

Four 3D digital models of pilot EPSs developed

Final Version of April/2022

Deliverable Number D.3.2.4.

Project Acronym	PEPSEA
Project ID Number	10047424
Project Title	Protecting the Enclosed Parts of the Sea in Adriatic from pollution
Priority Axis	2 – Safety and Resilience
Specific objective	2.2 – Increase the safety of the Programme area from natural and man-made disaster
Work Package Number	3
Work Package Title	Planning the response system for sea pollution risks and incidents in EPSs
Activity Number	A.3.2
Activity Title	Thorough survey of the pilot EPSs
Partner in Charge	PP4 – ŠIBENIK-KNIN COUNTY
Partners involved	LP - ZADRA NOVA , PP3 – SPLIT-DALMATIA COUNTY PP4 - ŠIBENIK-KNIN COUNTY PP6 – PO DELTA VENETO REGIONAL PARK
Status	Final
Distribution	Public

Summary:

A. LEAD PARTNER – ZADAR COUNTY DEVELOPMENT AGENCY ZADRA NOVA	11
Abstract.....	12
Sažetak	14
I. Batimetrijska i geodetska izmjera uvala integralnim mjernim sustavom (multibeam, IMU, RTK-GPS) ...	15
1. Uvod.....	15
2. Područje izmjere	18
3. Teorijska osnova	20
4. Metodologija istraživanja.....	25
4.1. Batimetrijska izmjera uvala Sali i Sašćica	25
4.1.2.2. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna.....	34
4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka.....	36
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka.....	39
4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava	42
4.1.6. Uređivanje podataka.....	43
4.1.7. Filtracija podataka primjenom <i>SOR filter-a</i>	46
4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF).....	47
4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom	49
4.1.10. Prostorna rezolucija	50
4.2. Izračun volumena i duljine obalne linije šireg područja uvala Sali i Sašćica	50
5. Rezultati	53
5.3. 2.5D i 3D modeli uvala Sali i Sašćica	53
5.4. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava	54
5.6. Integralni modeli uvala Sali i Sašćica.....	58
5.7. Volumen, površina i duljina obalne linije uvala Sali i Sašćica	62
II. AEROFOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE PRIOBALNOG POJASA	65
Aerofotogrametrijsko snimanje priobalnog pojasa	66

a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm	66
b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm.....	66
c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u uvali	66
d) obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	66
Podaktivnosti:	66
Sažetak	67
a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm	91
b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm.....	98
c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u uvali	99
d) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka	104
III.AERO SNIMANJE UVALE TERMALNOM KAMEROM	106
Aero snimanje uvale termalnom kamerom	107
Sažetak	108
a) Izrada termalnog snimka prostorne rezolucije do 50 cm	109
b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena	121
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	126
IV.AERO SNIMANJE PRIOBALNOG POJASA MULTISPEKTRALNOM KAMEROM	133
Aero snimanje priobalnog pojasa multispektralnom kamerom (do 5 kanala)	134
Sažetak	135
a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm - PRVO SNIMANJE (MODEL 1)	136
Prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove.....	140
a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm - DRUGO SNIMANJE (MODEL 2)	160
b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno orijentiranih analiza	190
1) Izrada DOF-a (digitalni ortofoto) uvale i naselja Sali.....	192

2) Instalacija aplikacije Plant Net na mobilni uređaj.....	192
3) Instalacija aplikacije Bluetooth GPS (bilo koja druga aplikacija koja u realnom vremenu prikazuje lokaciju korisnika u globalnom koordinatnom sustavu, a ima mogućnost bluetooth spajanja s laptopom, odnosno ArcMap programom)	194
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	197
Uvod - teorijska osnova	197
B. PROJECT PARTNER 3 – SPLIT-DALMATIA COUNTY	218
I. BATIMETRIJSKA I GEODETSKA IZMJERA OKO TOČAKA UZORKOVANJA SEDIMENATA INTEGRALNIM MJERNIM SUSTAVOM	219
Abstract.....	220
Sažetak	221
a) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka, izrada modela tvrdoće	222
1. Uvod.....	222
1.1. Objekt i cilj batimetrijske i geodetske izmjere	224
1.2. Svrha izmjere.....	226
2. Područje izmjere	226
3. Teorijska osnova	228
3.1. Geoprostorne tehnologije.....	228
3.1.1. Satelitska fotogrametrija	228
3.1.2. Batimetrijska izmjera	228
4. Metodologija istraživanja.....	232
4.1. Batimetrijska izmjera testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva.....	232
4.1.1. Plan batimetrijske izmjere	233
4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka.....	243
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka.....	246
4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava	248
4.1.6. Uređivanje podataka.....	249

4.1.7. Filtracija podataka primjenom <i>SOR filter-a</i>	253
4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF).....	254
4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom	256
4.1.10. Prostorna rezolucija	257
5.Rezultati	258
5.1. Prikaz profilima	258
5.2. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava	259
5.3. Batimetrijska karta testnog područja	262
6.Izrada modela tvrdoće dna	267
6.1. Model tvrdoće dna testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva	268
II.PRIKUPLJANJE I OBRADA STEREO SNIMAKA VISOKE REZOLUCIJE	273
Abstract.....	274
Sažetak	274
a) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 60 cm	275
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	299
III.PRIKUPLJANJE I OBRADA MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA VISOKE REZOLUCIJE (VIŠE OD 5 KANALA) ..	303
Abstract.....	304
Sažetak	304
a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije	305
b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno orijentiranih analiza	313
Metodološki okvir izrade modela zemljišnog pokrova	316
Koncept izrade modela zemljišnog pokrova primjenom objektno-orijentiranih analiza (GEOBIA)	321
Worldview-3 multispektralni satelitski snimci.....	328
c) Obrada, analiza i vizualizacija prikupljenih podataka	331
C. PROJECT PARTNER 4 – ŠIBENIK-KNIN COUNTY	347
I.BATIMETRIJSKA I GEODETSKA IZMJERA KANALA SV. ANTE INTEGRALNIM MJERNIM SUSTAVOM.....	348
BATHYMETRIC AND GEODETIC SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL BY AN INTEGRATED MEASURING SYSTEM	349

Abstract.....	349
Sažetak	349
1.Uvod.....	350
1.1. Objekt i cilj batimetrijske i geodetske izmjere.....	351
1.2. Svrha izmjere.....	352
2. Područje izmjere	353
3. Teorijska osnova	354
3.1. Geoprostorne tehnologije.....	354
3.1.1. Aerofotogrametrija	354
3.1.2. Batimetrijska izmjera	355
4. Metodologija istraživanja.....	359
4.1. Batimetrijska izmjera kanala Sv. Ante.....	359
4.1.1. Plan batimetrijske izmjere	359
4.1.2. Integralni mjerni sustav kombinacija RTK GPS i višesopnog dubinomjera	360
4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka.....	371
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka.....	374
4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava	377
4.1.6. Uređivanje podataka.....	378
4.1.7. Filtracija podataka primjenom <i>SOR filter-a</i>	381
4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF).....	382
4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom	384
4.1.10. Prostorna rezolucija	384
4.2. Izračun volumena i duljine obalne linije kanala Sv. Ante.....	384
5. Rezultati	386
5.3. 2.5D i 3D modeli kanala Sv. Ante	386
5.4. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava	388
5.6. Integralni model kanala Sv. Ante	392
5.7. Volumen, površina i duljina obalne linije kanala Sv. Ante	395

II.AEROFOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE KANALA SV. ANTE	397
Aerofotogrametrijsko snimanje kanala Sv. Ante	398
AEROPHOTOGRAMMETRIC SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL	399
Abstract.....	399
Sažetak	399
Izrada modela šireg prostora kanala Sv. Ante	400
a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm	403
b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm.....	417
c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u kanalu Sv. Ante	420
Uvod.....	420
Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela)	420
d) Izrada digitalnog modela reljefa	422
e) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka	432
III.AERO SNIMANJE TERMALNOM KAMEROM.....	433
Aero snimanje termalnom kamerom.....	434
THERMAL IMAGING SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL.....	435
Abstract.....	435
Sažetak	435
a) Izrada termalnog modela prostorne rezolucije do 50 cm	436
b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena	445
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	457
IV.AERO SNIMANJE KANALA SV.ANTE MULTISPEKTRALNOM KAMEROM	468
Aero snimanje kanala Sv. Ante multispektralnom kamerom (do 5 kanala)	469
Aero recording of the St. Anthony's Channel with multispectral camera (up to 5 channels).....	470
Abstract.....	470
Sažetak	470
a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm	471

Prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove.....	477
Izrada plana snimanja	480
Izvođenje multispektralnog snimanja.....	483
Obrada snimaka - izrada multispektralnog snimka	487
b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno-orijentiranih analiza	497
Segmentacija i klasifikacija multispektralnog snimka.....	505
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka.....	510
Zaključak	516
Conclusion.....	517
Bibliography	518
D. PROJECT PARTNER 6 – PO DELTA VENETO REGIONAL PARK.....	528
1 Premise	529
2 Reference framework	530
2.1 Environmental framework.....	530
2.1.1 Hydromorphological Aspects	535
2.1.1.1 Caleri lagoon.....	537
Loss of hydraulic functionality at the sea mouth.....	539
2.1.1.2 Canarin lagoon.....	549
2.1.2 Environmental aspects.....	560
2.1.2.1 Biodiversity and habitats	560
2.1.2.2 Water environment	568
2.2 Programmatic framework.....	572
2.2.1 Main Legislative references	572
2.2.2 Planning issues	575
3 The strategy	578
3.1 Main objectives.....	580
4 Methodological approach.....	582

4.1 Caleri Lagoon.....	582
4.1.1 First level interventions	584
4.1.1.1 Sea mouth and channels excavation (branches: A, B, D, E).....	584
4.1.1.2 Interventions on artificial morphological structures (marshes).....	584
4.1.1.3 Navigable channels interventions	585
4.1.1.4 Maintenance of Varco Pozzadini.....	585
4.1.1.5 Creation of shallows	586
4.1.2 Second level interventions.....	586
4.1.2.1 Inner channels excavation (branches: C, F, G, H, I, X)	586
4.1.2.2 Navigable channels interventions	586
4.1.2.3 Creation of artificial marshes	587
Canarin lagoon	588
4.1.3 First level interventions	590
4.1.3.1 Sea mouth and channels excavation (branches: C2, C3, C4, C10).....	590
4.1.3.2 Southern littoral reinforcement	590
4.1.3.3 Northern littoral reinforcement	591
4.1.3.4 Creation of artificial marshes (Bar.1 - Bar.7)	592
4.1.3.5 North embankment reinforcement.....	592
4.1.3.6 Reshape of connection channel with Busa del Bastimento Po river branch.....	593
4.1.3.7 Confinement of the area facing the Pellestrina pump	594
4.1.4 Second level interventions.....	595
4.1.4.1 Inner channels excavation (branches: C4bis, C5, C6, C7, C9)	595
4.1.4.2 Creation of artificial marshes (Barene 8 e 9, Barena Nord e Barena Sud)	595
4.1.4.3 Inserimento di un pennello lungo la Busa del Bastimento.....	597
5 Sediment's management	598
5.1 Legislative framework.....	599
5.2 Available data.....	604
5.3 Chemistry and granulometry	606

6 Monitoring programme	612
7 Bibliography	614

Remark:

Due to the extensive and detailed research of the pilot sites, the document was prepared in Croatian language for Croatian partners with a short summary in English. The results from this document were crucial for the development of contingency plans in case of marine pollution, which were made entirely in English and presented as part of the deliverable D.3.4.2. Four detailed contingency plans of pilot EPSs developed.

A. LEAD PARTNER – ZADAR COUNTY DEVELOPMENT AGENCY ZADRA NOVA

Abstract

The bathymetric survey covered the wider area of Sali and Sašćica bays, while the aerial photogrammetric survey, with the aim of creating an integrated model, covered the topographic area of Sali and Sašćica bays.

From the aerial photogrammetric survey of Sali and Sašćica bays, the following were performed: High-resolution digital orthophoto (DOF) with a resolution of 2.91 cm; High-resolution digital surface model (DSM) with a resolution of 3.115 cm and a 3D model of bays from a filtered dense point cloud.

The bathymetric measurement generated a bottom model with a maximum depth of -70.76 m. The merging of the bottom model with aerial photogrammetric images resulted in the first integral model with a maximum height within the topographic basin of 199.41 m.

From the generated digital depth model, data on the volume of bays on the day of recording of 107026794.05 m³ were derived, while the volume of the land part was 277064304.75 m³.

By modeling aerial photogrammetric images, models were made (Digital orthophoto image DOF, Digital surface model DMP, Digital relief model DMR and Normalized digital model of nDMP surfaces of wider space with a spatial resolution of 0.292 m and average errors in used landmarks of 0.8 m.

The high-resolution digital orthophoto (DOF) with a spatial resolution of 5 cm was performed based on aerial images collected by the Matrix 210 RTK drone.

The creation of a digital model of surfaces was generated based on the interpolation of 1.5 109 points within a dense cloud of points with a spatial resolution of 5 cm. The data collection density was 270 points / m². During the development of the DMP, the projection of the developed model was defined, for which the HTRS96 projection was selected in accordance with the research area.

A bottom model with a maximum depth of -70.76 m was generated. The merging of the bottom model with aerial photogrammetric images resulted in the first integral model with a maximum height within the topographic basin of 199.41 m. The main goal is to generate predictive models of water level fluctuations bays and calculation of potential negative environmental impacts

Derived high-resolution models (digital model of surfaces - DMP, digital model of relief - DMR and digital orthophoto - DOF) served as a basic template in generating primary and secondary criteria used in risk analyzes (fire, erosion).

The wider area of the Sali settlement was cyclically (three times with a time resolution of three months) captured by a DJI Zenmuse XT2 thermal imaging camera integrated on a DJI Matrix 210 RTK drone.

A digital model of the surface of the settlement and Sali bay with a spatial resolution of about 30 cm was derived from a dense cloud of points in thermal imaging (23,396,751 points).

The last step of the aerial photogrammetric process involved the construction of a thermal digital orthophoto model of the settlement and the bay of Sali. The spatial resolution of the derived model was 30 cm.

Aerial photogrammetric recording with a multispectral camera of the bay and the settlement of Sali was performed by an unmanned aerial vehicle (UAV) DJI Matrix Pro 600 (Figure IV-24-25 A-D) and RTK-GPS Stonex S10. The Matrix 600 Pro is a larger drone of the Chinese company Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. (DJI) based in Shenzhen, Guangdong. A Red Edge-Mica SenseMX multispectral camera is mounted on it

From the multispectral image of the bay and the settlement of Sali, a land cover model was generated that contains a total of 15 classes if the Sea class is excluded.

The document was produced in Croatian language by external experts to avoid additional expenses in translation due to the large quantity of research material.

Sažetak

Batimetrijskom izmjerom bilo je obuhvaćeno šire područje uvala Sali i Saščica, dok je aerofotogrametrijskim snimanjem, s ciljem izrade integralnog modela, bilo obuhvaćeno topografsko područje uvala Sali i Saščica.

Iz aerofotogrametrijskog snimanja uvala Sali i Saščica izvedeni su: Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto snimak (DOF) rezolucije 2,91 cm; Visoko-rezolucijski digitalni model površina (DSM) rezolucije 3,115 cm i 3D model uvala iz filtriranog gustog oblaka točaka.

Batimerijskom izmjerom generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -70,76 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom kojem maksimalna visina unutar topografskog bazena iznosi 199,41 m.

Iz generiranog digitalnog modela dubina izveden je podatak o volumenu uvala na dan snimanja od 107026794,05 m³, dok je volumen kopnenog dijela 277064304,75 m³.

I. Batimetrijska i geodetska izmjera uvala integralnim mjernim sustavom (multibeam, IMU, RTK-GPS)

1. Uvod

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju prirodnih procesa na Zemljinoj površini (Blaszczynski, 1997; Bishop i dr., 2012). U početcima terenskih istraživanja, modeliranje Zemljine površine vršilo se na licu mjesta (Blaszczynski, 1997; Shroder i Bishop, 2003), no razvojem geoprostornih tehnologija (geografski informacijski sustav (GIS), globalni položajni sustav (GPS) i daljinska istraživanja (RS – *remote sensing*)) za prikupljanje i obradu podataka (Bodzin i Cirucci, 2009; Mareddy i dr., 2017; Šiljeg i dr., 2018), u posljednjih dvadesetak godina (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018), došlo je do revolucije u geomorfometriji (Pike, 2000; Gessler i dr. 2009; Guth, 2013). Proces izrade digitalnog modela reljefa i izvođenja analiza na temelju njega naziva se digitalno modeliranje reljefa (Šiljeg i dr., 2018). Model je objekt ili koncept koji se koristi za predstavljanje nečega drugog, odnosno pojednostavljena stvarnost pretvorena u oblik koji možemo razumjeti (Meyer, 1995; Wu i Marceau, 2002). Prema tome, modeliranje je proces kojim se uspostavlja veza između oblika i procesa na Zemljinoj površini i modela.

Ovisno o svrsi istraživanja, geoprostorne tehnologije u modeliranju kompleksnih procesa i oblika omogućuju različite razine detaljnosti (Šiljeg, 2019). U svrhu poboljšanja kvalitete modela, s ciljem analize, vizualizacije i interpretacije, izrađuju se integralni modeli. To su modeli izrađeni od podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (Fabris i dr., 2010; Abdalla, 2016). Ovisno o objektu, cilju i svrsi istraživanja primjenjuju se različite vrste geoprostornih tehnologija. Batimetrija, kao znanost o mjerenju i kartiranju dubina, izuzetno je bitna pri izradi modela koji uključuju vodene površine (Kearns i Breman, 2010), dok primjerice aerofotogrametrija i laserska (LiDAR) tehnologija imaju veoma važnu ulogu pri stvaranju kvalitetnih digitalnih modela kopnenih područja (Fabris i dr. 2010).

Hidrografska izmjera obuhvaća proces mjerenja i proučavanja konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vode na Zemlji (NOAA, 1976). Glavni cilj većine hidrografskih istraživanja je dobiti egzaktne podatke za izradu pomorskih karata s posebnim naglaskom na mogućnosti koje mogu utjecati na sigurnost plovidbe. Ostali ciljevi uključuju dobivanje informacija vezanih za upravljanje i zaštitu obalnim područjem, eksploataciju resursa, znanost, nacionalnu prostornu infrastrukturu podataka, turizam itd. (IHO, 2005). Suvremena batimetrija je, kao grana hidrografije, znanost o određivanju dubina, odnosno generalnom utvrđivanju fizičkih značajki dna na temelju analize podatka iz snimljenih profila. Svi podatci o dubinama moraju biti svedeni na razinu referentnog datuma i imati x i y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i z koordinate (predstavljaju dubinu). Postoje

različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje ovise o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja).

One se mogu klasificirati na 3 razine: 1) komercijalni projekti – standard točnosti je najveći, 2) projekt stanja – standard točnosti je srednji i 3) projekt generalnog poznavanja – standard točnosti je najniži (IHO, 2005, Sciortino, 2010). Mjerenje dubina može se obaviti pomoću: 1) dubinomjerne motke, 2) dubinomjernog viska, 3) jednostavnog inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i 4) naprednog inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno ili indirektno (IHO, 2005, Šiljeg i dr., 2015).

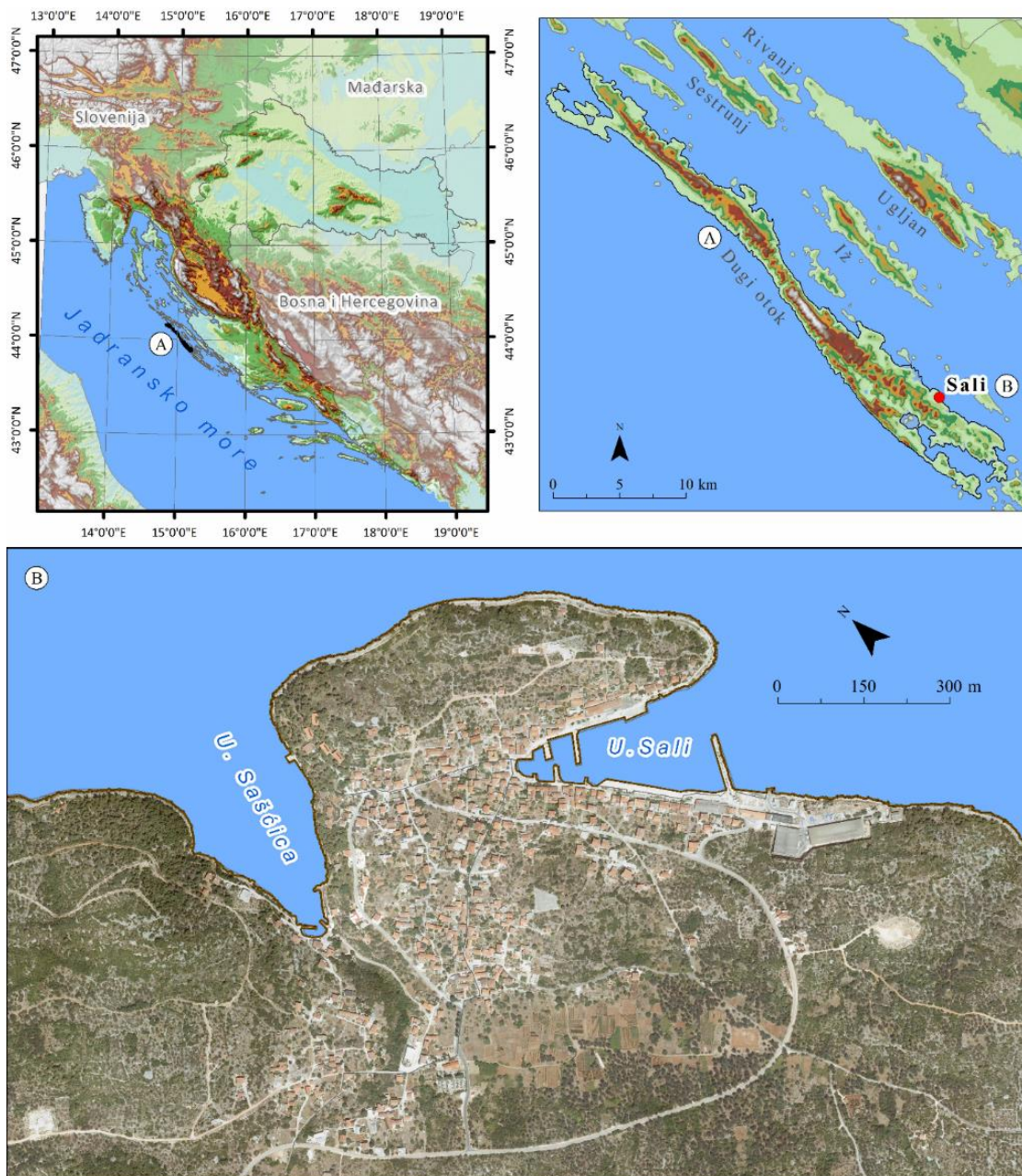
U ovom istraživanju koristit će se višesnopni dubinomjer. Oni se brzo razvijaju i imaju veliki potencijal, međutim zahtijevaju poznavanje i korištenje odgovarajućih postupaka u procesu izmjere koji su nužni za pravilno detektiranje (detaljno poznavanje tehnologije, dugogodišnju praksu, način tumačenja i vrednovanja dobivenih podataka itd.) (MSA, 2004). Prednosti višesnopnih dubinomjera su: mjerenje više vrijednosti dubina u isto vrijeme pokrivajući tako veću površinu, izrada točnog morfološkog modela podvodnog dna. Nedostatci su visoka cijena opreme, zahtjevnija obrada podataka itd.

Sve veći broj nacionalnih hidrografskih organizacija prihvatio je ovu tehnologiju kao standardnu metodu prikupljanja batimetrijskih podataka, s ciljem proizvodnje najkvalitetnijih navigacijskih karata koje jamče sigurnost plovidbe (IHO, 2005, Ernsten i dr., 2006). Višesnopni dubinomjeri koriste se u različitim disciplinama poput podvodne gradnje (Pickrill i Tod, 2003; Caress i dr., 2008.), praćenja ribljih jata (Graham i dr., 2004; Kang, 2011), u podvodnoj arheologiji (Lawrence, 2004), sanaciji divljih odlagališta u moru (Wienberg i dr., 2004) i dr. Istraživanja kvalitete dubinomjera najčešće provodi Međunarodna hidrografska organizacija. Horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera korištenjem RTK-GPS-a iznosi između ± 20 i ± 25 centimetara, a vertikalna između ± 2 i ± 8 centimetara (Ernsten i dr., 2006; Kaufman i Nemet, 2011.). One ovise prvenstveno o frekvenciji dubinomjera, širini snopa i obliku snopa.

Objekt i cilj batimetrijske i geodetske izmjere

Objekt izmjere i istraživanja je modeliranje širega područja uvala Sali i Saščica (Slika I-1) primjenom geoprostornih tehnologija. Aerofotogrametrija je korištena za snimanje vodnog lica i širega područja uvala s ciljem dobivanja podatka o duljini obalne linije kao i zbog izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja. Batimetrijsko istraživanje, kao primarni cilj prve projektne aktivnosti je izvršeno pomoću višesnopnog dubinomjera kako bi se dobili podaci o dubini, tvrdoći dna i zastupljenosti posejdonije. Također cilj istraživanja je utvrditi vertikalnu i horizontalnu preciznost integralnoga mjernog sustava kombinacija RTK GPS i višesnopnog dubinomjera s obzirom na to da je isti

prvi put korišten u Republici Hrvatskoj te dobiti informacije o osnovnim karakteristikama šireg područja uvala Sali i Sašćica.



Slika I-1. Geografski položaj A) Republike Hrvatske, B) djela Dugog otoka i C) uvala Sali i Sašćica

Svrha izmjere

Izmjera i istraživanje šireg područja uvala Sali i Saščica provedeno je iz više razloga: izrade batimetrijske karte (modela visoke rezolucije), kartiranja tvrdoće dna i posejdonije, dokumentacije trenutnog stanja uvala i vizualizacije uvala. Primarna svrha istraživanja je izrada detaljne batimetrijske karte upotrebom WASSP S3 višesnopnog dubinomjera.

2.Područje izmjere

Batimetrijskom izmjerom bilo je obuhvaćeno šire područje uvala Sali i Saščica (Slika I-2), dok je aerofotogrametrijskim snimanjem, s ciljem izrade integralnog modela, bilo obuhvaćeno topografsko područje uvala Sali i Saščica.

Područje uvala je specifična cjelina koju karakterizira velika vertikalna raščlanjenost na malom području (preko 70 metra). Uvale su smještene na sjeveroistočnoj obali Dugog otoka (Slika I-1). Uvale su zaštićene od vjetra i kao takve služi kao pristanište za brodove.

Navedene specifičnosti te definirane projektne aktivnosti utjecale su na izbor metoda batimetrijske izmjere te izbor misija u aerofotogrametrijskom snimanju. Za batimetrijsku izmjeru korištena je najmodernija tehnika – integralni mjerni sustav, kombinacija višesnopnoga ultrazvučnog dubinomjera i RTK-GPS-a.



Slika I-2. Područje batimetrijske izmjere

3. Teorijska osnova

Geoprostorne tehnologije

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju svih procesa na Zemljinoj površini (Bishop i dr., 2012). Pojavom geoprostornih tehnologija, odnosno GIS-a, GPS-a i RS-a, ostvaren je brz napredak u kvaliteti modeliranja (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018). Geoprostorni podaci dostupni su na internetu te im je moguće pristupiti sa svih platformi koje imaju mogućnost povezivanja na internetsku mrežu. Geoprostorne tehnologije omogućuju vizualizaciju, kartiranje i analizu više slojeva georeferenciranih podataka te su se dokazale kao vrijedan alat u procesu razumijevanja okoliša i donošenja odluka. Sposobnost korištenja, analize te tumačenja slika i karata postaje sve važnije u mnogim znanstvenim i ekonomskim područjima. Prostorno razmišljanje obuhvaća znanje i vještine korištenja prostornih koncepata, karata i grafova te procesa zaključivanja u svrhu organiziranja i rješavanja problema (Bodzin i Cirucci, 2009).

Aerofotogrametrija

Fotogrametrija je znanstvena disciplina i tehnologija dobivanja pouzdanih kvantitativnih informacija o objektima na Zemlji, procesom snimanja, označavanja, mjerenja, analiziranja i interpretacije fotografskih snimaka i prikaza elektromagnetskog zračenja dobivenih senzorskim sustavima (Matthews, 2008; Ahmad i Samad, 2010; Barilar i dr., 2015). Najširu primjenu ima aerofotogrametrija, metoda u kojoj su kamere pričvršćene na posebna žiroskopski stabilizirana postolja iznad otvora na podu zrakoplova (Wawro, 2013). Obilježava je velika gustoća prikupljanja podataka koja se prilagođava konkretnom projektu i morfološkim osobinama terena. Zahtijeva manje terenskog rada, pokriva velika područja, pogodna je za mjerenja u opasnim i nepristupačnim područjima i primjenjuje se u različitim oblastima. Najveći problem kod ove metode predstavlja vegetacija i optička vidljivost terena sa snimališta. Kao jedno od glavnih i trenutno najpopularnijih tehnoloških dostignuća fotogrametrije uključuje razvoj bespilotnih zrakoplovnih sustava (UAV) i njima pripadajućih algoritama za obradu fotogrametrijskih podataka. Oni imaju mogućnost snimanja opasnih i nepristupačnih terena bez ugroze ljudskih života, ali i snimanje iz mnogo veće blizine nego što je to moguće nekom drugom vrstom letjelice (Eisenbeiß, 2009). Bespilotne letjelice imaju mogućnost manualnog, poluautonomnog i autonomnog upravljanja, što omogućuje planiranje misija leta u svrhu pravilne i potpune pokrivenosti terena zračnim snimkama. Kamere mogu biti mjerne (poznati elementi unutarnje orijentacije) i nemjerne (nema točno određene elemente unutarnje orijentacije).

Pri izvođenju aerofotogrametrijskih i bliskopredmetnih mjerenja (ako se upotrebljava nemjerna kamera) nužno je precizno odrediti parametre unutarnje kalibracije (žarišna daljina i koordinata glavne točke snimke po osima X i Y, zakošenost piksela, radijalna i tangencijalna distorzija), tj. kameru je potrebno kalibrirati (Remondino i Fraser, 2006). Važni su i vanjski parametri orijentacije (*Jaw, Pitch i Roll*) koji se odnose na položaj kamere u prostoru u odnosu na objekt snimanja. Također, potrebno je kalibrirati i bespilotnu letjelicu te u softveru izraditi prikladan plan snimanja. Ovisno o planu snimanja te specifikacijama i kalibracijskim parametrima kamere i bespilotne letjelice varirat će i kvaliteta izlaznih rezultata.

Batimetrijska izmjera

Kartiranje dna oceana, mora, rijeka i jezera jedna je od najstarijih aktivnosti čiji je cilj izrada karata i kartama srodnih prikaza. Pomorci već tisućama godina mjere dubine kako bi omogućili sigurnu plovidbu (Kearns i Breman, 2010). U današnje vrijeme, nacionalne vlade, vojska, telekomunikacijske kompanije, naftne korporacije i akademske institucije kartiraju dno s ciljem dobivanja egzaktnih podataka koji imaju višestruku primjenu u brojnim granama gospodarstva (IHO, 2005; Kearns i Breman, 2010) poput turizma (Ferreira i dr., 2009), eksploatacije prirodnih resursa (Medved i dr., 2010), proširenja lučkih terminala (Šiljeg i dr., 2019), gradnje mostova (Kuspilić i dr., 2010), podzemnih tunela (Aykut i Akpınar, 2013) ili pak komunalne infrastrukture (Snellen i dr., 2011; Nonnis i dr., 2016) te zaštite prirodnih dobara (Wilson i dr., 2007; Medak i dr., 2008; Letessier i dr., 2016).

Hidrografija je grana fizičke oceanografije koja se bavi mjerenjima i definiranjem konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vodenih površina na Zemlji (NOAA, 1976; IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Batimetrija je grana hidrografije koja se odnosi na mjerenje i kartiranje dubina za određivanje topografskih obilježja dna vodenih površina. Svi podaci o dubinama trebaju imati koordinate u nekom od koordinatnih sustava, u pravokutnom koordinatnom sustavu to su X i Y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i Z koordinate (predstavljaju dubinu ili vertikalnu poziciju) koji vrijede za ravninu u odgovarajućoj kartografskoj projekciji, a u geografskom koordinatnom sustavu to su geografska širina (ϕ), geografska dužina (λ) i dubina (h). Batimetrija se može vršiti pomoću raznih sredstava poput satelita, zrakoplova, brodova, podmornica i podmorskih platformi korištenjem raznih metoda i tehnika (Kearns i Breman, 2010).

Metode i tehnike batimetrijske izmjere

Ovisno o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja), postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje se razlikuju prema standardu točnosti. Najveći standard točnosti je na komercijalnim projektima. Srednji standard točnosti je na projektima stanja, dok je najniži na projektima generalnog poznavanja (IHO, 2005; Sciortino, 2010).

Batimetrija se može obaviti pomoću dubinomjernog viska, dubinomjerne motke, jednostavnoga inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i naprednoga inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano).

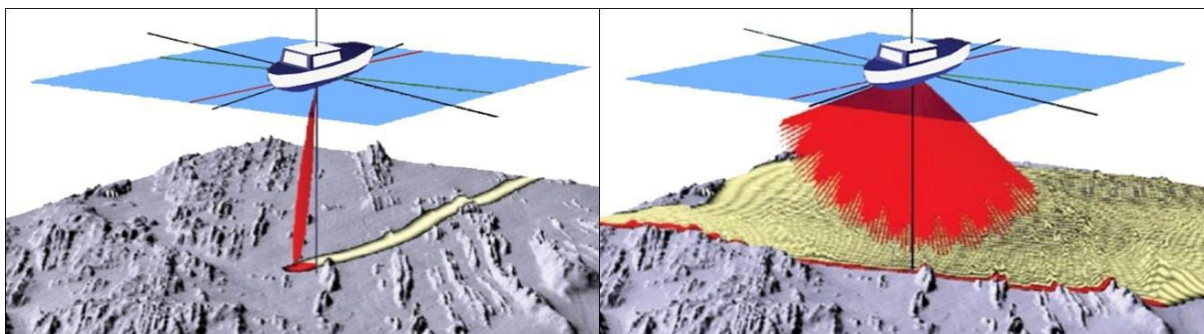
Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno i indirektno (IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Posljednjih nekoliko desetljeća batimetrijsko istraživanje je napredovalo pojavom jednosnopnih (*singlebeam*) i višesnopnih dubinomjera (*multibeam*) te zračnih laserskih sustava (*airborne laser sounding*) koji imaju mogućnost prikupljanja podataka velike gustoće i omogućuju realističan prikaz dna (Šiljeg i dr., 2018). Jednosnopni i višesnopni ultrazvučni dubinomjeri funkcioniraju na principu mjerenja vremenskog zaostatka zvučnog signala odaslanog iz sonde, dok zračni laserski sustavi funkcioniraju na principu mjerenja vremena potrebnog laserskim zrakama (infracrvenim i zelenim) da se vrate u laserski altimetar (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpınar, 2013; Šiljeg, 2013). Ultrazvučni dubinomjeri su najčešće korištene metode batimetrijske izmjere jer imaju najbolji omjer cijene i kvalitete prikupljenih podataka (Šiljeg, 2013).

Jednosnopni dubinomjeri

Ultrazvučna tehnologija je široko primijenjena metoda prikupljanja podataka o dnu vodenih površina koja na temelju vremenskog zaostatka i intenziteta zvuka daje korisne podatke o izgledu i sastavu dna (Amiri-Simkooei i dr., 2011; Ferretti i dr., 2015). Jednosnopni dubinomjer je ultrazvučni dubinomjer koji na temelju vremenskog zaostatka zvučnih impulsa odaslanih sa sonde uronjene u vodu računa dubinu. (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpınar, 2013; Šiljeg, 2013). Vremenski zaostatak se računa na temelju brzine zvuka u vodi koja ovisi o salinitetu, temperaturi i tlaku (dubini) (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013).

Osim za trup broda (Kearns i Breman, 2010), sonda (*transducer*) može biti montirana i na šipku ili može biti vučena za brodom (Letessier i dr., 2016). Jednosnopni dubinomjeri prikladni su za generiranje profila dna i najčešće su korišteni za mjerenje dubina neposredno ispod plovila, odnosno za snimanje manjih dijelova uskih ponora s ciljem utvrđivanja njihove dubine (Kearns i Breman, 2010). S obzirom na to da kut snimanja iznosi manje od 3°, potrebno je jako puno vremena kako bi se snimilo dno određene vodene površine pa se preporučuje snimanje po unaprijed isplaniranim i jednako udaljenim profilima kako bi prostor koji nije obuhvaćen snimanjem mogao biti interpoliran prikladnom metodom interpolacije (Medak i dr., 2008; Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Kvaliteta podataka prikupljenih jednosnopnim dubinomjerom ovisi o karakteristikama senzora, dubini vode i definiranom planu snimanja (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Važno je istaknuti kako se kod jednosnopnih dubinomjera upotrebom metoda interpolacije, pri određivanju vrijednosti između dva profila, vertikalna i horizontalna greška povećavaju (Šiljeg, 2013). Snimanje je moguće u

rasponu frekvencija između 12 i 710 kHz (Šiljeg i dr., 2018), ovisno o tome što se točno želi detektirati: morfologija dna, olupine brodova, riba itd. (Biffard, 2011).



Slika I-3. Princip rada jednosnopnog i višesnopnog dubinomjera (Šiljeg, 2103)

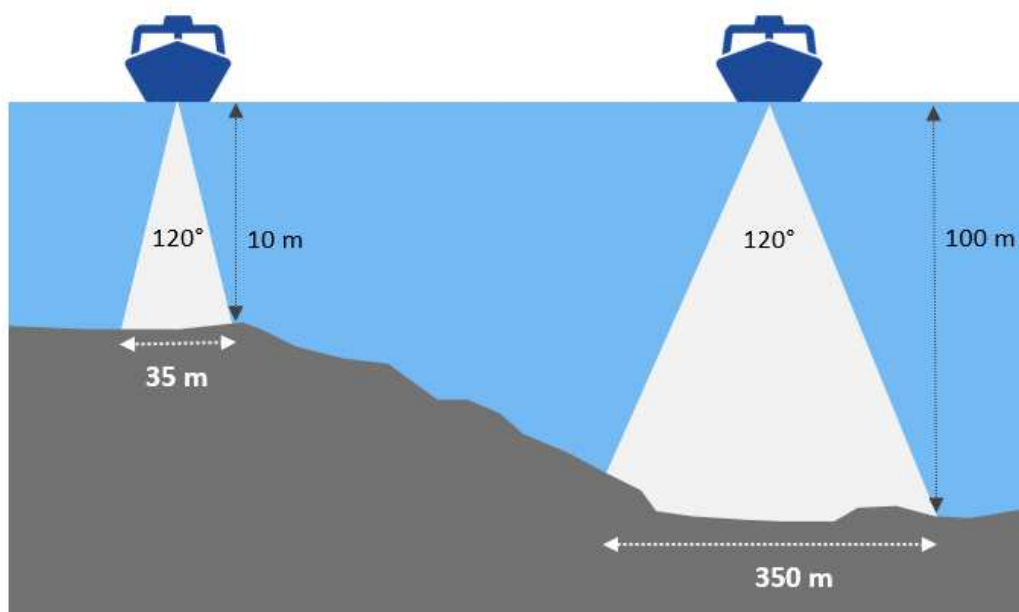
Višesnopni dubinomjeri

Mjerenja dubina vode, posebice u dubokim oceanima, bila su gotovo nemoguća prije razvoja tehnologije ultrazvučnih dubinomjera. To se posebno odnosi na višesnopni dubinomjer koji je omogućio snimanje velikih vodenih površina u relativno kratkom vremenskom roku (Whiteway, 2009). U usporedbi s jednosnopnim, prednost višesnopnog dubinomjera je mjerenje veće površine dna u isto vrijeme koja omogućava veliku pokrivenost dna (Slika I-3). No postoje i nedostaci poput veće cijene opreme te više vremena potrebnog za obradu prikupljenih podataka (Biffard, 2011; Šiljeg i dr., 2019). Tehnologija višesnopnih dubinomjera ima višestruku primjenu poput batimetrije, nadzora i održavanja okoliša, ribarstva, istraživanja ugljikovodika, upravljanja obalnim područjima ili podvodne arheologije (Lurton, 2016). Da bi rezultati mjerenja bili reprezentativni, potrebno je prikupiti podatke potrebne za kalibraciju dubinomjera (salinitet, temperatura) na referentnom području (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Eleftherakis i dr., 2018).

Korištenjem RTK-GPS-a horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera iznosi ± 20 i ± 30 centimetara, dok vertikalna iznosi između ± 2 i ± 8 centimetara. Točnost ponajviše ovisi o radnoj frekvenciji dubinomjera, kao i o širini i obliku snopa (Šiljeg, 2013). Veliku ulogu u točnosti podataka ima i dubina jer s njom raste i *footprint* (okvir snimka), a prostorna rezolucija snimljenog područja opada (Slika I-4). Sustavi poput zračnog laserskog skenera ili višesnopnog dubinomjera upotrebljavaju čimbenik preklapanja kako bi osigurali potpunu i kontinuiranu pokrivenost dna. (Kearns i Breman, 2010).

Osim prema broju snopova, dubinomjeri se dijele i prema broju frekvencija (jednofrekventni i višefrekventni) (Lurton, 2016; Eleftherakis i dr., 2018; Janowski i dr., 2018), zatim prema obliku snopa

(uskosnopni i širokosnopni) te prema broju kanala (jednokanalni i višekanalni) (Lurton, 2016; Clarke, 2006).

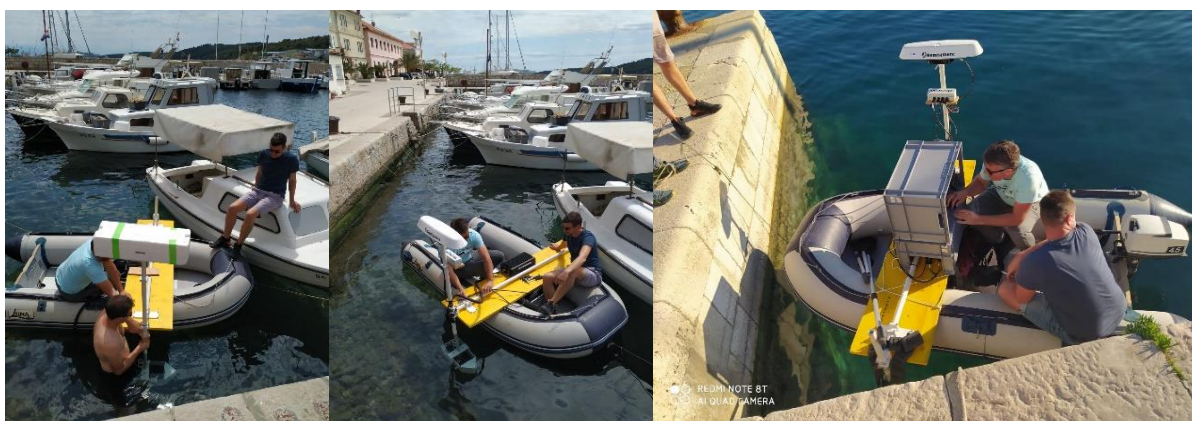


Slika I-4. Veza dubine i *footprint*-a snimka (Kearns i Breman, 2010)

4. Metodologija istraživanja

4.1. Batimetrijska izmjera uvala Sali i Saščica

Batimetrijskom izmjerom obuhvaćeno je šire područje uvala Sali i Saščica. Za batimetrijsku izmjeru korišten je gumenjak *Luna* duljine oko 2,5 m, koji se zbog manjih dimenzija i gaza te lake mogućnosti ugrađivanja komponenti mjernog sustava pokazao kao optimalno rješenje (Slika I-5).



Slika I-5. Gumenjak *Luna* na kojem je instaliran integralni mjerni sustav

Plan batimetrijske izmjere

Tijekom batimetrijske izmjere iznimno je važno detaljno planiranje koje omogućava praćenje razvoja i organizaciju izmjere od početka do kraja (IHO, 2005). Plan izmjere obuhvaćao je širok spektar aktivnosti koje su se sastojale od nekoliko faza:

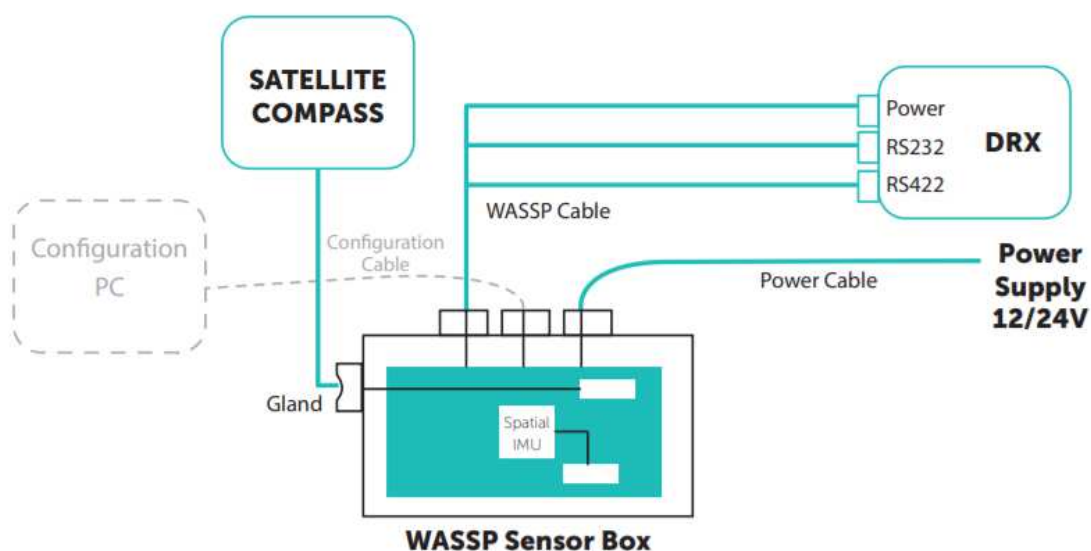
- 1) određivanje točnog područja izmjere;
- 2) utvrđivanje svrhe batimetrijske izmjere;
- 3) primjena metode izmjere (tehnika, točnost, horizontalni i vertikalni referentni geodetski sustav, oprema itd.);
- 4) vremenski rok (duži ili kraći);
- 5) prikupljanje sekundarnih podataka (aero snimke, salinitet, temperatura itd.);
- 6) uzimanje u obzir ograničavajućih čimbenika (proračun, logistika itd.).

Integralni mjerni sustav kombinacija RTK GPS i višesnog dubinomjera

Batimetrijska mjerenja izvršena su integriranim mjernim sustavom (Slika I-6) koji je uključivao šest glavnih sastavnica:

- WASSP S3 Multibeam Wideband Sounder c/w DRX (Slika I-7);
- WASSP Sensor Box s integriranim Spatial IMU (Slika I-15);
- Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna (mFreq, mGNSS, RTK, SBAS) (Slika I-16);
- akumulator i kabel za napajanje;
- konfiguracijsko računalo i kabel;
- softveri za konfiguraciju (*PocketMax*, *NtripClient*, *DRX Setup Webpages*);
- softveri za navođenje (*CDX*) i eksportiranje podataka (*Data Manager*).

Sve komponente su povezane i konfigurirane prema uputama proizvođača i međunarodnih standarda s obzirom na obilježja korištenog broda s ciljem minimaliziranja korisničko definiranih parametara koji mogu utjecati na izlazne rezultate. Uz navedenu konfiguraciju sustava prilikom izmjere bitno je kalibrirati sondu, pri čemu na izlazne rezultate mjerenja dubine i tvrdoće dna treba izračunati optimalnu brzinu zvuka u vodi (ENL Group, 2016).

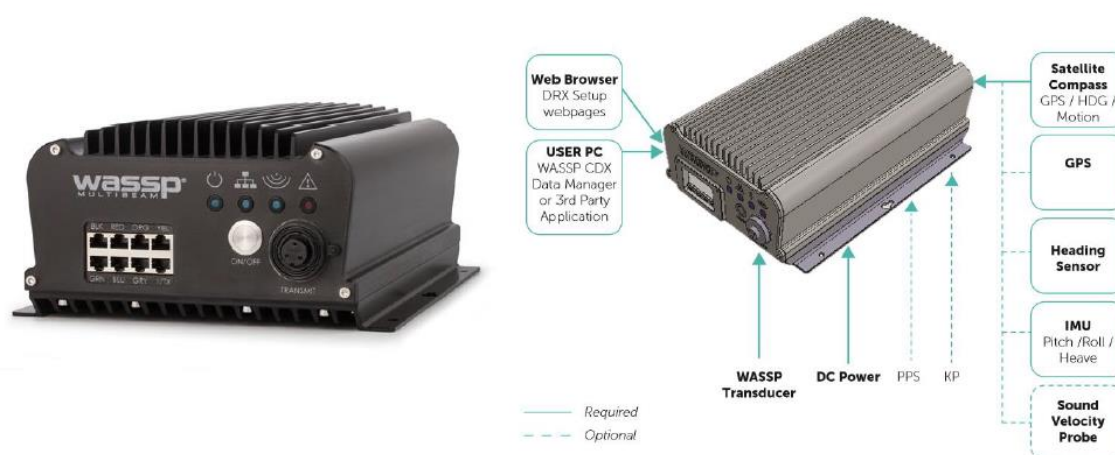


Slika I-6. Komponente integralnog mjernog sustava (ENL Group, 2016)

Višesnopni dubinomjer *WASSP S3 Multibeam*

WASSP (*Wide Angle Sonar Seafloor Profiler*) je višenamjenski ultrazvučni dubinomjer koji omogućava istraživanje, generiranje modela visoke rezolucije i detaljno kartiranje dna mora, jezera, rijeka itd.

Verzija S3 (*Survey*) treća je i najnovija generacija višesnopnih dubinomjera koja koristi širokopoljnu tehnologiju. Ocijenjen je certifikatom IP53 koji je potvrda da je kućište novog DRX-32 primopredajnika (Slika I-7) djelomično zaštićeno od prašine i otporno na prskanje vode (URL5). To ga uz njegovu kompaktnost i ekonomičnost nameće kao prvi izbor pri izvođenju batimetrije na teže dostupnim mjestima pomoću manjih plovila gdje oprema ne može biti u potpunosti zaštićena od vanjskih utjecaja. Maksimalna vertikalna rezolucija mu iznosi 2 centimetra što ga čini idealnim rješenjem za istraživanje podvodnih područja s izrazitom vertikalnom raščlanjenosti terena do 400 m dubine. WASSP S3 karakterizira frekvencija od 160 kHz i 224 snopa, a mogući raspon snopova je od 4 do 120 stupnjeva (Tablica I-1) (URL6).



Slika I-7. Višesnopni dubinomjer WASSP S3 (prema: URL3 i URL6)

Tablica I-1. Osnovna specifikacija višesnog dubinomjera WASSP S3

MODEL	S3
Frequency	160 kHz (WideBand Variable)
Transceiver type	DRX-32
Transducers supported	WMB - 160
IMU supported	External
Depth - swath	200 m
Depth - max	400 m
Effective beamwidth (athwartships x fore-aft)	120° x 4°
Beam width PS (deg)	4.4
Beam width FA (deg)	3.2
Beam spacing (nominal)	0.54° over 120° (224 beams)
Max vertical resolution (cm)	2
Sensor connectivity	DRX
PSU	9-32VDC (30W)
Bottom detections	Amplitude & Phase
Interface	RS232/422/NMEA0183
Tide correction	Fully Geo Referenced
Bathymetry 2D / 3D	Yes
Sonar polar view	Yes
Sounder (quint beam)	No

Izvor: URL6

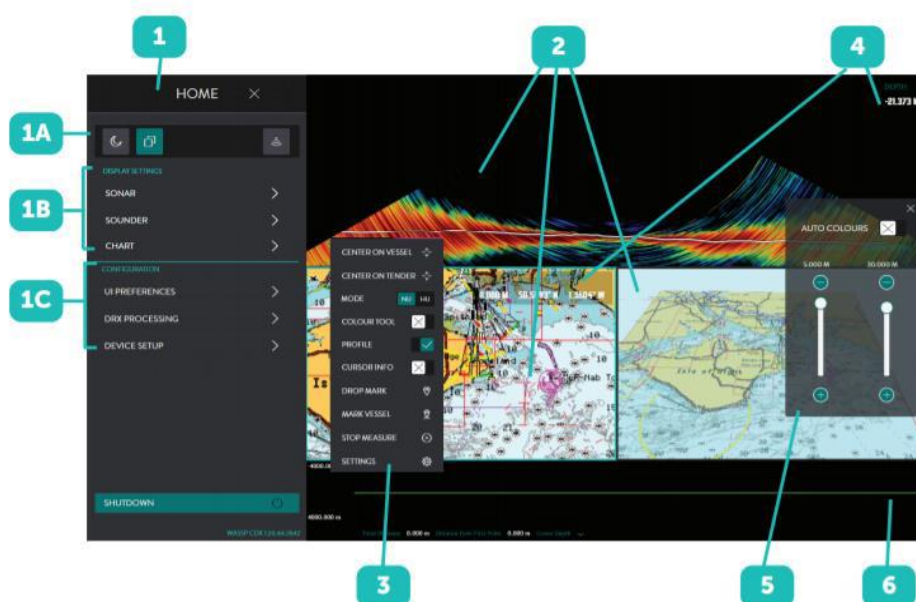
Softveri CDX i Data Manager

CDX je WASSP-ov operativni sustav koji služi za kontrolu, vizualizaciju i upravljanje prikupljenim podacima. On omogućava kartiranje dna u visokoj rezoluciji te prikaz snimanog područja u realnom vremenu na pojednostavljenom korisničkom sučelju.

Pametni algoritam uzima najbolje podatke sa starih i novih snimaka generirajući tako visoko kvalitetne batimetrijske karte bez grubih granica između snimljenih profila. Baza podataka je višerezolucijska i organizirana tako da se s približavanjem prema karti prostorna rezolucija povećava (URL6).

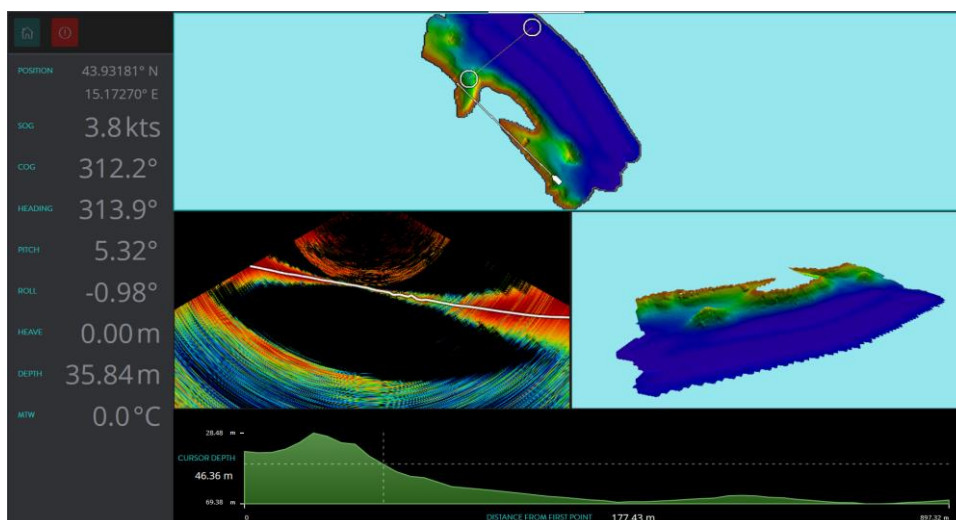
Aplikacija *CDX* sastoji se od 6 sastavnica (Slika I-8):

- 1) *Home* pristup – pruža mogućnosti konfiguracije zaslona, ploče, izgleda, alata, postavljanje sustava i korisničkih postavki;
- 2) Okviri zaslona – zasloni su povezani su s određenim tipovima podataka za vizualizacija i kontrola;
- 3) *CS (context sensitive)* meni – omogućuje postavljanje i konfiguraciju specifičnih ploča za prikaz kojima se pristupa desnim klikom na bilo kojoj ploči;
- 4) Zaslone s informacijama – mogućnost preklapanja informacija na ploči zaslona s *CS* izbornikom;
- 5) Alati za kontrolu – omogućuju kontrolu preklapanja upravljačke ploče na zaslonu;
- 6) Opcijski alati – služe za prikaz općih podataka.



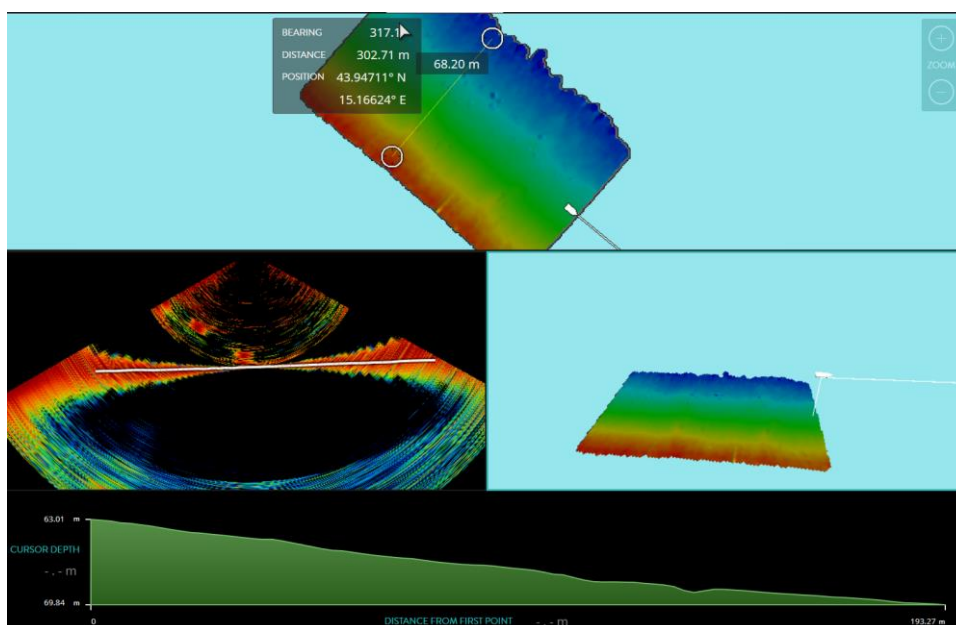
Slika I-8. Sastavnice aplikacije *CDX*

Sučelje aplikacije *CDX* sadrži osnovne podatke o značajkama specifičnog položaja broda i okvire za prikaz. Sustav je opremljen naprednim sastavnicama koje omogućuju uvid u realnom vremenu u vizualnu kvalitetu modela kroz čak 4 prikaza uvala: a) dvodimenzionalni, b) perspektivni (3D), c) sonarno polje i d) profil (Slika I-9).

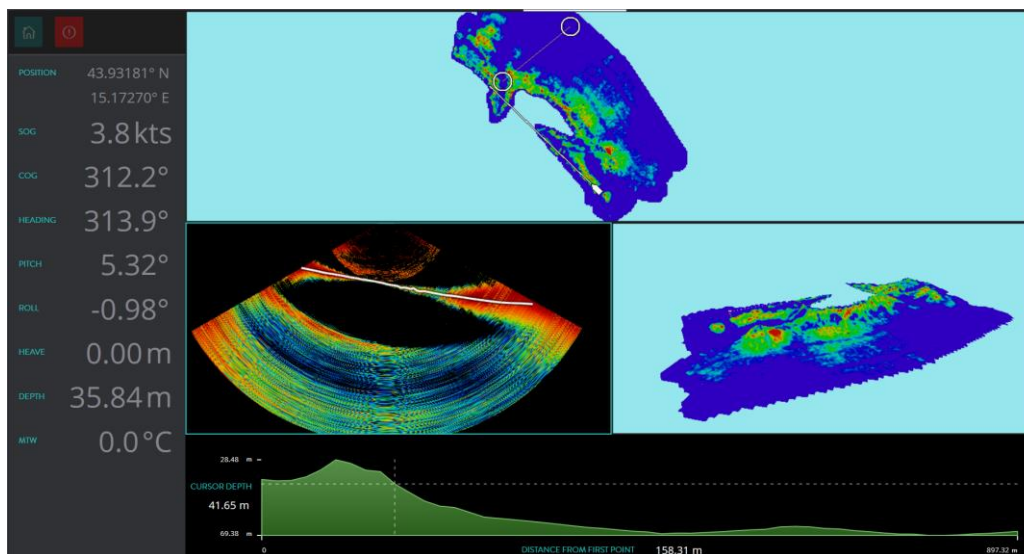


Slika I-9. Prikazi šireg područja uvala: a) dvodimenzionalni; b) perspektivni (3D); c) sonarno polje; d) profilni

Na slici I-10. je primjer snimljenog dna (dubina) širega područja uvala Sali i Sašćica (3D, profil) s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3, dok je na slici I-11. prikazano kako uređaj kartira tvrdoću dna.



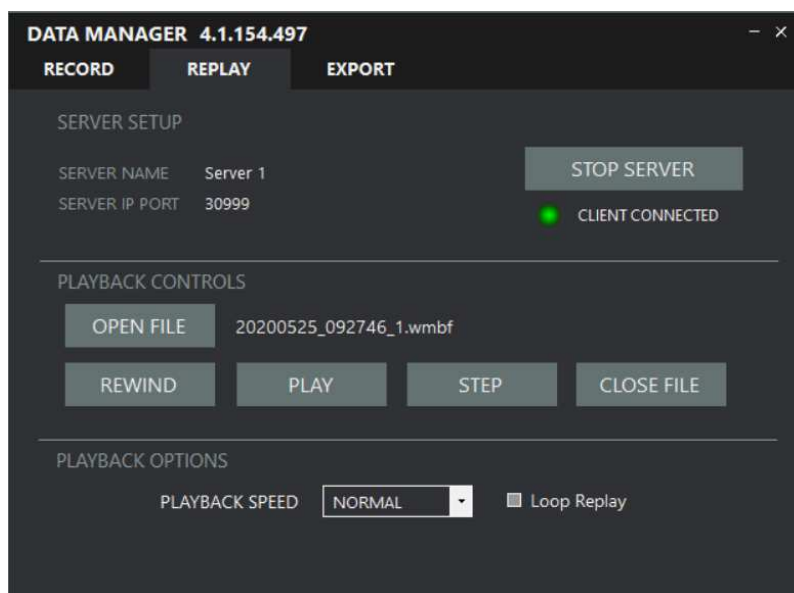
Slika I-10. Primjer snimljenog dna (dubina) djela šireg područja uvala s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3



Slika I-11. *Primjer snimljenog dna (tvrdoća) uvala s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3*

Data Manager je programski paket za upravljanje podacima. On se generalno sastoji od tri komponente (Slika I-12):

- 1) Snimanje podataka;
- 2) Ponovni prikaz;
- 3) Izvoz podataka



Slika I-12. *Sučelje softvera Data Manager*

Sonda

Sonda ili *transducer* je uređaj koji pretvara energiju iz jednog oblika u drugi (Song i Lee, 2008). U slučaju batimetrije to se odnosi na pretvaranje elektronskog signala u ultrazvučni i obrnuto. Na temelju vremenske razlike između odaslanog i primljenog zvučnog signala bilježi se vertikalna udaljenost od dna do sonde.

Pri batimetriji širega područja uvala Sali i Sašćica korištena je sonda *WMB-160* čija je operativna frekvencija 160 kHz (Slika I-13). Ona je čvrsto pričvršćena za čeličnu motku kako se prilikom izmjere ne bi pomicala i samim time utjecala na izlazne rezultate. Uronjena je na dubinu od 60 cm te je razlika udaljenosti između nje i vodene površine uračunata u izmjeru.

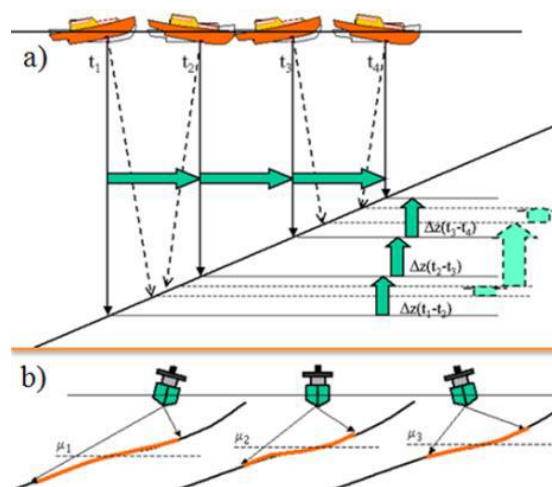
Orijentirana je pod kutem od 90° kako bi zvučni signal putovao najkraćim mogućim putem i bio pravilno georeferenciran. Također je veoma važna i pozicija sonde s obzirom na turbulencije uzrokovane radom propelera koje mogu utjecati na kvalitetu prikupljenih podataka. Stoga je cijeli sustav pozicioniran što je dalje bilo moguće od vanbrodskog motora. Kako bi prikupljeni podaci bili na točnoj X,Y koordinati, odnosno kako bi horizontalna točnost bila kvalitetna, antena je montirana točno iznad sonde (Slika I-13).



Slika I-13. Sonda *WMB-160* (URL9) i njezina pozicija u integralnom mjernom sustavu

Inercijalni mjerni sustav

Kvaliteta prikupljenih podataka oscilira s obzirom na to da je pri batimetrijskoj izmjeri prisutan utjecaj prednjih i bočnih valova zbog kretanja plovila po vodenoj površini (Slika I-14) (Šiljeg, 2013). Stoga veliku važnost pri prikupljanju podataka, korištenjem integralnog mjernog sustava - kombinacije RTK GPS-a i višesnopnog dubinomjera, ima integrirani inercijalni mjerni sustav (IMU) koji omogućuje registraciju podataka po X, Y i Z osi.



Slika I-14. Utjecaj a) prednjih i b) bočnih valova na registraciju podataka (Šiljeg, 2013)

Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-INU smješten u senzornoj kutiji (Slika I-15) je minijaturni navigacijski sustav s inernim navigacijskim sustavom GPS-a i AHRS (*attitude and heading reference system*). On osigurava točnu poziciju, brzinu, ubrzanje i orijentaciju u najzahtjevnijim uvjetima te je zbog svoje visoke preciznosti u kombinaciji s *Hemisphere V320 GNSS* pametnom antenom (Slika I-16) idealan za sustave na malim plovilima koji su pod velikim utjecajem prednjih i bočnih valova (URL10). Kombinira temperaturno kalibrirane, akcelerometre, žiroskope, magnetometre i senzor tlaka s naprednim GNSS prijemnikom. Oni su spojeni u sofisticiranom fuzijskom algoritmu kako bi pružili točnu i pouzdanu navigaciju i orijentaciju (Pao, 2018).



Slika I-15. WASSP Sensor Box s integriranim Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-IMU (prema: ENL Group, 2016; URL10)

4.1.2.2. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna

Hemisphere V320 (Slika I-16) prva je višenamjenska GNSS pametna antena, koja omogućava RTK precizno usmjerenje.

Tablica I-2. Specifikacija GNSS senzora

MODEL	V320
Receiver type	Vector GNSS L1 Compass
Signals received	GPS and GLONASS
Channels	540
GPS sensitivity	-142 dBm
SBAS tracking	2-channel, parallel tracking
Update rate	20 Hz standard
Position accuracy: RMS	Horizontal Vertical
Position accuracy: Single point	1.2 m 2.5 m
Position accuracy: SBAS (WAAS)	0.3 m 0.6 m
Position accuracy: Code differential GPS	0.3 m 0.6 m
Heading accuracy	0.30°
Pitch/Roll accuracy	1°
Heave accuracy	30 cm 3

Timing (1 PPS) accuracy	20 ns
Rate of turn	90°/s maximum
Compass safe distance	75 cm (with enclosure)
Cold start	60 s (no almanac or RTC)
Warm start	20 s typical (almanac and RTC)
Hot start	1 s typical (almanac, RTC and
Heading fix	10 s typical (valid position)
Maximum speed	1,850 mph (999 kts)
Maximum altitude	18,288 m (60,000 ft)
Differential options	SBAS Beacon, External RTCM

Izvor: URL11

Dizajnirana je tako da i u različitim vremenskim uvjetima omogućava kvalitetno dinamičko pozicioniranje pri profesionalnom istraživanju dubina (Tablica I-2). S postavljenim odvajanjem, V320 pruža konzistentnu i pouzdanu točnost položaja i smjera. Vector 320 može koristiti Atlas L-opseg i SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, itd.) za korekciju GNSS signala (URL11).



Slika I-16. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna (URL11)

4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka

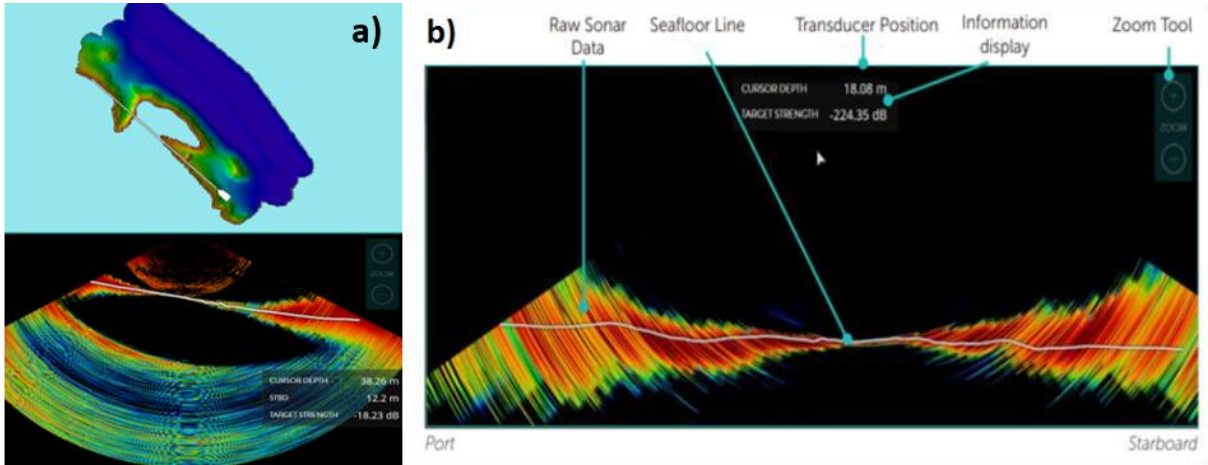
Dobivanje sekundarnih podataka predstavljalo je proces koji je uključivao prikupljanje svih podataka koji su neophodni za optimalno planiranje batimetrijske izmjere. DOF i HOK korišteni su kao podloge za iscrtavanje granice obale i profila. Podatci o temperaturi su bitni zbog izračuna brzine zvuka u vodi. Dobivena vrijednost brzine zvuka važan je parametar prilikom kalibracije dubinomjera. Unos brzine zvuka potreban je za kompenzaciju netočnosti raspona uzrokovanih zvukom varijacije u brzini. Te se promjene mogu dogoditi, sezonski i s geografskim područjima, posebno u obalnim područjima gdje će na brzinu zvuka utjecati temperatura vode i zraka te razlike u slanosti vode. Na brzinu zvuka u vodi dakle utječu i temperatura i slanost.

Ovu vrijednost treba redovito prilagoditi ovisno o radnom okruženju, jer će imati izravan utjecaj na točnost kartiranja. Što je brzina zvuka preciznija definirana, to je preciznije kartiranje dna. Vizualni učinak neispravne brzine zvuka očituje se tako da će se prikaz ravnog morskog dna konkavno ili konveksno zakriviti (Dong i dr., 2007; Dong i dr., 2011) (Slika I-17).

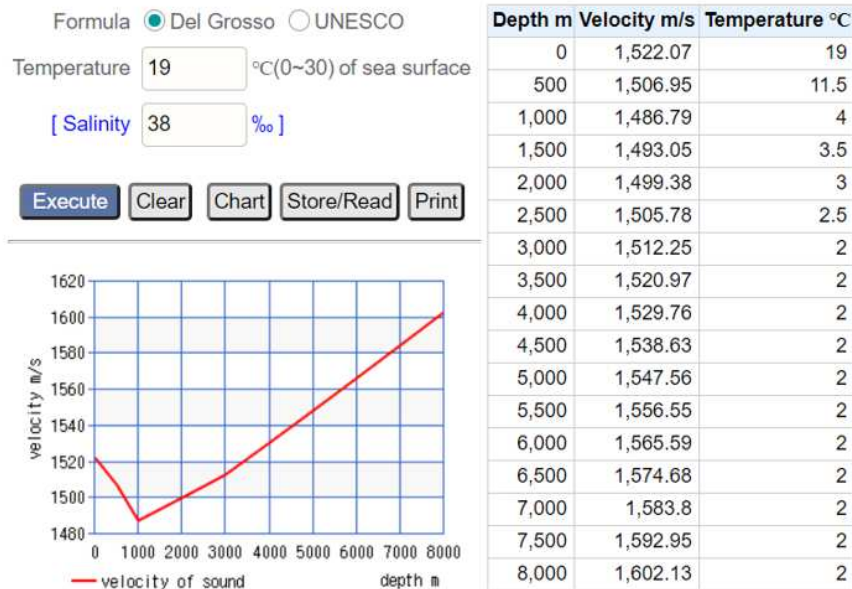


Slika I-17. Netočnosti prikaza morskog dna zbog pogrešne brzine zvuka

Stoga je uređaj kalibriran na zaravnjenom dijelu s ciljem minimaliziranja grešaka prilikom izmjere (Slika I-10). S obzirom na karakteristike temperature i saliniteta na dan izmjere brzina zvuka iznosila je 1522,07 m/s (Slika I-19).



Slika I-18. Prikaz Sonarne ploče koja prikazuje vodeni stup i profil morskog dna ispod sonde a) primjer uvala Sali i Sašćica; b) generalan primjer sa sastavnicama

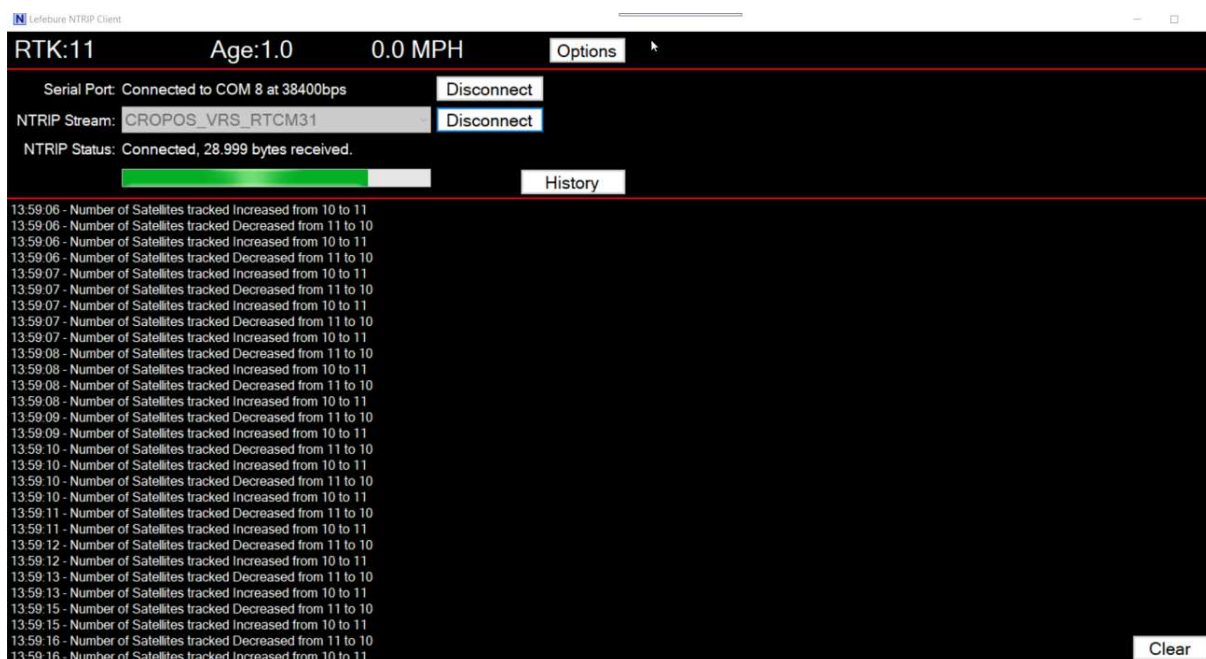


Slika I-19. Korištena formula za izračun brzine zvuka u vodi

Uz podešavanje brzine zvuka u vodi, bitna faza procesa kalibracije sustava odnosi se na konfiguraciju GPS antene, za što je korišten softver PocketMax3. Antena je na CROPOS_VRS_RTCM31 sustav spojena preko NTRIP Client softvera čime je omogućena registracija podataka u realnom vremenu vrlo visoke preciznosti.



Slika I-20. Sučelje softvea PocketMax3

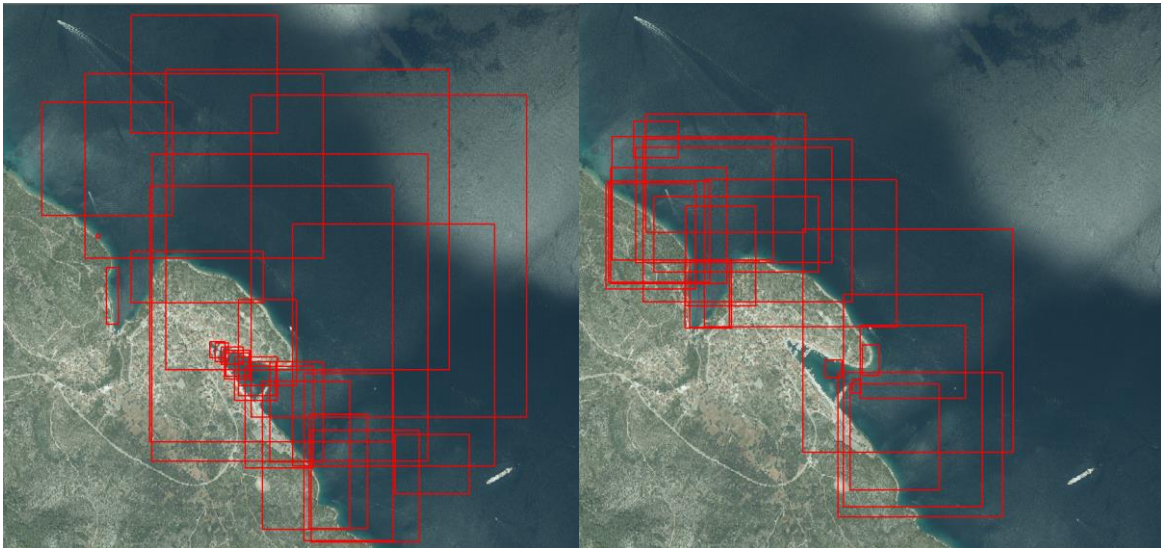


Slika I-21. Sučelje softvera NTRIP Client

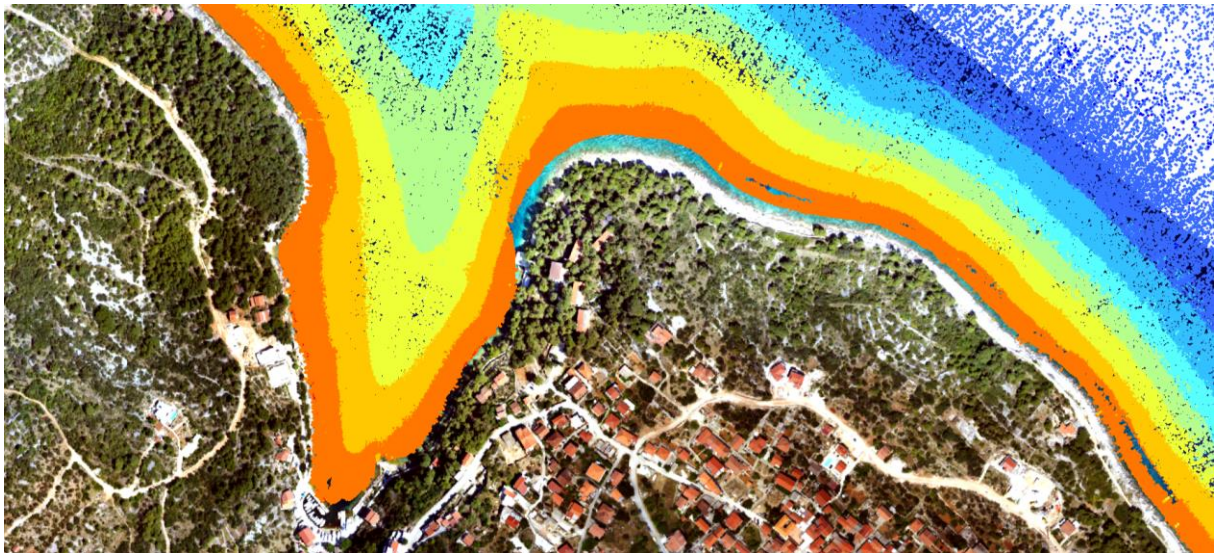
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka

Prilikom prikupljanja podataka postotak preklapanja snimaka iznosio je oko 40% s ciljem dobivanja kvalitetnijih modela i provjere preciznosti integralnog mjernog sustava. Operativna frekvencija iznosila je 160 kHz, dok je operativna širina snopa bila 20°. Stopa pinga varirala je od 10 do 14/sek. Također, uređaj je u realnom vremenu prikupljao i prikazivao podatke o položaju broda, brzini, azimutu, odstupanju od ravnine i dubini na temelju unaprijed definiranih korisničko definiranih postavki sustava. Prilikom prikupljanja podataka GPS antena je preko GSM mreže spojena na CROPOS sustav. To je omogućilo vrlo visoku preciznost prikupljenih podataka. Sustav je prikupljao podatke u WGS84_UTM_N33 projekciji.

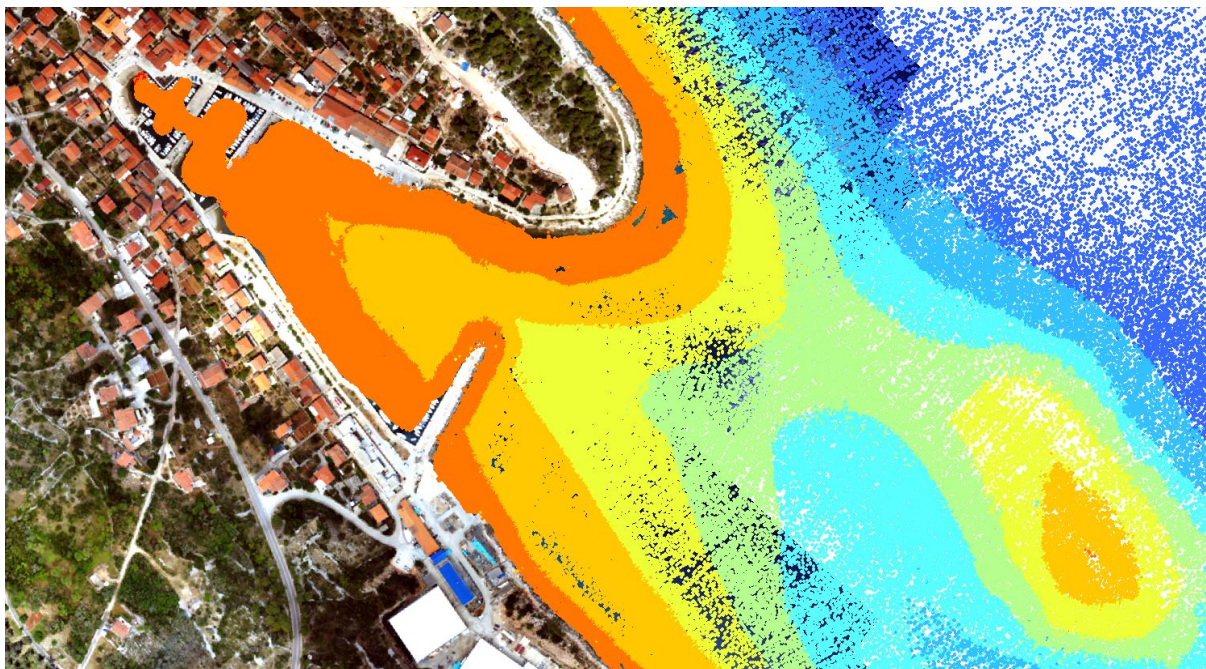
U procesu obrade s ciljem standardizacije svi podatci transformirani su u HTRS96 projekciju. Mjerenje šireg područja uvala Sali i Sašćica izvršeno je u razdoblju od 24. do 25. svibnja 2020. (dva dana) (Slika I-22). Ukupno je prikupljeno 46 820 187 točaka (prvi dan 29 084 281, a drugi 17 735 906) (Slika I-22 i I-23) koje su pospremljene u 2 direktorija (47 .wbmf dokumenata). Minimalna prikupljena vrijednost dubine iznosila je u -0,58 m, a maksimalna dubina -103,319 m. Maksimalne vrijednosti se odnose na artefakte ili greške koje su uvjetovane mjernim sustavom. Raspon vodostaja na dan snimanja praćen je s uređajem *Stonex S10*. Kao srednja vrijednost uzet je srednji vodostaj koji je praćen na rivi (kod kafića Maritimo) u 10 ponovljenih mjerenja.



Slika I-22. Snimljena područja po danima a) prvi dan (lijevo) i b) drugi dan (desno)



Slika I-23. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka na primjeru uvale Sašćica



Slika I-24. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka na primjeru uvale Sali

Izmjereni podatci su preko programskih paketa (aplikacija) za navođenje *CDX* i upravljanje podacima *Data Manager* (Slika I-12) prebačeni na stolno računalo na daljnju obradu i interpretaciju. Korišteni programski paketi tijekom mjerenja kreiraju zasebnu datoteku s informacijama o položaju točke, vremenu u kojem je točka registrirana, dubini i atributima o tvrdoći u svakoj točki. Programski paketi imaju samo mogućnost eksportiranja točaka u *.xyz* formatu. S obzirom na raspored, gustoću i brojnost uzoraka navedeni format nije prikladan za daljnju obradu, analizu, vizualizaciju i interpretaciju podataka. Stoga su sve točke pomoću alata, unutar softverskog paketa *ArcMap 10.1.*, konvertirane u *.las* format (preporuka američkog društva za fotogrametriju i daljinska istraživanja).

4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava

Za ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava bilo je potrebno usporediti vertikalne i horizontalne vrijednosti minimalno dva nefiltrirana gusta oblaka točaka koji pokrivaju isto područje. U alatu *C2C (Cloud to Cloud)* unutar programa *CloudCompare* uspoređeni su gusti oblaci točaka.

U opciji *Distance computation* unutar alata *C2C* podešeni su parametri za izradu modela apsolutnih udaljenosti uspoređenih oblaka. Za izračun udaljenosti u opciji *General parameters* razina ekstrahiranja (*Octree level*) je postavljena na automatsko, dok je maksimalna udaljenost postavljena na 1 m jer se preko 90% točaka nalazi unutar udaljenosti od 1 m, a maksimalna greška, provjerena u opciji *Approximate distances* iznosi 0,579 m.

Alat *M3C2* unutar *CloudCompare*-a omogućava generiranje pozitivnih i negativnih vrijednosti udaljenosti na temelju čega se izračunava standardna devijacija (SD), koja je korištena kao glavna statistička metoda za provjeru vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava. To je zapravo najčešća mjera odstupanja vrijednosti od aritmetičke sredine, a izračunava se po formuli:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - M)^2}{N - 1}}$$

U formuli x_i predstavlja sve vrijednosti točaka, M je aritmetička sredina, a N ukupan broj točaka (Streiner, 1996).

Najvažniji parametar unutar *M3C2* je *subsample cloud #1* u kojem je određeno da minimalna udaljenost između točaka bude 0,1 m. Upravo ovaj parametar utječe na konačan broj uzoraka na temelju kojih će se ispitati vertikalna preciznost. *Max depth* je postavljen na 1 m iz istih razloga kao i u opciji *General parameters* unutar alata *C2C*. Vertikalna i horizontalna preciznost su u konačnici ispitane na temelju 823 722 uzorka.

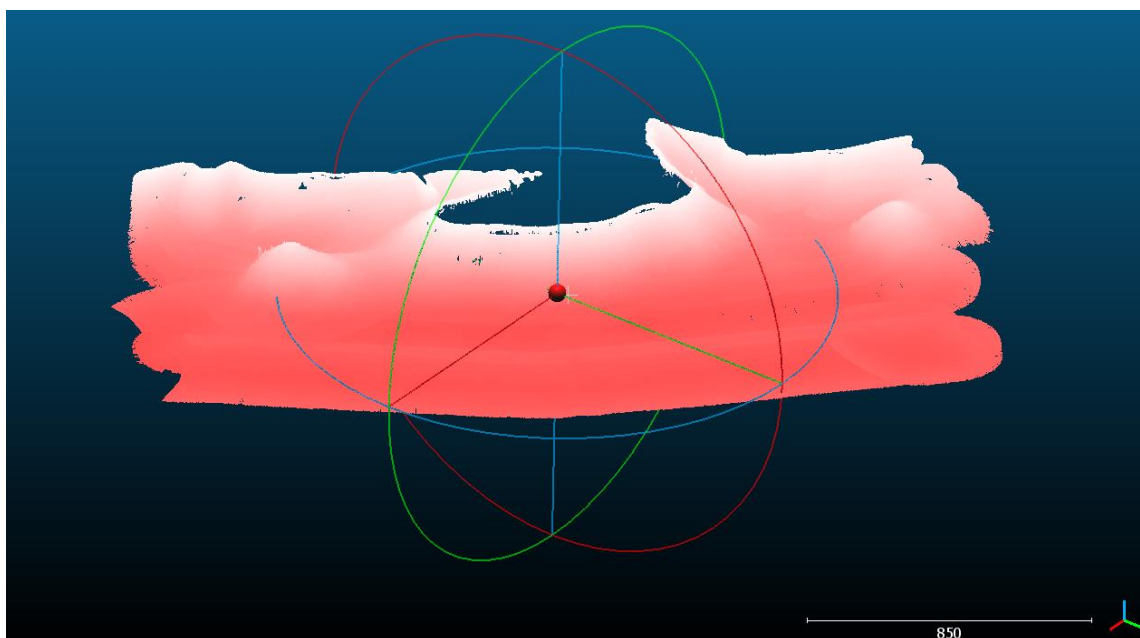
Standardna devijacija za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava je računata i na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s cikličnim snimcima (OP_0, OP_2 i OP_3). Sva tri uspoređena uzorka su postavljena u uloge referentnog i uspoređenog oblaka. U alatu *M3C2* ponovno su postavljeni isti parametri kao i prvi put, osim što je *Max depth* postavljen na 0,2 m. SD je izračunata za svih šest mogućih kombinacija, a konačna vrijednost SD je srednja vrijednost svih SD-a.

Standardna devijacija za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava također je ispitana na odabranom testnom području i to na temelju odnosa snimaka OP_2 i OP_3, odnosno OP_3 i OP_2, koji je najreprezentativniji. Konačna vrijednost SD je srednjak dobivene dvije vrijednosti.

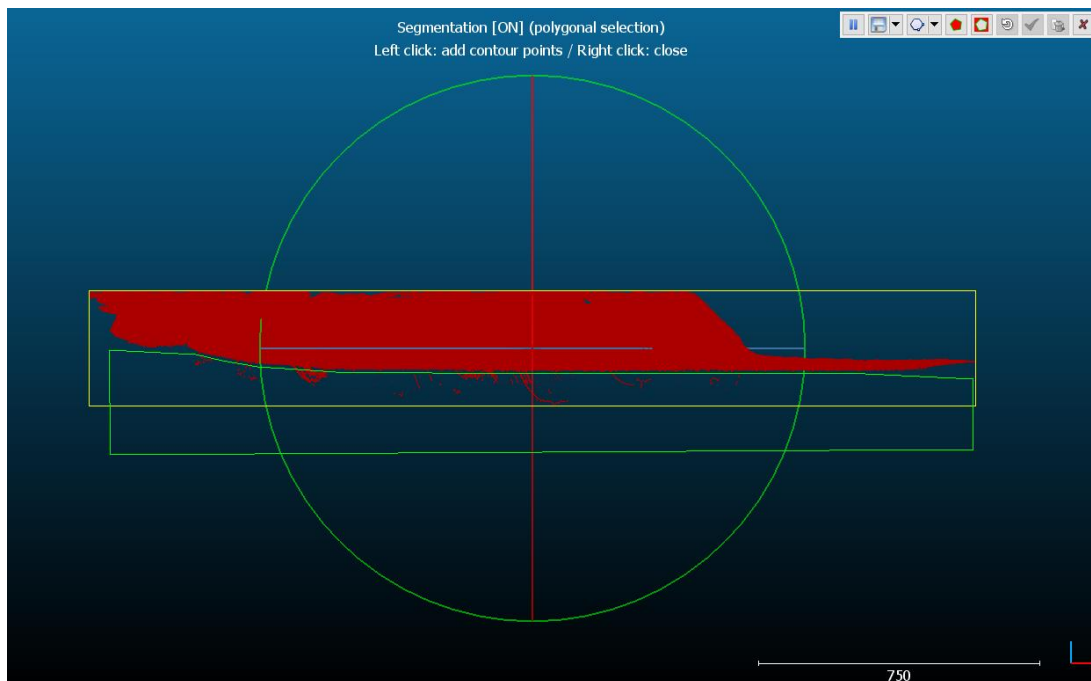
4.1.6. Uređivanje podataka

S ciljem izrade kvalitetnog modela, prema standardima Međunarodne hidrografske organizacije, jedan od najzahtjevnijih zadataka u procesu modeliranja je filtracija podataka. Naime, sustav prikupi mnoštvo visinskih podataka koji ne reprezentiraju morfologiju dna, već mogu biti različiti šumovi i greške koje je potrebno pročititi.

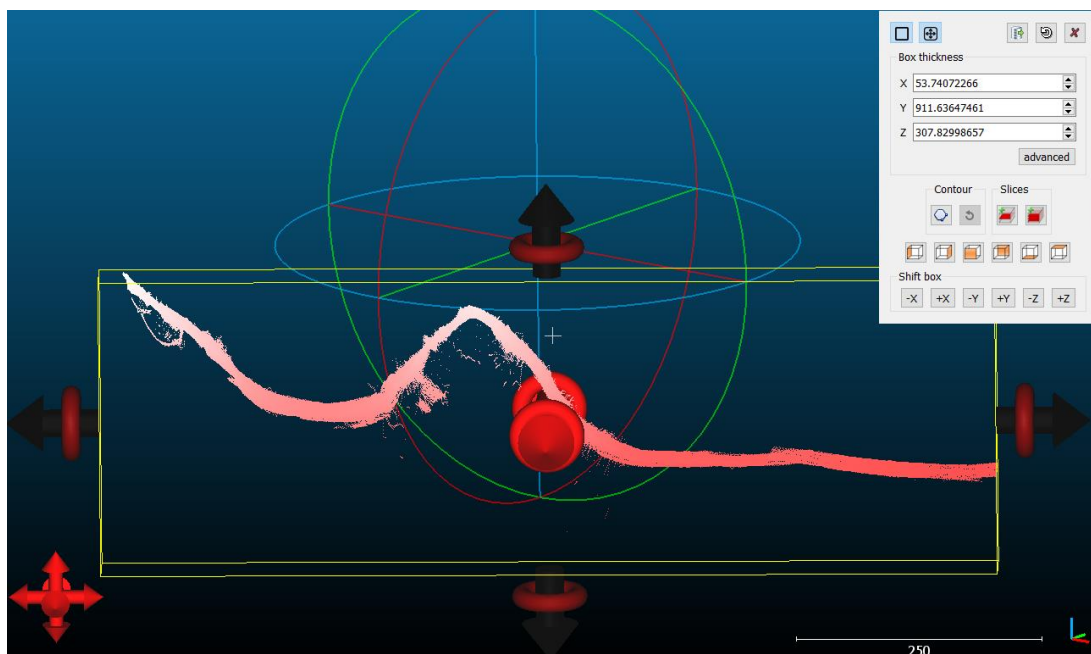
S obzirom na specifičnosti uvala teško je iz gustog oblaka točaka uočiti i zaključiti jesu li značajnija odstupanja od prosječnih vrijednosti za pojedina područja greške ili pak pukotine. U procesu filtracije podataka korištene su dvije metode u softveru *CloudCompare*: ručna metoda (iz 3D prikaza i profila) (Slika I-26 i I-27), metoda segmentacije (Slika I-28 i I-29) i CSF filter (Slika I-31). Ručna metoda uklanjanja grešaka je izrazito dugotrajan i zahtjevan proces u kojem istraživač na temelju iskustva iz 3D prikaza i uzdužnih i poprečnih profila uklanja greške, prateći pritom konfiguraciju dominantnog terena.



Slika I-25. Gusti oblak točaka u softveru *CloudCompare*



Slika I-26. Primjer ručnog uklanjanja grešaka iz 3D prikaza u softveru CloudCompare

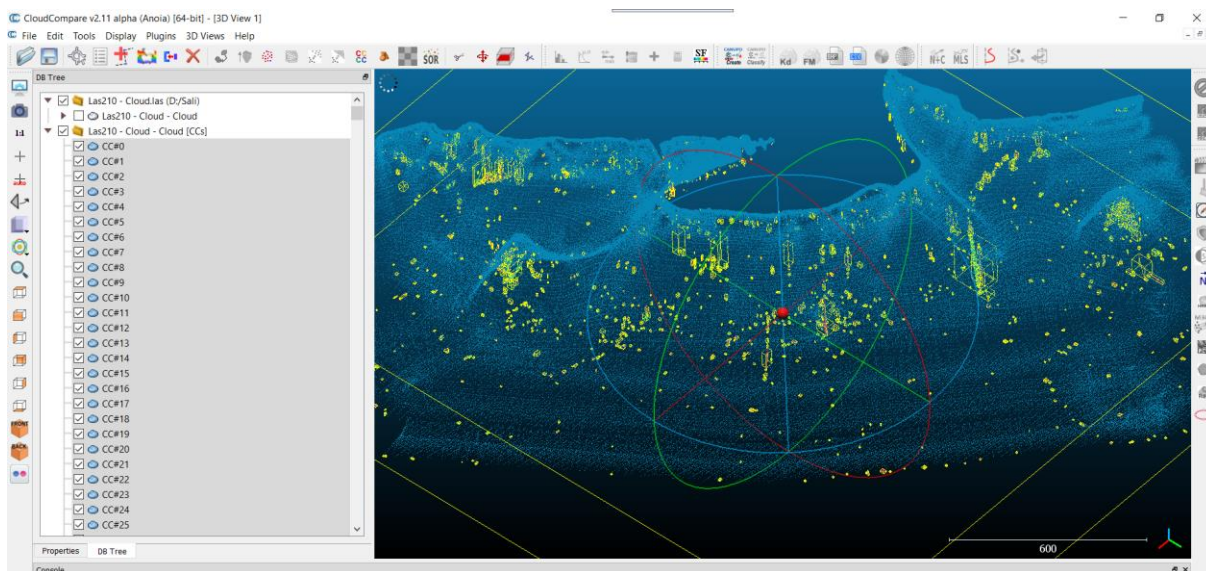


Slika I-27. Primjer ručnog uklanjanja grešaka iz profila u softveru CloudCompare

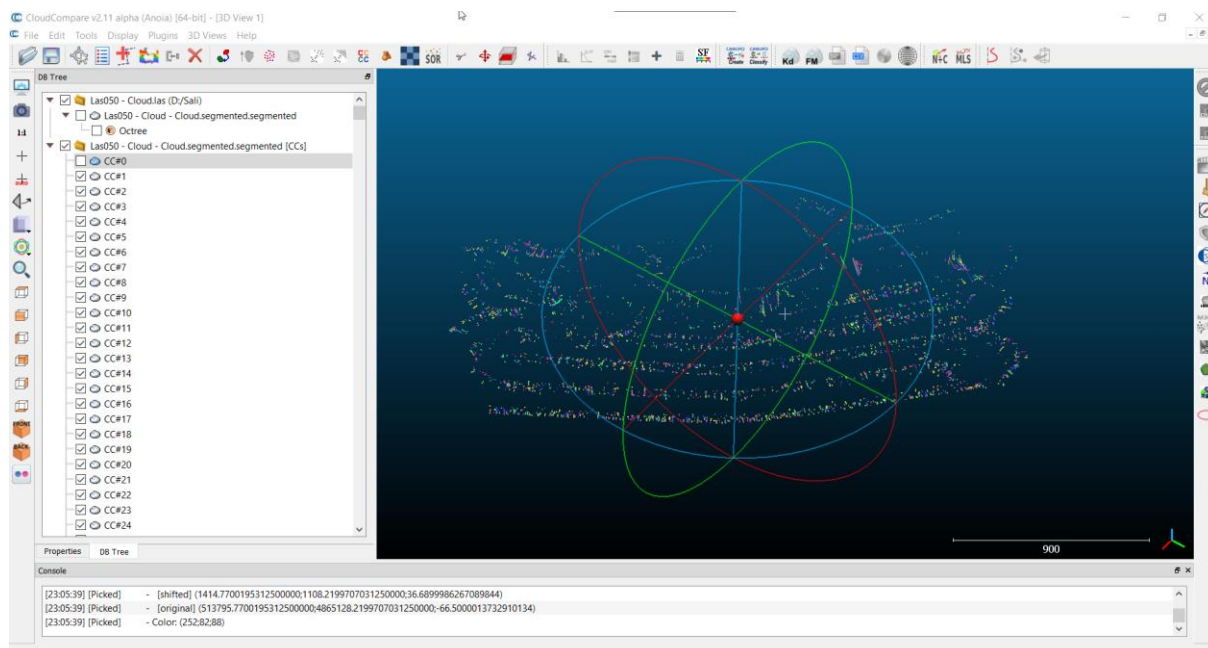
Automatsko uklanjanje grešaka obavljeno je pomoću alata *LabelConnected Components* u *CloudCompare*-u koji koristi 3D rešetku za ekstrahiranje povezanih komponenti. Ovaj alat segmentira odabrane oblake u manje dijelove odvojene minimalnom udaljenošću, pri čemu je svaki dio povezana komponenta (tj. skup 'spojenih' točaka). Alat zahtjeva poznavanje nekoliko važnih parametara.

Prvi je Razina ekstrahiranja (*Octree level*) kojim se definira minimalni razmak između dvije komponente. Što je razina viša to je razmak između komponenti manji što rezultira gušćom ćelijom, odnosno dobiva se više oblaka točaka koji su podskupine izvornog oblaka. Razina ovisi o ukupnom broju i gustoći prikupljenih točaka te je s obzirom na to postavljena razina 11. Sljedeći parametar je Minimalan broj točaka po komponenti (*Minimum points per component*). On je također uvjetovan brojem i gustoćom prikupljenih točaka te je definirano da se sve komponente koje imaju manje od 8 točaka zanemare.

Na poslijetku je označena i opcija Slučajne boje (*Random colors*) kojom je svakoj komponenti dodijeljena slučajna boja kako bi se lakše uočile razlike među komponentama. Po završetku *CloudCompare* je stvorio više oblaka kao komponenti (4388) koji su zapravo odgovarajuća podskupina izvornog oblaka s istim značajkama (skalarna polja, normale, boje itd.). Označeni su oblaci koji predstavljaju šumove i greške nastale u procesu prikupljanja podataka te opcijom Izbrisi (*Delete*) uklonjeni iz skupa točaka koji ide u daljnji proces obrade.



Slika I-28. Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru *CloudCompare*



Slika I-29. *Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru CloudCompare*

4.1.7. Filtracija podataka primjenom *SOR filter-a*

Za uspješnije filtriranje točaka korišten je napredni *SOR filter* (*Statistical Outlier Removal*) unutar *CloudCompare-a*. On filtraciju podataka vrši na sljedeći način. Za početak izračunava prosječnu udaljenost svake točke do svojih susjeda. Potom odbacuje, odnosno briše sve točke čija je udaljenost od susjednih točaka izvan intervala definiranog prosječnom udaljenosti i standardnim odstupanjem. *SOR filterima* dva parametra. U prvom (*Number of points to use for mean distance*) se definira broj susjednih točaka koji će se koristiti za izračun 'udaljenosti do susjeda' za svaku točku. Prema zadanim postavkama određeno je da je to broj 6. Drugi parametar (*Standard deviation multiplier threshold (nSigma)*) odnosi se na množitelja standardnog odstupanja koji može biti bilo koji realni broj između 0 i 10 uključujući i njih. *SOR filter* je veoma osjetljiv te se za ovaj parametar predlaže odabir veće vrijednosti od broja točaka unutar klastera (Shen i dr., 2011). Stoga je određeno da sve točke čije je standardno odstupanje veće od onog pomnoženog s brojem 8 bude označeno te na posljetku filtrirano. Dobiven je u potpunosti 'čist' oblak točaka bez šumova i pogrešnih očitavanja koji je spreman za interpolaciju.

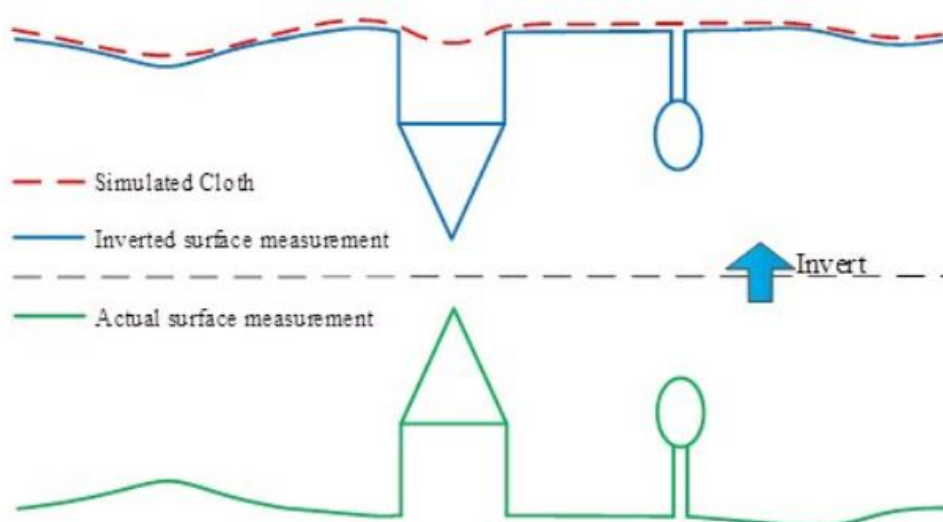
4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF)

Cloth Simulacijski filter (CSF) je alat za izdvajanje temeljnih točaka u diskretnim povratnim točkama prikupljenim različitim tehnologijama, a posebice LiDAR. Razdvajanje oblaka točaka u zemaljska i nezemaljska mjerenja važan je korak za generiranje digitalnih modela terena (DTM) iz različitih podataka.

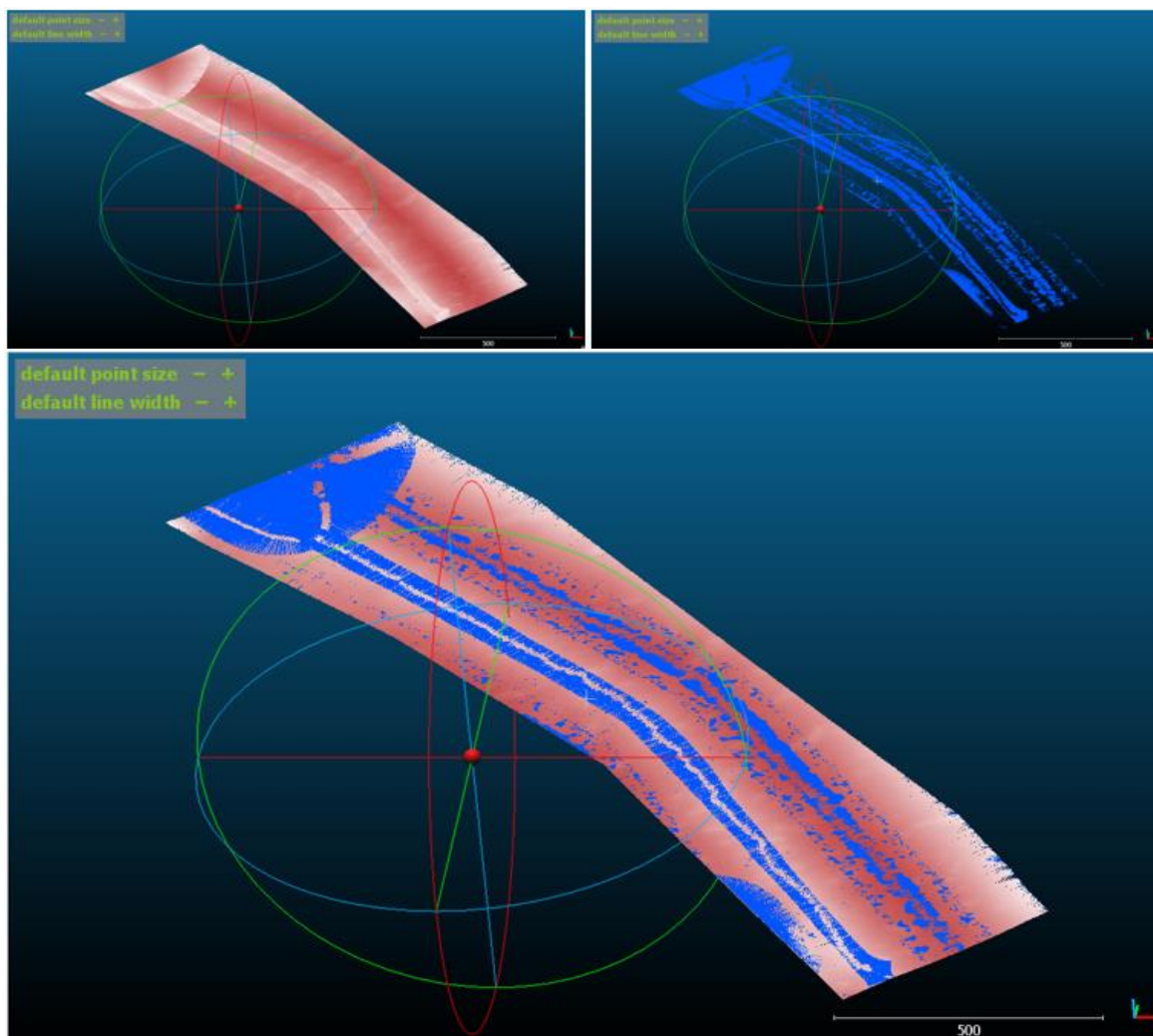
Razvijeni su mnogi algoritmi filtriranja. Međutim, čak i najmoderniji algoritmi za filtriranje trebaju pažljivo postaviti brojne složene parametre kako bi se postigla visoka točnost.

U svrhu smanjenja parametara koje korisnici postavljaju i promoviranja algoritama filtriranja, CSF je nova metoda filtriranja za koju je potrebno nekoliko jednostavno postavljenih cjelobrojnih i logičnih parametara. Ova metoda temelji se na simulaciji platna, algoritam 3D računalne grafike i koristi se za simulaciju platna unutar računalnog programa. U ovom predloženom pristupu obrnut je gusti točka, a zatim se krutom tkaninom prekriva obrnuta površina. Analizom interakcija između platnenih čvorova i odgovarajućih točaka mogu se odrediti lokacije platnenih čvorova kako bi se stvorila aproksimacija površine zemlje. Konačno, točke tla mogu se izdvojiti iz oblaka točaka usporedbom izvornih točaka i generirane površine.

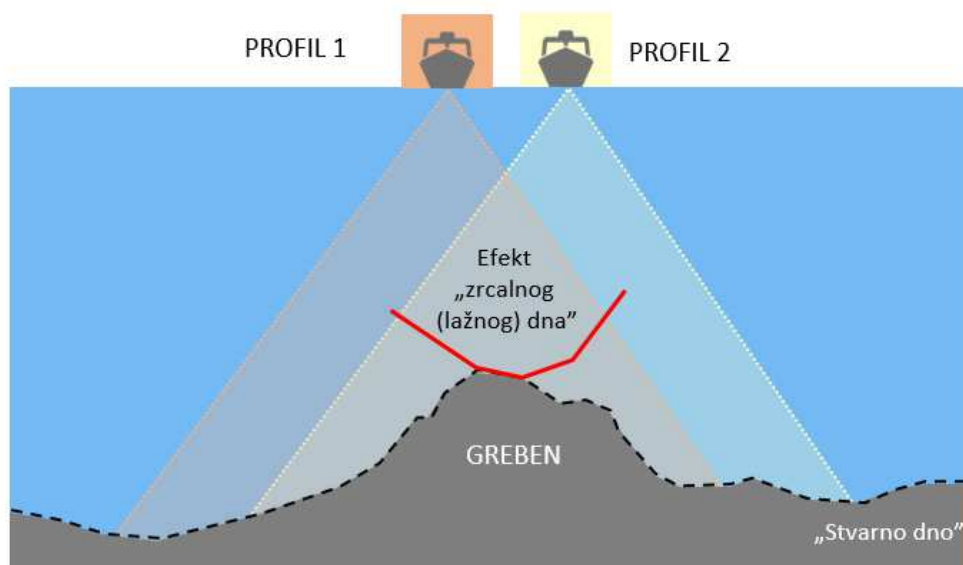
Glavni razlog primjene metode su brojni artefakti uvjetovani karakteristikama opreme i morfologije dna. Na slici I-31. prikazan je primjer pojave „zrcalnog (lažnog) dna“.



Slika I-30. Princip rada CSF metode



Slika I-31. *Primjer uklanjanja oblaka točaka korištenjem CSF algoritma*



Slika I-32. Primjer pojave efekta „zrcalnog (lažnog) dna“

4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom

Da bi se dobile kontinuirane površine (visoko rezolucijski modeli) koje su neophodne za proučavanje, a time i poznavanje dna bilo je potrebno procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pritom optimalnu interpolacijsku metodu i prostornu rezoluciju. Interpolacija je proces računanja vrijednosti za određenu točku uz pomoć dviju ili više susjednih točaka s poznatim vrijednostima. Nova vrijednost u točki nikad ne prelazi interval određen susjednim točkama, a procijenjena vrijednost se svrstava u područje mogućega (Šiljeg i dr, 2018). Slijedeći primjere dobre prakse unutar digitalnog modeliranja reljefa odabrana je metoda interpolacije prirodni susjed (*natural neighbor*).

„Prirodni susjed je jedna od najpopularnijih metoda interpolacija, sa širokom primjenom u geografskom i geofizičkom modeliranju, mehanici itd. Ona kombinira najbolje značajke metoda najbližih susjeda i triangulacijske nepravilne mreže. To je metoda ponderiranog prosjeka koja procjenjuje vrijednost pomoću lokalnih koordinata prirodnog susjeda na temelju Voronoijeve teselacije (proces stvaranja dvodimenzionalne ravnine ponavljanjem geometrijskih oblika bez preklapanja i praznina)“ (Šiljeg i dr., 2018:45).

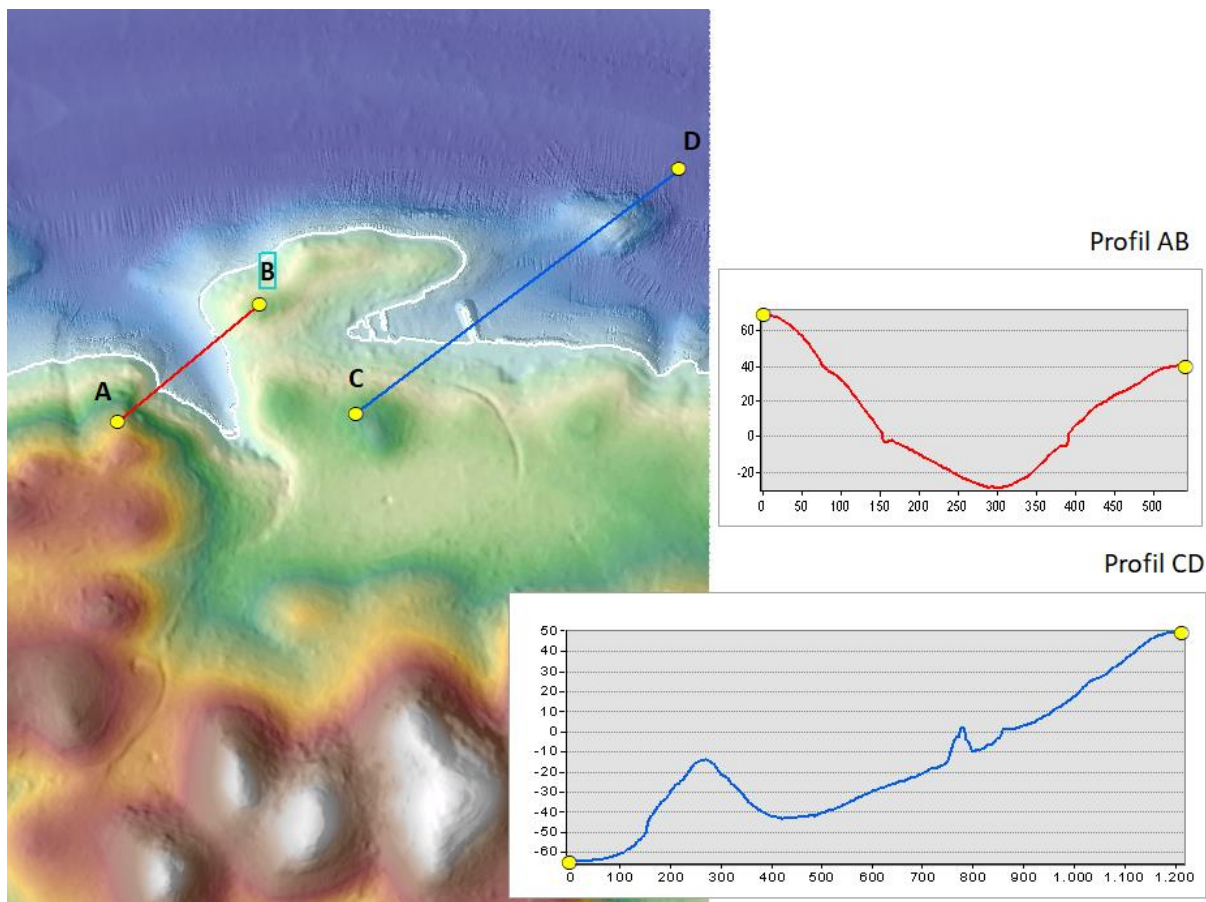
4.1.10. Prostorna rezolucija

Nakon procesa usporedbe metoda interpolacije, sljedeći korak je proces odabira pravilne prostorne mreže ili *grid-a*. Najveći problem za većinu znanstvenika, pri izradi digitalnih modela, predstavlja odabir prostorne rezolucije ili veličine piksela. Ona je izračunata pomoću *Grid calculator-a* i metode analize uzoraka točaka (Hengl, 2006). Prilikom izrade integralnog modela (digitalni model dubina + digitalni model površina) odabrana je optimalna prostorna rezolucija od 5 cm (*point pattern analysis*). Ona predstavlja kompromis između gustoće uzorkovanja visinskih i dubinskih točaka te površine područja snimanja. Za potrebe vizualizacije rezolucija modela je smanjena na vrijednost od 10 cm.

4.2. Izračun volumena i duljine obalne linije šireg područja uvala Sali i Sašćica

Iz generiranih 2.5D i 3D modela uvala oko moguće je izvoditi različite primarne i sekundarne parametre (morfometrijske, hidrološke itd).

Tako je primjerice na slici 33 prikazana izmjera specifičnih profila unutar uvale Sašćica kroz odabrane poprečne presjeke. Naime, da bi se što bolje razumjela prostorno-vremenska evolucija pojedinih dijelova dna uvala potrebno je provesti detaljnu morfometrijsku i tipološku klasifikaciju određenih promatranih profila i to kroz kvantitativno opisivanje recentnih promjena u širini i dubini promatranih poprečnih presjeka uvala.



Slika I-33. Poprečni AB i uzdužni CD profili u uvali Sašćica i Sali

U završnoj fazi batimetrijskog istraživanja izračunati su površina i volumen te duljina šireg područja uvala Sali i Sašćica. „Volumen se može definirati kao količina vode koja zauzima određeni prostor između površine i dna mora izražen u kubičnim jedinicama” (Šiljeg i dr., 2016:248).

Na izlazne rezultate mogu utjecati brojni čimbenici. To su ponajprije raščlanjenost dna, zatim odabrana metoda prikupljanja podataka, gustoća i raspored prikupljenih točaka te prostorna rezolucija (veličini piksela). No izlazni rezultati ovise i o korištenom softveru i algoritmima te metodama interpolacije koji omogućuju prikaz rezultata te njihovu usporedbu (Šiljeg i dr., 2016).

Volumen uvala izračunat je iz pravilne mreže dobivene interpolacijom. Korištene su tri *Newton-Cotesove* formule integrirane unutar softvera *Surfer* koje služe za izračun površine i volumena različitih oblika:

produljeno trapezoidno pravilo, produljeno Simpsonovo $1/3$ pravilo te produljeno Simpsonovo $3/8$ pravilo (Šiljeg i dr., 2016).

Ukupna duljina obalne linije izračunate su u softveru *ArcMap 10.1.* iz DEM-a usklađenog s DOF-om dobivenim obradom aerofotogrametrijskih snimaka. Osnova za izdvajanje obalne linije je izohipsa 0,05 m (vrijednosti izmjerene geodetskim GPS-om *Stonex S10*).

5. Rezultati

5.3. 2.5D i 3D modeli uvala Sali i Sašćica

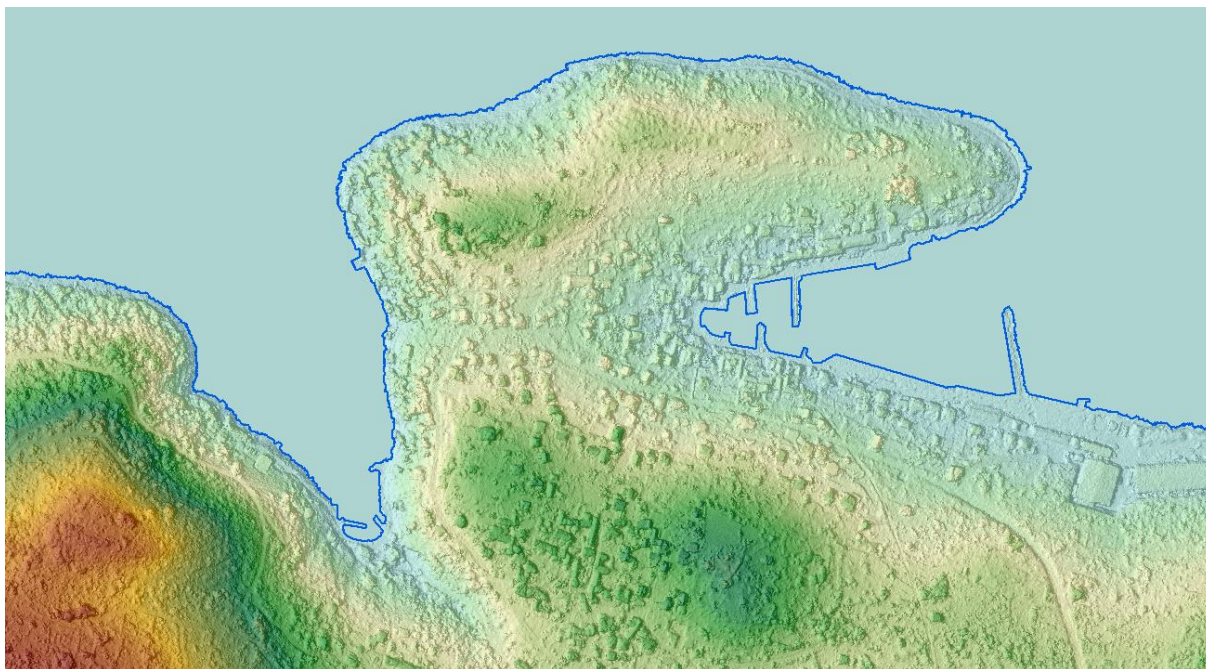
Iz aerofotogrametrijskog snimanja izvedeni su sljedeći uvala Sali i Sašćica:

- 1) Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto snimak (DOF) (Slika I-34)
- 2) Visoko-rezolucijski digitalni model površina (DSM) (Slika I-35)
- 3) 3D model uvala (Slika I-40, I-42) iz filtriranog gustog oblaka točaka (Slika I-43).

Nova 1) visoko-rezolucijska digitalna ortofoto (DOF) karta uvala Sali i Sašćica je izvedena u prostornoj rezoluciji 2,91 cm (Slika I-34). Ortofoto karta je planimetrijski ispravna snimka iz zraka, koja po metričkim svojstvima, u potpunosti odgovara karti istog mjerila (URL1). Izrada ortofoto karte temelji se na orijentiranom digitalnom fotogrametrijskom snimku i digitalnom modelu reljefa. Iz gustog oblaka točaka generiran je 2) digitalni model površina (DSM) šireg područja uvala. Prostorna rezolucija modela posljedica je postavki parametra *Quality* koja je postavljena na *High*. U konačnici je generiran model prostorne rezolucije 3,115 cm (Slika I-35).



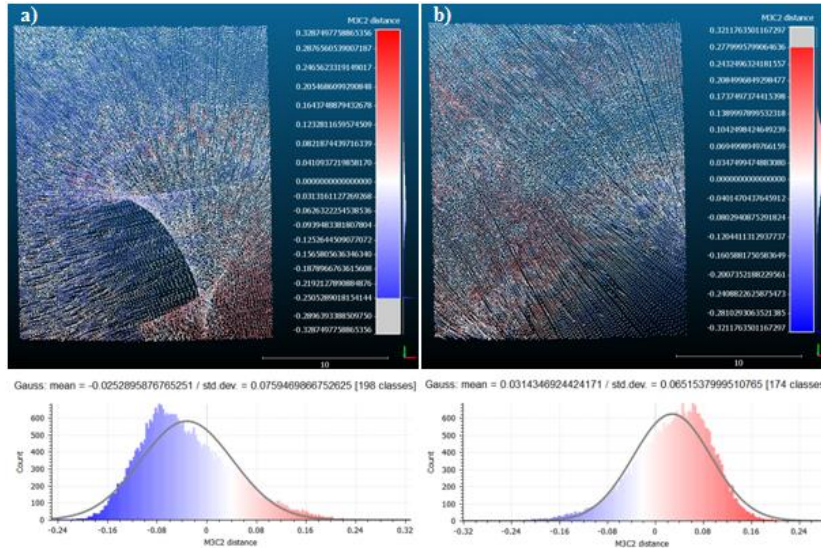
Slika I-34. Visoko-rezolucijski DOF snimak uvala Sali i Sašćica



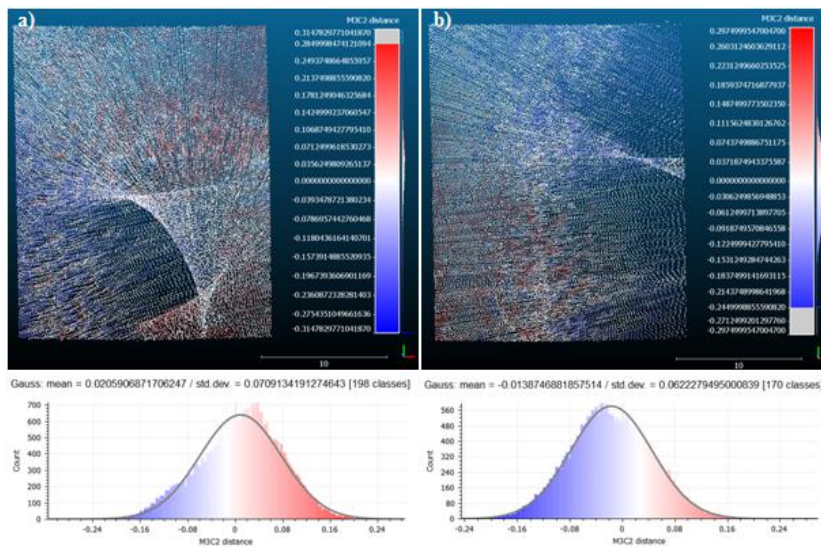
Slika I-35. Digitalni model površina (DSM) uvala Sali i Sašćica

5.4. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava

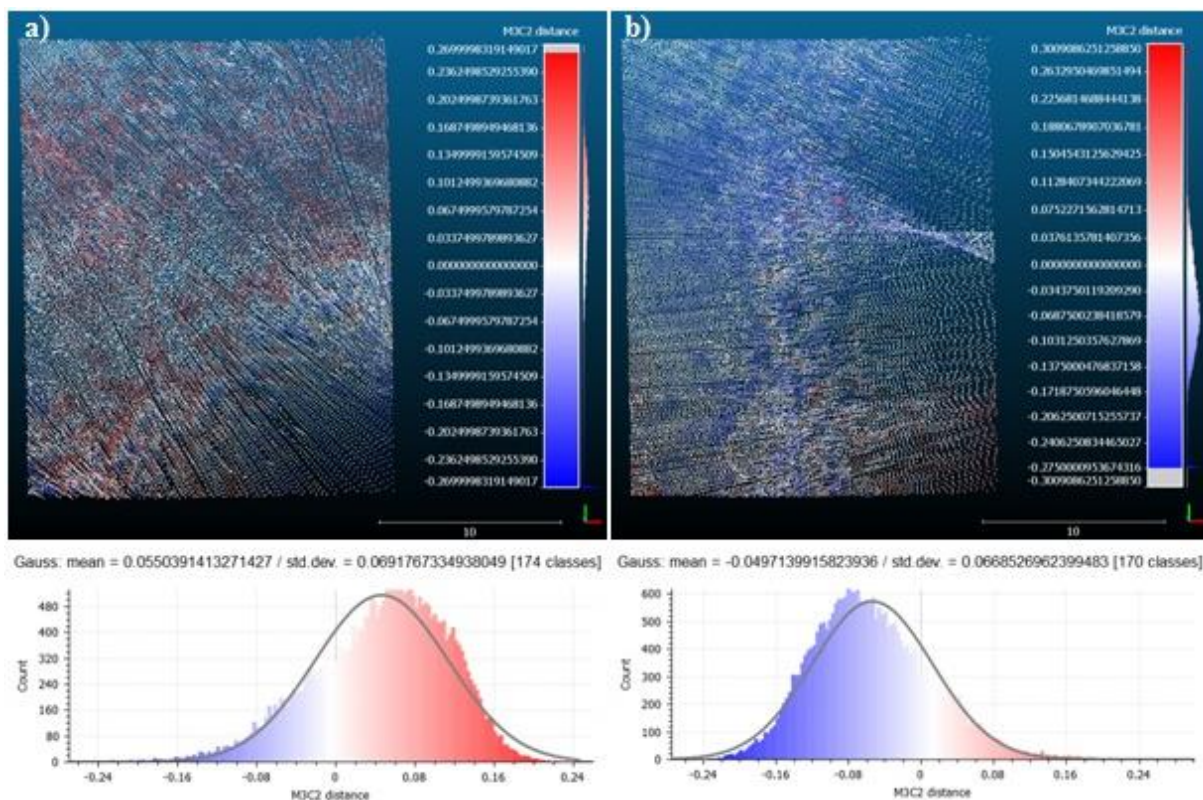
Standardna devijacija je računata, ali ovaj put na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s tri ciklična snimanja na kojima je približno jednaka gustoća uzorkovanja (OP_0, OP_2 i OP_3). SD je računata za svih mogućih šest kombinacija pri kojima uzorak svakog cikličnog snimka bio u ulozi referentnog i uspoređenog oblaka točaka (Slika I-36, I-38).



Slika I-36. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP₀ - OP₂ i b) OP₂ - OP₀



Slika I-37. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP₀ - OP₃ i b) OP₃ - OP₀



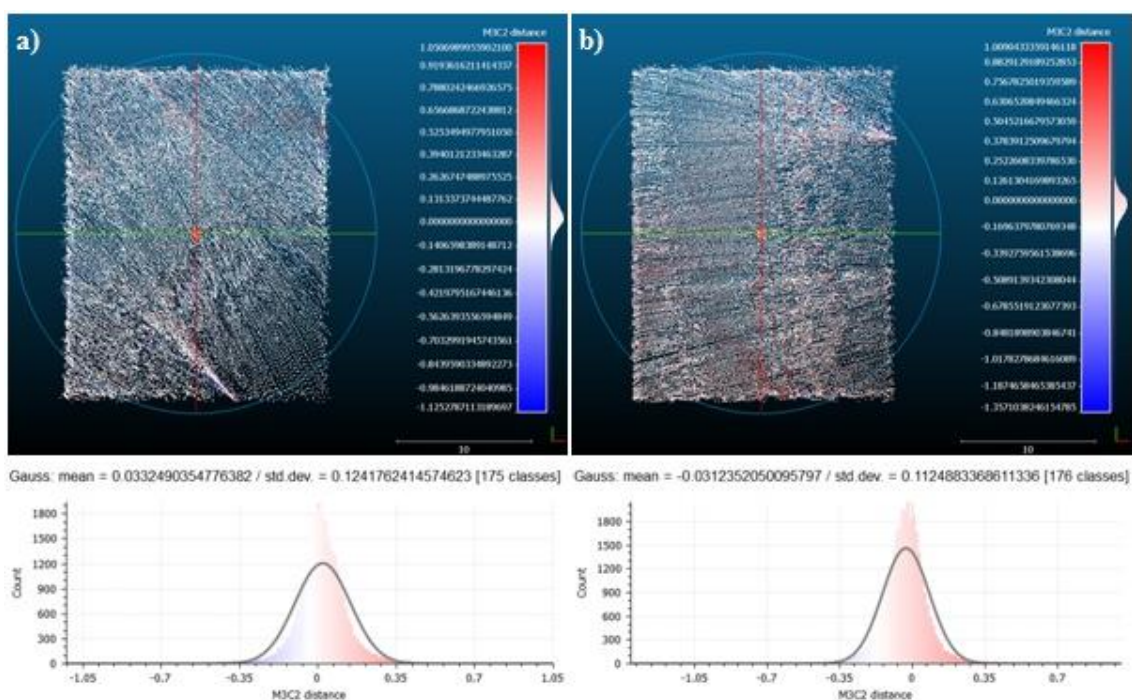
Slika I-38. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP₂ - OP₃ i b) OP₃ - OP₂

Dobivene su vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava. SD za vertikalnu preciznost izračunata je kao srednja vrijednost svih šest kombinacija. Ona iznosi 6,8 cm (Tablica I-3).

Tablica I-3. Vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka

Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_0 - OP_2	7,6
OP_2 - OP_0	6,5
OP_0 - OP_3	7,1
OP_3 - OP_0	6,2
OP_2 - OP_3	6,9
OP_3 - OP_2	6,7
Ukupno	6,8

Ispitivanje horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava provedeno je na temelju usporedbe testnog područja trećeg (OP_2) i četvrtog (OP_3) cikličnog snimka (Slika I-39).



Slika I-39. Horizontalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_2 - OP_3 i b) OP_3 - OP_2

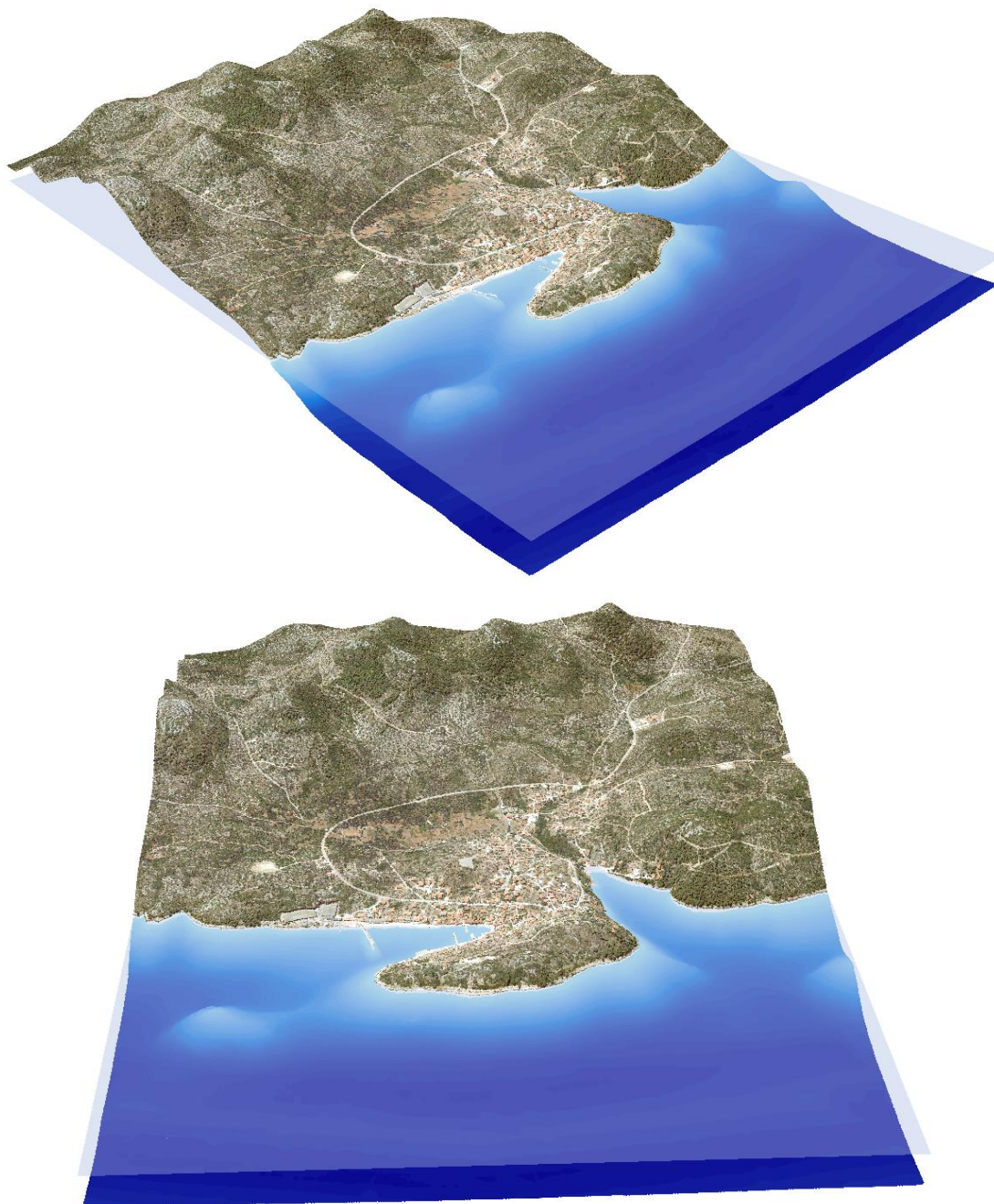
Srednja vrijednost standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava iznosi 11,8 cm (Tablica I-4).

Tablica I-4. *Vrijednosti standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka*

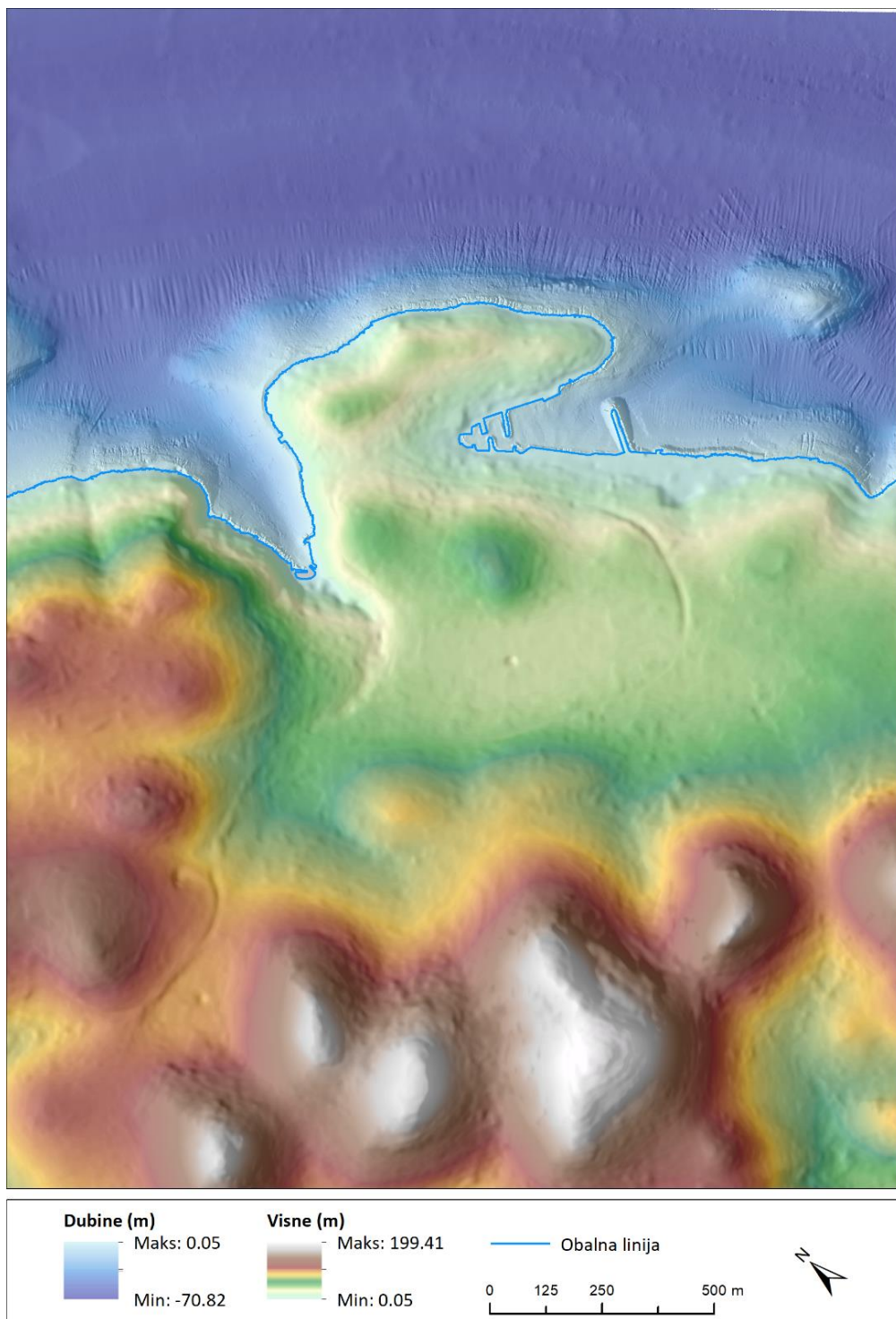
Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_2 - OP_3	12,4
OP_3 - OP_2	11,2
Ukupno	11,8

5.6. Integralni modeli uvala Sali i Saščica

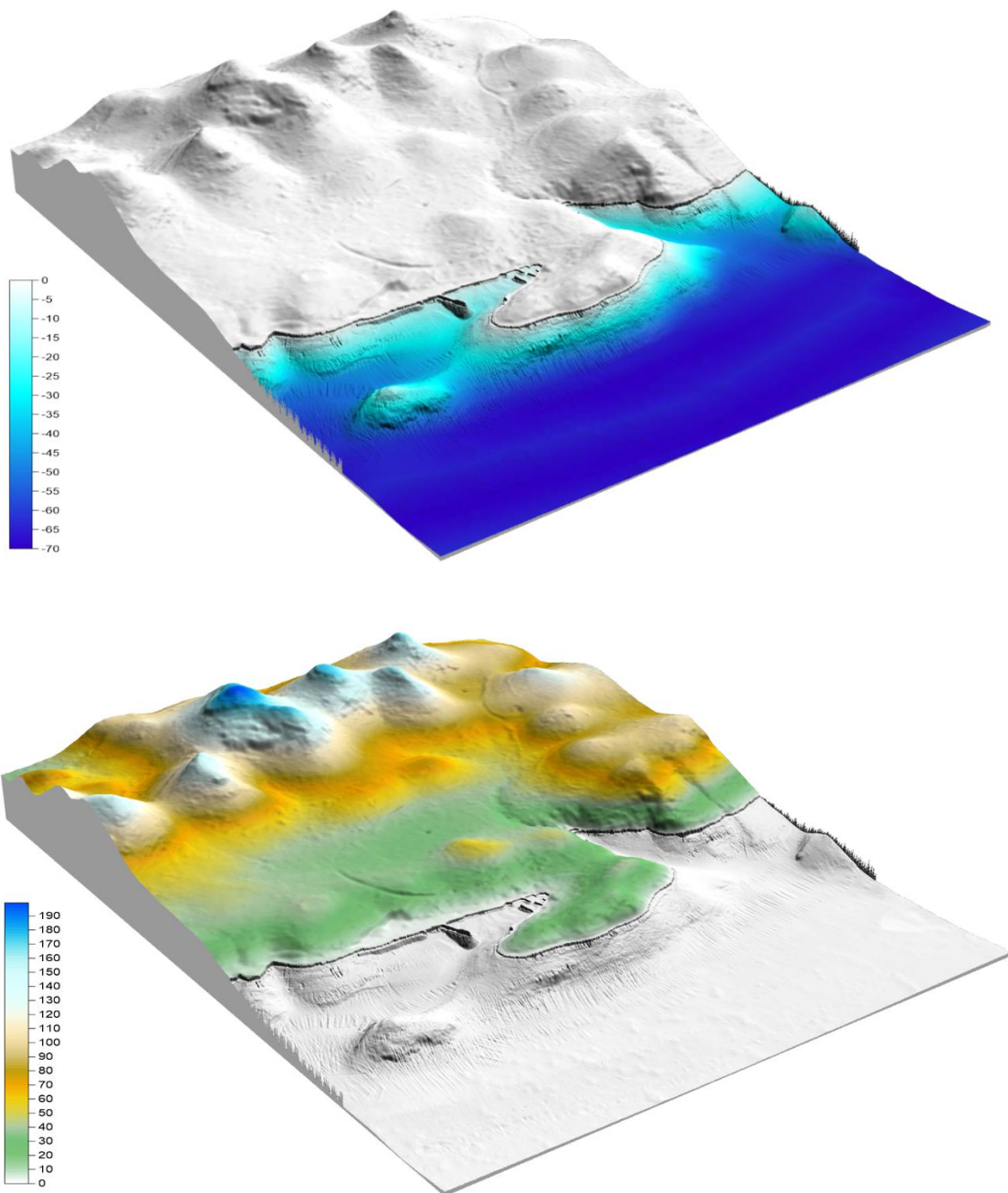
Generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -70,76 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom kojem maksimalna visina unutar topografskog bazena iznosi 199,41 m. Perspektivni blokovski prikazi (Slika I-40 i I-42) klasificirani su *Stretch* metodom klasifikacije koja je idealna za prikaz kontinuiranih vrijednosti piksela koji imaju veliki raspon vrijednosti.



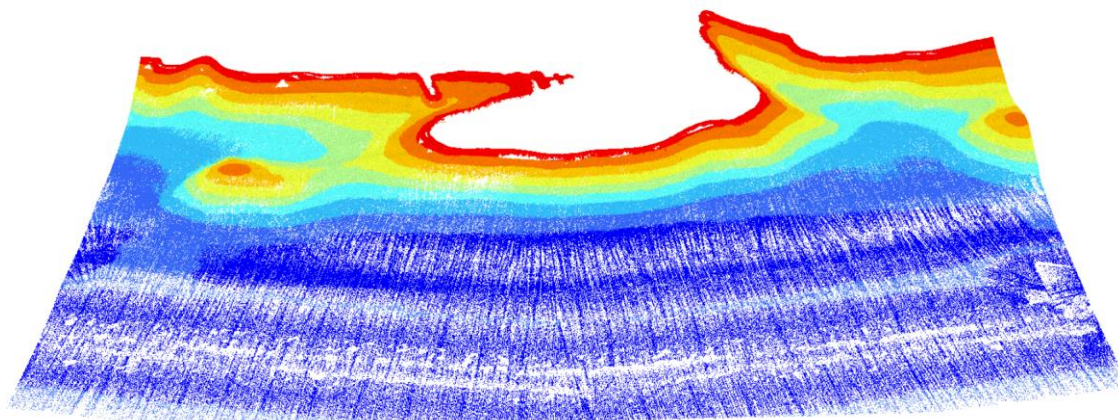
Slika I-40. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela uvala Sali i Sašćica



Slika I-41. Integralni model uvala Sali i Sašćica



Slika I-42. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela uvala Sali i Sašica



Slika I-43. Filtrirani gusti oblak točaka

5.7. Volumen, površina i duljina obalne linije uvale Sali i Sašćica

Iz generiranog digitalnog modela dubina izveden je podatak o volumenu uvala na dan snimanja od 107026794,05 m³, dok je volumen kopnenog dijela 277064304,75 m³.

Volumen uvala u odnosu na vodostaj na dan snimanja (0,05 m)

Lower Surface

Level Surface defined by $Z = 0$

Volumes

Z Scale Factor: 1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule:	170037510.69506
Simpson's Rule:	170037366.40394
Simpson's 3/8 Rule:	170037421.34965

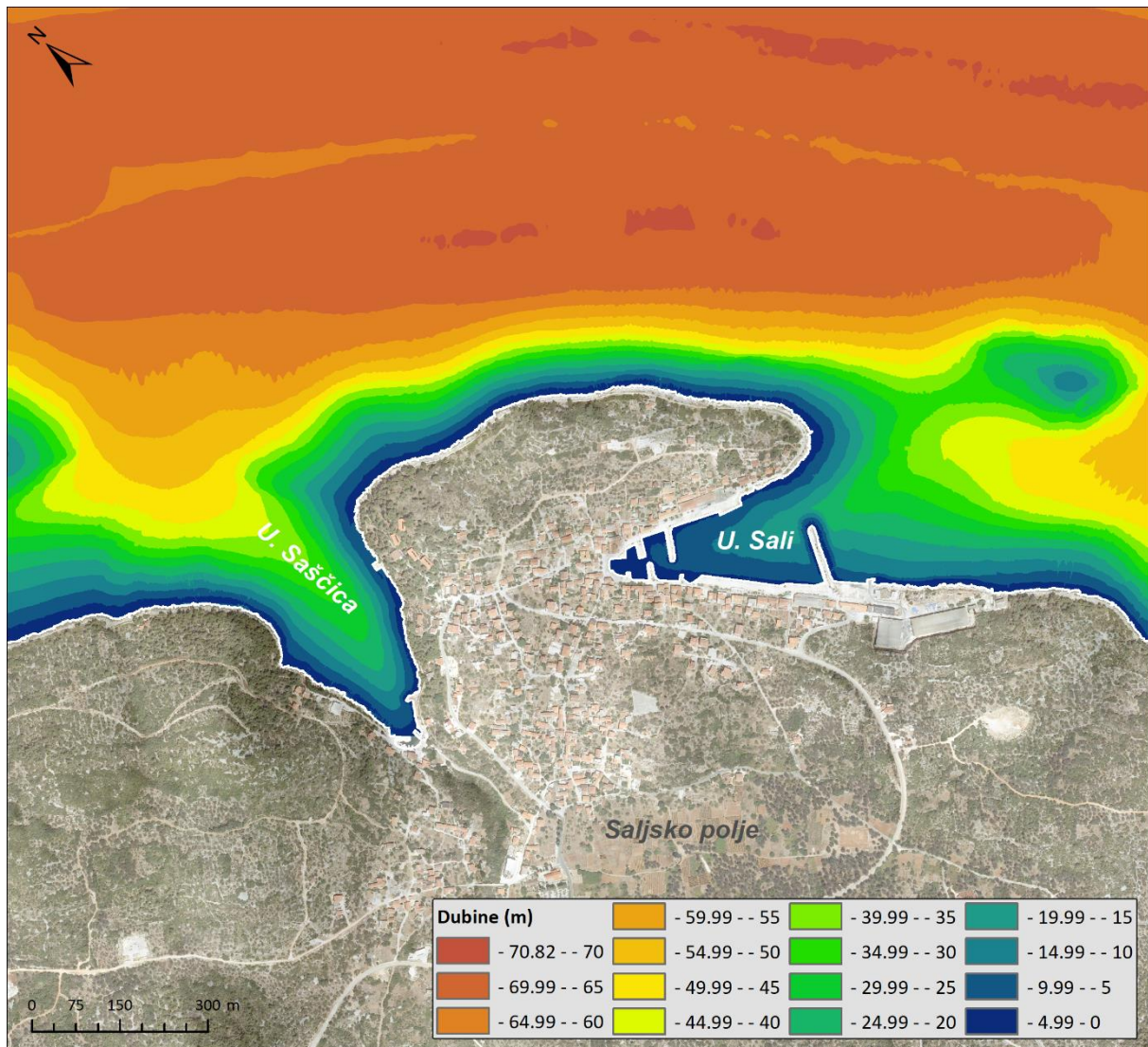
Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]:	277064304.75199
Negative Volume [Fill]:	107026794.05692
Net Volume [Cut-Fill]:	170037510.69508

Iz DEM-a usklađenog s DOF-om izvedeni su podaci o površini i duljini obalne linije na dan snimanja. Duljina obalne linije (Slika I-44) unutar područja istraživanja (topografski bazen) iznosi 5599,15 m.



Slika I-44. Obalna linija (crvena boja) unutar područja istraživanja (topografskog bazena uvala Sali i Sašćica)



Slika I-45. Batimetrijska karta uvala Sali i Saščica

II. AEROFOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE PRIOBALNOG POJASA



Aerofotogrametrijsko snimanje priobalnog pojasa

- a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm
- b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm
- c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u uvali
- d) obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Podaktivnosti:

- a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm;
- b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm;
- d) obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka su obavljene u prvom izvješću u razdoblju od 20. veljače do 30. travnja 2020. godine

Sažetak

Modeliranjem aerofotogrametrijskih snimaka izrađeni su modeli (Digitalni ortofoto snimak DOF, Digitalni model površina DMP, Digitalni model reljefa DMR i Normalizirani digitalni model površina nDMP šireg prostora prostorne rezolucije 0.292 m i prosječne pogreške u korištenim orijentacijskim točkama od 0.8 m.

Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto (DOF) prostorne rezolucije 5 cm izveden je na temelju zračnih snimaka koji su prikupljeni bespilotnom letjelicom Matrice 210 RTK.

Izrada digitalnog modela površina generirana je na temelju interpolacije 1,5 109 točaka unutar gustog oblaka točaka prostorne rezolucije 5 cm. Gustoća prikupljanja podataka je iznosila 270 točaka/m². Prilikom izrade DMP-a definirana je projekcija izrađenog modela, za koju je sukladno području istraživanja odabrana HTRS96 projekcija.

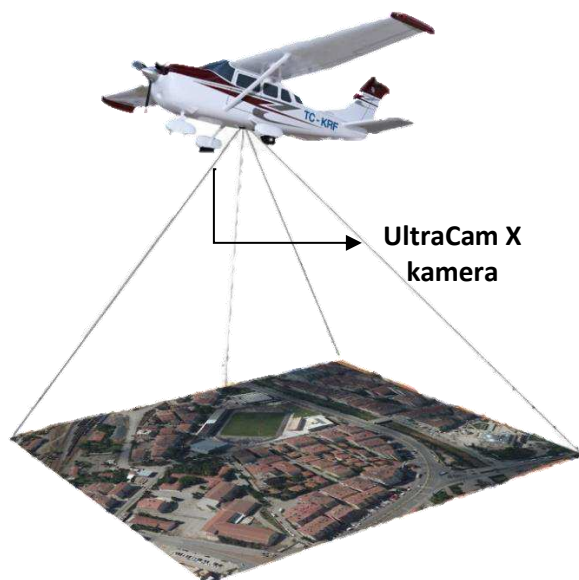
Generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -70,76 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom kojem maksimalna visina unutar topografskog bazena iznosi 199,41 m. Glavni cilj je generiranje predikcijskih modela kolebanja vodostaja (morske razine) u uvalama i izračuna potencijalnih negativnih utjecaja na okoliš

Izvedeni visokorezolucijski modeli (digitalni model površina - DMP, digitalni model reljefa - DMR te digitalnog ortofota - DOF) poslužili su kao osnovni predložak u generiranju primarnih i sekundarnih kriterija koji su korišteni u analizama rizika (požar, erozija).

Izrada model šireg prostora naselja Sali

Širi prostor naselja Sali obuhvaća sva slivna područja povezana s drenažnim bazenima uvala Sali i Sašćica. Izrada digitalnog modela reljefa (DMR) i digitalnog ortofoto snimka (DOF) vrlo visoke rezolucije šireg prostora naselja Sali omogućava proučavanje hidroloških procesa i potencijalnih kopnenih izvora onečišćenja unutar čitavog površinskog hidrološkog sustava navedenih uvala. Modeli šireg prostora izrađeni su na temelju dostupnih aerofotogrametrijskih podataka Državne geodetske uprave (DGU).

Aerofotogrametrijski snimci DGU nastaju u sklopu sustavnih zračnih snimanja cijelog teritorija Republike Hrvatske, koja se provode periodički svakih nekoliko godina. Od 2009. godine aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave nastaju periodičkim zračnim snimanjima s digitalnom kamerom pričvršćenom na žiroskopski stabilizirana postolja, fiksirana iznad otvora u dnu zrakoplova (Slika II-1.) (DGU, 2018).



Slika II-1. Princip prikupljanja aerofotogrametrijskih podataka uz pomoć digitalne kamere fiksirane na dnu zrakoplova

Aerofotogrametrijsko snimanje prostora Dugog otoka je za potrebe DGU izvršila firma Geofoto d.o.o. sa zrakoplovom opremljenim UltraCam X digitalnom kamerom (S/N: UCX-SX-1-40410410), razvijenom od strane austrijske firme *VexellmagingGmbH* (Landeka i Vilus, 2012.). Digitalna kamera UltraCam X istovremeno prikuplja pankromatski snimak, vidljivi dio spektra (crvena-zelena-plava (RGB) te blisko infracrveni spektar (NearInfraRed – NIR) u vrlo visokoj prostornoj rezoluciji (DGU, 2018.). Pri tome četiri središnja senzora prikupljaju pankromatski snimak, dok preostala (okolna) četiri senzora prikupljaju

multispektralne kanale (Slika II-2.) (Gruber i dr., 2008). Detaljne specifikacije pankromatskog i multispektralnog snimka prikupljenog UltraCam X digitalnom kamerom dan je u tablici II-1.



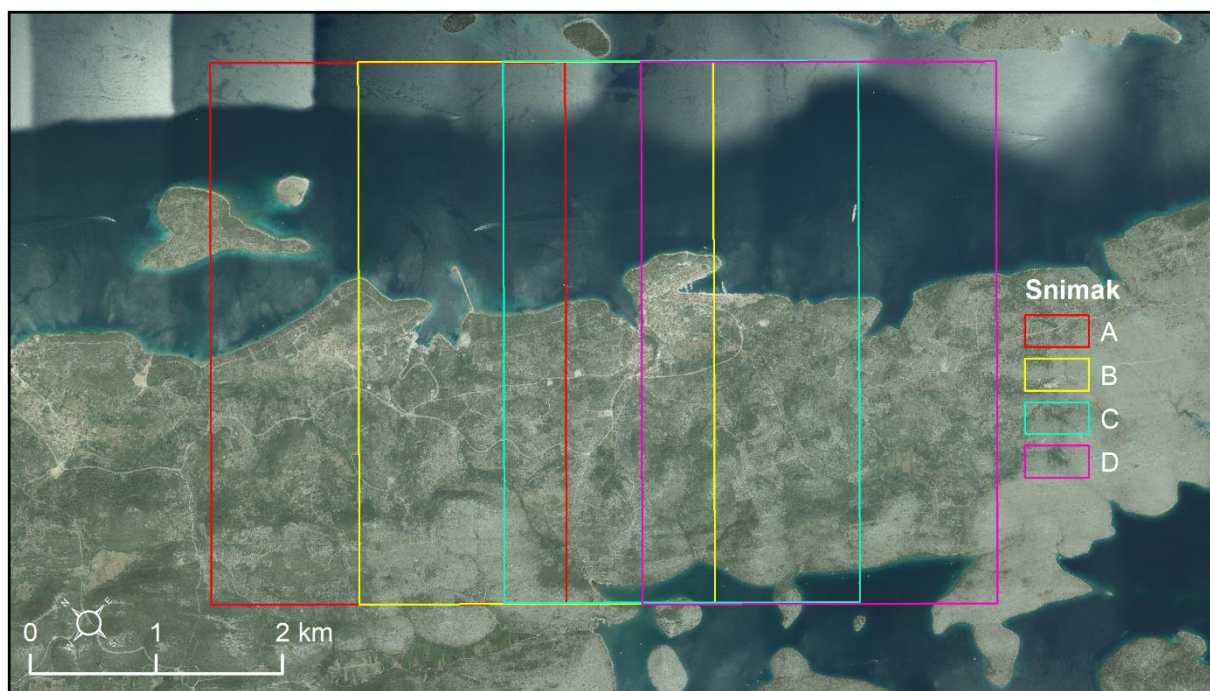
Slika II-2. Izgled i raspored senzora UltraCam X digitalne kamere (lijevo); UltraCam X kamera postavljena unutar zrakoplova (desno)

Tablica II-1. Tehničke specifikacije UltraCam X digitalne kamere (Tonković, 2006; Vexcellmaging, 2011)

Pankromatski kanal	
Veličina pojedinog snimka (pix)	14430 x 9420
Veličina pojedinog snimka (mm)	103.896 x 67.824
Veličina piksela	7.2 μm
Žarišna duljina	100.500
Otvor leće pankromatskog objektiva	f = 1/5.6
Multispektralni kanal	
Spektralni kanali	crveni (R), zeleni (G), plavi (B), blisko infracrveni (NIR)
Veličina pojedinog snimka (pix)	4810 x 3140
Veličina pojedinog snimka (mm)	103.896 x 67.824
Veličina piksela	21.6 μm
Žarišna duljina	100.500
Otvor leće multispektralnog objektiva	f = 1/4.0
Generalne značajke kamere	
Težina	55 kg

Dimenzije kamere (cm)	45x45x60
Prostorna rezolucija (GSD) pri visini leta od 500 m (od 300m)	3.6 cm (2.2 cm)
Minimalni interval između fotografija	1.35 sekunde
Radiometrijska rezolucija u svakom kanalu	12 bit
Potrošnja energije pri punim performansama	150 W

Širi prostor naselja Sali reprezentiran je s ukupno 4 aerofotogrametrijska snimka, koja su za potrebe ovog projekta ustupljena od strane firme *Teodolit d.o.o.* iz Zadra. Prostorni obuhvat ustupljenih aerofotogrametrijskih podataka vidljiv je na slici II-3, a obuhvaća čak i znatno veće područje od područja potrebnog za provedbu analiza na širem prostoru naselja Sali. Visina leta prilikom prikupljanja aerofotogrametrijskih snimaka bila je oko 4.5 km, iz čega proizlazi prostorna rezolucija izrađenih modela od oko 0.29 m.



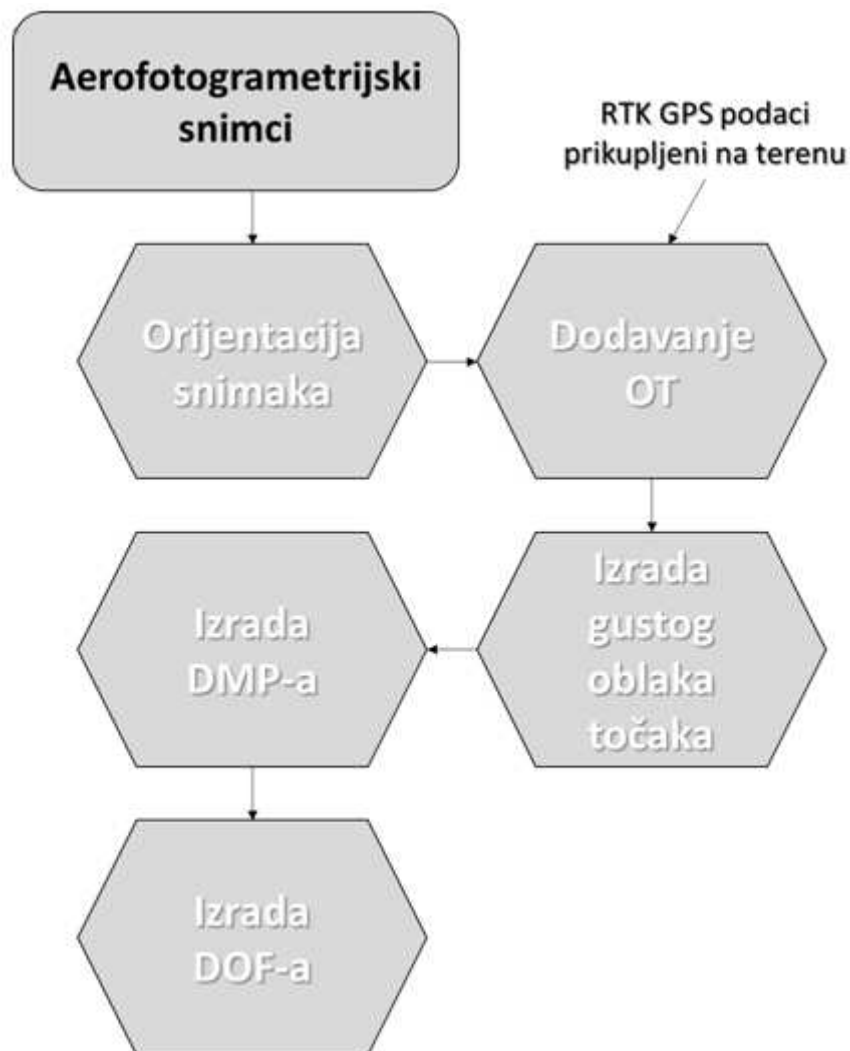
Slika II-3. Prostorni obuhvat ustupljena četiri aerofotogrametrijska snimka prikupljena 2011. godine s *UltraCam X* digitalnom multispektralnom kamerom

Modeliranje aerofotogrametrijskih podataka

Obrada aerofotogrametrijskih snimaka napravljena je u Agisoft Metashape 1.5.1. softveru, trenutno jednom od najnaprednijih softvera za obradu fotogrametrijskih snimaka. Zahvaljujući implementiranim *structure-from-motion* (SfM) i *multi-view* algoritmima Agisoft omogućava 3D modeliranje, zasnovano na rekonstrukciju 3D struktura iz preklapljenih 2D snimaka (Mancini i dr., 2013; Agisoft, 2020.). SfM algoritam omogućava automatsko preklapanje i uparivanje prikupljenih 2D snimaka, na temelju čijih piksela se vrši rekonstrukcija geometrije prikaza i izrada 3D oblaka točaka (James i Robson, 2012; Westboy i dr., 2012; Mancini i dr., 2013; Shervais, 2017.).

Pri tome izrada oblaka točaka i DMP-a u Agisoft Metashape softveru predstavlja polu-automatizirani proces, koji uključuje sljedećih pet faza:

- orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1)
- dodavanje kontrolnih točaka (2)
- izrada gustog oblaka točaka (3)
- izrada digitalnog modela površina (4)
- izrada digitalnog ortofoto snimka (5) (Slika II-4.)



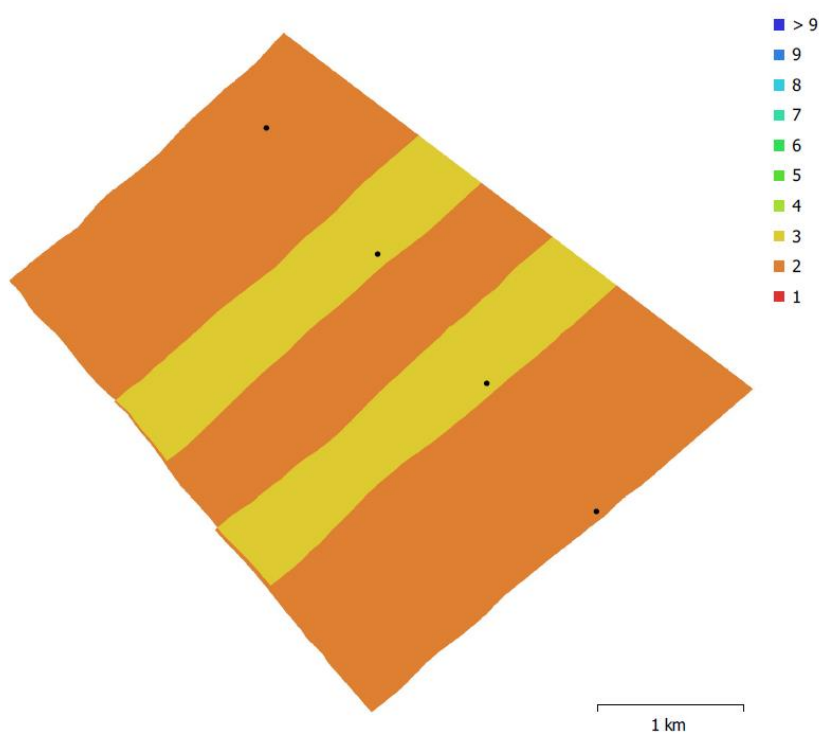
Slika II-4. Faze izrade DMP-a i DOF-a u Agisoft Metashape softveru

Detaljan prikaz svih koraka i odabranih korisničko definiranih parametara primijenjenih za izradu modela šireg prostora naselja Sali dan je u tablici II-3, dok se pojašnjenje glavnih pet faza izrade modela nalazi u nastavku.

Orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1) – prva faza procesa izrade modela iz prikupljenih aerofotogrametrijskih snimaka obuhvaća orijentaciju i povezivanje prikupljenih snimaka (engl. *AlignPhotos*).

Agisoft Metashape automatski za svaki prikupljeni snimak prepoznaje vezne piksele, uz pomoć kojih međusobno povezuje i orijentira zadane snimke i izrađuje rijetki oblak točaka (engl. *sparsepointcloud*)

(Agisoft, 2020.). Pri tome korisnik definira varijablu *accuracy*, koja se odnosi na ukupan broj piksela slike koje će softver koristiti za orijentaciju i povezivanje zadanih snimaka. S obzirom da o ovoj fazi ovise sljedeći koraci procesa izrade modela, ali i vrijeme potrebno za obradu snimaka, poželjno je sukladno mogućnostima postaviti što višu razinu varijable *accuracy*. Radi postizanja što točnije orijentacije snimaka prilikom izrade svih modela u AgisoftMetashapeu korištena je *highest* vrijednost varijable *accuracy*, dok je za vrijednost parametara *keypoint limit* i *tiepoint limit* zadana maksimalna vrijednost ($n = 0$). Preklapanje između četiri zadana aerofotogrametrijska snimka vidljivo je na slici II-5.



Slika II-5. Preklapanje između četiri orijentirana aerofotogrametrijska snimka za širi prostor naselja Sali

Dodavanje orijentacijskih točaka (2) – da bi se postigla apsolutna orijentacija rekonstruiranog modela potrebno je georeferencirati izrađeni oblak točaka prema orijentacijskih točaka (OT), čije su precizne xyz koordinate prikupljene na terenu, korištenjem geodetskog RTK-GPS uređaja (James i dr., 2017.). Prije terenskog prikupljanja odabrane su optimalne lokacije za OT, koje pretežito čine različite specifične lokacije, vidljive na aerofotogrametrijskim snimcima snimljenim 2011. godine. Specifične oznake

predstavljaju različite objekte i elemente krajolika koje je moguće jednostavno i precizno izdvojiti u prostoru, a vidljivi su i prepoznatljivi na ustupljenim aerofotogrametrijskim snimcima prikupljenim UltraCam X digitalnom multispektralnom kamerom. Uglavnom su kao prepoznatljive specifične oznake korišteni različiti antropogeni elementi krajolika (npr. cestovne oznake, ribarski molovi, kontrasti u asfaltu, itd.) koje je bilo moguće detektirati na aerofotogrametrijskim snimcima te kasnije pronaći i prikupiti precizne XYZ koordinate na terenu.

Terensko prikupljanje OT izvršeno je u sklopu terenskih istraživanja izvršenih 25. veljače 2020. godine. Koordinate OT su prikupljene sa Stonex S10 RTK GPS-om, pri čemu su ukupno prikupljene precizne XYZ koordinate na devet različitih lokacija, raspodijeljenih unutar cijelog prostora šireg područja naselja Sali (Slika II-6). S obzirom da se aerofotogrametrijski snimci preklapaju, pojedine OT su vidljive na nekoliko snimaka. Pogreška u OT korištenim za apsolutnu orijentaciju izrađenih modela šireg područja dana je u tablici II-2. Prosječna pogreška u devet OT iznosi **80.6 cm**. Ako se u obzir uzme prostorna rezolucija aerofotogrametrijskih snimaka te svrha modela, takva točnost izrađenih modela zadovoljava potrebe analiza za koje će se izrađeni modeli koristiti.

Tablica II-2. Pogreška u orijentacijskim točkama korištenim za izradu modela šireg područja

ID	Naziv OT	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)
OT1	15.411	-10.4157	-29.9674	35.2708
OT2	-28.0125	75.0419	-63.6737	102.325
OT3	-94.1635	3.55379	48.6314	106.04
OT4	29.9884	10.3094	-103.424	108.177
OT5	78.6814	-69.9428	-18.3057	106.854
OT6	6.55474	30.9592	-2.57083	31.7498
OT7	-2.19373	-9.74468	33.3806	34.843
OT8	8.08104	25.0223	49.4727	56.0265
OT9	-7.48853	-11.6142	83.4783	84.6144
Total	43.6504	37.3648	56.6531	80.6911

Izrada gustog oblaka točaka (3) – nakon dodavanja OT i optimizacije modela slijedi izrada gustog oblaka točaka (*builddensecloud*). Unutar ove faze program automatski iz ranije orijentiranih snimaka izračunava dubinske informacije za svaki orijentirani snimak te izrađuje jedinstveni oblak točaka, čija gustoća ovisi o korisničko definiranoj varijabli *quality* zadanom načinu dubinskog filtriranja (engl. *depthfiltering*) (Agisoft, 2020.). Varijabla *quality* određuje udio piksela orijentiranih snimaka koji će biti korišten za izradu gustog oblaka točaka, pri čemu opcija *ultrahighz* za svaki piksel orijentiranih snimaka izrađuje jednu točku, dok kod ostalih opcija broj piksela za koje se izrađuju točke postupno opada. Kao i kod *orijentacije snimaka*, radi izrade modela maksimalne točnosti poželjno je odabrati što veću razinu varijable *quality*,

što opet ovisi o raspoloživom vremenu procesiranja te tehničkim specifikacijama radne stanice na kojoj se vrši procesiranje podataka.

Prilikom izrade modela u Agisoft Metashape softveru korištena je *ultrahigh* opcija varijable *quality* te *agressive* način dubinskog filtriranja. Zahvaljujući odabranom *ultrahigh* parametru izrađen je gusti oblak maksimalne gustoće, s ukupno 144 133 272 točaka.

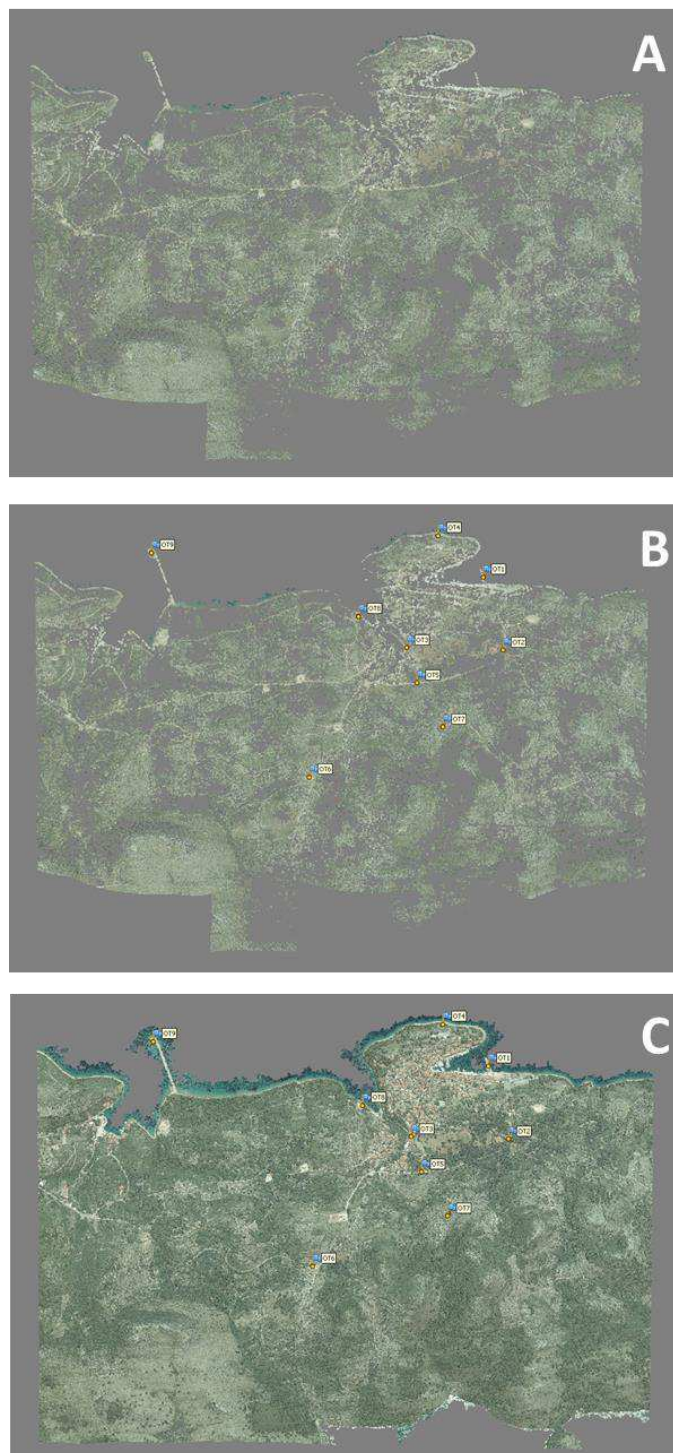
Izrada digitalnog modela površina (4) – nakon izrade gustog oblaka točaka, slijedi izrada digitalnog modela površina. U ovoj fazi Agisoft Metashape softver na temelju interpolacije 144 133 272 točke iz gustog oblaka točaka generira DMP prostorne rezolucije 0.292153 m. Prilikom izrade DMP-a definirana je projekcija izrađenog modela, za koju je sukladno području istraživanja odabrana HTRS96 projekcija.

Izrada digitalnog ortofoto snimka (5) – posljednja faza procesa izrade DMP-a iz aerofotogrametrijskih snimaka u Agisoft Metashape softveru obuhvaća izradu digitalnog ortofoto snimka (engl. *buildorthomosaic*) (Agisoft, 2020.). U ovom koraku softver na temelju ranijeg generiranog digitalnog modela površina iz orijentiranih aerofotogrametrijskih snimaka generira ortofoto snimak. Na temelju izrađenog DMP-a i oblaka točaka napravljen je digitalni ortofoto snimak prostorne rezolucije 0.292153 m, koji sadrži tri vidljiva kanala (RGB). Kao i kod izrade DMP-a u prethodnom koraku, prilikom izrade DOF-a odabrana je HTRS96 projekcija.

Tablica II-3. Pregled korisničko definiranih parametara korištenih pri izradi DMP-a šireg prostora naselja Sali u AgisoftPhotoScan Professional programu

#	Korak	Korisničko-definirani parametar	Odabrana opcija
1	Orijentacija snimaka	Accuracy	Highest
		Pairselection	Reference
		Keypoint limit	0
		Tiepoint limit	0
2	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	ReprojectionError	Uklanjanje 10 % točaka
		ReconstructionUncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projectionaccuracy	Uklanjanje 10 % točaka
3	Optimizacija oblaka točaka	Optimizationparameters	Svi parametri
4	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	UltraHigh
		Depthfiltering	Agressive
5	Generiranje 3D mreže poligona	Surfacetype	Heightfield
		Face count	High
		Interpolation	Enabled
6	Dodavanje OT	Orijentacijske točke dodane (OT)	

7	Optimizacija oblaka točaka	Optimizationparameters	Svi parametri
8	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	ReprojectionError	Uklanjanje 10 % točaka
		ReconstructionUncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projectionaccuracy	Uklanjanje 10 % točaka
9	Optimizacija oblaka točaka	Optimizationparameters	Svi parametri
10	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	UltraHigh
		Depthfiltering	Agressive
11	Generiranje 3D mreže poligona	Surfacetype	Heightfield
		Face count	10000000
		Interpolation	Enabled
12	Izrada teksture modela	Mapping mode	Generic
		Blending mode	Mosaic
		Texturesize	8096
		Colorcorrection	Enabled
13	Izrada DMP-a	Coordinate system	HTRS96
		Source data	Densecloud
		Interpolation	Enabled
		Pointclasses	All
14	Izrada ortofoto snimka	Surface mode	DEM
		Blending mode	Mosaic



Slika II-6. Prikaz odabranih faza izrade DMP u Agisoft Metashape softveru
(A – orijentacija snimaka; B – dodane OT; C – izrada gustog oblaka točaka)

Izrada digitalnog modela reljefa (DMR)

Za razliku od digitalnog modela reljefa (DMR), koji reprezentira visinu površine reljefa, izrađeni DMP reprezentira visinu svih prirodnih (npr. vegetacija) i antropogenih (npr. stambeni objekti, prometnice, industrijska postrojenja, itd.) površina, koje se nalaze na površini reljefa (Šiljeg, 2013). Za različite hidrološke i morfometrijske analize, koje će se provoditi u sklopu modeliranja erozije tla i poplavnog potencijala unutar šireg prostora naselja Sali, bitne su isključivo značajke površine reljefa. Zbog toga zadnji korak izrade konačnog modela šireg prostora obuhvaća generiranje digitalnog modela reljefa (DMR) šireg prostora naselja Sali, kroz korekciju i filtraciju izrađenog DMP-a.

Proces filtriranja DMP-a i izrade DMR-a može se podijeliti na *automatsku korekciju DMP-a u DMR* (1), *korekciju pogrešaka na vodenim površinama* (2) i *ručno filtriranje preostalih pogrešaka* (3). Automatska i ručna filtracija DMP-a i izrada DMR-a izvršeni su uz pomoć Geomatica 2018 softvera, dok je korekcija pogrešaka na vodenim površinama izvršena u *ArcGIS 10.1 softveru*.

Automatska konverzija DMP-a u DMR (1)

Prvi korak izrade DMR-a je automatska korekcija DMP-a u DMR, kojom se iz zadanog DMP-a automatski uklanja većina površina koje ne reprezentiraju površinu reljefa. Automatska korekcija DMP-a u DMR je unutar Geomatica 2018 softvera izvršena uz pomoć *DSM2DTM* algoritma, koji omogućava automatsku filtraciju DMP-a prema zadanim korisničko-definiranim parametrima. *DSM2DTM* algoritam automatski konvertira DMP u DMR primjenom niza filtracijskih koraka koji postupno uklanjaju antropogene i prirodne elemente te uglašavaju konačni model uklanjanjem preostalih nepravilnosti, poput udubljenja i ispupčenja, koje ne reprezentiraju površinu reljefa.

Korisnik može kontrolirati proces konvertiranja DMP-a u DMR kroz definiranje različitih korisničko-definiranih parametara za svaki filter (npr. size – veličina, gradient – nagib, itd.). S obzirom da korisničko-definirani parametri *DSM2DTM* algoritma uvjetuju uspješnost automatske filtracije, potrebno ih je prilagoditi lokalnim značajkama reljefa odabranog područja. Detaljan prikaz odabranih korisničko-definiranih parametara dan je u tablici II-4., dok je svaki pojedini parametar detaljnije pojašnjen u nastavku.

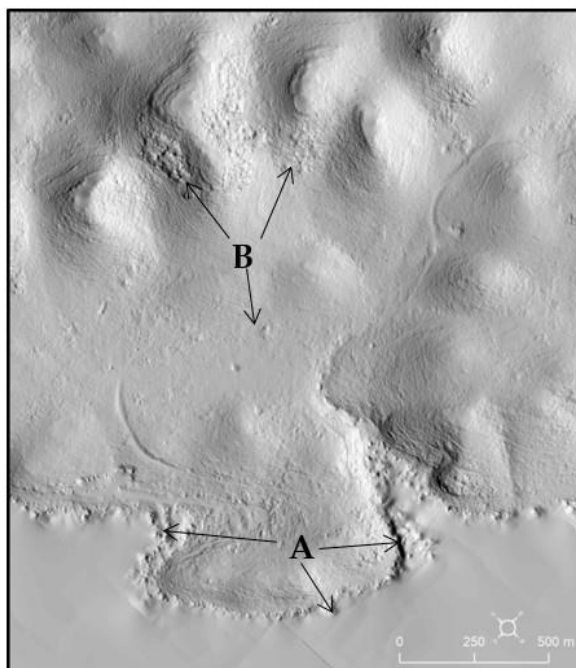
Tablica II-4. Parametri automatske filtracije DMP-a uz pomoć DSM2DTM algoritma

Parametar	Zadana vrijednost	Opis
Elevation failure value	0	Definira piksele u DMP-u koji će se zanemariti tijekom obrade i biti interpolirani.
Back ground elevation value	0	Definira vrijednost piksela bez podataka (No Data), koji će biti izuzeti tijekom obrade i kopirani u završni DMR.
Object removal dimension units	Geocoded	Definira mjernu jedinicu za parametar objectsize (m ili pix).
Object size	25	Veličina filtera koji se koristi za uklanjanje površina.
Gradient treshold	55	Značajke s nagibima manjim od ovog praga smatrat će se prirodnim značajkama i neće se uklanjati tijekom obrade.
Terrain type	Hilly	Određuje prevladavajući tip reljefa reprezentiranog na zadanom modelu.
Bump filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje filtere za uklanjanje izbočina preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih velikih značajki.
Pits filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje uklanjanje udubljenja preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih značajki.
Median filter: <i>size (pixels)</i>	3	Definira intenzitet uglačavanja konačnog modela.
Clamp filter: <i>size, gradient</i>	5, 3	Fino uglačavanje - korigira sve piksele unutar zadanog područja do vrijednosti manje od prostorne rezolucije modela.

Iako širi prostor naselja Sali pretežito karakteriziraju blage uzvisine i padine, pojedine dijelove, poput jaruge koja se spušta u uvalu Sašćica te strmijih, vršnih dijelova Velikog i Malog Berčastca, karakterizira znatno veća vertikalna raščlanjenost terena. Zbog toga je bilo potrebno korisničko-definirane parametre korekcije DMP-a u DMR podesiti na način da uklone sve neželjene površine, a da pri tome ne devalviraju kvalitetu modela na vertikalno raščlanjenijim dijelovima reljefa.

Dva najvažnija korisničko-definirana parametra DSM2DTM algoritma su *veličina objekta (objectsize)* i *prag nagiba (gradienttreshold)*. Veličina objekta definira dimenzije površina koje će biti uklonjene iz zadanog DMP-a, gdje se preporučujeda zadana vrijednost odgovara dimenzijama najvećih objekata (npr. zgrade, industrijska postrojenja), koje se želi ukloniti. Međutim, tako definirani parametar veličine objekta može utjecati na previše intenzivno filtriranje stvarne površine reljefa. U takvim slučajevima treba smanjiti vrijednost ovog parametra i prilagoditi ju prevladavajućoj veličini objekata koje se želi ukloniti. Na području naselja Sali najveći objekti su u sklopu tvornice ribljih konzervi Mardešić, koji dimenzijama znatno nadilazi ostale objekte u naselju. Ukoliko se parametar veličine objekta prilagodi dimenzijama tvornice, dolazi do prenaplašene filtracije stvarnog reljefa, posebice na prostoru ogoljenih reljefnih uzvišenja. Zbog toga je vrijednost ovog parametra značajno smanjena ($n = 25$).

Drugi parametar je prag nagiba, koji definira vrijednost nagiba ispod koje se sve padine smatraju prirodnima, te se kao takve izostavljaju iz procesa korekcije i filtracije. Kako bi se uklonili antropogeni objekti sa strmim, vertikalnim bočnim stranama, poput stambenih i industrijskih objekata, a sačuvala većina prirodnih padina, zadan je odgovarajući prag nagiba ($n = 55$). S obzirom da na širem prostoru naselja Sali prevladavaju blage padine, ali i da maksimalna nadmorska visina područja neznatno prelazi 200 m, zadan je *hilly* prevladavajući tip reljefa. Filterima za uklanjanje preostalih nepravilnosti (*bump filter* i *pits filter*) i filteri za završno ugačavanje modela (*median filter* i *clamp filter*) zadane su odgovarajuće vrijednosti za iterativno uklanjanje nepravilnosti, od većih prema manjima. U konačnici je izrađen digitalni model reljefa, kojega je bilo potrebno dodatno popraviti kroz ručnu filtraciju (Slika II-7.). Najviše pogrešaka prisutno je na vodenim površinama, odnosno prostoru mora, te na mjestima uklonjenih većih objekata. Navedene pogreške uklonjene su u sljedeća dva koraka.



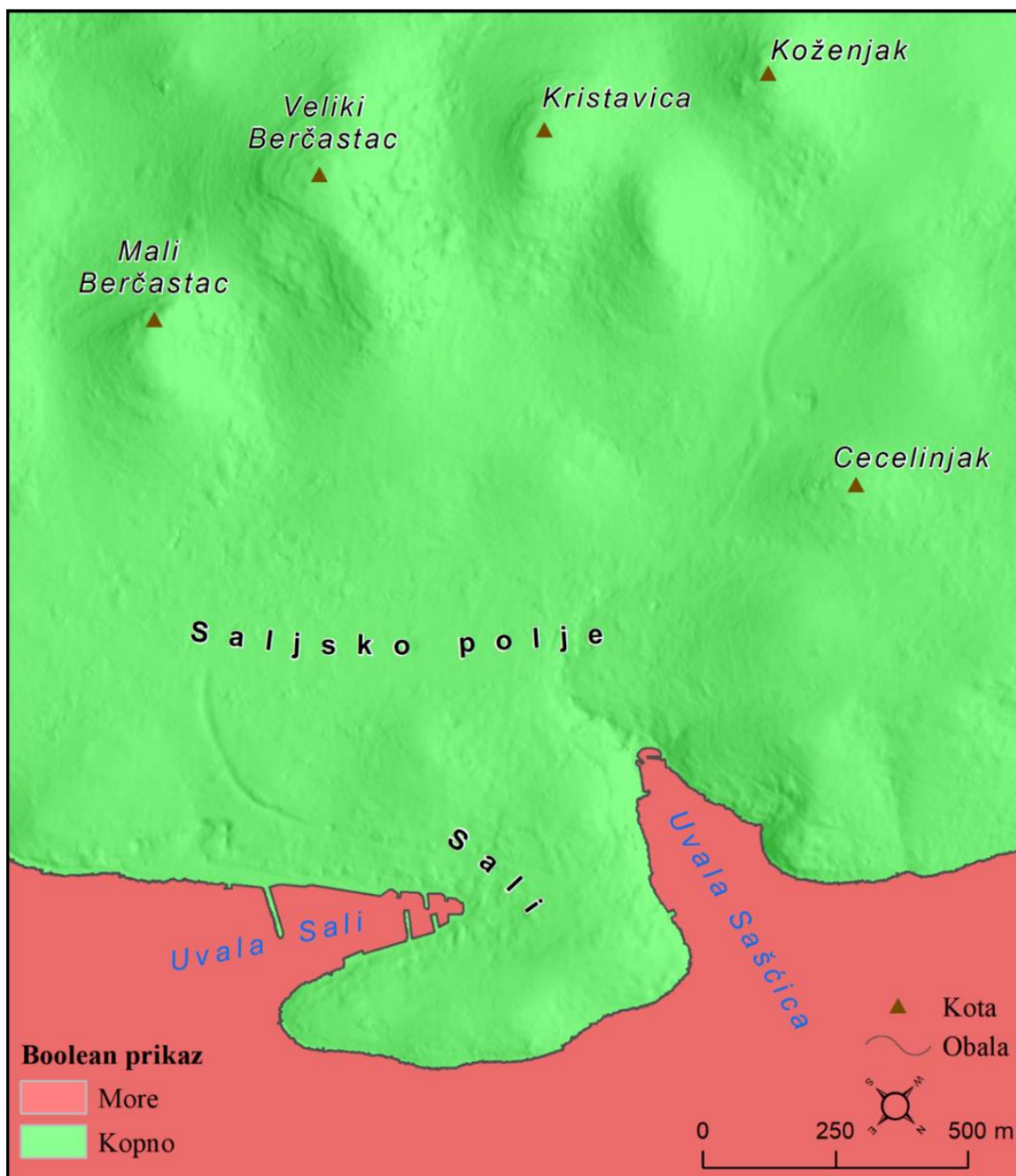
Slika II-7. DMR izrađen DSM2DTM algoritmom (A - pogreške na vodenim površinama; B - pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije i antropogenih objekata)

Filtracija pogrešaka na vodenim površinama (2)

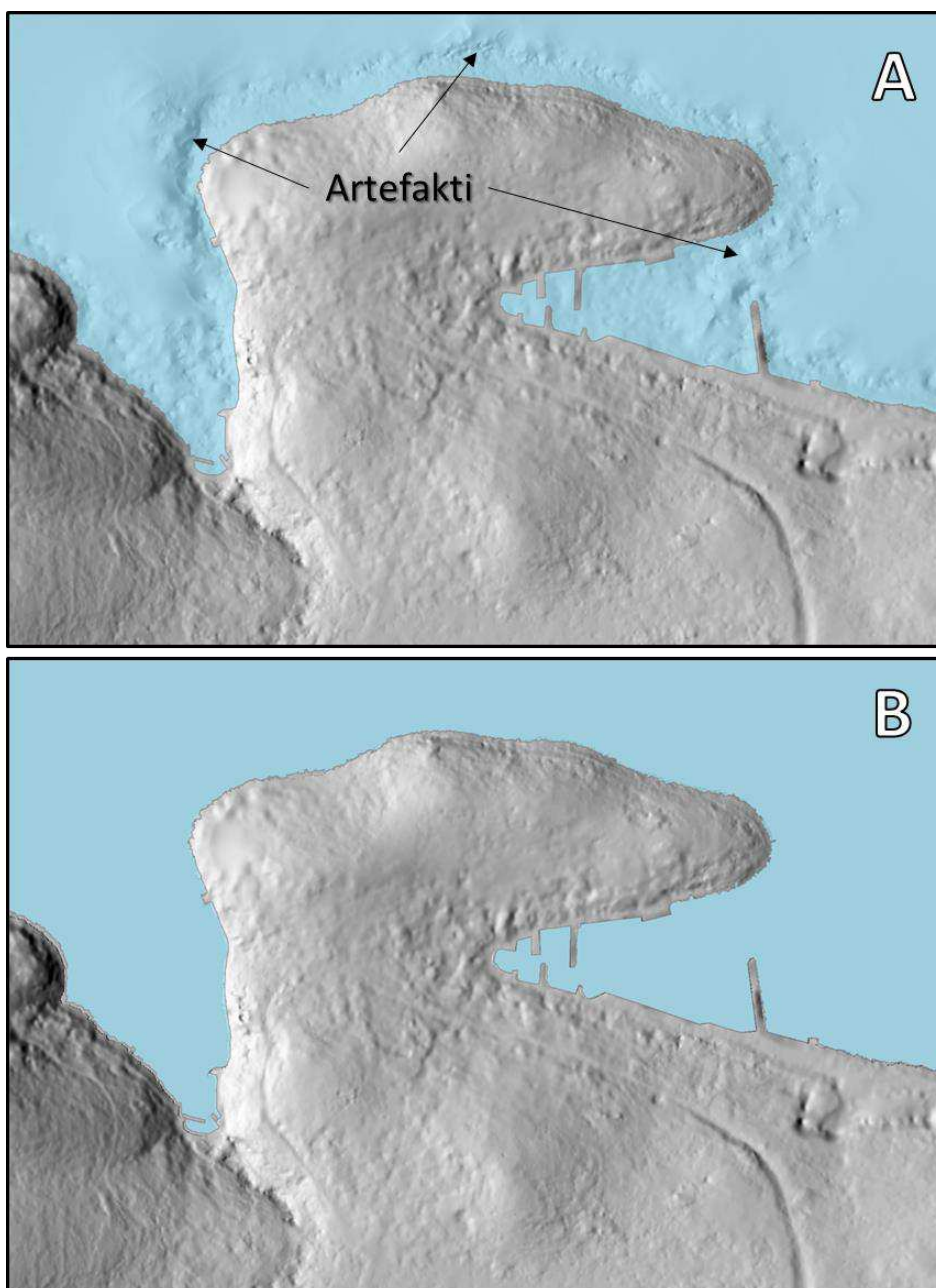
Nakon automatske konverzije DMP-a u DMR bilo je potrebno ručnom filtracijom ukloniti sve preostale pogreške, koje su proizašle iz procesa automatske filtracije. Pogreške u izrađenom modelu prvenstveno su se javljale na prostorima prekrivenim vodenim površinama (npr. more), gdje zbog jednoličnosti površine softver nije mogao provesti korelaciju i povezivanje pikselaaerofotogrametrijskih snimaka. Pojava artefakata i pogrešaka nad vodenim površinama karakteristična je za izradu DMP-a i DMR-a iz aerofotogrametrijskih snimaka, zbog čega je filtriranje vodenih površina dio standardnog procesa post-obrade modela (Poli i Caravaggi, 2012.). Da bi se napravilo uklanjanje pogrešaka u modelu nad prostorima prekrivenim vodenim površinama

(Slika II-9.A), bilo je potrebno napraviti Boolean rasterski prikaz svih vodenih površina unutar područja istraživanja. S obzirom da detaljnost dostupnih podataka o vodenim površinama (npr. OpenStreetMap, DGU, itd.) nije bila dovoljna za filtriranje izrađenog DMP-a visoke rezolucije, sve vodene površine su izdvojene iz nenadziranom izrađenog DOF-a korištenjem nenadzirane klasifikacije.

Kroz nenadziranu klasifikaciju izdvojene su sve klase koje predstavljaju vodene površine, kojima je zatim kroz reklasifikaciju dodijeljena vrijednost 0 (Slika II-8.). Svim ostalim klasama, koje predstavljaju kopneni dio područja istraživanja dodijeljena je vrijednost 1. Spajanjem izrađenog Boolean prikaza vodenih površina s generiranim DMR-om napravljen je model s uklonjenim artefaktima i pogreškama na područjima prekrivenim vodenim površinama (Slika II-9. B).



Slika II-8. Izrađeni boolean prikaz mora i kopna (1 = kopno; 0 = more)



Slika II-9. Korekcija pogrešaka u izrađenom DMR-u na vodenim površinama
(A – nefiltrirani DMR s artefaktima na prostoru mora;
B – filtrirani DMR s uklonjenim artefaktima na prostoru mora)

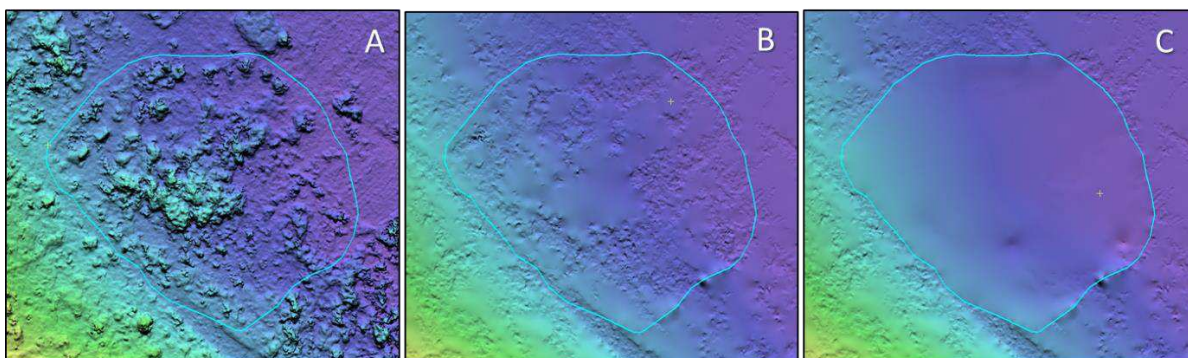
Ručna filtracija preostalih pogrešaka (3)

Usljedilo je ručno uklanjanje pogrešaka preostalih nakon automatske korekcije DMP-a u DMR. Za razliku od artefakata na vodenim površinama, koji obuhvaćaju kontinuirane dijelove modela, pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije i antropogenih objekata predstavljaju pojedinačne, prostorno heterogene pogreške, koje nije moguće automatski ukloniti. Zbog toga je primijenjeno ručno uklanjanje pogrešaka uz pomoć filtera za korekciju DMR-a iz *DEM Editing* ekstenzije Geomatica 2018 softvera (Tablica II-5.).

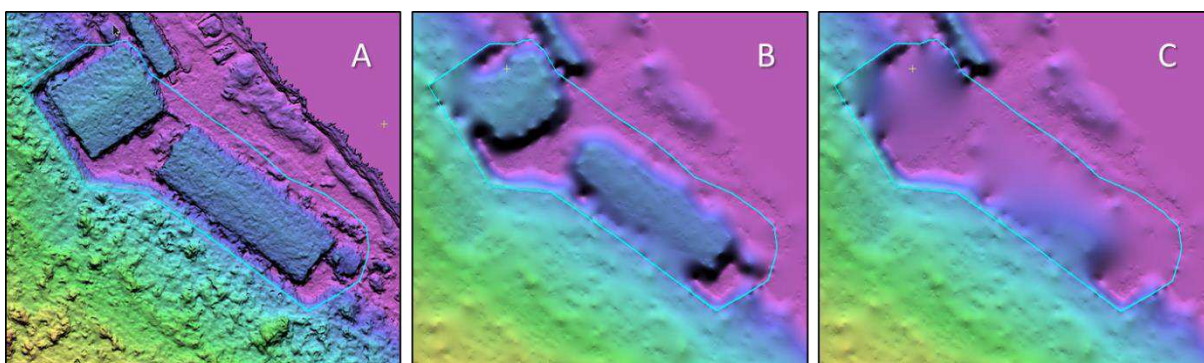
Tablica II-5. Filteri korišteni za ručnu korekciju izrađenog DMR-a

#	Filter	Primjena filtera
1	<i>Remove bumps</i>	Uklanjanje izbočina preostalih nakon korekcije DMP-a
2	<i>Remove bumps (keep linear)</i>	Uklanjanje nelinearnih izbočina
3	<i>Remove pits</i>	Uklanjanje udubljenja (rupa)
4	<i>Terrain (flat)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na zaravnjenim područjima
5	<i>Terrain (hilly)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na brežuljkastim područjima
6	<i>Average filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema prosječnoj vrijednosti unutar zadanog poligona
7	<i>Median filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema srednjoj vrijednosti unutar zadanog poligona
8	<i>Fill from edges</i>	Zapunjavanje reljefa prema rubovima definiranog poligona
9	<i>Average elevation</i>	Poravnanje reljefa na prosječnu visinu
10	<i>Constant elevation</i>	Poravnanje reljefa na zadanu visinu
11	<i>Clamp filter</i>	Zaglađivanje manjih neravnina

Pogreške u izrađenom DMR-u uglavnom su činili različiti artefakti preostali nakon uklanjanja gušće vegetacije (Slika II-10.), ili pak većih antropogenih objekata (Slika II-11.). Primjenom različitih navedenih filtera uspješno su uklonjeni svi preostali artefakti, pri čemu je izrađen konačni DMR šireg prostora.



Slika II-10. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja vegetacije iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)



Slika II-11. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja antropogenih objekata iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)

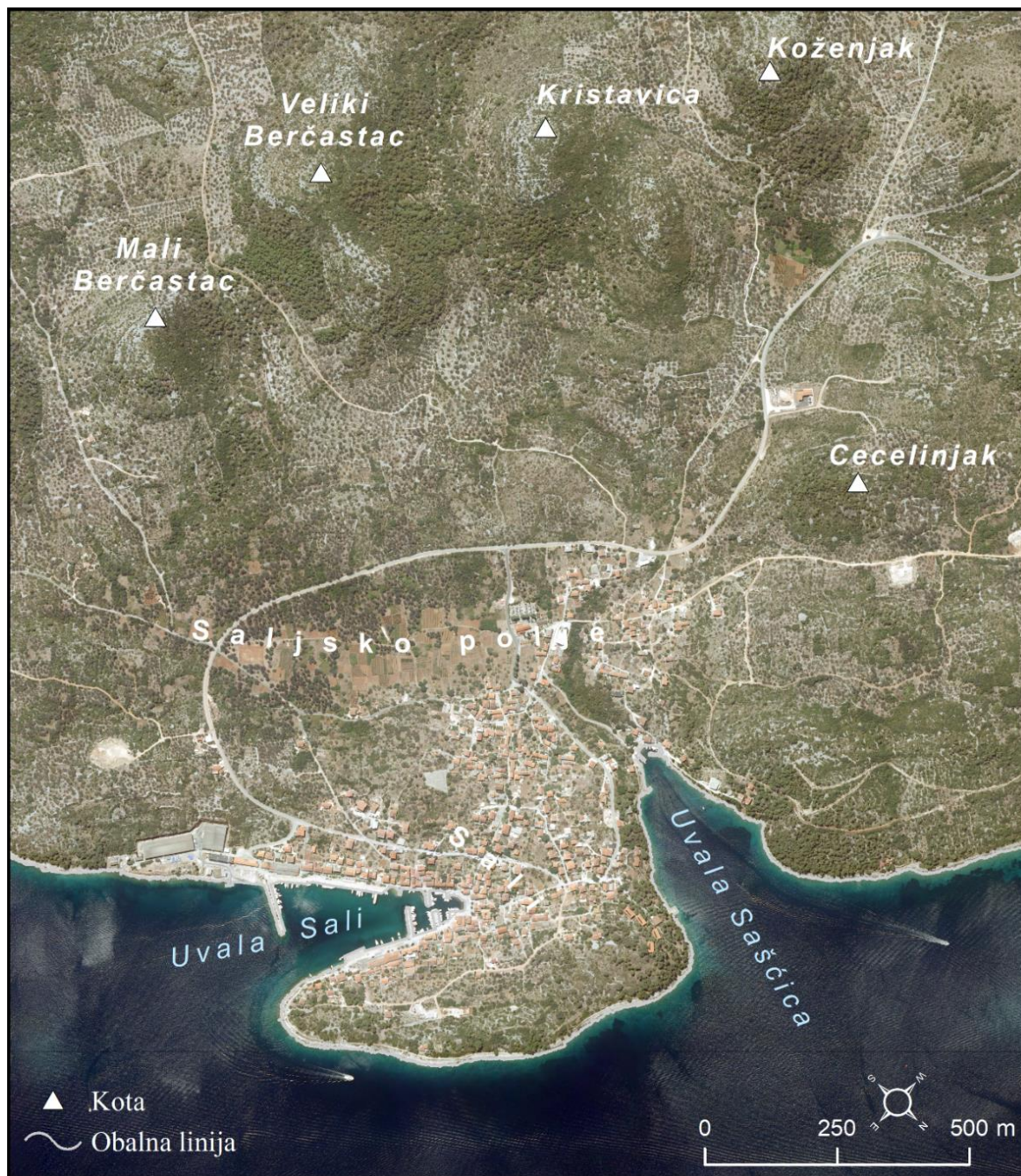
Konačni model šireg područja naselja Sali

U konačnici su modeliranjem aerofotogrametrijskih snimaka izrađeni sljedeći modeli šireg prostora prostorne rezolucije 0.292 m i prosječne pogreške u korištenim orijentacijskim točkama od 0.8 m:

- I. Digitalni ortofoto snimak (DOF)
- II. Digitalni model površina (DMP)
- III. Digitalni model reljefa (DMR)
- IV. Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

Izrađeni modeli šireg prostora naselja Sali pokrivaju površinu od **11.5 km²**, što omogućava proučavanje hidroloških karakteristika i potencijalnih kopnenih ugroza na čitavom širem prostoru vezanom za naselje Sali.

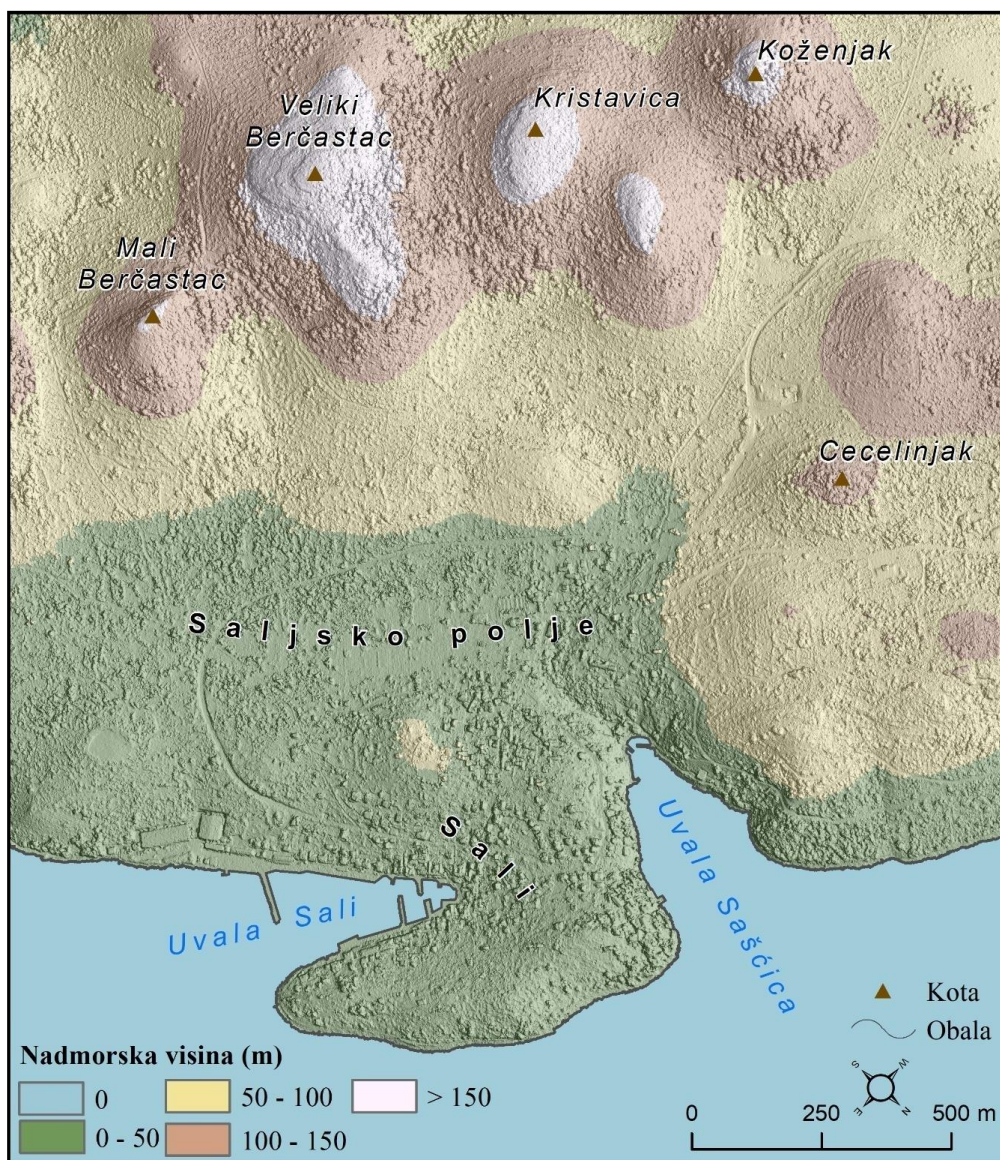
Digitalni ortofoto snimak (DOF) šireg prostora naselja Sali izrađen je u prostornoj rezoluciji od 0.292 m te sadrži tri vidljiva kanala (RGB). Zahvaljujući vrlo visokoj prostornoj rezoluciji izrađeni DOF omogućava detekciju različitih antropogenih i prirodnih elemenata na prostoru naselja Sali (npr. kartiranje i izradu baze stambenih objekata, poljoprivrednih parcela, prometnica, itd.). S obzirom da je snimak nastao iz podataka prikupljenih 2011. godine, na temelju usporedbe s novijim podacima moguće je napraviti i različite prostorno-vremenske analize (npr. praćenje urbanizacije, ilegalnih odlagališta, itd.).



Slika II-12. Izrađeni digitalni ortofoto snimak šireg prostora naselja Sali

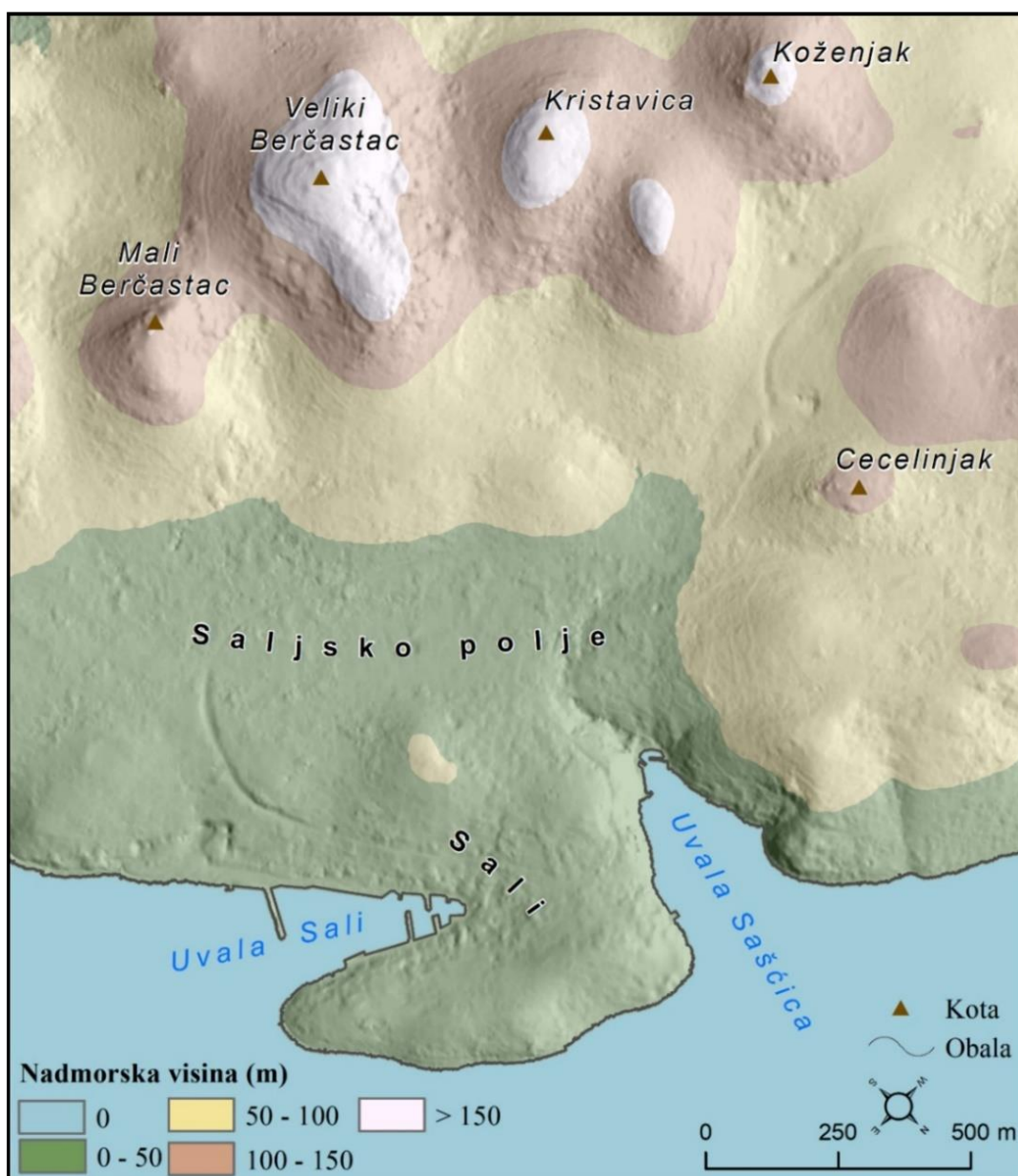
Digitalni model površina (DMP) šireg prostora naselja Sali reprezentira reljef i sve prirodne i antropogene površine koje se nalaze na njemu (Slika II-13).

S obzirom da izrađeni DMP osim reljefa reprezentira i vegetaciju i antropogene objekte, zbog čega se ovaj model može primijeniti za proučavanje morfometrijskih značajki reprezentirane vegetacije i antropogenih objekata.



Slika II-13. Izrađeni digitalni model površina šireg prostora naselja Sali

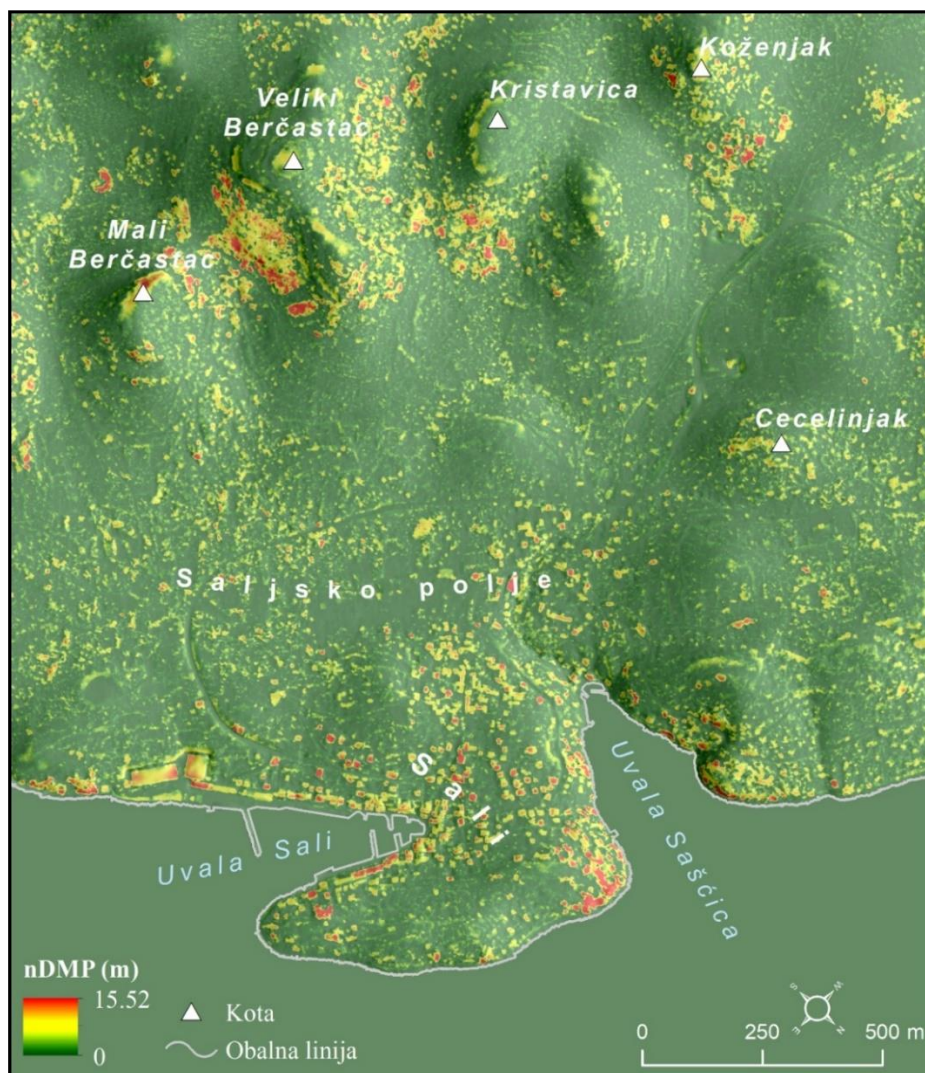
Digitalni model reljefa (DMR) šireg prostora naselja Sali reprezentira golu površinu reljefa bez antropogenih i prirodnih elemenata (Slika II-14.). Zahvaljujući tome ovaj model omogućava neometano proučavanje različitih značajki reljefa. Kao takav koristiti će se za morfometrijske (npr. nagib, zakrivljenost i orijentacija padina, vertikalana raščlanjenost, itd.) i hidrološke analize (npr. model otjecanja, model akumulacije, kartiranje povremenih tokova, itd.) na temelju kojih će se izvršiti višekriterijsko GIS modeliranje podložnosti eroziji tla, ali i modeliranje poplavnog potencijala.



Slika II-14. Digitalni model reljefa šireg prostora naselja Sali

Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

Normalizirani digitalni model površina predstavlja rasterski prikaz visina svih nadzemnih antropogenih i prirodnih objekata u prostoru. Ovaj model nastaje oduzimanjem gole površine reljefa (DMR) od površine svih nadzemnih objekata (DMP). Kao takav ovaj model se može koristiti za klasifikaciju vegetacije ili antropogenih objekata prema njihovoj visini, što dodatno unaprjeđuje klasifikacijske mogućnosti. Primjerice ovaj model omogućava detekciju stambenih objekata koji nadilaze zakonski propisanu visinu.



Slika II-15. Normalizirani digitalni model površina šireg prostora naselja Sali

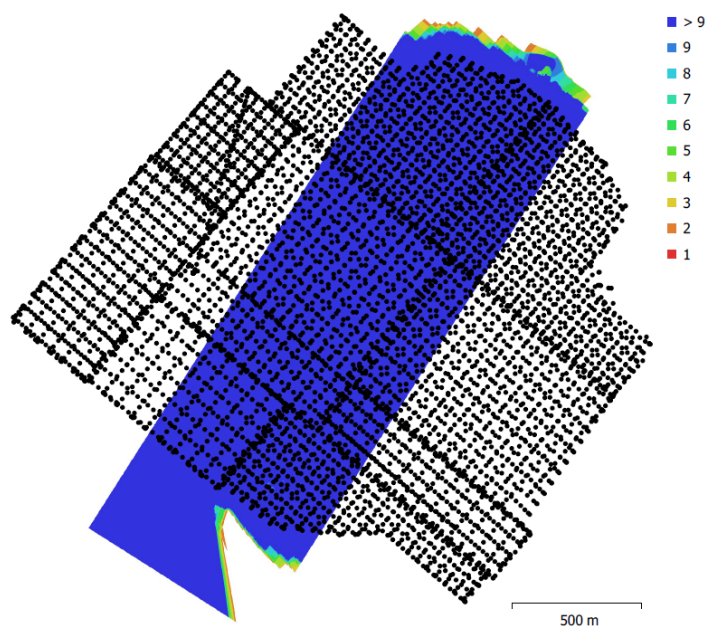
a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm

Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto (DOF) prostorne rezolucije 5 cm izveden je na temelju zračnih snimaka koji su prikupljeni bespilotnom letjelicom Matrice 210 RTK. U nastavku tekstu je popisan proces planiranja i izvođenja leta, te obrade zračnih snimaka. Ukupno je prikupljeno 6587 visoko-kvalitetnih fotografija. Snimanje je izvršeno primjenjujući tip misija *Double Grid Mission* s prednjim i bočnim preklapom > 80%. Misije su isplanirane u ArcMapu uvažavajući morfologiju terena, a izvođenje letenja je izvršeno u aplikaciji DJI GS Pro. Svaka misija je u prosjeku trajala 20-tak minuta. Ukupno je izvršeno 13 snimanja.

Obrada aerofotogrametrijskih snimaka napravljena je u *Agisoft Metashape 1.5.1.* softveru, trenutačno jednom od najnaprednijih softvera za obradu fotogrametrijskih snimaka. Zahvaljujući implementiranim *structure-from-motion (SfM)* i *multi-view* algoritmima Agisoft omogućava 3D modeliranje, zasnovano na rekonstrukciju 3D struktura iz preklapljenih 2D snimaka (Mancini i dr., 2013; Agisoft, 2020.). Pri tome izrada oblaka točaka i DMP-a u Agisoft Metashape softveru predstavlja polu-automatizirani proces, koji uključuje sljedećih pet faza: orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1), dodavanje kontrolnih točaka (2), izrada gustog oblaka točaka (3), izrada digitalnog modela površina (4) te izrada digitalnog ortofoto snimka (5).

Orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1) – prva faza procesa izrade modela iz prikupljenih aerofotogrametrijskih snimaka obuhvaća orijentaciju i povezivanje prikupljenih snimaka (engl. *Align Photos*).

Agisoft Metashape automatski za svaki prikupljeni snimak prepoznaje vezne piksele, uz pomoć kojih međusobno povezuje i orijentira zadane snimke i izrađuje rijetki oblak točaka (engl. *sparse point cloud*) (Agisoft, 2020.). Pri tome korisnik definira varijablu *accuracy*, koja se odnosi na ukupan broj piksela slike koje će softver koristiti za orijentaciju i povezivanje zadanih snimaka. S obzirom da o ovoj fazi ovise sljedeći koraci procesa izrade modela, ali i vrijeme potrebno za obradu snimaka, poželjno je sukladno mogućnostima postaviti što višu razinu varijable *accuracy*. Radi postizanja što točnije orijentacije snimaka prilikom izrade svih modela u Agisoft Metashapeu korištena je *highest* vrijednost varijable *accuracy*, dok je za vrijednost parametara *key point limit* i *tie point limit* zadana vrijednost od 40 000 i 10 000. S obzirom na to da je unutar snimanog područja prikupljeno 6578 visoko kvalitetnih fotografija obrada zračnih snimaka je zbog ograničenja radne stanica morala biti izvršena u odvojenim chunkovima. Primjerice, na slici II-16 je vidljivo preklapanje unutar snimanog prostora za drugi *chunk*. U svakom *chunku* prostor snimanja je vidljiv na minimalno devet fotografija.



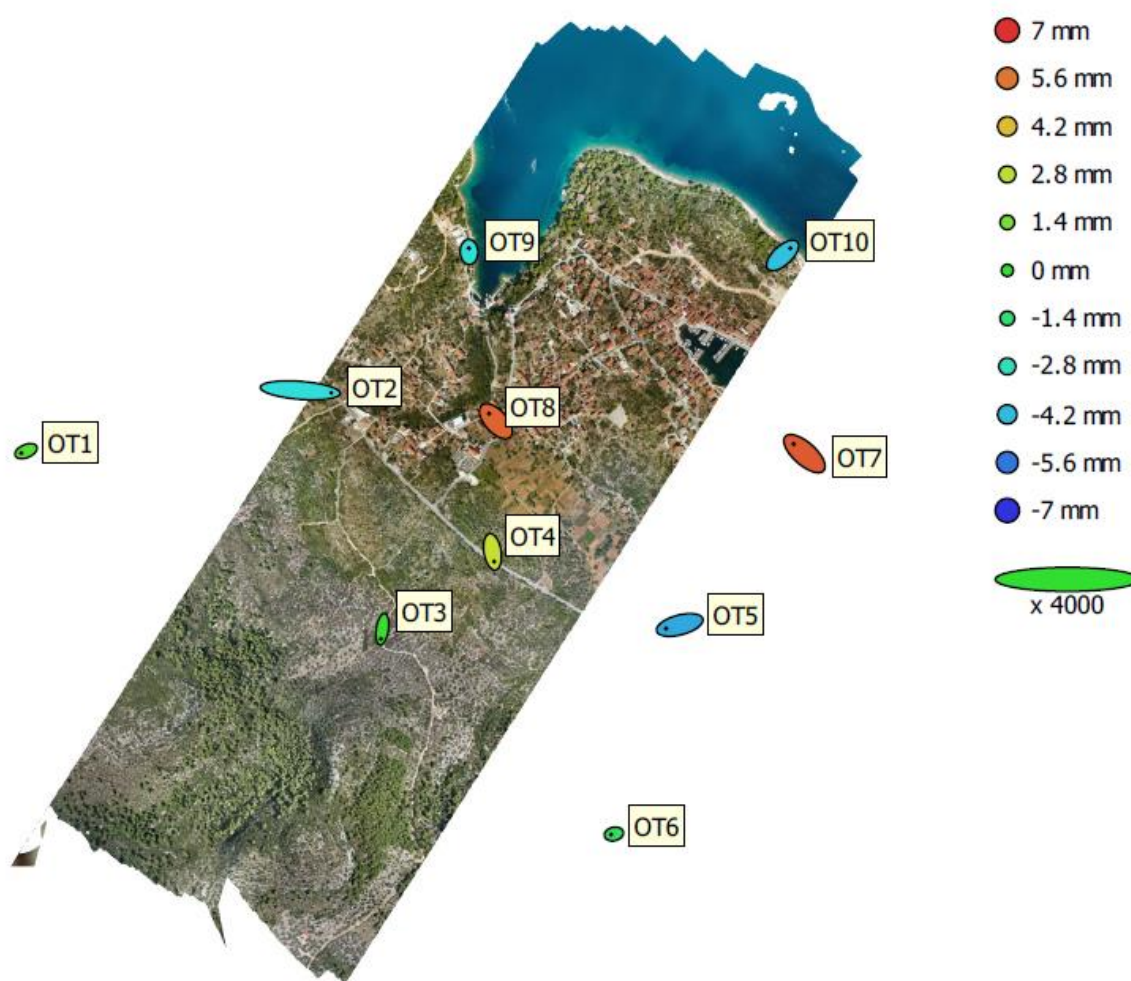
Slika II-16. Broj preklapanja snimaka unutar snimljenog područja (chunk 2)

Dodavanje orijentacijskih točaka (2) – da bi se postigla apsolutna orijentacija rekonstruiranog modela potrebno je georeferencirati izrađeni oblak točaka prema orijentacijskih točaka (OT), čije su precizne xyz koordinate prikupljene na terenu, korištenjem geodetskog RTK-GPS uređaja (James i dr., 2017.). Prije terenskog prikupljanja odabrane su optimalne lokacije za OT, koje pretežito čine različite specifične lokacije. Terensko prikupljanje OT izvršeno je u sklopu terenskih istraživanja izvršenih 10. kolovoza 2020. godine prije izvođenja zračnog snimanja (Slika II-17).



Slika II-17. Izvođenje snimanja za potrebe generiranja DOF-a (5 cm)

Koordinate OT su prikupljene sa Stonex S10 RTK GPS-om, pri čemu su ukupno prikupljene precizne XYZ koordinate na 10 različitih lokacija, raspodijeljenih unutar cijelog prostora šireg područja naselja Sali (Slika II-18).



Slika II-18. Lokacije i pogreške orijentacijskih točaka unutar chunka 2.

Pogreška u OT korištenim za apsolutnu orijentaciju izrađenih modela šireg područja dana je u tablici II-6. ukupna pogreška u deset OT iznosi 1,542 cm. Ako se u obzir uzme prostorna rezolucija aerofotogrametrijskih snimaka te svrha modela, takva točnost izrađenih modela zadovoljava potrebe analiza za koje će se izrađeni modeli koristiti. Reprojekcijska pogreška iznosi 0,324 pix. U tablici II-7 dan je pregled svih korisničko-definiranih parametara izvedenih u unutar procesa obrade zračnih snimaka.

Tablica II-6. Pogreška u orijentacijskim točkama korištenim za izradu modela šireg područja

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
OT1	-0,52	-0,22	0,06	0,56	0,269
OT2	3,25	-0,26	-0,34	3,46	0,396
OT3	-0,15	-1,07	0,02	1,08	0,361
OT4	0,17	-1,08	0,30	1,13	0,294
OT5	-1,50	-0,39	-0,45	1,61	0,297
OT6	-0,31	-0,07	-0,08	0,33	0,234
OT7	-1,19	1,06	0,61	1,71	0,214
OT8	-0,75	0,83	0,59	1,28	0,468
OT9	-0,01	0,41	-0,33	0,53	0,391
OT10	0,85	0,79	-0,40	1,23	0,319
Total	1,31	0,72	0,38	1,54	0,324

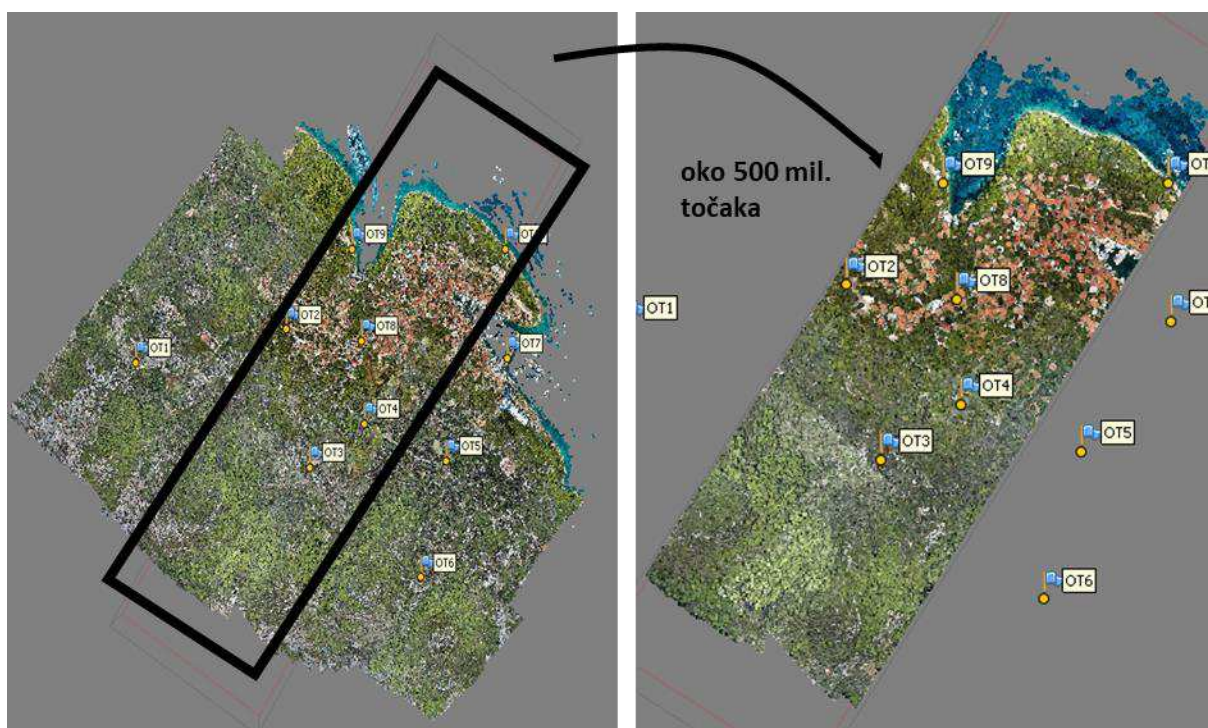
Tablica II-7. Korisničko-definirani parametri izvedeni unutar procesa obrade zračnih snimaka

#	Korak	Korisničko-definirani parametar	Odabrana opcija
1	Orijentacija snimaka	Accuracy	High
		Pair selection	Reference
		Key point limit	40000
		Tie point limit	10000
2	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	Reprojection Error	Uklanjanje 10 % točaka
		Reconstruction Uncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projection accuracy	Uklanjanje 10 % točaka
3	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
4	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	High
		Depth filtering	Agressive
5	Generiranje 3D mreže poligona	Surface type	Height field
		Face count	High
		Interpolation	Enabled
6	Dodavanje OT	Orijentacijske točke dodane (OT)	
7	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
8	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	Reprojection Error	Uklanjanje 10 % točaka
		Reconstruction Uncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projection accuracy	Uklanjanje 10 % točaka
9	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
10	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	High
		Depth filtering	Agressive
11	Generiranje 3D mreže poligona	Surface type	Height field
		Face count	10000000
		Interpolation	Enabled
12	Izrada tekture modela	Mapping mode	Generic
		Blending mode	Mosaic
		Texture size	8096
		Color correction	Enabled
13	Izrada DMP-a	Coordinate system	HTRS96
		Source data	Dense cloud
		Interpolation	Enabled
		Point classes	All
14	Izrada ortofoto snimka	Surface mode	DEM
		Blending mode	Mosaic

Izrada gustog oblaka točaka (3) – nakon dodavanja OT i optimizacije modela slijedi izrada gustog oblaka točaka (*build dense cloud*). Unutar ove faze program automatski iz ranije orijentiranih snimaka izračunava dubinske informacije za svaki orijentirani snimak te izrađuje jedinstveni oblak točaka, čija

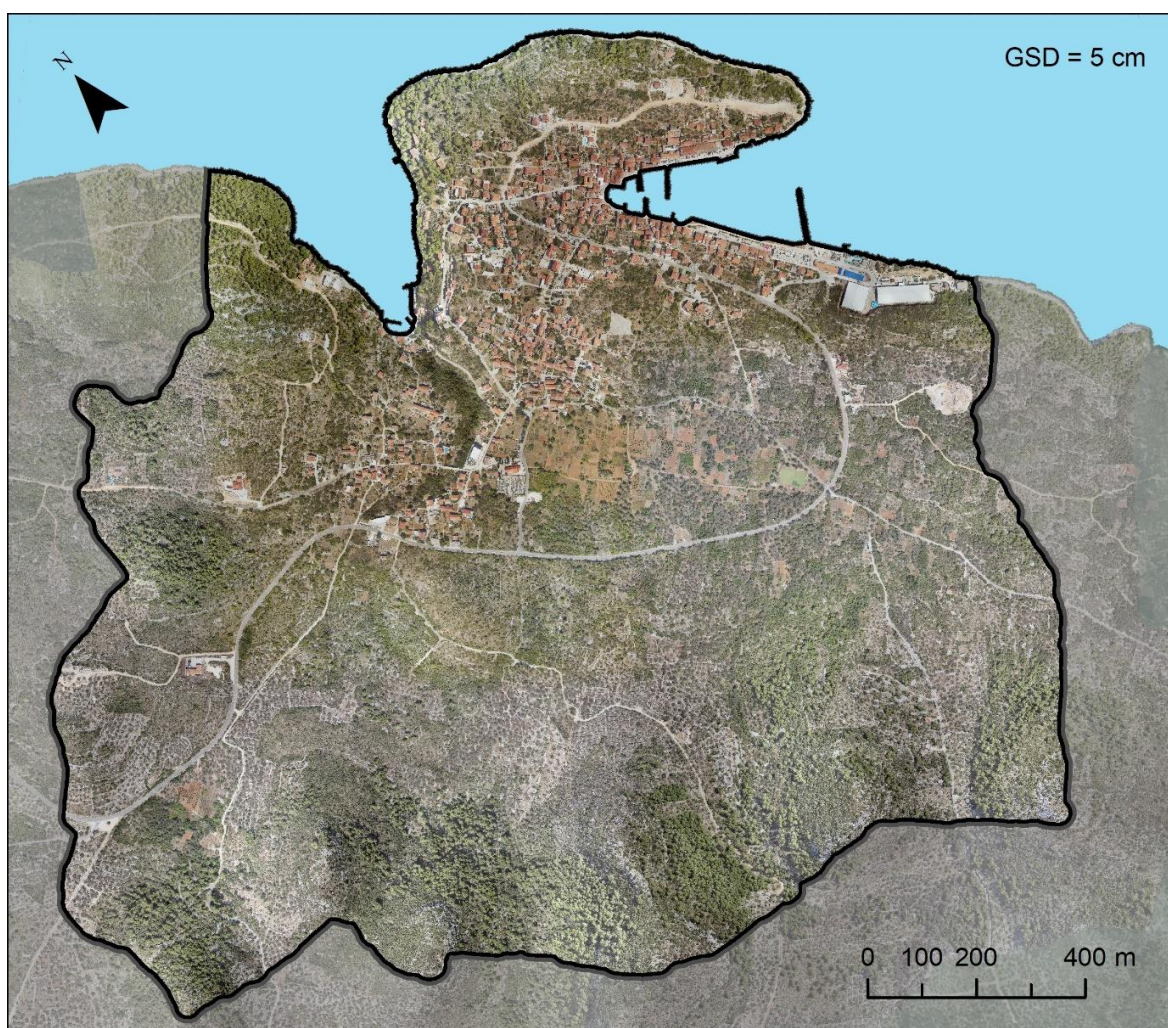
gustoća ovisi o korisničko definiranoj varijabli *quality* i zadanom načinu dubinskog filtriranja (engl. *depth filtering*) (Agisoft, 2020.). Varijabla *quality* određuje udio piksela orijentiranih snimaka koji će biti korišten za izradu gustog oblaka točaka, pri čemu opcija *ultra high* za svaki piksel orijentiranih snimaka izrađuje jednu točku, dok kod ostalih opcija broj piksela za koje se izrađuju točke postupno opada. Kao i kod *orijentacije snimaka*, radi izrade modela maksimalne točnosti poželjno je odabrati što veću razinu varijable *quality*, što opet ovisi o raspoloživom vremenu procesiranja te tehničkim specifikacijama radne stanice na kojoj se vrši procesiranje podataka.

Prilikom izrade modela u Agisoft Metashape softveru korištena je *high* opcija varijable *quality* te *agressive* način dubinskog filtriranja. Velika količina fotografija te ograničenja radne stanice uvjetovala su obradu, odnosno izvođenje gustog oblaka točaka u izdvojenim posebnim chunkovima. Izdvojena su tri chunka, te je unutar svakog izveden gusti oblak točaka pod parametrom *high*. U svakom chunku je ukupno generirano oko 500 000 milijuna točaka. Dakle, ukupno je širi prostor naselja Sali reprezentiran s oko $1,5 \cdot 10^9$ točaka. Na slici II-18 prikazan je gusti oblak točaka za drugi chunk.



Slika II-19. Isječak gustog oblaka točaka šireg područja naselja Sali (chunk 2)

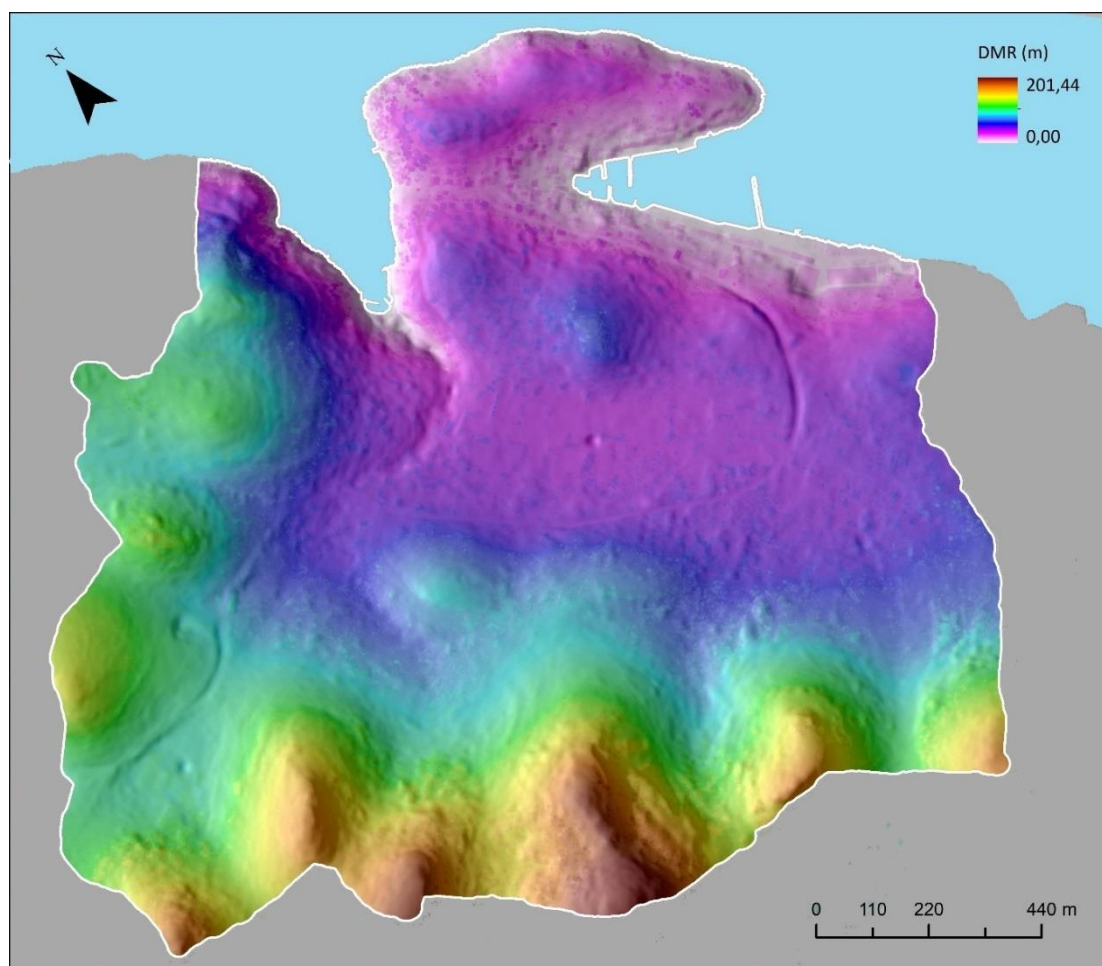
*Izrada digitalnog ortofoto snimka (5) – posljednja faza procesa izrade DMP-a iz aerofotogrametrijskih snimaka u Agisoft Metashape softveru obuhvaća izradu digitalnog ortofoto snimka (engl. *build orthomosaic*) (Agisoft, 2020.). U ovom koraku softver na temelju ranijeg generiranog digitalnog modela površina iz orijentiranih aerofotogrametrijskih snimaka generira ortofoto snimak. Na temelju izrađenog DMP-a i oblaka točaka napravljen je digitalni ortofoto snimak prostorne rezolucije 5 cm, koji sadrži tri vidljiva kanala (RGB) (Slika II-20). Odabrana je HTRS96 projekcija.*



Slika II-20. DOF šireg područja naselja i uvale Sali (5 cm)

b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm

Izrada digitalnog modela površina (4) – nakon izrade gustog oblaka točaka, slijedila je izrada digitalnog modela površina (DMS). U ovoj fazi *Agisoft Metashape* softver na temelju interpolacije $1,5 \cdot 10^9$ točaka unutar gustog oblaka točaka generira DMP prostorne rezolucije 5 cm. Gustoća prikupljanja podataka je iznosila 270 točaka/m². Prilikom izrade DMP-a definirana je projekcija izrađenog modela, za koju je sukladno području istraživanja odabrana HTRS96 projekcija.



Slika II-21. Digitalni model površina (DSM) šireg područja naselja i uvala Sali (5 cm)

c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u uvali

Uvod

U svrhu poboljšanja kvalitete modela, s ciljem analize, vizualizacije i interpretacije, izrađuju se integralni modeli. To su modeli izrađeni od podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (Fabris i dr., 2010; Abdalla, 2016). Detaljan opis korištenih metoda, tehnika i procedura je detaljno pojašnjen u poglavlju I. Batimetrijska i geodetska izmjera uvale integralnim mjernim sustavom (multibeam, IMU, RTK-GPS) drugog izvješća i u poglavlju II. Aerofotogrametrijsko snimanje priobalnog pojasa prvog izvješća.

Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela)

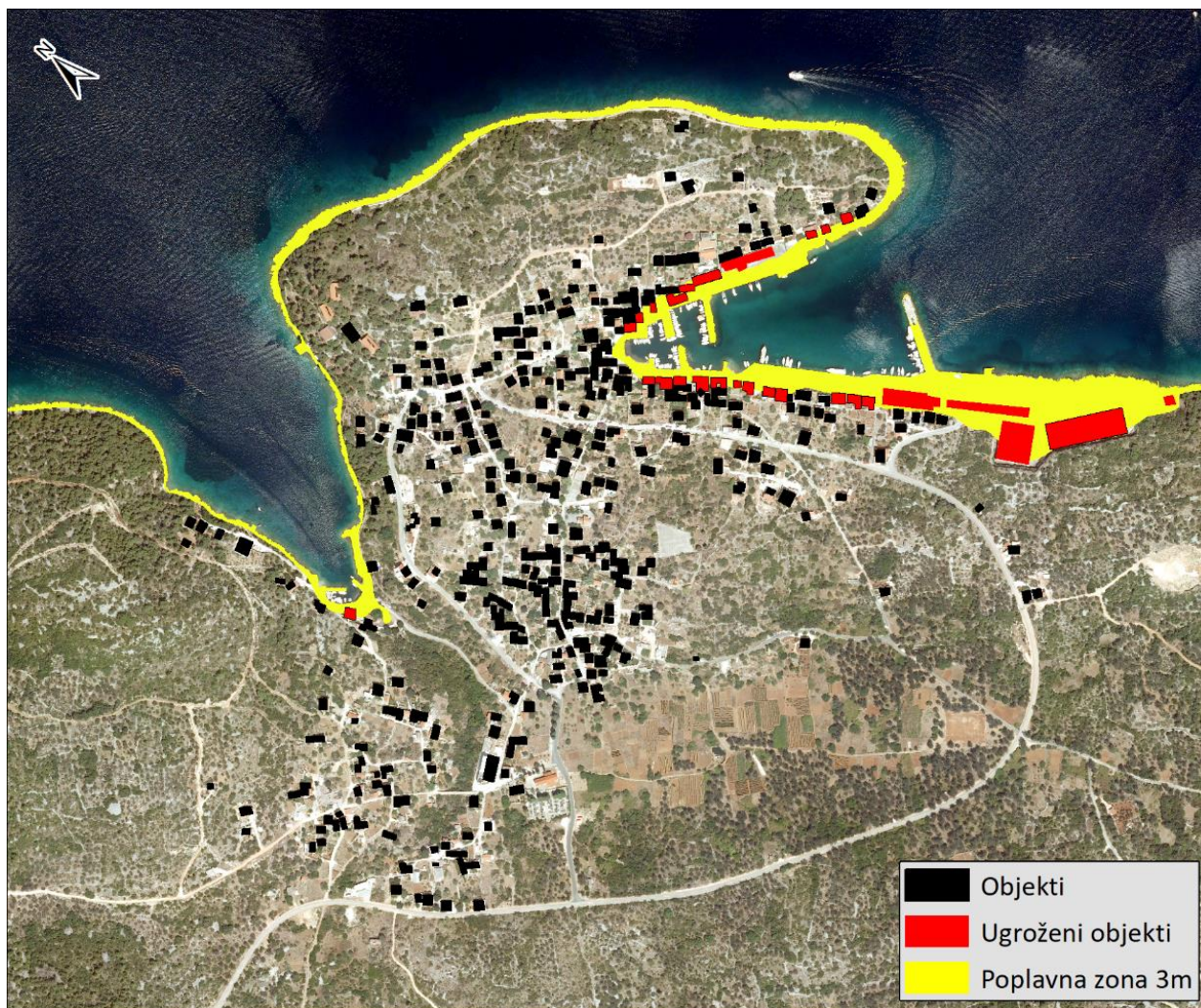
Generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -70,76 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom kojem maksimalna visina unutar topografskog bazena iznosi 199,41 m. Glavni cilj je generiranje predikcijskih modela kolebanja vodostaja (morske razine) u uvalama i izračuna potencijalnih negativnih utjecaja na okoliš (Slika II-24). Perspektivni blokovski prikazi (Slika II-22 i II-23) klasificirani su *Stretch* metodom klasifikacije koja je idealna za prikaz kontinuiranih vrijednosti piksela koji imaju veliki raspon vrijednosti.



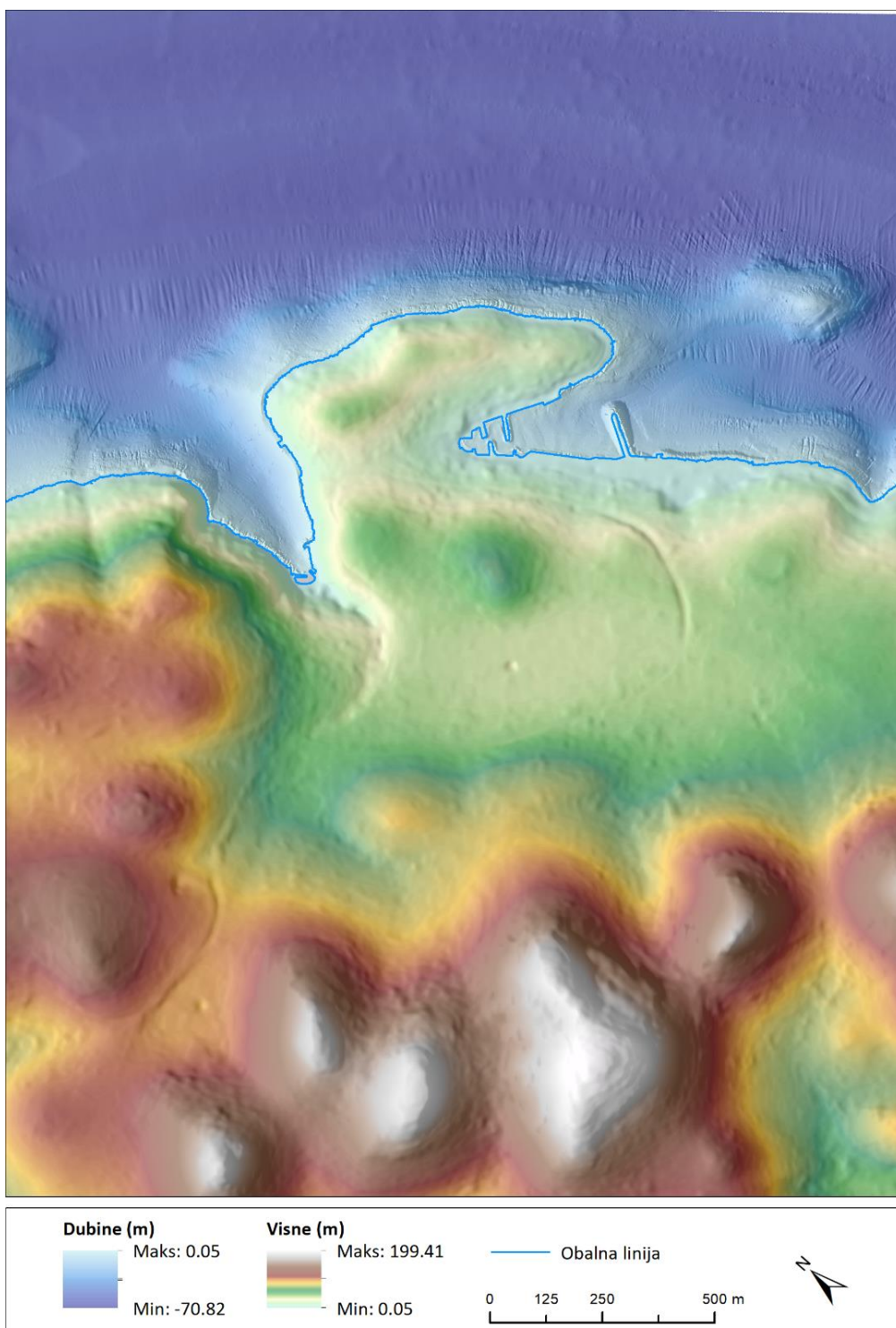
Slika II-22. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela uvala Sali i Sašica (kombinacija DOF-a i digitalnog modela visina)



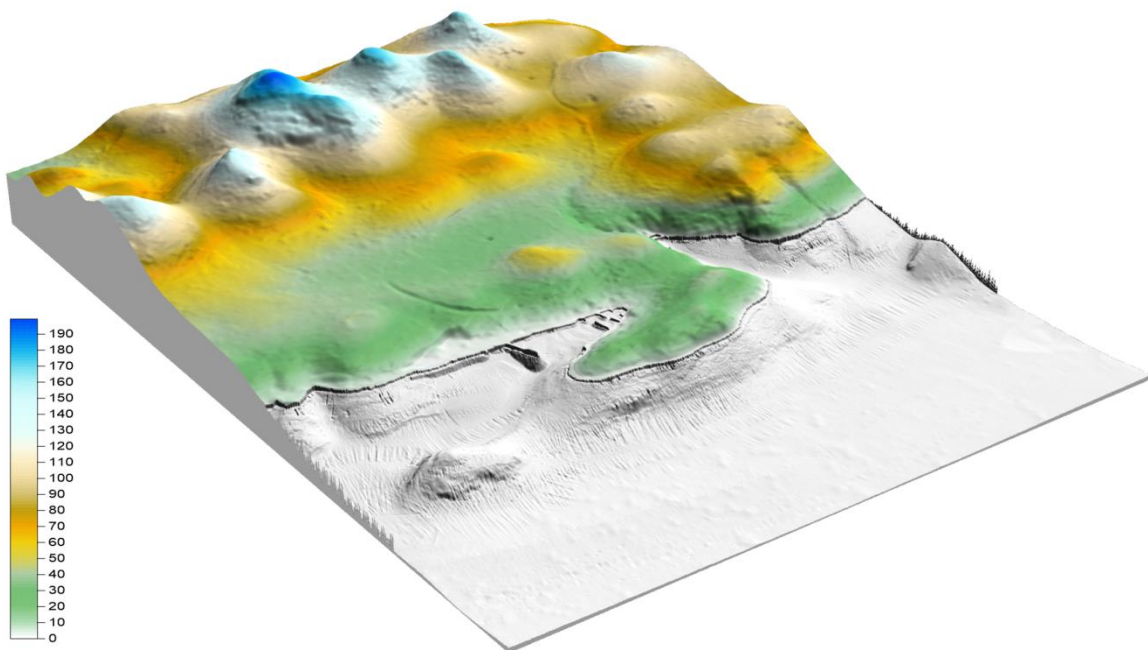
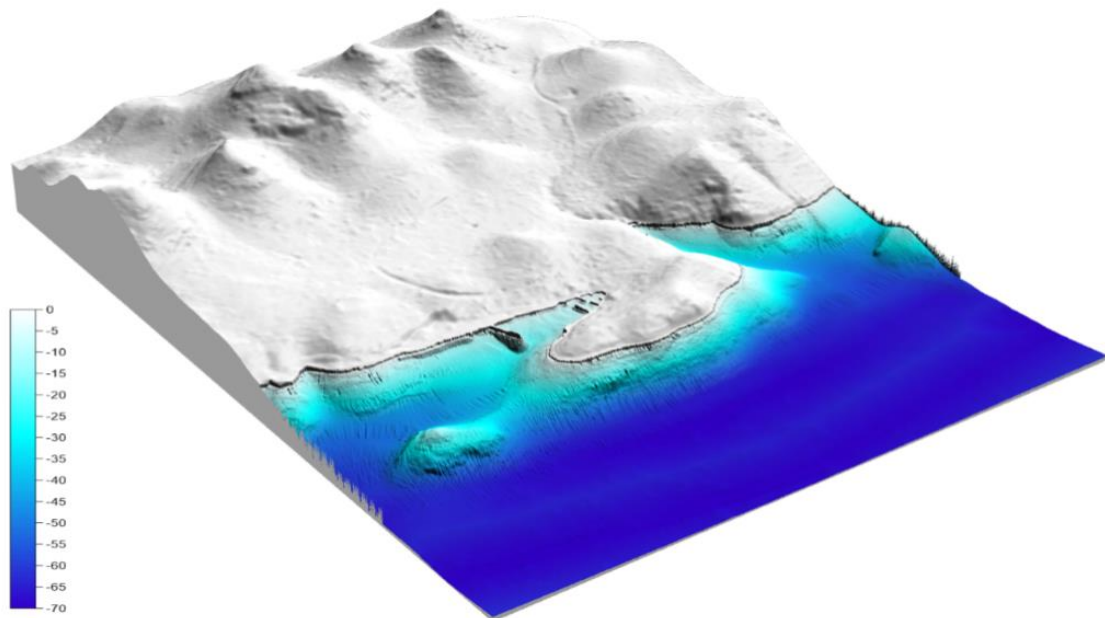
Slika II-23. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela uvala Sali i Sašica (kombinacija DOF-a i digitalnog modela visina)



Slika II-24. Prikaz utjecaja porasta morske razine od 3 m na naselje Sali



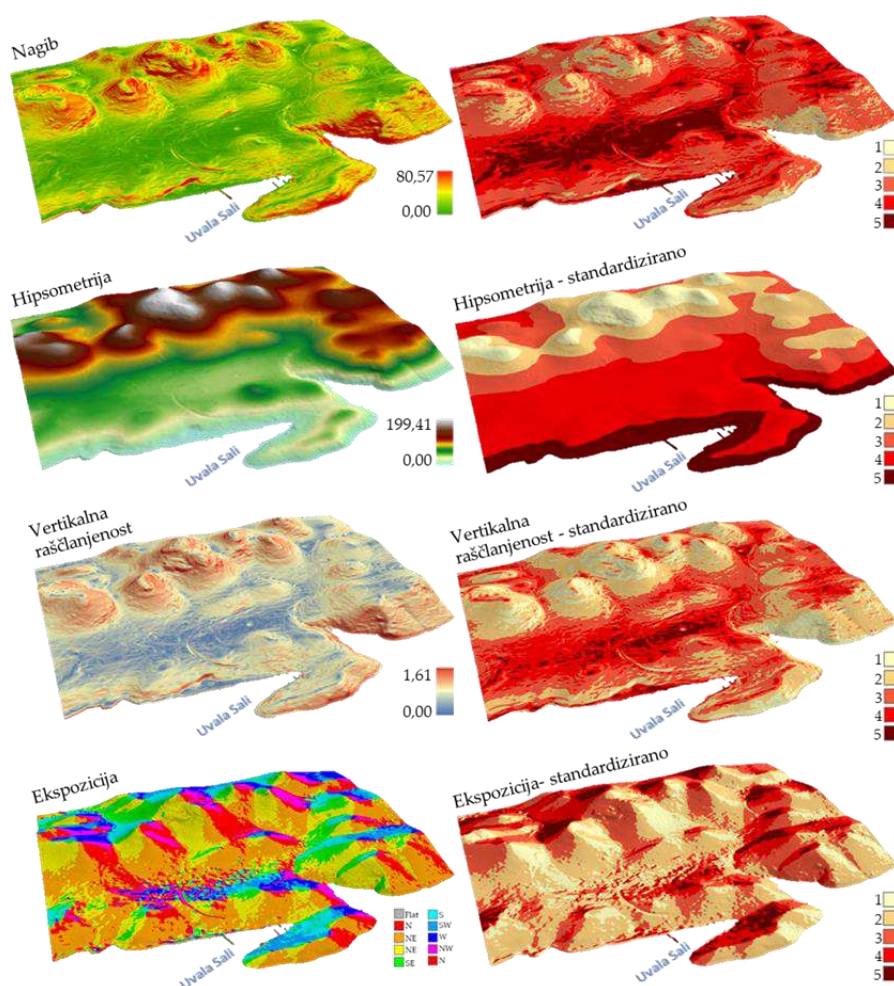
Slika II-25. Integralni model uvala Sali i Sašćica



Slika II-26. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela uvala Sali i Sašica

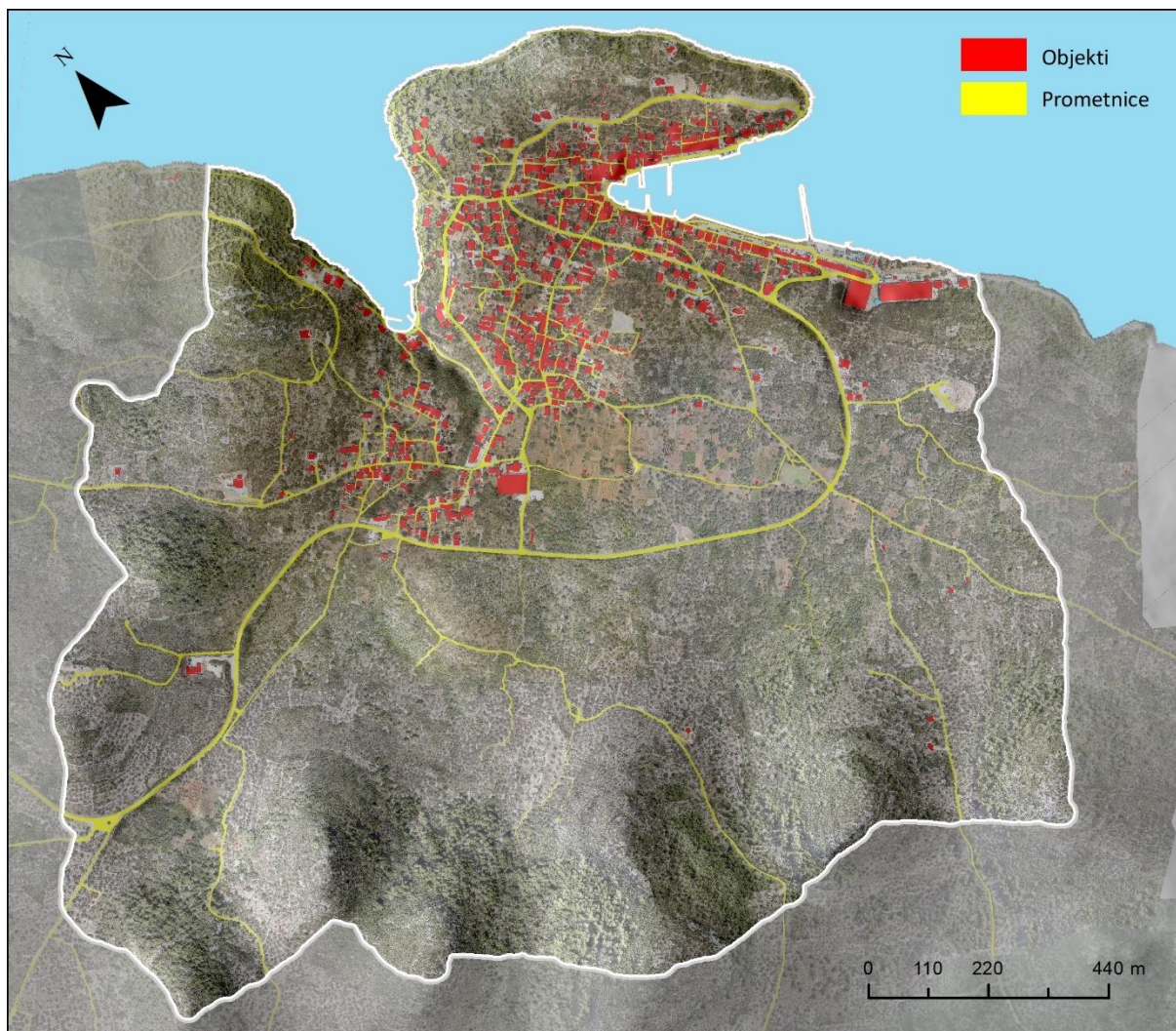
d) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Izvedeni visokorezolucijski modeli (digitalni model površina - DMP, digitalni model reljefa - DMR te digitalnog ortofota - DOF) poslužili su kao osnovni predložak u generiranju primarnih i sekundarnih kriterija koji su korišteni u analizama rizika (požar, erozija). Točnije, iz DMR uvale i naselja Sali izvedeni su sljedeći morfometrijski parametri: nagib, orijentacije padine, vertikalna raščlanjenost, hipsometrija, indeks toplinskog opterećenja - HLI, indeks topografske vlažnosti - TWI (Slika II-27).



Slika II-27. Kriteriji izvedeni iz DMR uvale i naselja Sali korišteni u analizama rizika

Nadalje, na digitalnom modelu površina - DMP izvršene su simulacije izdizanja razine mora. Visokorezolucijski digitalni ortofoto - DOP poslužio je kao predložak za detaljno kartiranje stambenih i drugih objekata te prometnica unutar šireg područja naselja i uvale Sali (Slika II-28). Detektirano je ukupno 971 objekata (uključuje: stambene, pomoćne, gospodarske, itd.) Izvedeni modeli su također korišteni u analizama rizika izbijanja požara, erozije i izdizanja razine mora.



Slika II-28. Kartirani stambeni objekti i prometnice unutar šireg područja naselja Sali

III.AERO SNIMANJE UVALE TERMALNOM KAMEROM



Aero snimanje uvale termalnom kamerom

Podaktivnosti:

- a) Izrada termalnog modela prostorne rezolucije do 50 cm
- b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena
- c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Sažetak

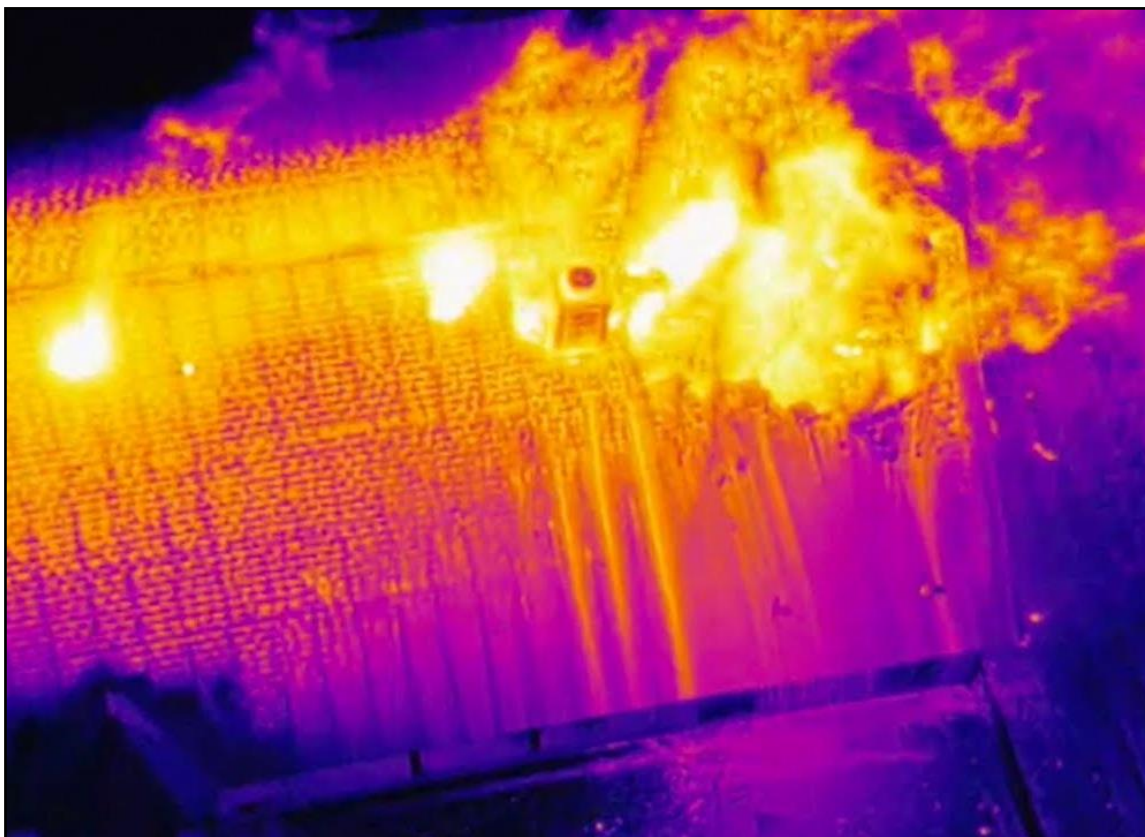
Širi prostor naselja Sali je ciklički (tri puta s vremenskom rezolucijom od tri mjeseca) sniman termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* integriranom na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu.

Iz gustog oblaka točaka u termalnom snimanju (23 396 751 točaka) izveden je digitalni model površine naselja i uvale Sali prostorne rezolucije oko 30 cm.

Posljednji korak aerofotogrametrijskog procesa uključivao je izgradnju termalnog digitalnog ortofoto modela naselja i uvale Sali. Prostorna rezolucija izvedenog modela iznosila je 30 cm.

a) Izrada termalnog snimka prostorne rezolucije do 50 cm

Termovizijsko snimanje predstavlja vrstu snimanja kod kojega se određeni prostor ili objekt snima termovizijskom kamerom, koja omogućava bilježenje snimaka s vrijednostima elektromagnetskog zračenja iz infracrvenog pojasa elektromagnetskog spektra (~700 – 1050 nm). Unazad nekoliko godina termovizijske kamere su uspješno integriraju s različitim bespilotnim letjelicama (Slika III-2) čime nastaju prvi bespilotni termovizijski sustavi. Razvojem bespilotnih termovizijskih sustava započinje njihova postupna šira primjena u različitim djelatnostima. Tako se danas termovizijska snimanja provode uz pomoć takvih sustava za: detekciju požara, nadzor granica i ljudi, potragu i spašavanje unesrećenih osoba, itd.



Slika III-1. Zračni termovizijski snimak požara

Osim praktične primjene, termovizijska snimanja imaju veliku primjenu i u znanstvenim istraživanjima, gdje zahvaljujući činjenici da bilježe infracrvena elektromagnetska zračenja omogućavaju znanstvenicima da detektiraju pojave i procese koji bi inače bili nevidljivi ljudskom oku.

Tako se termovizijska zračna snimanja koriste za: monitoring biljnih i životinjskih vrsta, praćenje vulkanske aktivnosti, praćenje širenja onečišćenja, proučavanje požara (Slika III-1), određivanje solarnog potencijala, itd. U sklopu ovog projekta termovizijska snimanja bitna su radi potencijalne detekcije izvora onečišćenja.

Onečišćivači poput ilegalnih kanalizacijskih ispusta, ilegalnih industrijskih ispusta te ostale slične „anomalije“ mogu biti precizno detektirane iz snimaka površinskog dijela mora, prema različitim termalnim infracrvenim potpisima morske vode i potencijalnih onečišćivača. Ukoliko postoje različiti izvori zagađenja, koji postupno prodiru u more, toplinski potpis takvih tvari se bitno razlikuje od njihove okoline i na temelju toga se može izdvojiti iz prikupljenih snimaka. Naime, zbog razlike u temperaturama dviju tekućina u termalnom infracrvenom spektru moguće je odrediti točnu lokaciju ispusta onečišćivača, te odrediti površinu mora zahvaćenu onečišćenjem. Zbog toga je širi prostor naselja Sali u intervalnim snimanjima prvi put snimljen termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* integriranom na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu u veljači, 2020, godine.



Slika III-2. *DJI Matrice M210 RTK bespilotna letjelica*

Drugo termalno snimanje je izvršeno 26. lipnja, 2020. godine (Slika III-3 i III-5). Snimanje je također izvršeno s termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* integriranom na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu. Korištene su iste točke stajališta i iste misije leta.



Slika III-3. Izvođenje drugog termalnog snimanja (točka stajališta – Kamenolom)

Treće termalno snimanje izvršeno je 10. kolovoza, 2020. godine (Slika III-4). Snimanje je izvršeno s termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* integriranom na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu. Korištene su iste točke stajališta i iste misije leta.



Slika III-4. Izvođenje trećeg termalnog snimanja

DJI Matrice 210 RTK je jedna od trenutno najmodernijih bespilotnih letjelica, koja zahvaljujući laganoj, ali čvrstoj konstrukciji izrađenoj od karbona i pogonu koji čine snažna četiri motora omogućava provođenje zračnih snimanja s trajanjem i do 30 minuta. S obzirom na svoju konstrukciju ova bespilotna letjelica može biti opremljena s širokim spektrom senzora za prikupljanje različitih podataka (RGB kamera, termovizijska kamera, multispektralna kamera, aeroLiDAR, itd.). Zahvaljujući RTK GPS nadogradnji svim prikupljenim zračnim snimkama pridružuju se precizne x, y i z koordinate, što znatno olakšava daljnju obradu i izradu modela.



Slika III-5. Izvođenje drugog termalnog snimanja – (točka stajališta Maritimo)

Ova bespilotna letjelica opremljena je za potrebe zračnih termovizijskih snimanja s *DJI Zenmuse XT2* kamerom, koja je trenutačno jedna od najmodernijih termovizijskih kamera. Ova kamera omogućava simultano prikupljanje termovizijskih snimaka i RGB snimaka, što znatno olakšava kasniju interpretaciju prikupljenih podataka. Detaljne specifikacije termovizijske kamere *DJI Zenmuse XT2* dane su u tablici III-1.

Infracrveni kanal	
Veličina pojedinog snimka (pix)	640 x 512
Veličina pojedinog snimka (mm)	10.88 x 8.704
Veličina piksela	17 μ m
Žarišna duljina	13 mm
Otvor leće	f /1.25
Elektromagnetsko zračenje	7.5 – 13.5 μ m
Vidljivi (RGB) kanali	
Spektralni kanali	crveni (R), zeleni (G), plavi (B)
Veličina pojedinog snimka (pix)	4810 x 3140
Žarišna duljina	8
Generalne značajke kamere	
Težina	588 g
Dimenzije kamere (mm)	18.02×111.6×125.5

Tablica III-1. Tehničke specifikacije DJI Zenmuse XT2 digitalne kamere

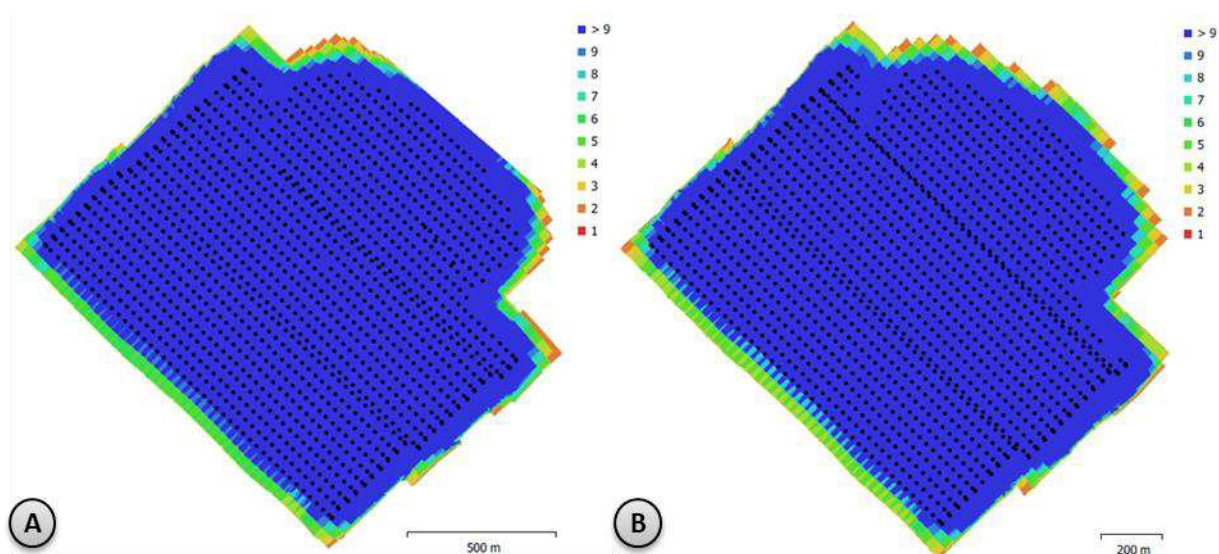
U nastavku izvješća su navedeni detaljni parametri koji su izvedeni prilikom obrade termalnih zračnih snimaka naselja i uvale Sali prikupljeni u drugom (26. lipnja, 2020. godine) i trećem snimanju 10. kolovoza, 2010. godine.

Obrada fotografija je izvršena u programu *Agisoft Metashape*. Proces se sastojao od nekoliko koraka:

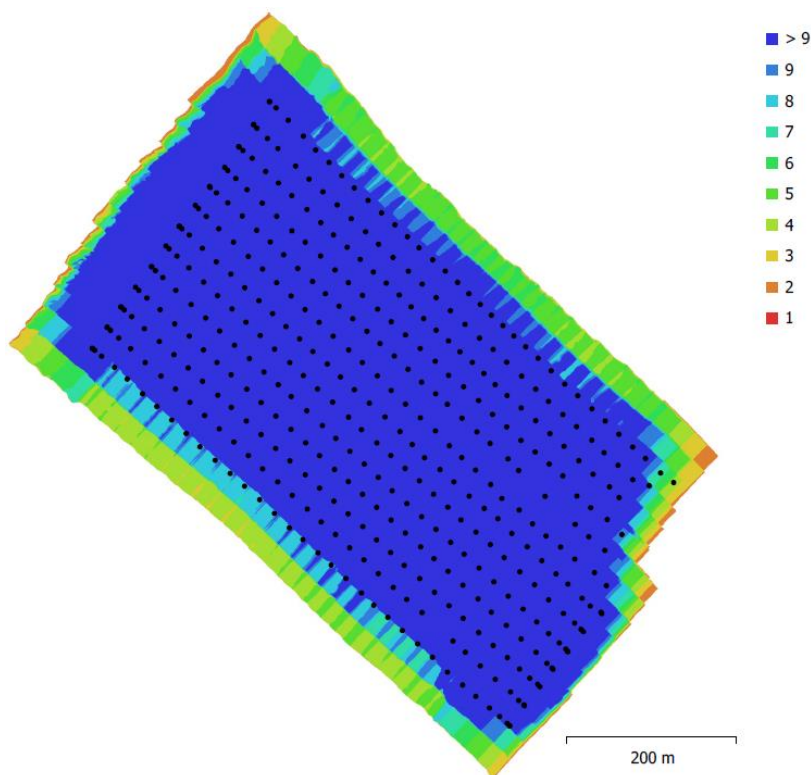
- 1) Spajanje snimaka (*align photos*)
- 2) Gradualna selekcija (brisanje veznih točaka)
- 3) Optimizacija rijetkog oblaka točaka
- 4) Izgradnja gustog oblaka točaka
- 5) Izgradnja poligonskog mesha

- 6) Izgradnja gustog oblaka točaka
- 7) Generiranje digitalnog modela površina
- 8) Generiranje digitalnog orto-fota

Na slici III-6 prikazane su lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar područja snimanja za prvo (Slika III-6a) i drugo (Slika III-6b) termalno snimanje. Na slici III-7 prikazan je isječak lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar područja snimanja za treće termalno snimanje. U snimanju je korišten tip misije *Single Mission* s prednjim i bočnim preklapanjem postavljenim na 80%. Sve lokacije unutar područja snimanja vidljive su na minimalno 9 fotografija (plava boja), jedino sami rub misija bilježi nešto manje preklapanje. Snimanje je obavljeno u tri misije. Svaka misija je trajala 30-tak minuta. Sve misije su snimljene s istog stajališta (*Kamenolom*) koje je osiguralo neometanu liniju pogleda kroz cijeli proces snimanja. Manji dio jedne misije je zbog sigurnosnih razloga snimljen sa stajališta *Maritimo* (Slika III-4) za sva tri intervalna snimanja.



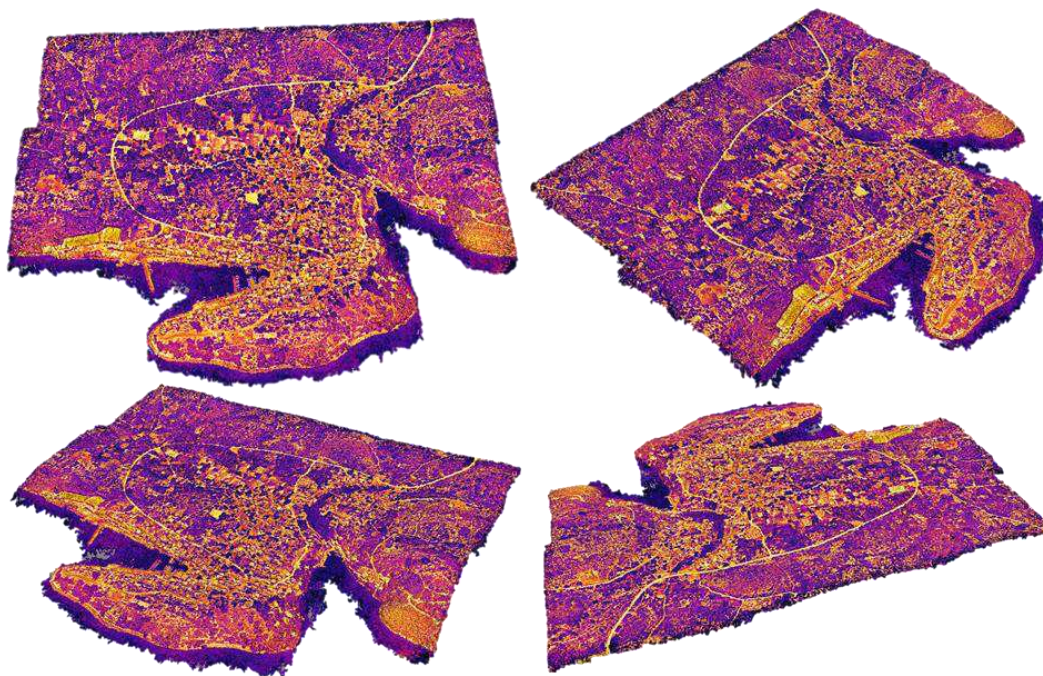
Slika III-6. Lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar područja snimanja za A) prvo i B) drugo termalno snimanje šireg područja naselja Sali



Slika III-7. Lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar isječka područja snimanja u trećem termalnom snimanju šireg područja naselja Sali

U tablici III-2 su navedene osnovne specifikacije provedenog drugog zračnog termalnog snimanja naselja i uvala Sali. Ukupno je korišteno 1497 fotografije od kojih je uspješno povezano 1346 (oko 89.91%). Slične vrijednosti su generirane i u prvom termalnom snimanju. Ostatak neuspješno povezanih fotografija odnosi se na prostor mora. Prosječna visina leta je iznosila oko 206 metara. Nakon izvođenja gradualne selekcije ostalo je ukupno 121 926 veznih točaka s ukupnom reprojekcijskom pogreškom od 0,452 pix. Reprojekcijska pogreška je nešto niža u odnosu na prvo termalno snimanje.

Iz spojenih snimaka te izvedenih rijetkih oblaka točaka izveden je gusti oblak točaka (23 396 751 točaka) (Slika III-8). U odnosu na prvo termalno snimanje izvedeno je oko 6 milijuna točaka više. S obzirom na to da su se koristile isti misije kao u prvom termalnom snimanju, ne iznenađuje da je ukupno snimljeno područje iste površine odnosno iznosi oko 1,9 km².



Slika III-8. Izvedeni gusti oblak točaka (23 396 751 točaka)_drugo termalno snimanje

U tablici III-3 su navedene osnovne specifikacije provedenog trećeg zračnog termalnog snimanja naselja i uvale Sali. Ukupno je korišteno 1435 fotografija od kojih je uspješno povezano 1379 (oko 96,1%). Slične vrijednosti su generirane i u prva dva termalna snimanja.

Ostatak neuspješno povezanih fotografija odnosi se na prostor mora. Prosječna visina leta je iznosila oko 210 metara. Nakon izvođenja gradualne selekcije ostalo je ukupno 132 458 veznih točaka s ukupnom reprojekcijskom pogreškom od 0,397 pix. Reprojekcijska pogreška je nešto niža u odnosu na drugo termalno snimanje.

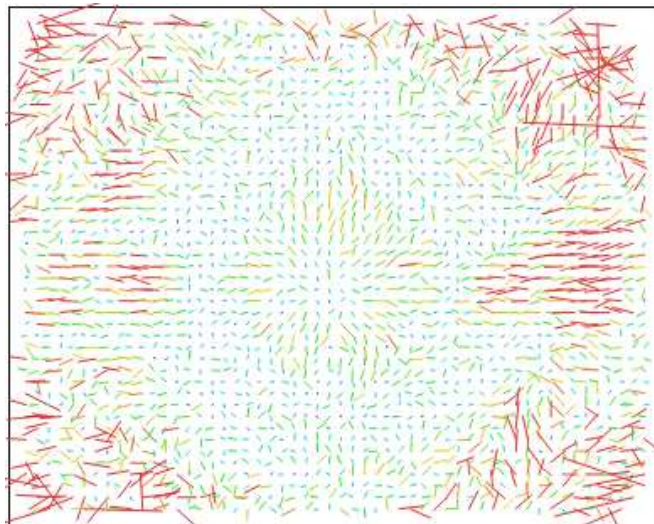
Tablica III-2. Osnovne specifikacije drugog izvedenog snimanja

Broj fotografija	1497	Lokacije kamera	1346
Prosječna visina leta	206 m	Vezne točke	121 927
Prostorna rezolucija modela (GSD)	30.8 cm/pix	Projekcije	342 055
Snimljena površina	1,9 km²	Reprojekcijska pogreška	0,452 pix.

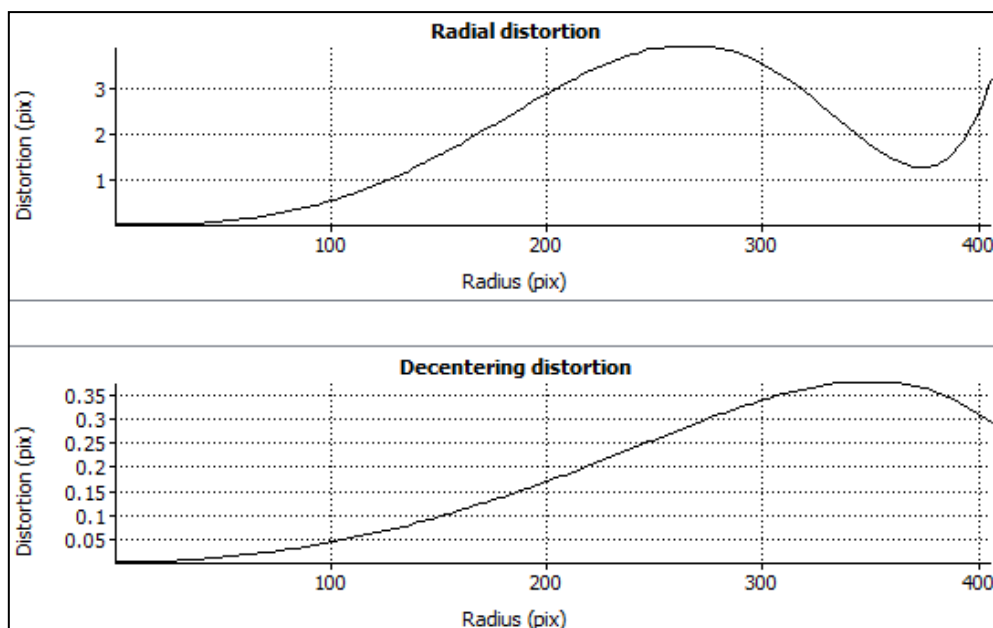
Tablica III-3. Osnovne specifikacije trećeg izvedenog snimanja

Broj fotografija	1435	Lokacije kamera	1336
Prosječna visina leta	210 m	Vezne točke	132 458
Prostorna rezolucija modela (GSD)	30.9 cm/pix	Projekcije	342 055
Snimljena površina	1,9 km²	Reprojekcijska pogreška	0,397 pix.

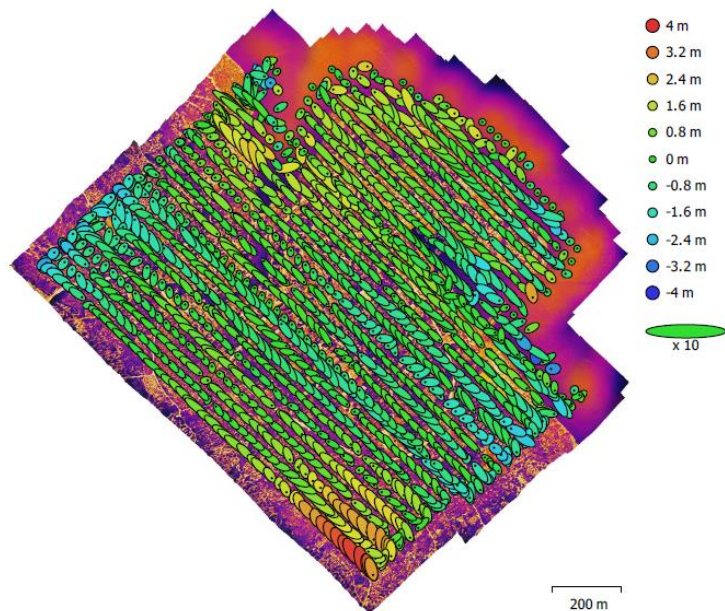
Kalibracija kamere je obavljena u sklopu rekonstrukcije objekta (samokalibracija). Metoda samokalibracije omogućava određivanje elemenata unutarnje orijentacije (osnovnih i dodatnih) u sklopu 3D rekonstrukcije objekta. Pritom nikakvi referentni podaci nisu potrebni ako je geometrija konfiguracije snimanja kvalitetna, te ako nije nužno da rekonstruirani objekt bude u mjerilu. Samokalibracija je analitička metoda kalibracije, te je implementirana u gotovo svim fotogrametrijskim programskim paketima. To je čini fleksibilnom i široko primjenljivom, ali i podložnom korelacijama parametara. Najčešće koreliraju parametri vanjske orijentacije (u smjeru osi snimanja) i žarišna duljina leće, te koordinate PPA i parametara tangencijalne distorzije. Na slikama III-9, III-10, III-11 i III-12 prikazani su rezultati samokalibracije kamere u Agisoftu za drugo i treće termalno snimanje.



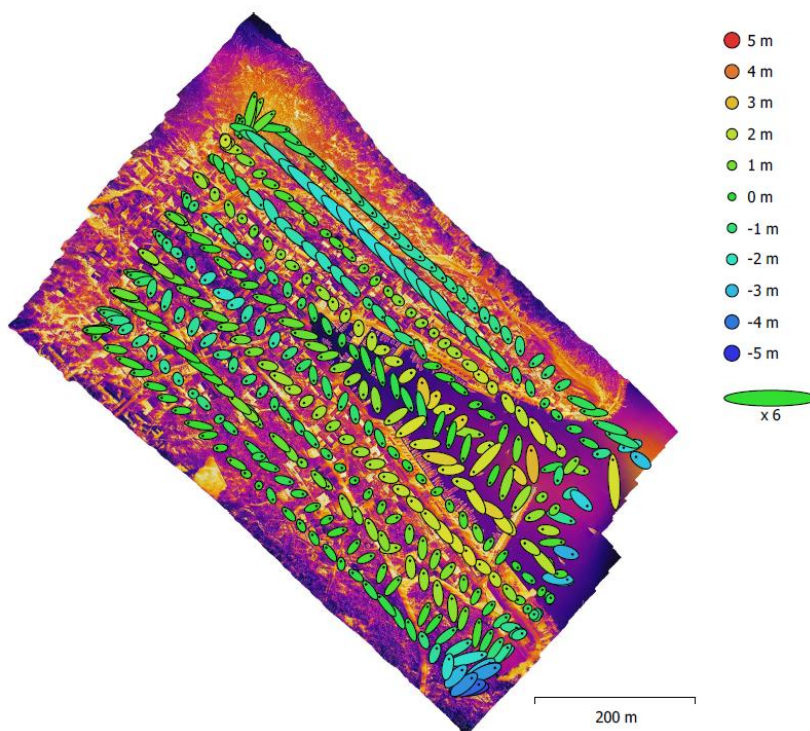
Slika III-9. Residuali slike za XT2 (13mm)



Slika III-10. Graf kretanja distorzije



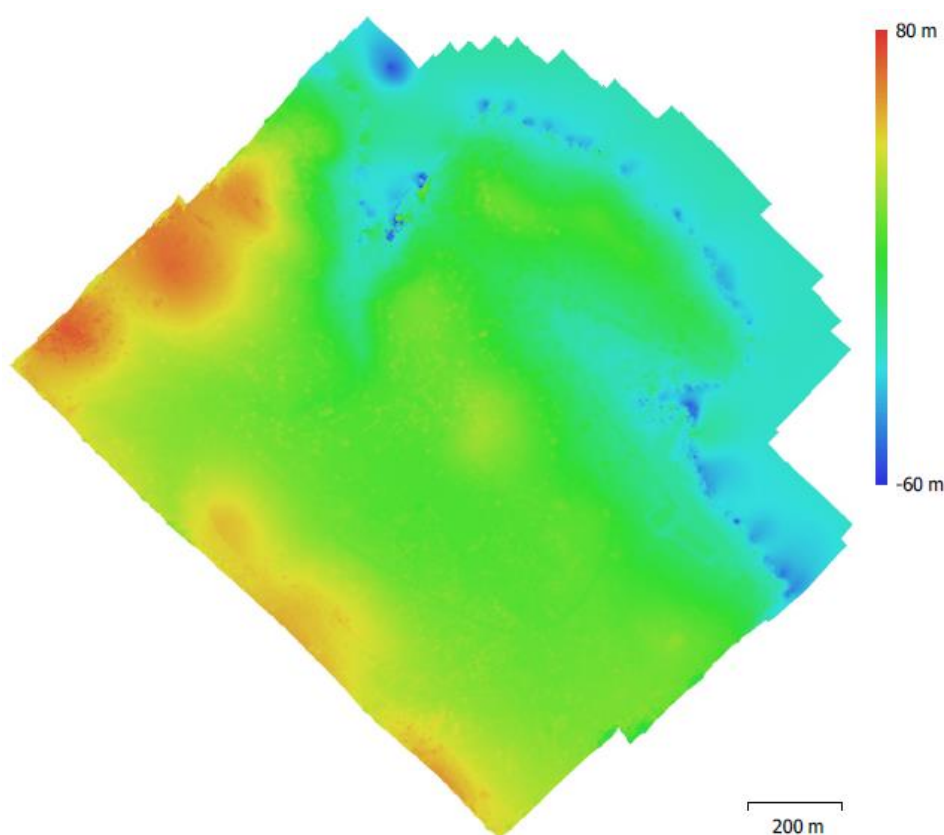
Slika III-11. Lokacije fotografija i procjene pogreške u drugom termalnom snimanju
 (Z pogreška je predstavljena bojom elipse. Pogreške X, Y predstavljene su oblikom elipse)



Slika III-12. Isječak lokacija fotografija i procjene pogreške u trećem termalnom snimanju (Z pogreška je predstavljena bojom elipse. Pogreške X, Y predstavljene su oblikom elipse)

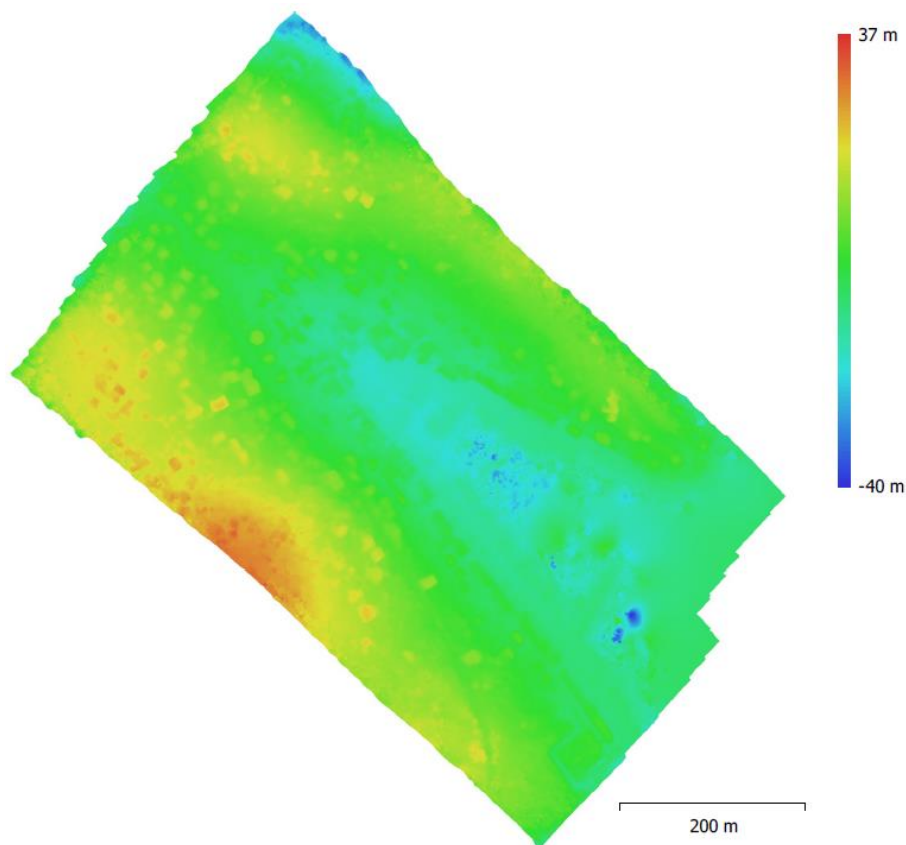
b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena

Iz gustog oblaka točaka u drugom termalnom snimanju (23 396 751 točaka) izveden je digitalni model površine naselja i uvale Sali prostorne rezolucije oko 30 cm (Slika III-13).



Slika III-13. Rekonstruirani digitalni model površina u drugom termalnom snimanju (GSD = 30.8 cm, gustoća točaka = 10.5 točaka na m²)

Slične vrijednosti su izvedene u trećem termalnom snimanju. Naime, iz gustog oblaka točaka (25 734 234 točaka) izveden je digitalni model površine naselja i uvale Sali prostorne rezolucije oko 30 cm (Slika III-14).



Slika III-14. *Isječak rekonstruiranog digitalnog modela površina u trećem termalnom snimanju (GSD = 30.8 cm, gustoća točaka = 10.5 točaka na m²)*

U nastavku teksta detaljno su navedeni svi korisničko definirani parametri koji su odabrani te bili rezultat procesa orijentacije termalnih snimaka te izgradnje trećeg termalnog modela za prostor naselja i uvale Sali. Parametri su podijeljeni u 13 osnovnih koraka.

1) General

Cameras = 1435

Aligned cameras = 1379

Coordinate system = HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)

2) Point Cloud

Points = **132,45** of **294,345**

RMS reprojection error = **0.121 (0.397 pix)**

Max reprojection error = **1.765 (5.432 pix)**

Mean key point size = **2.96707 pix**

Average tie point multiplicity = **3.72892**

3) Alignment parameters

Accuracy = **High**

Generic preselection = **Yes**

Reference preselection = **Yes**

Key point limit = **0**

Tie point limit = **0**

4) Optimization parameters

Parameters = **f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4**

5) Depth Maps

Count = **1165**

6) Reconstruction parameters

Quality = **Ultra High**

Filtering mode = **Aggressive**

7) Dense Point Cloud

Points = **25,743,234**

8) Reconstruction parameters

Quality = **Ultra High**

Depth filtering = **Aggressive**

9) DEM

Size = **11,574 x 10,617**

Coordinate system **HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)**

10) Reconstruction parameters

Source data = **Dense cloud**

11) Orthomosaic

Size = **5,902 x 5,784**

Coordinate system = **HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)**

12) General

Colors **3 bands, uint8**

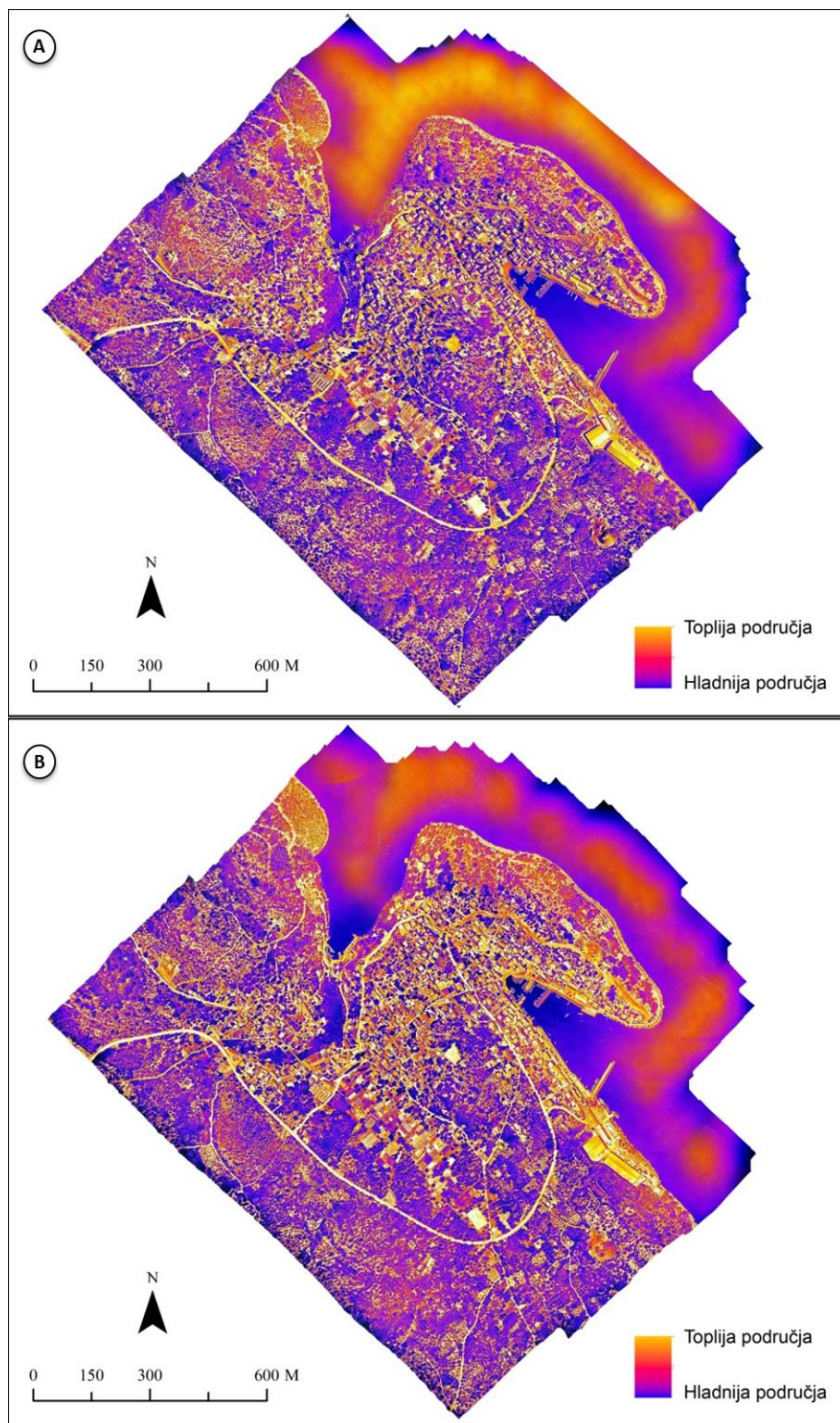
13) Reconstruction parameters

Blending mode = **Mosaic**

Posljednji korak aerofotogrametrijskog procesa uključivao je izgradnju termalnog digitalnog ortofoto modela naselja i uvale Sali. Prostorna rezolucija izvedenog modela iznosila je 30 cm. Nadalje, na slikama III-16A i B prikazani su intervalni (prvi i drugi) termalni modeli za šire područje naselja i uvale Sali.



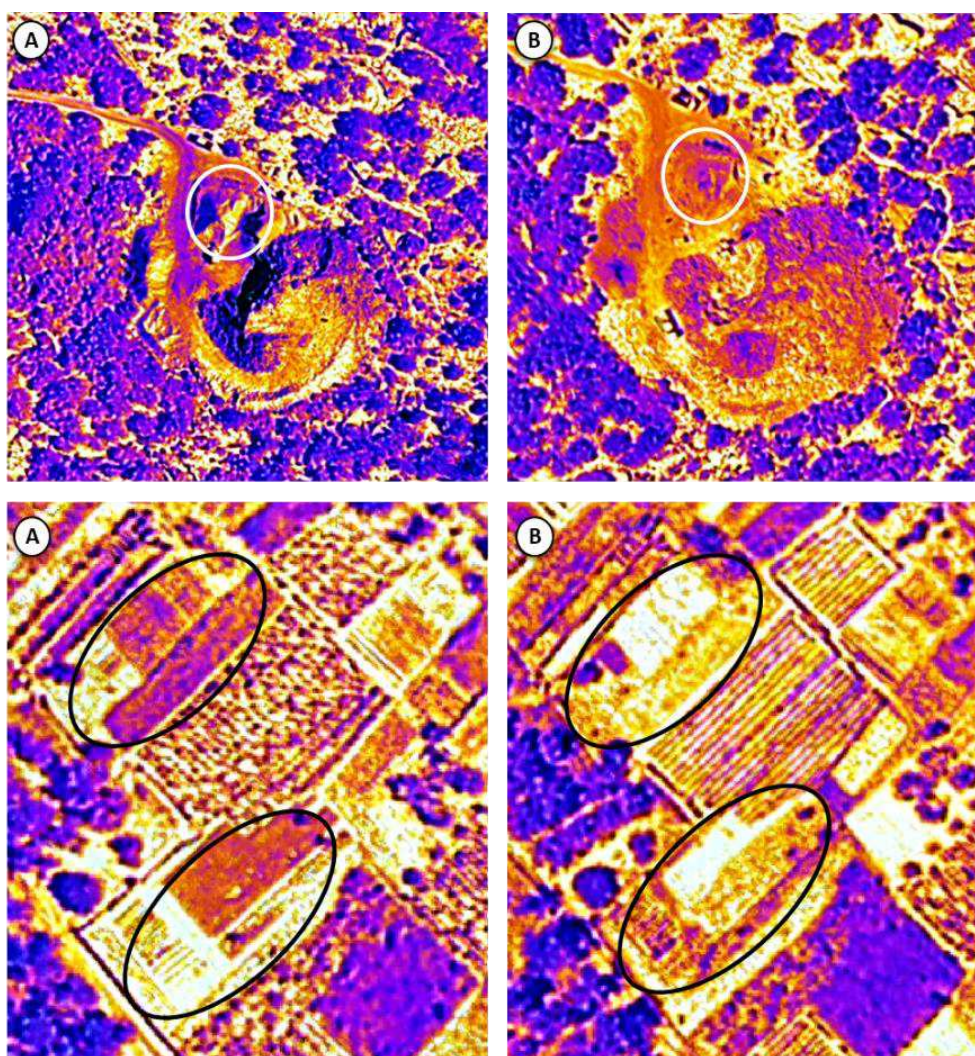
Slika III-15. *Isječak trećeg termalnog snimka uvale i naselja Sali*



Slika III-16. (A) Prvi i (B) drugi termalni model uvale i naselja Sali

c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

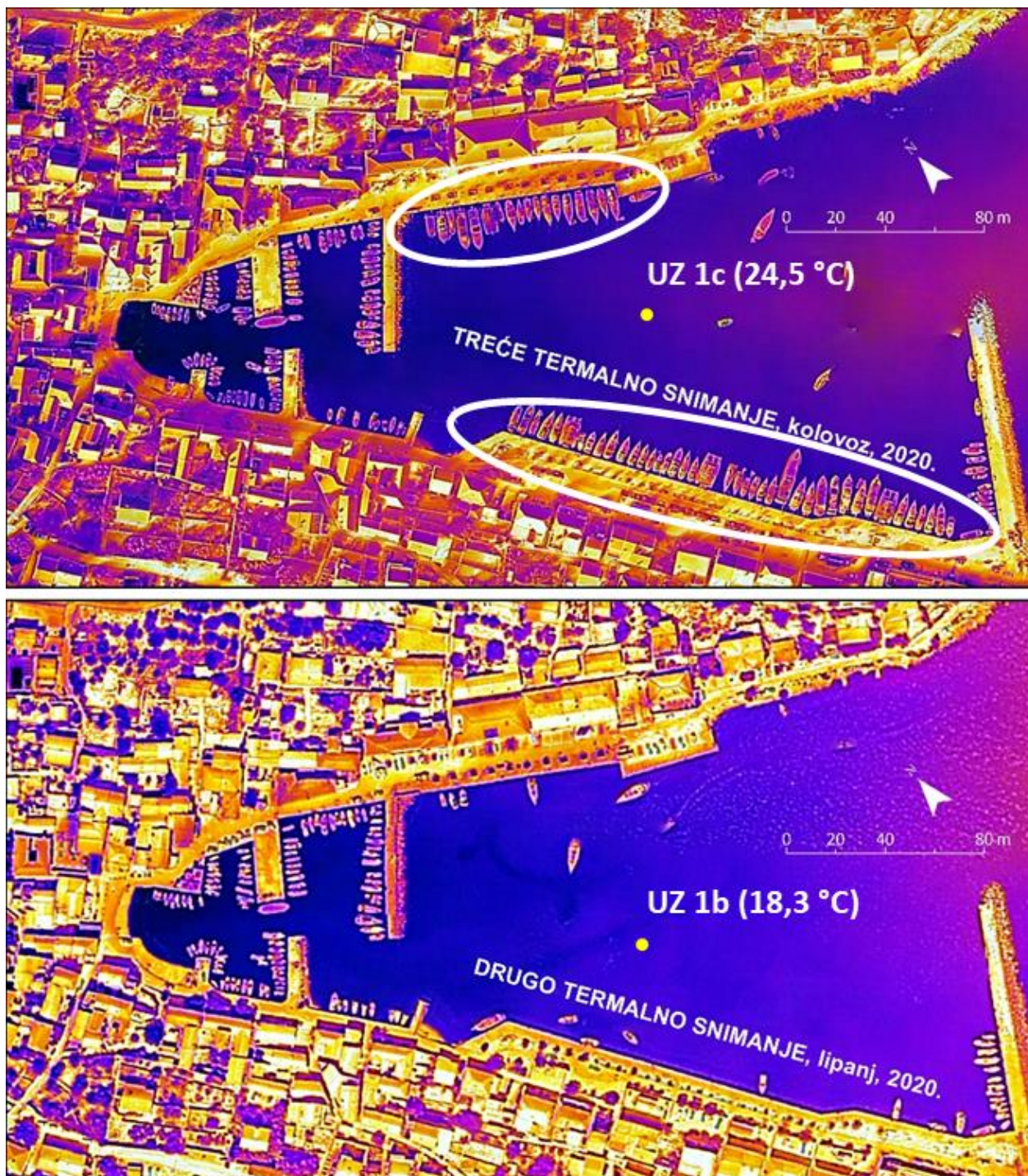
Iz intervalnih termovizijskih snimanja mogu se detektirati određene temperaturne i ostale promjene u prostoru. U nastavku je dato nekoliko primjera gdje su iz intervalnih termalnih modela uočene značajnije promjene. Na slici III-17 mogu se uočiti vizualne razlike između kamenoloma i poljoprivrednih parcela smještenih u širem području naselja Sali.



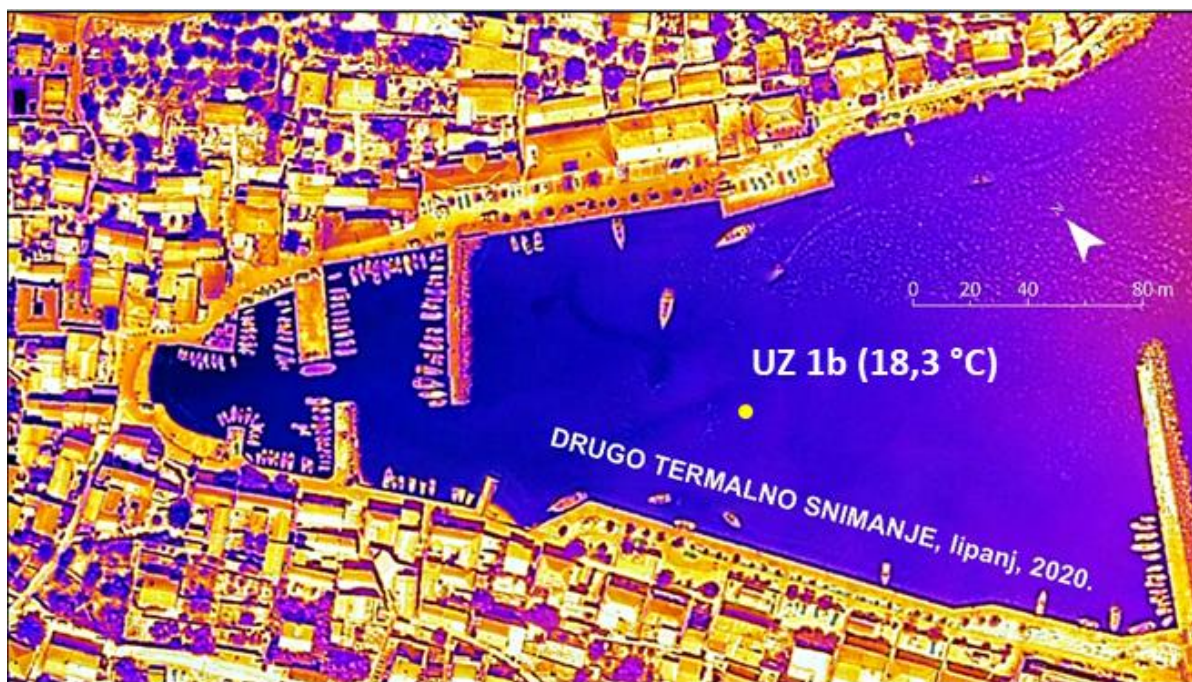
Slika III-17. Termalni digitalni ortofoto snimak kamenoloma i poljoprivrednih parcela snimljen u intervalnom termalnom snimanju

Na slici III-17 može se uočiti da je dio iskopanog materijala iz kamenoloma u razmaku između dva intervalna snimanja potrošen/odnesen. Niža temperatura zabilježena u centru kamenoloma posljedica je činjenice da je prvo intervalno snimanje napravljeno u trenutku veće sjene u odnosu na drugo snimanje. Također, na slici III-17 može se uočiti kako je u razmaku između dva intervalna snimanja došlo do uklanjanja vegetacije na određenim parcelama.

Nadalje, napravljene su usporedbe za treće termalno snimanje. Na slikama III-18-19-20 vidljiva su sva tri termalna snimka generirana u projektom istraživanju PEPSEA-ZADAR. Na snimaka je prikazano uže područje uvale i naselja Sali. Osim temperaturnih promjena, na snimcima se može uočiti veći broj brodica i jedrilica u trećem (kolovoz) u odnosu na prvo i drugo snimanje (veljača i lipanj). Temperature promjene je izrazito teško izravno proučavati zbog toga što fotografije nisu snimljene u isto vrijeme u danu, ali mogu se uočiti više temperature (svjetlija skala boja) koje prevladavaju na trećem u odnosu na prethodna dva snimanja.



Slika III-18. Treći i drugi termalni digitalni ortofoto snimak uvale Sali

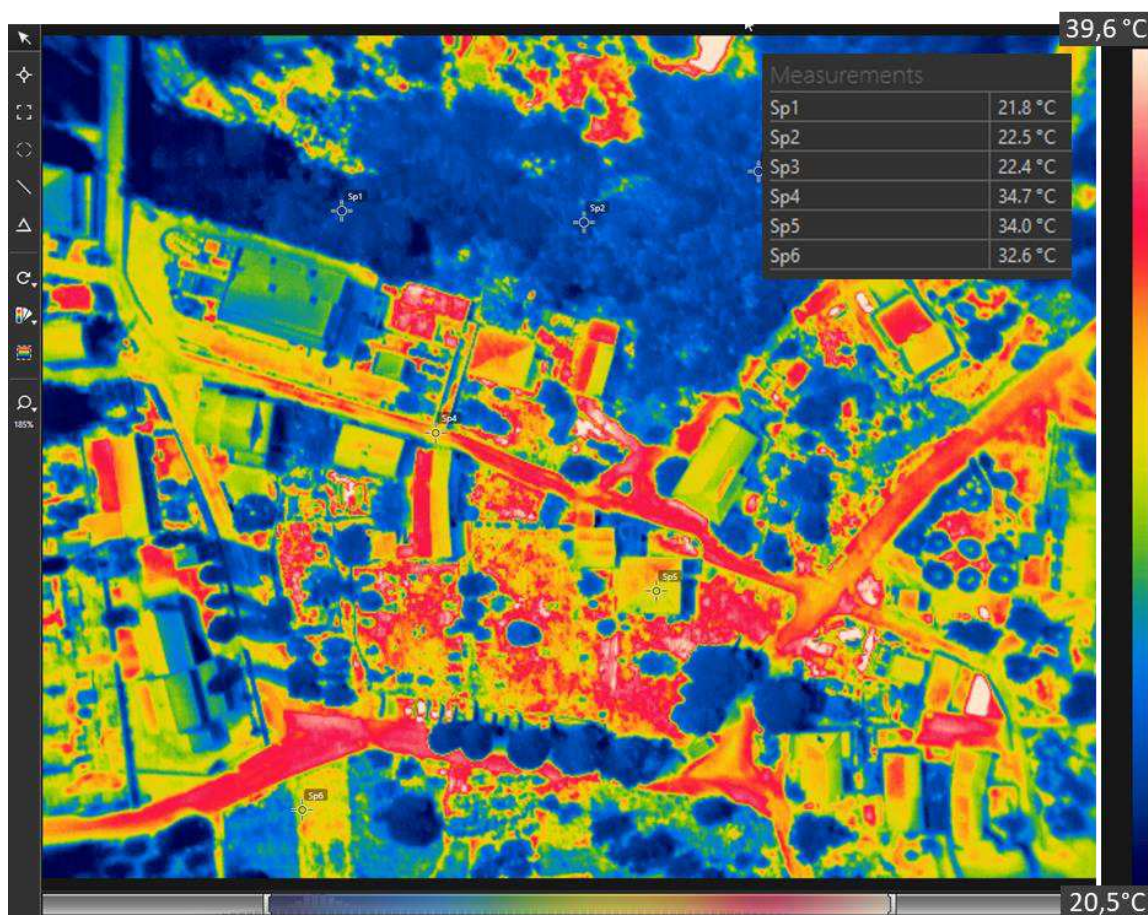


Slika III-19. Prvi i drugi termalni digitalni ortofoto snimak uvale Sali



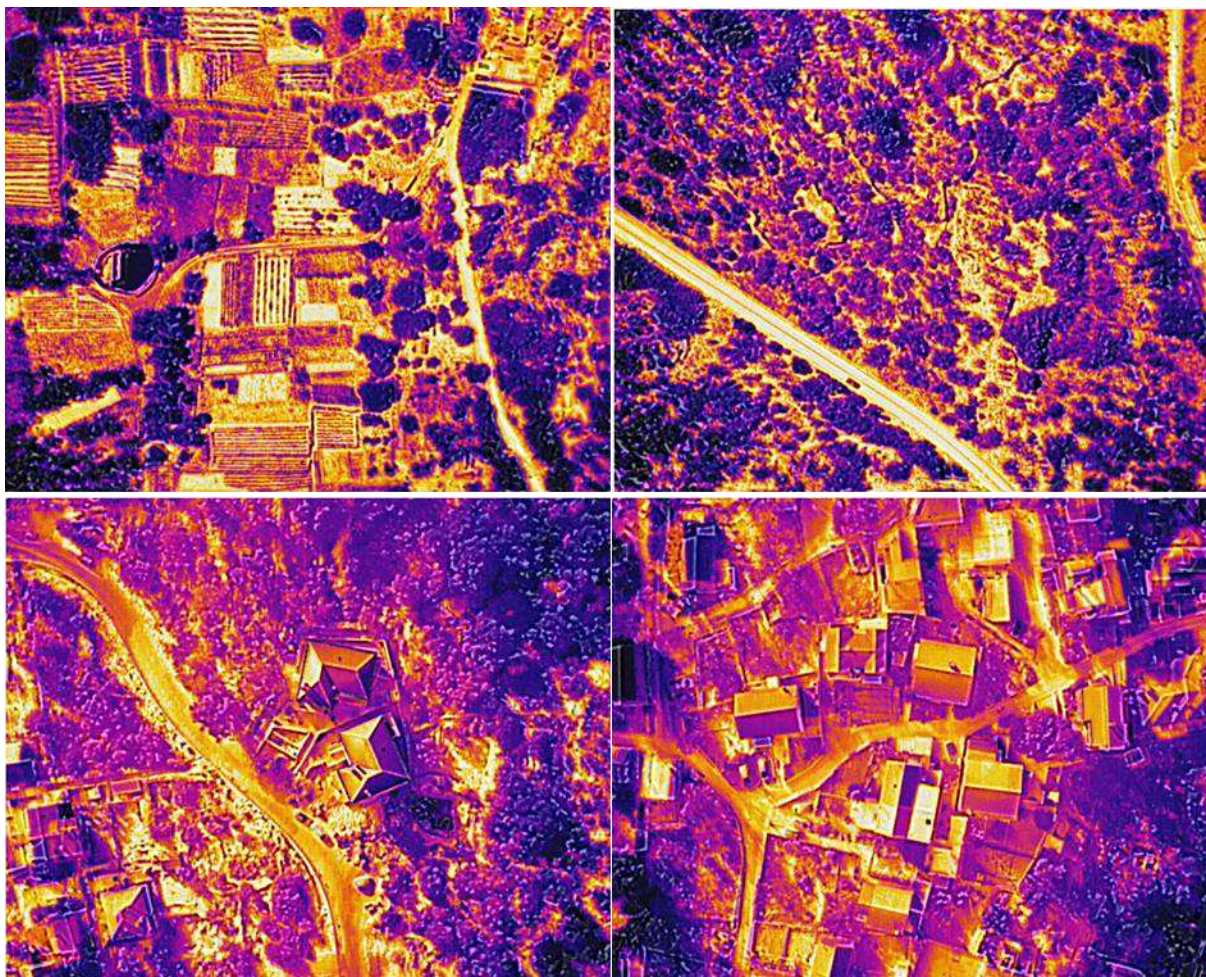
Slika III-20. Treći i prvi termalni digitalni ortofoto snimak uvale Sali

Na svakoj prikupljenoj fotografiji u intervalnim termalnim snimanjima mogu se očitati vrijednosti temperature za pojedini element slike (piksel). Na slici III-21. dan je primjer očitavanja temperature za šest proizvoljnih uzoraka unutar snimljenog područja slike.



Slika III-21. Primjer očitavanja vrijednosti temperature na odabranim uzorcima unutar termalne fotografije snimljene u drugom snimanju

Primjeri snimljenih termalnih fotografija u trećem termalnom snimanju (Slika III-22):



Slika III-22. *Primjeri snimljenih termalnih fotografija u trećem termalnom snimanju*

IV. AERO SNIMANJE PRIOBALNOG POJASA MULTISPEKTRALNOM KAMEROM



Aero snimanje priobalnog pojasa multispektralnom kamerom (do 5 kanala)

Podaktivnosti:

- a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm
- b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno orijentiranih analiza
- c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Sažetak

Aerofotogrametrijsko snimanje multispektralnom kamerom uvale i naselje Sali izvršeno je bespilotnom letjelicom (UAV¹) *DJI Matrice Pro 600* (Slika IV-24-25 A-D) i *RTK-GPS Stonex S10*. *Matrice 600 Pro* je veća bespilotna letjelica kineske tvrtke *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.* (DJI) sa sjedištem u *Shenzhen, Guangdong*. Na njega je montirana multispektralna kamera *Red Edge-Mica SenseMX*

Iz multispektralnog snimka uvale i naselja Sali generiran je model zemljišnog pokrova koji sadrži ukupno 15 klasa ako se isključi klasa *More*.

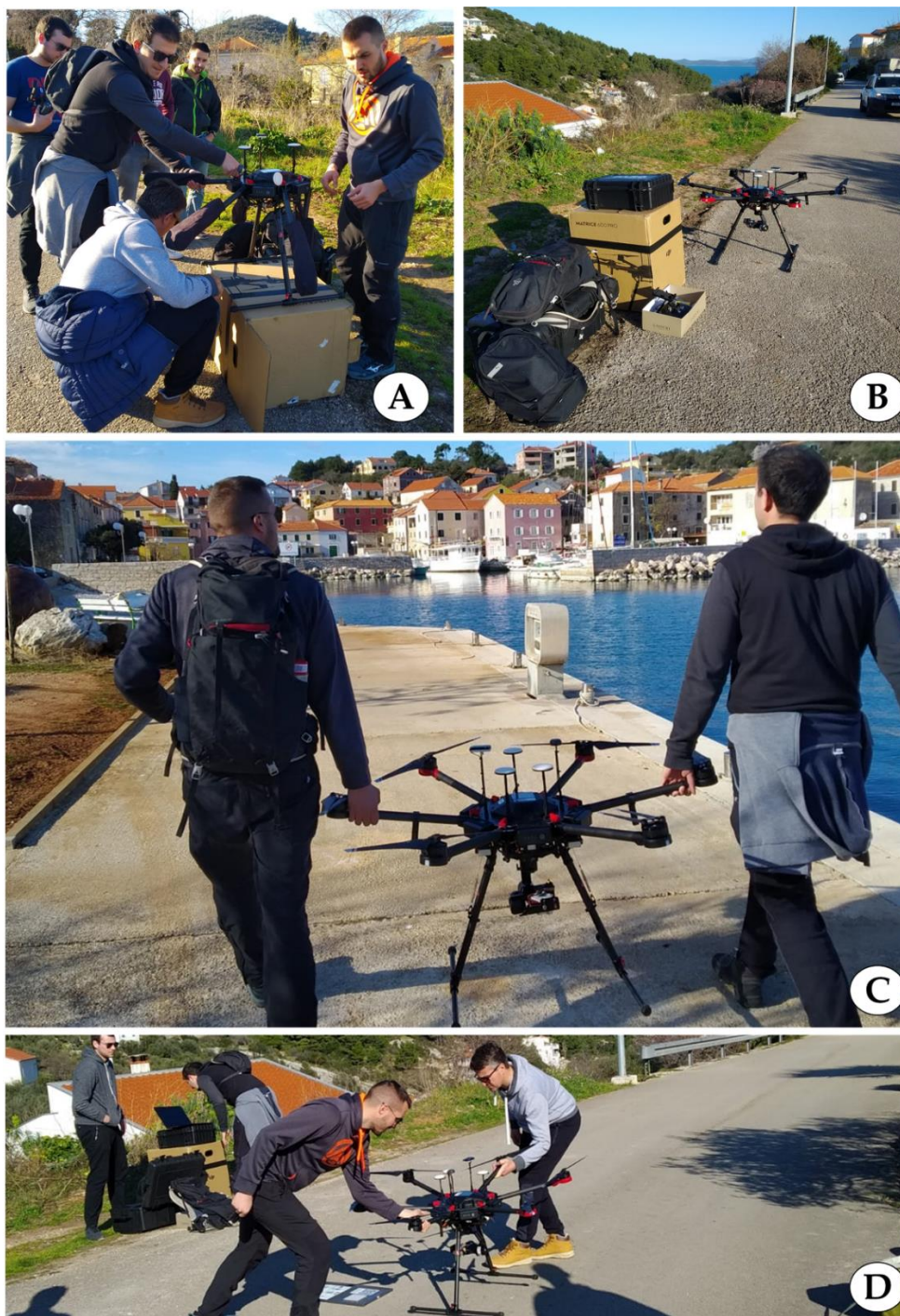
¹ Unmanned Aerial Vehicle

a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm - PRVO SNIMANJE (MODEL 1)

Prvo aerofotogrametrijsko snimanje multispektralnom kamerom uvale i naselje Sali izvršeno je 21. veljače 2020. godine. U procesu prikupljanja podataka korištena je bespilotna letjelica (UAV) *DJI Matrice Pro 600* (Slika IV-1 i IV-2. A-D) i *RTK-GPS Stonex S10*. *Matrice 600 Pro* je veća bespilotna letjelica kineske tvrtke *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.* (DJI) sa sjedištem u *Shenzhen, Guangdongu*. Na njega je montirana multispektralna kamera *Red Edge-Mica SenseMX* (Slika IV-1-2).



Slika IV-1. a) *DJI Matrice 600 Pro*, b) *Stonex S10* i c) *Red-Edge Mica SenseMX*



Slika IV-2. A) Priprema Matrice 600 Pro za zračno snimanje B) Matrice 600 Pro na prvom stajalištu C) prenošenje Matrice 600 Pro između stajališta D) sigurnosna provjera sastavnica UAV-a prije svakog leta (na slikama: A. Šiljeg, I. Marić, F. Domazetović, L. Pandža, T. Bulat)

UAV *Matrice 600 Pro* je opremljen autopilotom koji neprekidno analizira podatke inercijalne mjerne jedinice (*Inertial Measurement Unit*), uključujući podatke integriranog GPS-a. GPS i inercijalni sustavi određuju trenutnu prostornu poziciju i kutne momente uređaja. Dobivena razlučivost terena rezultat je odabira visine leta te obilježja kamere (npr. visina 120 m = 8 cm)². Snimke se ne prenose u realnom vremenu, već se pohranjuju na SD memorijsku karticu. U Tablici IV-1 navedene su karakteristike multispektralne kamere *MicaSense RedEdgeMX*.

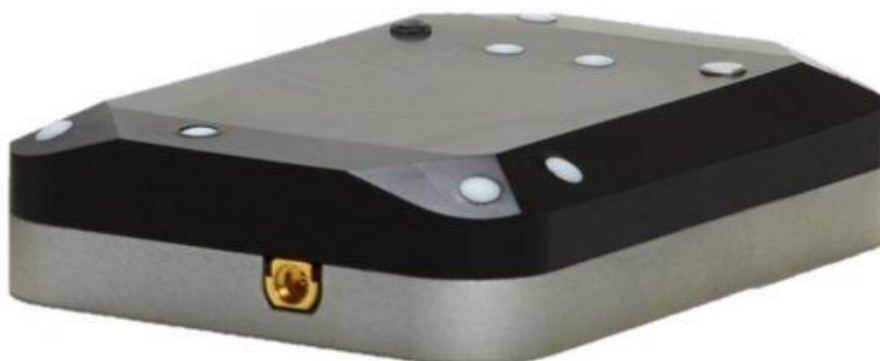
Tablica IV-1. Obilježja *MicaSense RedEdgeMX* multispektralne kamere

Obilježja	
Težina	231.9 g
Dimenzije	8.7cm x 5.9cm x 4.54cm
Spektralni kanali	Blue, green, red, red edge, near-IR (global shutter, narrowband)
Valna duljina (nm)	Blue (475 nm center, 20 nm bandwidth), green (560 nm center, 20 nm bandwidth), red (668 nm center, 10 nm bandwidth), red edge (717 nm center, 10 nm bandwidth), near-IR (840 nm center, 40 nm bandwidth)
Ground Samplig Distance (GSD)	8 cm per pixel (per band) at 120 m (~400 ft) AGL
Stopa snimanja	1 capture per second (all bands), 12-bit RAW
FoV (Field of View)	47.2° HFOV

MicaSense Red Edge je povezana na *Downwelling Light Sensor* (DLS2) (Slika IV-3). To je napredni senzor upadnog svjetla koji je izravno povezan na *MicaSense* senzore. Tijekom izvođenja misije DLS2 mjeri okolnu svjetlost i kut sunca za svaki od pet kanala kamere te sprema ove informacije u metapodacima (meta data) TIFF snimaka.

Te informacije zatim mogu koristiti specijalizirani alati za obradu (poput *Pix4Dmapper*) za ispravljanje globalnih promjena osvjetljenja usred leta, poput onih koje se mogu dogoditi zbog oblaka koji prekrivaju sunce. Pored toga, DLS2 pruža GPS podatke *MicaSense* senzoru ako GPS podaci nisu osigurani iz vanjskog izvora. Ako se koristi alternativni GPS izvor, GPS prijamnik će biti uključen pri jako maloj snazi (uBlox C/A code GPS @ 5 Hz). DLS2 bi uvijek trebao biti najviši objekt na UAV-u kako bi se izbjegle sjene ili refleksije. Sadrži integrirani GPS senzor koji se može koristiti za geografsko označavanje (geokodiranje) slika *MicaSense* senzora ako se GPS signali senzoru se dostavljaju na drugi način. Modul treba instalirati tamo gdje će imati jasan pogled u nebo, daleko od bilo kojeg uređaja koji bi ga mogli ometati (poput podatkovne veze ili video odašiljača).

² Prvi visini leta od 120 metara dobije se multispektralni snimak prostorne rezolucije od 8 cm



Slika IV-3. DLS2 senzor

Cilj terenskog istraživanja provedenog 21. veljače 2020. bio je snimiti prostor uvala i naselja Sali multispektralnom kamerom *RedEdge-MX - MicaSense*. Tjedan dana prije planiranja terenskog rada, izv. prof. dr sc. Ante Šiljeg i mag. geogr. Fran Domazetović otišli su na Dugi otok s ciljem upoznavanja sa suradnicima te za potrebe procjene morfometrije terena da bi što bolje isplanirali misije. Prostor snimanja obuhvaćao je naselje i uvalu Sali. U tablici IV-2 prikazan je generalni plan aktivnosti na terenu.

Tablica IV-2. Vremenski slijed izvođenja aktivnosti, 21. veljače, 2020.

Aktivnosti	Vrijeme (h)	
Polazak iz Zadra	5,45	
Dolazak u naselje Sali	6,30	
Označavanje orijentacijskih točaka	6,40 - 7,40	
Prikupljanje orijentacijskih točaka	6,40 - 7,40	
Odlazak na prvu točku stajališta i priprema za let	7,40 - 8,10	
(kalibracija kamere, IMU, kompasa)		
Prvo podizanje drona	8,10	
Trajanje svih misija	8,20 - 17,40	
Spremanje opreme i analiza terena	17,40 - 20,00	
Povratak u Zadar	20,40	

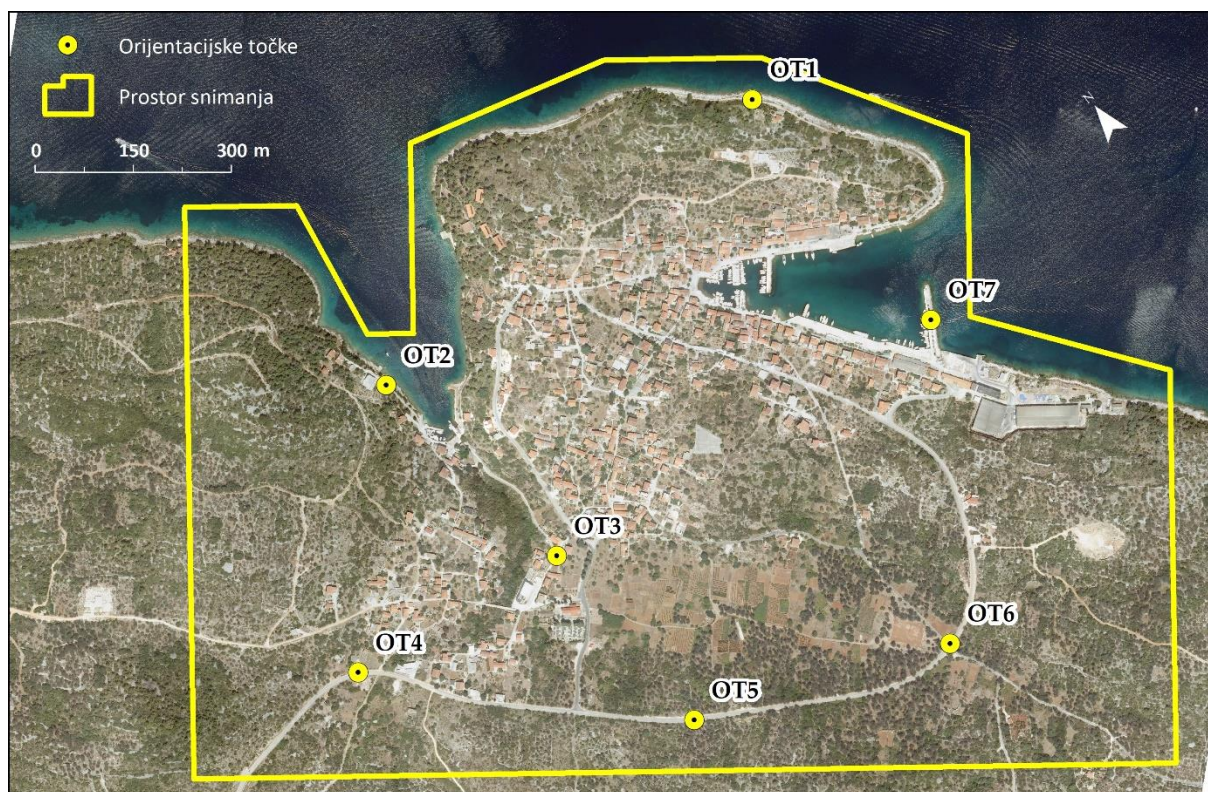
Prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove

Aerofotogrametrijsko snimanje i obrada podataka izvršena je u nekoliko koraka. Prvi korak se odnosio na označavanje i prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove. Orijentacijske točke (OT) su prikupljene s ciljem postizanja bolje apsolutne orijentacije modela. OT se mogu identificirati na snimkama ili rekonstruiranom modelu, a imaju poznate (x, y i z) koordinate u specifičnom koordinatnom sustavu. Koriste se za povezivanje bloka s referentnim koordinatnim sustavom i izjednačenje bloka aerotriangulacije. Označeno je i prikupljeno ukupno 7 točaka lokalne geodetske osnove (Slika IV-4).

Tablica IV-3. Koordinate prikupljenih orijentacijskih točaka

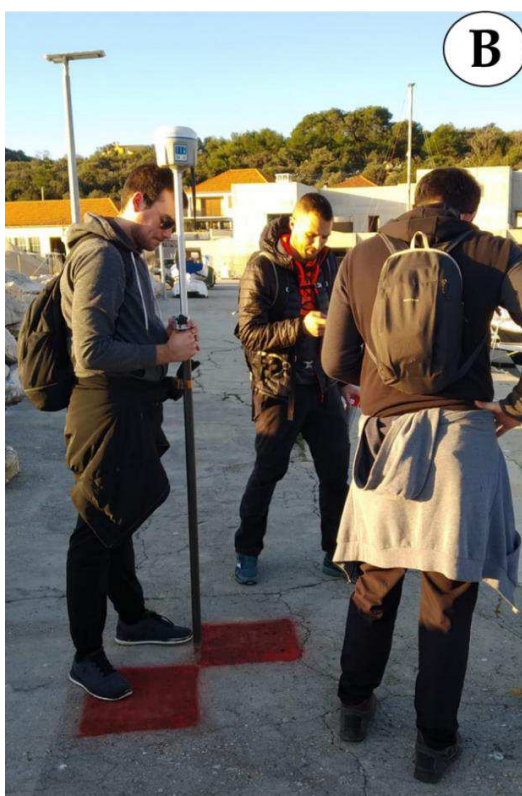
FID	Label	X	Y	Z
0	OT1	393053,867	4867457,182	6,147
1	OT2	392343,222	4867457,350	7,051
2	OT3	392387,875	4867090,737	32,376
3	OT4	392038,929	4867137,107	46,469
4	OT5	392398,951	4866763,155	39,732
5	OT6	392779,359	4866614,689	36,760
6	OT7	393061,366	4867023,297	1,080

Točke su prikupljene na različitim nadmorskim visinama (Tablica IV-3), uvažavajući pravila prostornog rasporeda postavljanja orijentacijskih točaka u fotogrametriji (distribucija kroz cijeli plan snimanja) (Slika IV-4). Plan postavljanja točaka je napravljen u softveru *ArcMap 10.1* uvažavajući morfometriju terena.



Slika IV-4. Distribucija prikupljenih orijentacijskih točaka

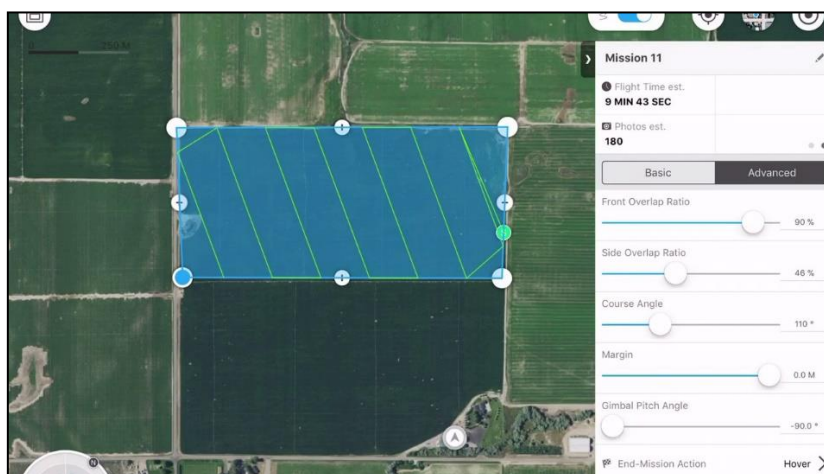
Ukupno je prikupljeno 7 orijentacijskih točaka (OT1-7) koje će poslužiti za postizanje bolje apsolutne orijentacije modela. Prilikom označavanja OT-a vođeno je računa da su oznake dovoljno velike, korištena je kontrastna (crvena) boja u odnosu na lokalni teren te se pazilo na otvorenost horizonta iznad oznaka kako bi se olakšalo dodavanje markera (Slika IV-5). Označene geodetske točke su prikupljene koristeći *GNSS RTK Stonex S10*. Točke su prikupljanje u službenom projekcijskom koordinatnom referentnom sustavu poprečne Mercatorove projekcije (HTRS96/TM) (Tablica IV-3).



Slika IV-5. A) Označavanje orijentacijske točke OT2 B) prikupljanje orijentacijske točke C) sjecište kvadrata = prikupljena točka (na slikama: A. Šiljeg, I. Marić, F. Domazetović, L. Pandža)

Izrada plana snimanja

Izrada optimalnog plana snimanja uključivala je odabir vrsta misija s obzirom na morfologiju terena, objekt istraživanja te distribuciju OT-a. Izrada misija UAV-om je izvršena u softveru *DJI GS PRO* (Slika IV-6). Širi prostor uvale i naselja Sali snimljen je koristeći jednu vrstu misija: *Grid (Single mission) Mission* s prednjim i bočnim preklapanjem 80%.



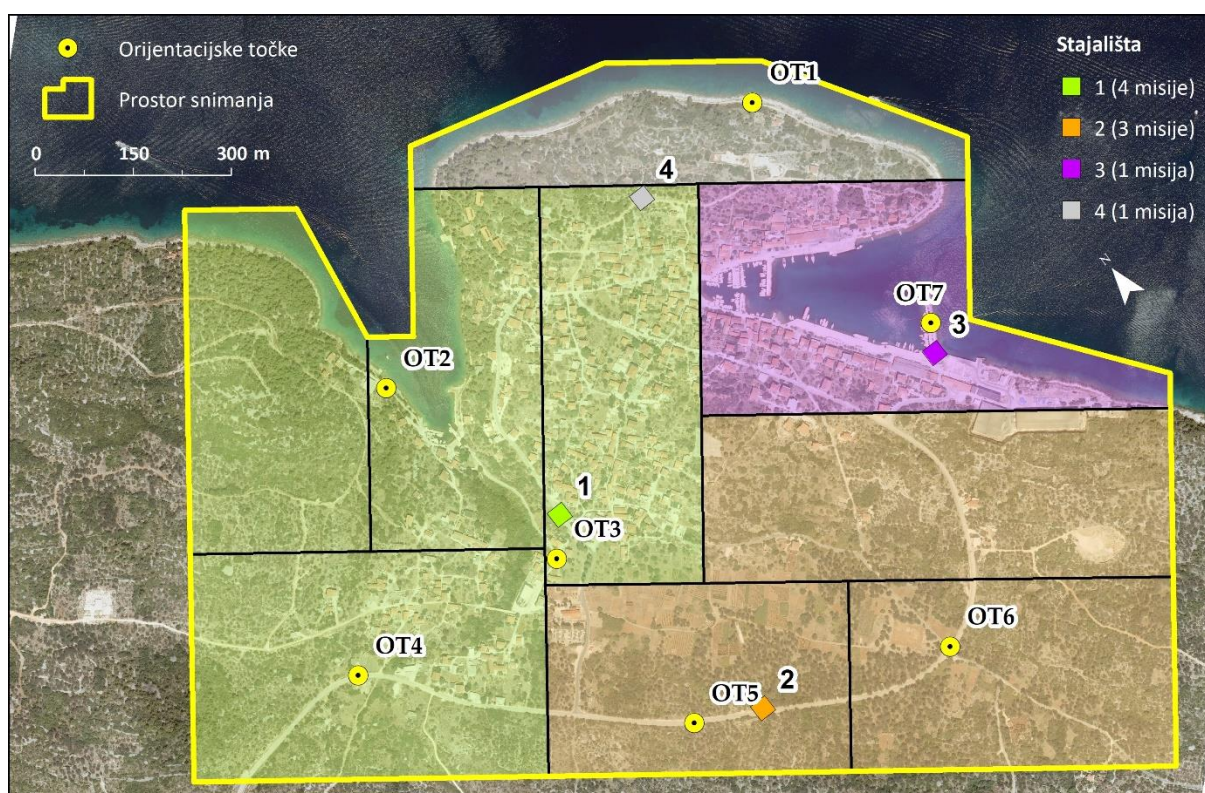
Slika IV-6. Primjer izgleda sučelja DJI GS Pro aplikacije

Misije su obuhvaćale širi prostor uvale i naselja Sali (Slika IV-8). S obzirom na obuhvatnost terena, te željenu prostornu rezoluciju koja se u ovoj projektnoj aktivnosti željela postići (GSD = 5 cm) prosječna visina leta odnosno snimanja bila je oko **75 metara** (Slika IV-7).

Calculator		
Sw	4,8	= the sensor width of the camera (millimeters)
FR	5,5	= the focal length of the camera (millimeters)
H	75	= the flight height (meters)
imW	1280	= the image width (pixels)
imH	960	= the image height (pixels)
GSD	5,11	= Ground Sampling Distance (centimeters/pixel)
Dw	65	= width of single image footprint on the ground (meters)
DH	49	= height of single image footprint on the ground (meters)

Slika IV-7. Izračun GSD-a u Pix4D kalkulatoru

Prostor snimanja je podijeljen u 9 misija (Slika IV-8), a predviđeno trajanje svake misije bilo je 14-20 minuta. Nakon izvođenja jedne misije, UAV bi se vratio na točku ishodišta (*home point*). Set baterija bi mu bio na razini od oko 30 %. Potom bi mu se istrošeni set baterija stavio puniti, a novi set postavio u UAV. S obzirom na dugotrajnost procesa snimanja, broj misija te vrijeme punjenja baterija na Dugi otok zaputili smo se trajektom u 5,45 iz Zadra. Nakon 45 minuta plovidbe stigli smo do odredišta. U jednom danu uspješno je izvršeno snimanje.



Slika IV-8. Isplanirane misije te predviđena stajališta za dizanje UAV-a

Izvođenje multispektralnog snimanja

Nakon prikupljanja točaka lokalne geodetske osnove (OT1-OT7) otišli smo na prvu lokaciju predviđenu za dizanje bespilotne letjelice (Slika IV-8). Potom je izvršena je radiometrijska kalibracija multispektralne kamere, kalibracija kompasa i IMU sustava. Kalibracija *Mica Sense RedEdge MX* kamere izvršena je pomoću refleksijskog kalibracijskog panela (CRP³) (Slika IV-9).



Slika IV-9. Izgled refleksijskog kalibracijskog panela te upute za kalibraciju

Radiometrijska kalibracija pretvara sirove vrijednosti piksela slike u apsolutne vrijednosti spektralnog zračenja. Korištenje spomenutog panela omogućuje precizniju kompenzaciju za upadne svjetlosne uvjete i generiranje kvalitetnijih podataka. CRP ima poznate vrijednosti refleksije u vidljivom i spektru infracrvenog svjetla.

³ Calibrated Reflectance Panel

Prema primjerima najbolje prakse CRP slike trebaju se snimiti prije i nakon svakog leta kako bi se osigurao precizan prikaz svjetlosnih uvjeta tijekom leta. Tako je napravljeno u slučaju multispektralnog snimanja uvale Sali (Slika IV-10).



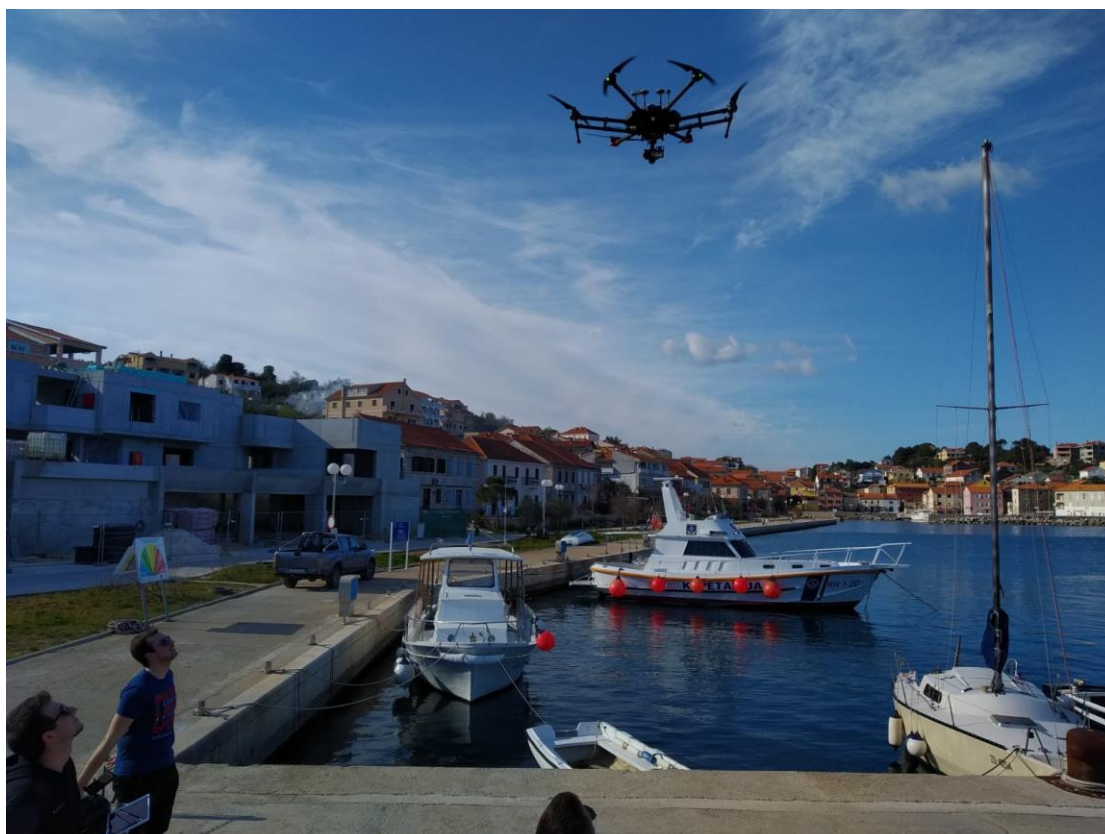
Slika IV-10. Slike kalibracijskog panela A) prije i B) nakon izvođenja misije

Proces kalibracije je izvršen na način da je panel spušten na ravnu podlogu. Potom je putem Wi-Fi mreže kamera spojena s konfiguracijskom stranicom. Posebna pozornost je obraćena na to da panel ne bude na sjeni prilikom snimanja kalibracijske fotografije. Ako je fotografija kalibracijskog panela uspješno snimljena senzori s unutarnjim zvučnicima reproducirat će zvuk dok sensor ne prepozna ploču refleksije MicaSense i QR kod. Potrebno je držati senzor (UAV + senzor) najmanje 1 metar iznad MicaSense kalibrirane ploče refleksije. Bitno je pokušati centrirati ploču i QR kôd u vidnom polju. Nakon reprodukcije zvuka bljeska plavo LED svjetlo koje pokazuje da je kalibracijski panel snimljen. Ako senzor ne prepozna ploču, nastavit će proizvoditi zvuk sve dok korisnik ne pritisne gumb "Stop" (Slika IV-11).



Slika IV-11. Kalibracijski panel na A) prvom i B) četvrtom stajalištu

Nakon kalibracije UAV je spojen s tabletom i aplikacijom *DJI GS Pro* te je pokrenuta svaka od isplaniranih misija (Slika IV-12).

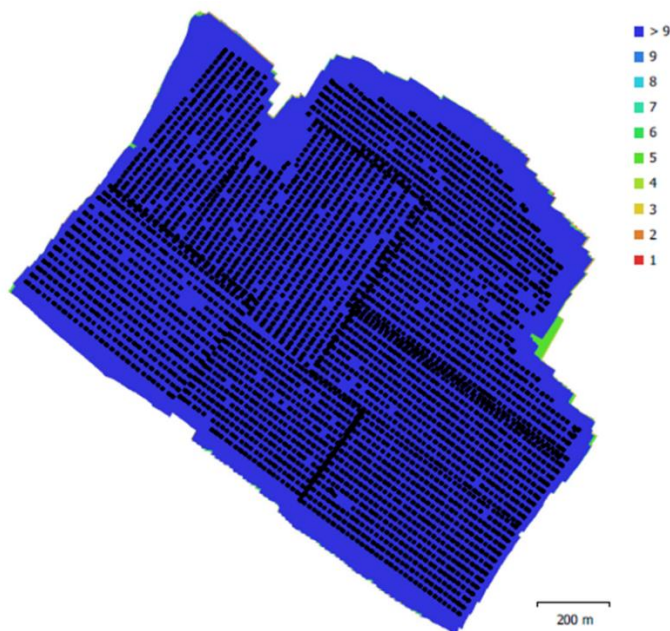


Slika IV-12. Uzlijetanje *Matrica 600 Pro* u pretposljednju isplaniranu misiju

U isplaniranih 7 misija ukupno je prikupljeno 94,6 GB fotografija. U svim misija bilo je ukupno 8184 lokacija snimanja. Iz toga proizlazi da je ukupno snimljeno ($8184 * 5 = 40\ 920$ fotografija). Naime, na svakoj lokaciji snimanja prikupljeno je 5 fotografija za svaki kanal (*red, green, blue, red-edge, near infra red*) koji multispektralna kamera snima (Slika IV-13). Iz izvješća generiranog u Agisoft Metashapeu utvrđeno je da je cijeli prostor snimanja uvale i naselja Sali vidljiv na više od 9 fotografija (Slika IV-14).



Slika IV-13. Ukupan broj snimljenih fotografija te primjer jedne lokacije snimanja



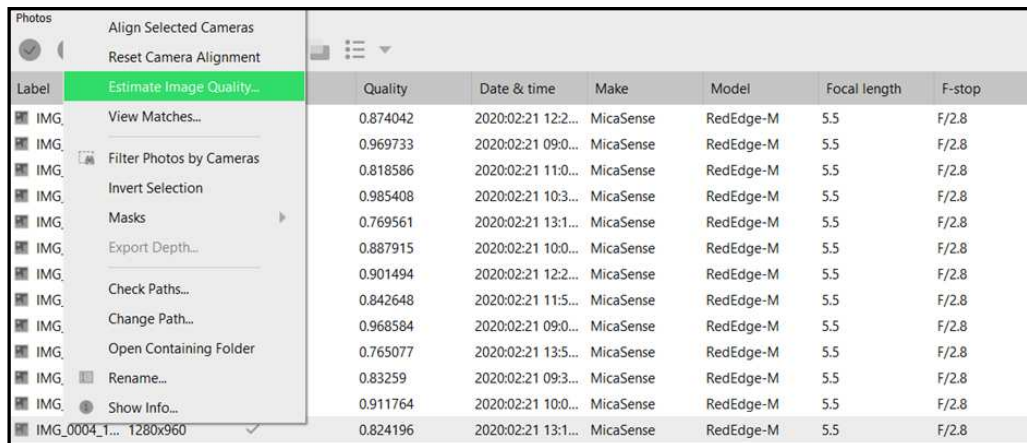
Slika IV-14. Lokacija fotografija te broj preklopa

Obrada snimaka - izrada multispektralnog snimka

U procesu obrade snimki korišten je računalni program *Agisoft Metashape Professional 1.5.1* specijaliziran SfM-MVS za fotogrametriju. To je napredni softver za 3D modeliranje koji kroz obradu digitalnih fotografija stvara visokokvalitetne 3D prostorne podatke. Primjenjuje metodu SfM koja omogućuje da se tehnikom prilagođavanja snopova (BA) istodobno odredi orijentacija i položaj kamere u prostoru (vanjski orijentacijski parametri) kao i 3D koordinate točaka objekata za veliki broj snimki. Uz vanjske, istodobno se određuju i unutarnji orijentacijski parametri kamere. Povezivanje snimki i rekonstrukcija 3D modela u programu su potpuno automatizirani. Proces obrade snimki i generiranja izlaznih modela (digitalnog modela površina (DSM), digitalnog ortofota (DOF), oblaka točaka i 3D modela) izvršen je u nekoliko koraka.

Prvi korak odnosio se na ubacivanje svih fotografija u kreirani projekt Sali.psx te provjeru uvezenih podataka.

Potom je izvršena provjera prikupljenih snimaka kroz automatsku procjenu kvalitete *Image quality* (Slika IV-15). Zamućene i loše fokusirane snimke mogu negativno utjecati na rezultate spajanja snimaka (*align*). Prema službenim uputama *Agisoft Metashape* preporuka je da granična vrijednost kvalitete bude 0,5. Slijedeće primjere dobre prakse navedene vrijednosti je uzeta u ovoj analizi.



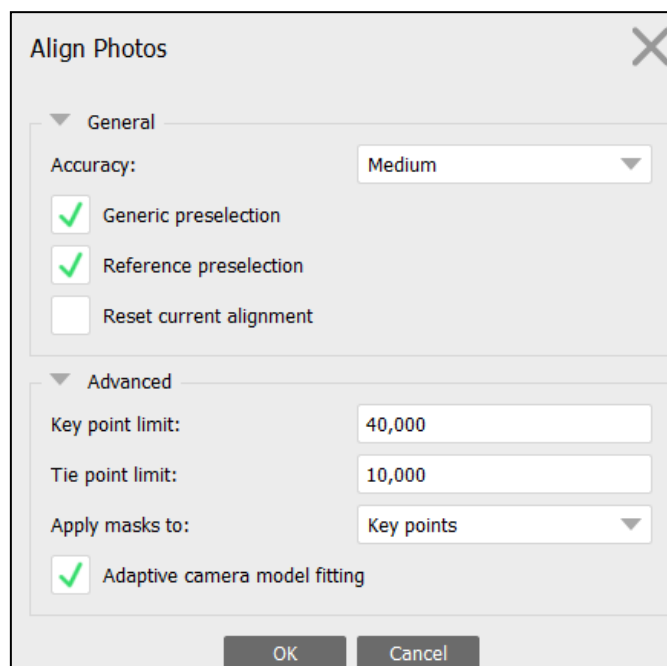
Label	Estimate Image Quality...	Quality	Date & time	Make	Model	Focal length	F-stop
IMG_0004_1...	1280x960	0.824196	2020:02:21 13:1...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_2...		0.83259	2020:02:21 09:3...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_3...		0.765077	2020:02:21 13:5...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_4...		0.968584	2020:02:21 09:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_5...		0.842648	2020:02:21 11:5...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_6...		0.901494	2020:02:21 12:2...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_7...		0.887915	2020:02:21 10:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_8...		0.769561	2020:02:21 13:1...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_9...		0.985408	2020:02:21 10:3...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_10...		0.818586	2020:02:21 11:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_11...		0.969733	2020:02:21 09:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_12...		0.874042	2020:02:21 12:2...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8

Slika IV-15. Procjena kvalitete prikupljenih fotografija u Agisoft Metashapeu

Nakon detekcije fotografija koje imaju vrijednost manju od 0,5 odabrana je opcija *Disable camera*. Pri tome je vođeno računa da se ne brišu uzastopne snimke, npr. ako tri snimke za redom imaju kvalitetu manju od 0,5, trebalo bi izbrisati prvu i treću snimku, a drugu ostaviti jer je važnije da imamo izrađen multispektralni snimak za cijelo područje uvale i naselja Sali na osnovi svih snimki od toga da su sve snimke oštre.

Nakon procjene kvalitete fotografija izvršeno je ručno brisanje snimaka u kojima je očigledno došlo do pogreške. Pogreška se u ovom slučaju odnosi na fotografije koje su snimljene prije polijetanja ili tijekom dizanja drona. Potom su isključeni (maskirani) pomični i nepotrebni dijelovi (npr. nebo, ljudi u pokretu) na snimkama koje prilikom izvođenja rijetkog i gustog oblaka točaka mogu otežati povezivanje snimki. Maskirana područja algoritam ne koristi prilikom procesa fototriangulacije.

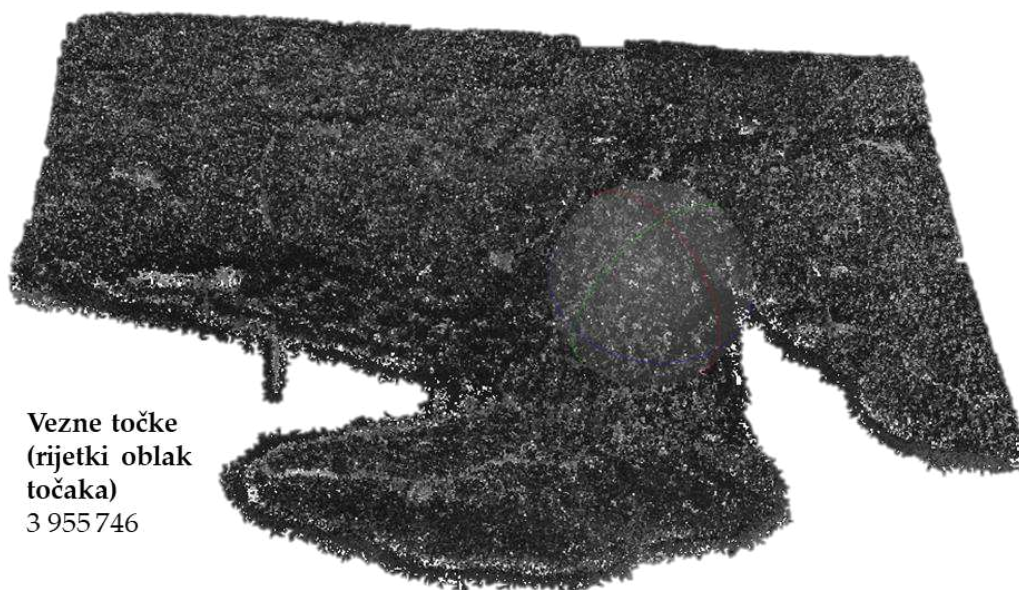
Prije inicijalne izrade modela izvršena je orijentacija i spajanje snimki (*align*). Zbog velike količine snimaka align je napravljen prema sljedećim parametrima *Accuracy* je postavljen na *Medium*, odabrane su opcije *Generic* i *Reference preselection*, *Key point limit* je postavljen na 40 000, a *tie point limit* na 10 000 (Slika IV-16). Cijeli proces spajanja je trajao 12 sati i 8 minuta.



Slika IV-16. *Primjer postavljenih parametara u procesu spajanja fotografija*

Nakon inicijalnog povezivanja (Slika IV-17) izvršeno je resetiranje *aligna* za netočno pozicionirane snimke (snimke bez *aligna*). U prozoru *Photos* označene su sve nepovezane fotografije → desni klik → *Reset Camera Alignment*. Sljedeći korak se odnosio na ručno brisanje veznih točaka koje sugeriraju na grubu pogrešku. Spomenute vezne točke nastale su kao pogreška pri alignu snimki. U glavnom prozoru *Metashapea* pomoću jednog od alata za označavanje označene su grube pogreške točaka nastalih pri alignu snimke te su izbrisane. Potom je pomoću seta alata *Gradual selection* izvršena reoptimizacija snimki kroz poluautomatsko brisanje veznih točaka prema zadanim parametrima.



U *Gradual selectionu* korištena su dva parametra: reprojekcijska pogreška (*Reprojection error*) i rekonstrukcijska nesigurnost (*Reconstruction uncertainty*). Od ukupnog broja veznih točaka označeno je i izbrisano njih 10% koji imaju najveću reprojekciju pogrešku. Nakon brisanja izvršena je optimizacija kamera (*Optimize Cameras*) nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametara ($f, cx, cy, k1, k2...$ itd). Potom je od preostalog broja veznih točaka označeno i izbrisano njih 10% koji imaju najveću nesigurnost rekonstrukcije. Opet je nakon brisanja izvršena optimizacija kamera nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametar.



Vezne točke
(rijetki oblak
točaka)
3 955 746

Slika IV-17. Preostale vezne točke nakon izvršene gradualne selekcije

Dakle, softver je unutarnje kalibracijske parametre kamere nakon svake optimizacije ažurirao (Slika IV-18). Očitani parametri kalibracije su u softveru uzeti kao početni elementi za izračun elemenata orijentacije u procesu fototriangulacije. Inicijalno je generirano 5 357 532 veznih točaka, međutim kroz ručno brisanje grubih pogrešaka i primjenu alata gradualne selekcije u konačnici je ostalo njih 3 955 746 s RMS reprojection error od 0.125395 pix.

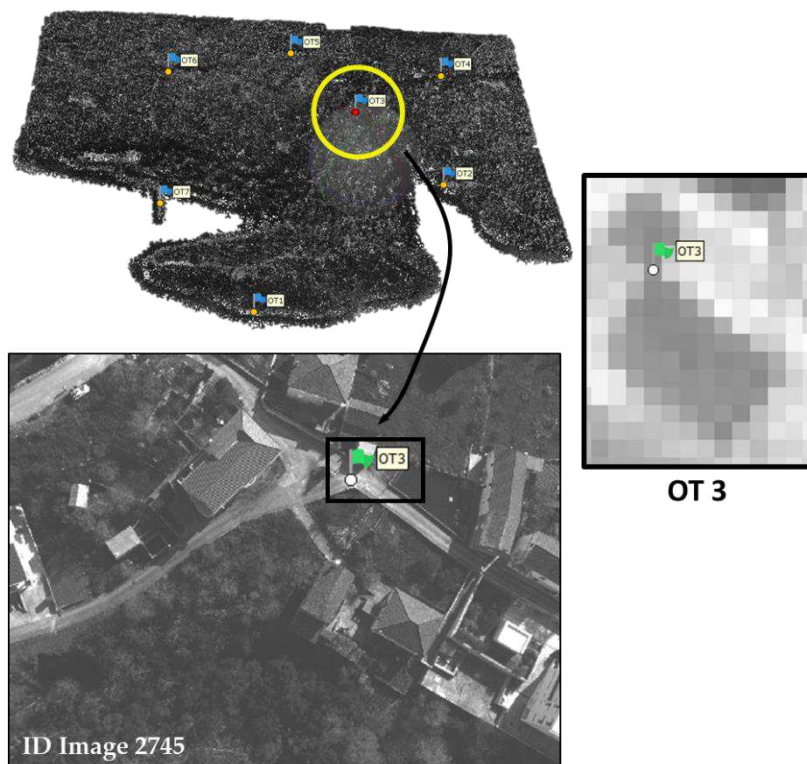
f:	1449.26959					
cx:	3.69064	b1:	0			
cy:	2.85602	b2:	0			
k1:	-0.0991088	p1:	0			
k2:	0	p2:	0			
k3:	0	p3:	0			
k4:	0	p4:	0			
f:	1447.66027					
cx:	4.45927	b1:	0.64923			
cy:	-2.40729	b2:	-0.253331			
k1:	-0.094404	p1:	-0.000106358			
k2:	0.140682	p2:	0.000142344			
k3:	-0.0468197	p3:	7.23867			
k4:	0.087038	p4:	-15.4311			

Slika IV-18. A) Inicijalni i B) procijenjeni kalibracijski parametri nakon iterativne optimizacije kamera

Nakon izgradnje rijetkog oblaka (*sparse cloud*) točaka sljedeći korak se odnosio na izvođenje i vizualizaciju gustog oblaka (*dense cloud*) točaka. Na osnovi procijenjenih lokacija kamera izračunava se dubina za svaku kameru. Tim procesom izvodi se oblak točaka koji može biti jednake gustoće ili čak gušći od oblaka točaka dobivenog LiDAR-om. Inicijalno je generiran gusti oblak točaka po parametrom kvalitete *Low*. Razlog tome je taj jer je spomenuti model poslužio kao osnova za dodavanje orijentacijskih točaka. Iz izvedenog gustog oblaka točaka potom je rekonstruirana 3D mreža poligona kao prikaz površine objekta.

Ona je izvedena primjenom algoritamske metode *Height field*. Rezultat rekonstrukcije geometrije, odnosno izrade mreže poligona u daljnjem procesu je teksturiran. Teksturirana mreža poligona poslužila

je kao osnova za dodavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka prikupljenih na terenu s RTK GNSS Stonex S10 (Slika IV-19).



Slika IV-19. *Primjer pozicioniranja OT3 na odabranom snimku*

Nakon što su dodane i pozicionirane sve orijentacijske točke na inicijalno izgrađenom modelu izvršen je *Update* te ponovna optimizacija kamere. Nakon dodavanja orijentacijskih točaka izračunata je točnost izvedenih modela (Tablica IV-4). Korišteni su sljedeći statistički pokazatelji: srednja apsolutna pogreška (*mean absolute error* – MAE) te srednja kvadratna pogreška (*root mean square error* – RMSE). RMSE se uobičajeno navodi i koristi se kao metrika provjere kvalitete površine modela, dok MAE pruža prirodnu i usporedivu mjeru performansi modela i indikaciju ne usmjerenih visinskih pogrešaka.

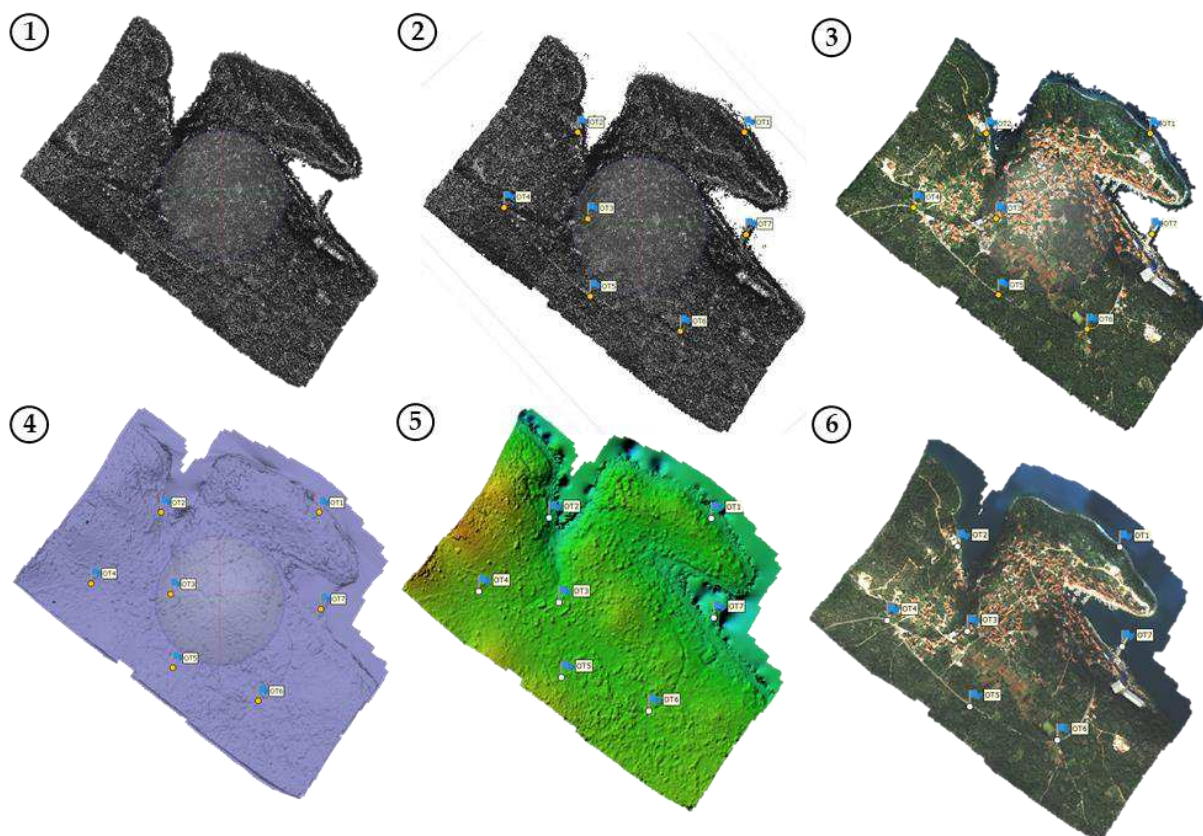
Kvaliteta modela (točnost i preciznost) uvjetovana je širokim spektrom čimbenika koji uključuju: odabrane postavke snimanje, površinu snimanog područja, kalibraciju kamere, performanse podudaranja fotografija, teksturu površine snimanog objekta, uvjete osvjetljenja, te najvažnijih obilježja korištenih orijentacijskih točaka (ovisno o RTK GPS-u).

Tablica IV-4. Izračun točnosti modela

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total error (m)	Image (pix)
OT1	-1,575	-0,120	0,385	1,626	0,165
OT2	1,448	1,346	-1,009	2,219	0,118
OT3	0,614	-0,306	0,003	0,686	0,265
OT4	-0,521	0,509	0,911	1,167	0,200
OT5	0,239	-1,403	-0,385	1,475	0,247
OT6	0,248	-0,480	-0,118	0,553	0,152
OT7	-0,489	0,425	0,156	0,666	0,316
RMSE	0,893	0,807	0,558	1,327	0,219
MEA	0,753	0,674	0,441	1,215	0,210

RMSE orijentacijskih točaka za X os iznosi 0,893 m, za Y os 0,807 m, a za Z os 0,558 m. Ukupna RMSE orijentacijskih točaka iznosi 1,327 m. RMSE u koordinatnom sustavu slike iznosi 0.210 pix. Ukupna pogreška pomaka odgovara vrijednostima koje su postignute u sličnim studijama i radovima, a orijentacijske točke se nalaze unutar oštrog prostora slike (DoF). Nakon preciznijeg apsolutnog orijentiranja modela te optimizacije veznih točaka generiran je gusti oblak točaka (dense cloud). Odabrani su sljedeći parametri: *Quality: High* i *Depth filtering: Aggressive*. Generirani oblak točaka se sastoji od nešto više od 633 573 570 točaka.

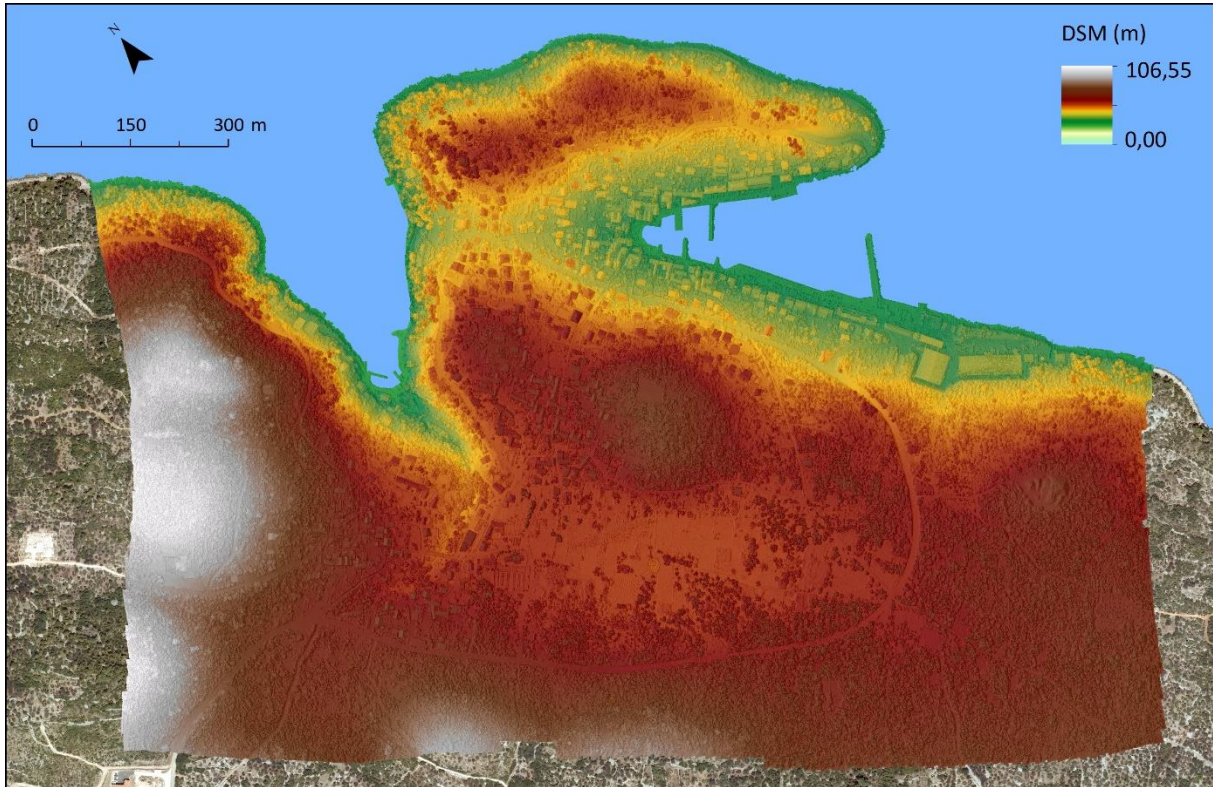
Iz gustog oblaka točaka generiran je poligonski model uvale i naselja Sali. Odabrane su sljedeće postavke: *Source data* (Dense cloud), *Surface type* (Height), *Face count* (High). Generirani poligonski model jezera je u konačnici teksturiran (Slika IV-20).



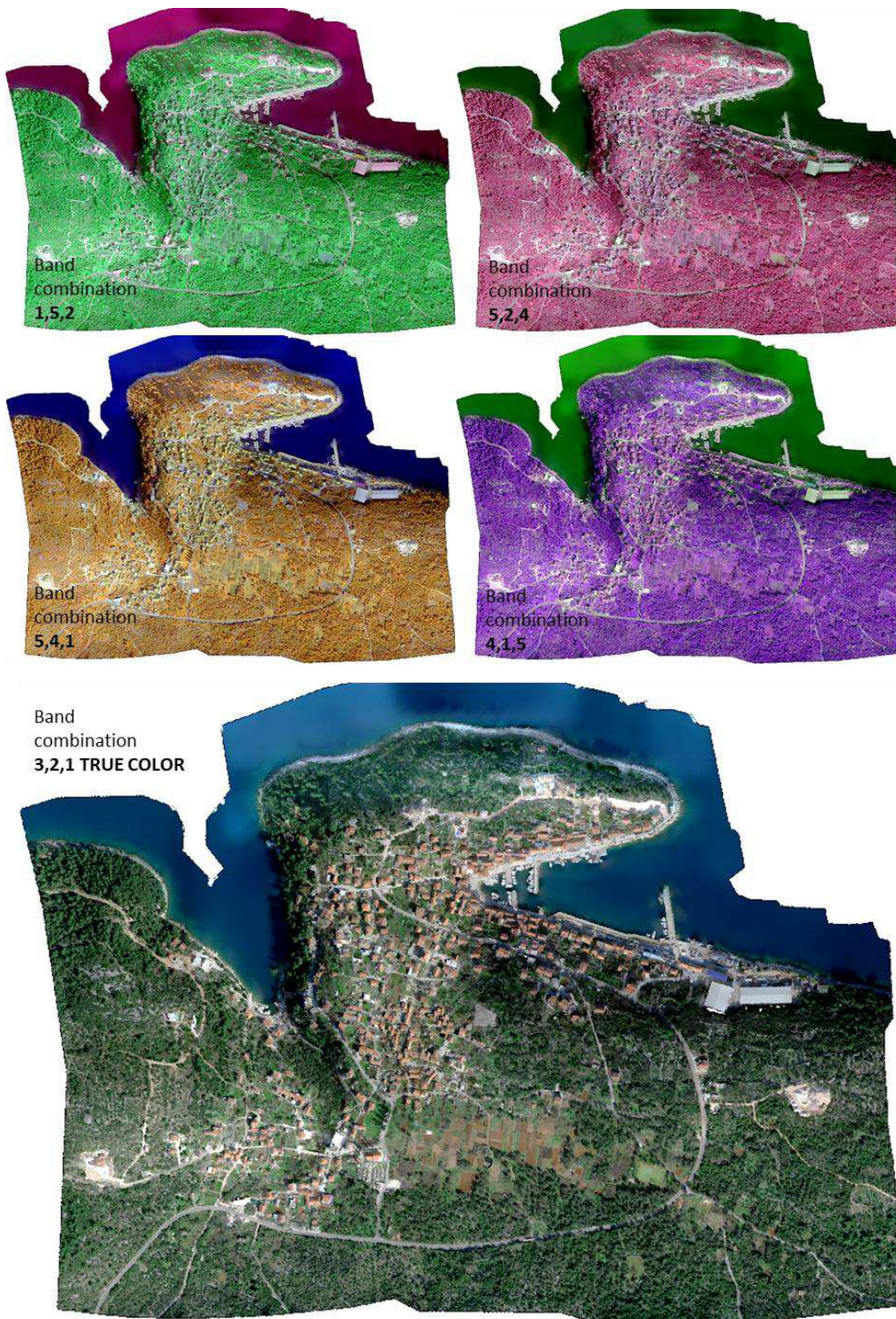
Slika IV-20. Cijeli proces izvođenja multispektralnog snimka naselja i uvale Sali: 1) vezne točke, 2) dodavanje orijentacijskih točaka, 3) gusti oblak točaka, 4) izgradnja poligonske mreže, 5) generiranje DEM-a te 6) generiranje multispektralnog snimka

U konačnici su iz aerofotogrametrijskog snimanja provedenog 21. veljače 2020. izvedeni sljedeći modeli:

- 1) Visoko-rezolucijski (5 cm) multispektralni snimak (DOF) (Slika IV-22).
- 2) Visoko-rezolucijski (5 cm) digitalni model površina (DSM) (Slika IV-21).

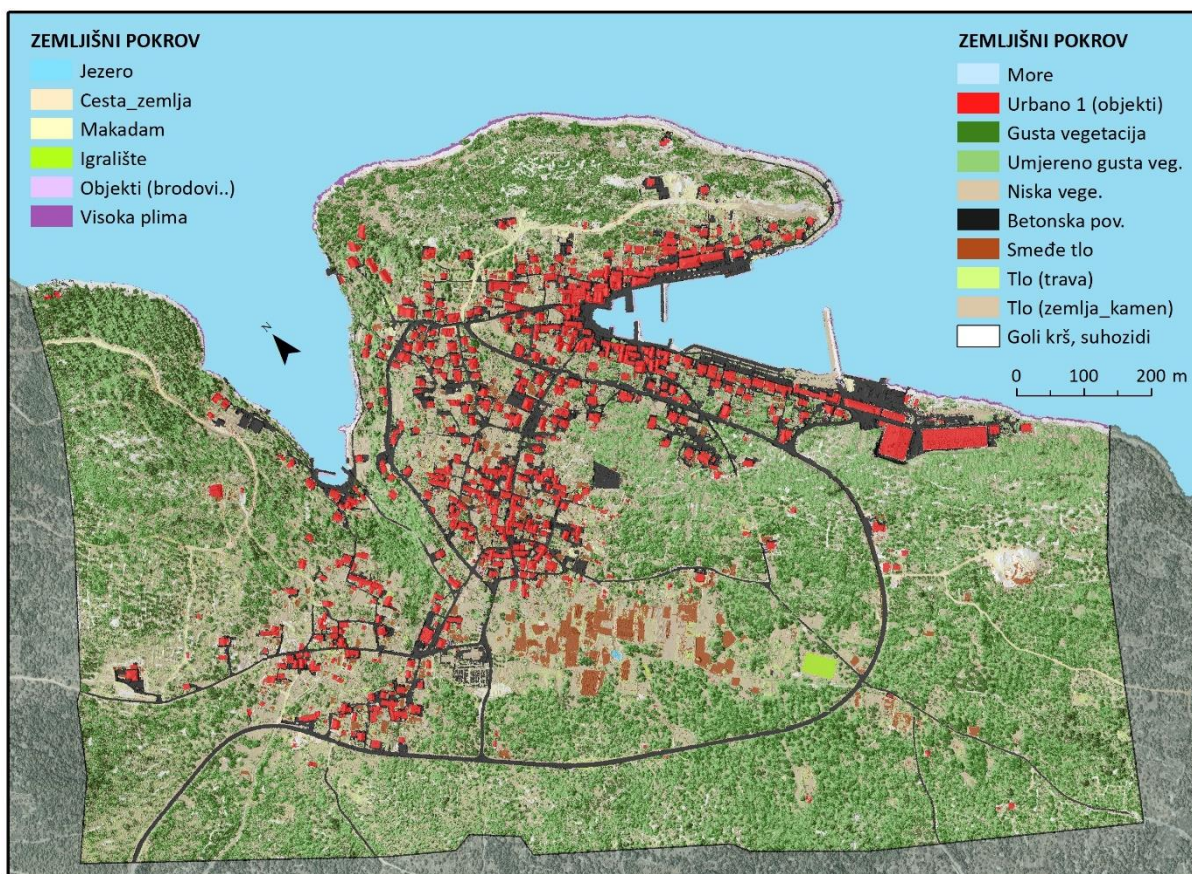


Slika IV-21. Visoko-rezolucijski (5 cm) digitalni model površina (DSM)



Slika IV-22. Visoko-rezolucijski multispektralni snimak naselja i uvale Sali

Iz multispektralnog snimka uvale i naselja Sali generiran je model zemljišnog pokrova koji sadrži ukupno 15 klasa (Slika IV-23) ako se isključi klasa *More*. S obzirom na to da je snimanje obavljeno u veljači, odlučeno je da se izvrši još jedno multispektralno snimanje, ovog puta, cijelog drenažnog bazena naselja i uvale Sali. Novi multispektralni snimak snimljen je u vrijeme (kraj lipnja) koje je povoljnije za izvođenje aerofotogrametrijskog snimanja (manje sjene, vegetacijski period) te je u konačnici rezultirao detaljnijim i boljim modelom zemljišnog pokrova.



Slika IV-23. Model 1 zemljišnog pokrova naselja i uvale Sali (veljača, 2020).

a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm - DRUGO SNIMANJE (MODEL 2)

Uvod u snimanje

Drugo aerofotogrametrijsko snimanje multispektralnom kamerom uvala i naselje Sali izvršeno je 27. i 28. lipnja, 2020. godine (Slika IV-25; IV-26). U procesu prikupljanja podataka korištena je bespilotna letjelica (UAV⁴) *DJI Matrice Pro 600* (Slika IV-24-25 A-D) i *RTK-GPS Stonex S10*. *Matrice 600 Pro* je veća bespilotna letjelica kineske tvrtke *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.* (DJI) sa sjedištem u *Shenzhen, Guangdongu*. Na njega je montirana multispektralna kamera *Red Edge-Mica SenseMX*.



Slika IV-24. a) *DJI Matrice 600 Pro*, b) *Stonex S10* i c) *Red-Edge Mica SenseMX*

⁴ Unmanned Aerial Vehicle



Slika IV-25. *Let Matrice 600 Pro s integriranom multispektralnom kamerom prema zadanoj misiji. (na slikama: F. Domazetović – stajalište Kamenolom)*



Slika IV-26. *Let Matrice 600 Pro s integriranom multispektralnom kamerom prema zadanoj misiji. (na slikama: I. Marić i F. Domazetović – stajalište Kamenolom)*

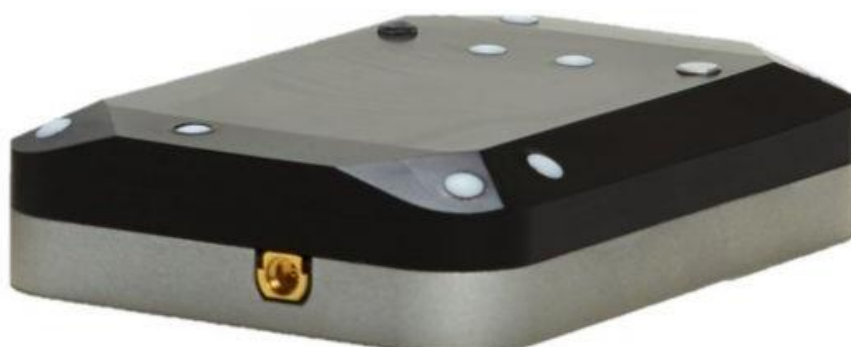
UAV *Matrice 600 Pro* je opremljen autopilotom koji neprekidno analizira podatke inercijalne mjerne jedinice (*Inertial Measurement Unit*), uključujući podatke integriranog GPS-a. GPS i inercijalni sustavi određuju trenutnu prostornu poziciju i kutne momente uređaja. Dobivena razlučivost terena rezultat je odabira visine leta te obilježja kamere (npr. visina 120 m = 8 cm)⁵. Snimke se ne prenose u realnom vremenu, već se pohranjuju na SD memorijsku karticu. U Tablici IV-5. navedene su karakteristike multispektralne kamere *MicaSense RedEdgeMX*.

Tablica IV-5. Obilježja *MicaSense RedEdgeMX* multispektralne kamere

Težina	231.9 g
Dimenzije	8.7cm x 5.9cm x 4.54cm
Spektralni kanali	Blue, green, red, red edge, near-IR (global shutter, narrowband)
Valna duljina (nm)	Blue (475 nm center, 20 nm bandwidth), green (560 nm center, 20 nm bandwidth), red (668 nm center, 10 nm bandwidth), red edge (717 nm center, 10 nm bandwidth), near-IR (840 nm center, 40 nm bandwidth)
Ground Samplig Distance (GSD)	8 cm per pixel (per band) at 120 m (~400 ft) AGL
Stopa snimanja	1 capture per second (all bands), 12-bit RAW
FoV (Field of View)	47.2° HFOV

MicaSense Red Edge je povezana na *Downwelling Light Sensor* (DLS2) (Slika IV-27). To je napredni senzor upadnog svjetla koji je izravno povezan na *MicaSense* senzore. Tijekom izvođenja misije DLS2 mjeri okolnu svjetlost i kut sunca za svaki od pet kanala kamere te sprema ove informacije u metapodacima (meta data) TIFF snimaka. Te informacije zatim mogu koristiti specijalizirani alati za obradu (poput *Pix4Dmapper*) za ispravljanje globalnih promjena osvjetljenja usred leta, poput onih koje se mogu dogoditi zbog oblaka koji prekrivaju sunce. Pored toga, DLS2 pruža GPS podatke *MicaSense* senzoru ako GPS podaci nisu osigurani iz vanjskog izvora. Ako se koristi alternativni GPS izvor, GPS prijamnik će biti uključen pri jako maloj snazi (uBlox C/A code GPS @ 5 Hz). DLS2 bi uvijek trebao biti najviši objekt na UAV-u kako bi se izbjegle sjene ili refleksije. Sadrži integrirani GPS senzor koji se može koristiti za geografsko označavanje (geokodiranje) slika *MicaSense* senzora ako se GPS signali senzoru se dostavljaju na drugi način. Modul treba instalirati tamo gdje će imati jasan pogled u nebo, daleko od bilo kojeg uređaja koji bi ga mogli ometati (poput podatkovne veze ili video odašiljača) (URL 1).

⁵ Prvi visini leta od 120 metara dobije se multispektralni snimak prostorne rezolucije od 8 cm



Slika IV-27. DLS2 senzor

Cilj terenskog istraživanja provedenog 27. i 28. lipnja, 2020. godine bio je snimiti prostor uvale i naselja Sali multispektralnom kamerom *RedEdge-MX – MicaSense* te uzorkovati testne uzorke specifičnih tipova vegetacije na temelju kojih će se dodavati elementi signature i izvršiti validacija konačnog modela zemljišnog pokrova.

Analizom primjera dobre prakse određeno je da se snimi cijelo slivno područje (drenažni bazen) uvale i naselja Sali s ciljem izrade modela zemljišnog pokrova. U tablici IV-6 prikazan je generalni plan aktivnosti na terenu koji se odvijao kroz spomenuta dva dana. S ciljem eliminacije problema pojave sjena i mogućih udara vjetra snimanje je izvršeno u dva dana u onom vremenskom okviru kad su ta dva navedena problema najmanje izražena (11,00 – 14,00h)

Tablica IV-6. *Vremenski slijed izvođenja aktivnosti, 27. i 28. lipanj, 2020.*

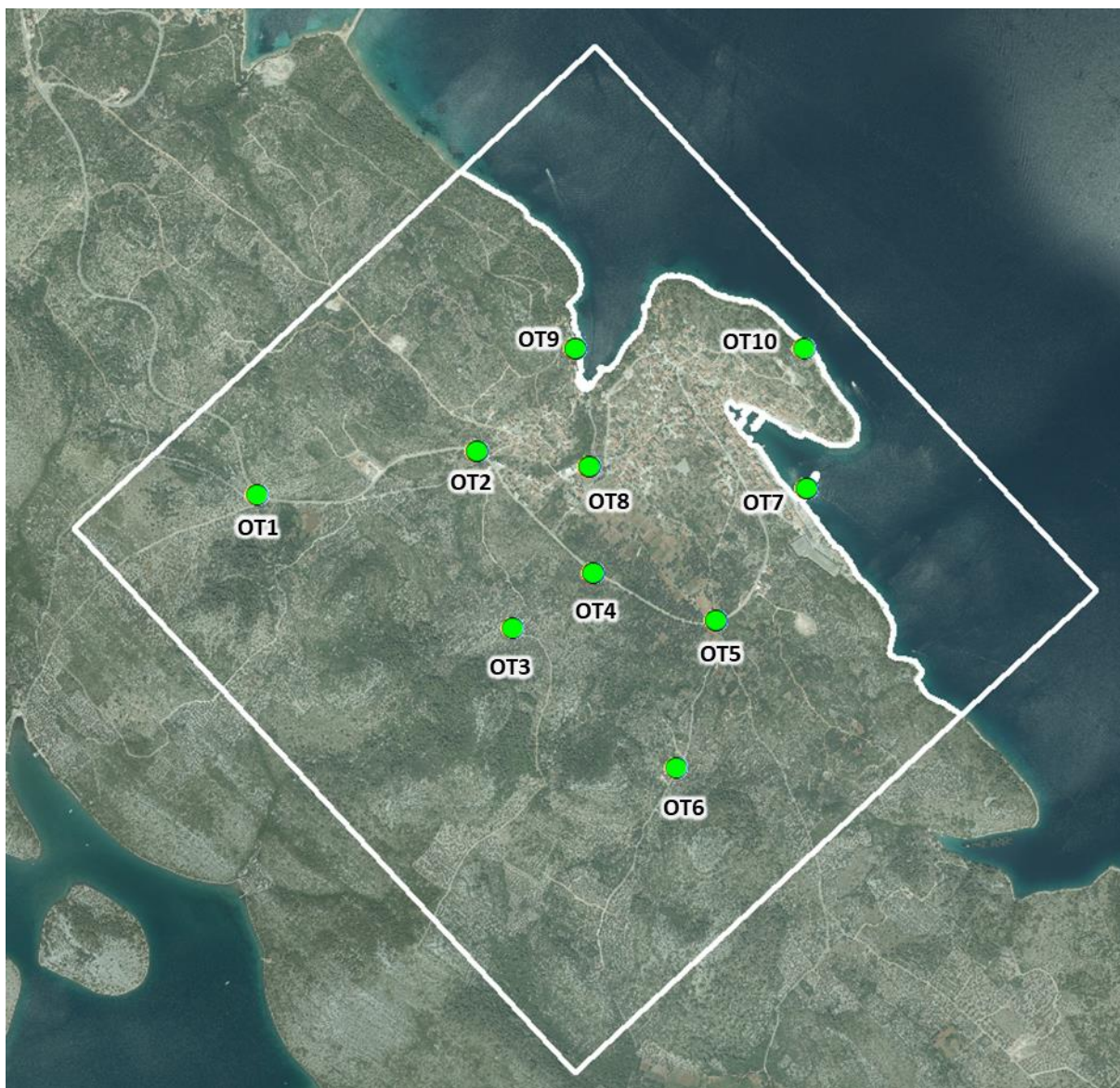
Aktivnosti	Vrijeme (h)
Odlazak na prvu točku stajališta i priprema za let (kalibracija kamere, IMU, kompasa)	10,30 – 11,00 h
Prvo podizanje drona	11,00
Trajanje svih misija	11,00 - 14,00
Spremanje opreme i analiza snimljenih slika	14,30 - 18,00

Prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove

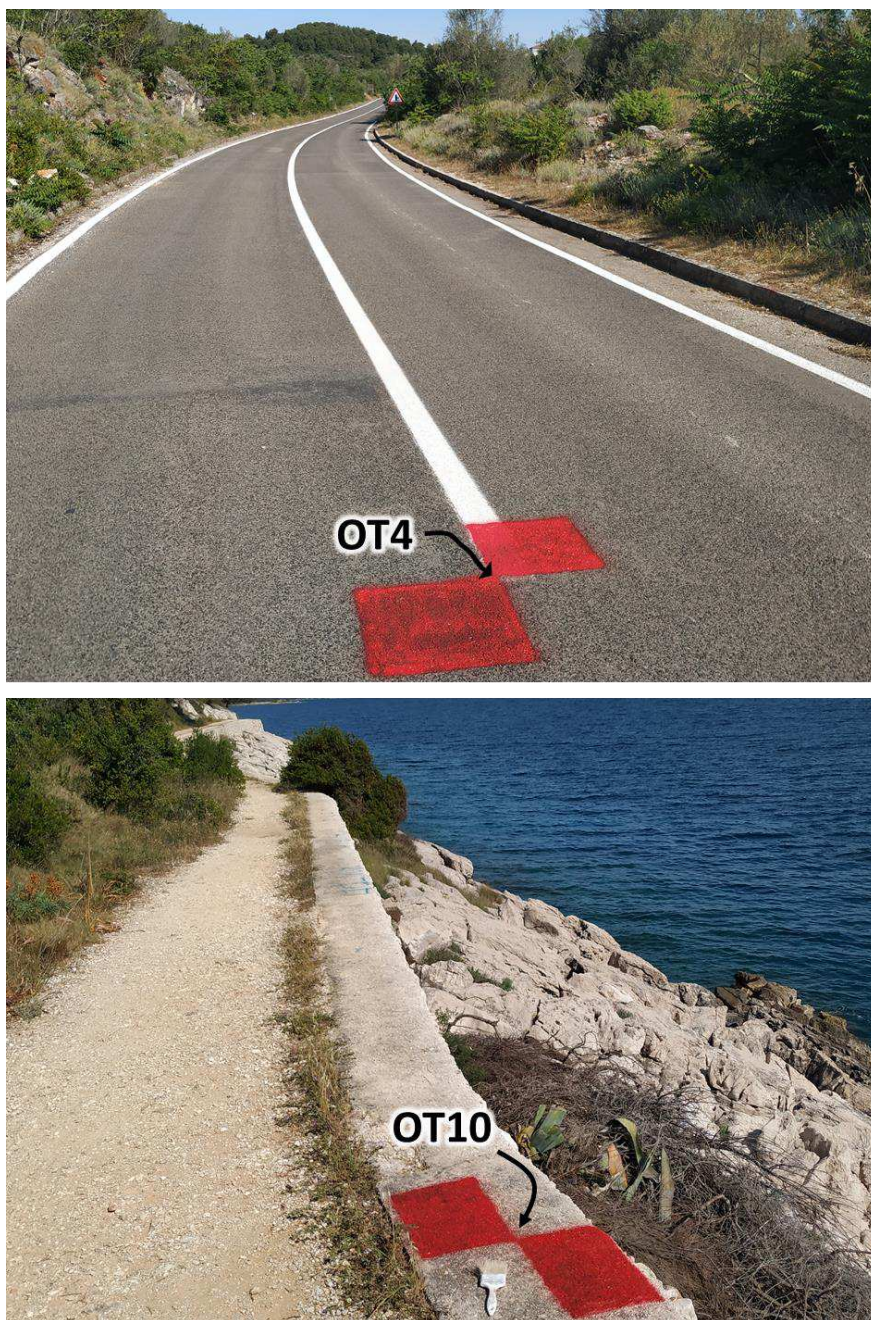
Aerofotogrametrijsko snimanje i obrada podataka izvršena je u nekoliko koraka. Prvi korak se odnosio na označavanje i prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove. Orijentacijske točke (OT) su prikupljene s ciljem postizanja bolje apsolutne orijentacije modela. OT se mogu identificirati na snimkama ili rekonstruiranom modelu, a imaju poznate (x, y i z) koordinate u specifičnom koordinatnom sustavu. Koriste se za povezivanje bloka s referentnim koordinatnim sustavom i izjednačenje bloka aerotriangulacije. Označeno je i prikupljeno ukupno 10 točaka lokalne geodetske osnove (Slika IV-28).

Točke su prikupljene na različitim nadmorskim visinama, uvažavajući pravila prostornog rasporeda postavljanja orijentacijskih točaka u fotogrametriji (distribucija kroz cijeli plan snimanja) (Slika IV-29). Plan postavljanja točaka je napravljen u softveru *ArcMap 10.1* uvažavajući morfometriju terena.

Ukupno je prikupljeno 10 orijentacijskih točaka (OT1-7) koje će poslužiti za postizanje bolje apsolutne orijentacije modela. Prilikom označavanja OT-a vođeno je računa da su oznake dovoljno velike, korištena je kontrastna (crvena) boja u odnosu na lokalni teren te se pazilo na otvorenost horizonta iznad oznaka kako bi se olakšalo dodavanje markera (Slika IV-29).



Slika IV-28. Lokacije prikupljenih orijentacijskih točaka unutar područja snimanja – šire područje drenažnog bazena



Slika IV-29. *Primjeri označenih orijentacijskih točaka na terenu (OT4 i OT10)*

Označene geodetske točke su prikupljene koristeći GNSS RTK Stonex S10. Točke su prikupljanje u službenom projekcijskom koordinatnom referentnom sustavu poprečne Mercatorove projekcije (HTRS96/TM). Mjerenje svake točke je trajalo 40 sekundi (40 epoha mjerenja) nakon inicijalizacije

prijemnika tzv. *fixed solution*. Elevacijski kut je bio postavljen na 10° s minimalnim brojem lociranih satelita u iznosu od 15. Orijentacijska točka OT10 zbog logističkih razloga nije bila izmjerena u epohama.

Izvođenje konačnih vrijednosti orijentacijskih točaka može se podijeliti u nekoliko koraka. Prvi korak se odnosi na preuzimanje izmjerenih mjerenja za svaku točku, izračun maksimalnih, srednjih i minimalnih vrijednosti X, Y i Z koordinate te utvrđivanje raspona mjerenja. Raspon mjerenja ukazuje koliko je korišteni RTK GPS Stonex S10 (ne)precizan, odnosno koliko mu X, Y i Z vrijednosti „plešu“ unutar fiksirane lokacije mjerenja.

U poglavlju (*Dodaci*) u tablicama prikazani su rezultati ovog koraka za svaku orijentacijsku točku. Prema izvedenom mjerenju u epohama zaključeno je da je u prosjeku RTK GPS Stonex S10 za X koordinatu u jednoj orijentacijskoj točki odstupao 2,15 cm, za Y koordinatu 2,14 cm, a za Z koordinatu 2,30 cm.

U drugom koraku izračunato je srednje apsolutno odstupanje za X, Y i Z koordinatu svakog mjerenja (svake epohe) u pojedinačnoj točki. Iz izvedenih vrijednosti je generirano ukupno odstupanje (*total*) koje je u ovom slučaju reprezentirano kao srednja vrijednost X, Y i Z odstupanja.

U trećem koraku je iz mjerenja svake orijentacijske točke izdvojeno 10 epoha koje su imale najmanje ukupno odstupanje. Potom je iz izdvojenih 10 epoha ponovno izračunata srednja vrijednost X, Y i Z koordinate. Izračunate srednje vrijednosti su u konačnici poslužile za orijentiranje kreiranog multispektralnog modela (Tablica IV-7-15).

Tablica IV-7. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT1

OT1			
LABEL	X	Y	Z
T15	391353.7509	4867003.285	90.0905
T3	391353.7521	4867003.279	90.0905
T21	391353.7502	4867003.286	90.0915
T12	391353.7514	4867003.276	90.0885
T6	391353.7501	4867003.281	90.0965
T20	391353.7518	4867003.283	90.0865
T11	391353.7532	4867003.28	90.0965
T10	391353.748	4867003.285	90.0925
T18	391353.7521	4867003.28	90.0975
T7	391353.7497	4867003.282	90.0855
MEAN	391353.750950	4867003.281790	90.091600

Tablica IV-8. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT2

OT2			
LABEL	X	Y	Z
T14	392038.9292	4867137.117	46.4527
T16	392038.9258	4867137.123	46.4477
T27	392038.9279	4867137.123	46.4557
T26	392038.9341	4867137.121	46.4547
T6	392038.9296	4867137.12	46.4537
T2	392038.9308	4867137.125	46.4487
T5	392038.9321	4867137.127	46.4497
T22	392038.9305	4867137.126	46.4467
T25	392038.9259	4867137.123	46.4527
T13	392038.9268	4867137.125	46.4517
MEAN	392038.92927	4867137.12306	46.45140

Tablica IV-9. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT3

OT3			
LABEL	X	Y	Z
T20	392148.7106	4866591.781	84.6432
T13	392148.7108	4866591.785	84.6422
T6	392148.7122	4866591.778	84.6442
T7	392148.7044	4866591.784	84.6432
T12	392148.7079	4866591.778	84.6422
T9	392148.7081	4866591.781	84.6422
T17	392148.7113	4866591.785	84.6392
T8	392148.7101	4866591.782	84.6422
T22	392148.711	4866591.784	84.6472
T26	392148.7087	4866591.787	84.6462
MEAN	392148.709510	4866591.782580	84.643200

Tablica IV-10. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT4

OT4			
LABEL	X	Y	Z
T11	392398.945	4866763.156	39.7057
T14	392398.944	4866763.16	39.7077
T23	392398.944	4866763.154	39.7077
T9	392398.943	4866763.16	39.7107
T10	392398.944	4866763.154	39.7127
T12	392398.941	4866763.151	39.7097
T17	392398.944	4866763.153	39.7127
T25	392398.938	4866763.158	39.7117
T7	392398.939	4866763.157	39.7107
T8	392398.937	4866763.154	39.7107
MEAN	392398.942	4866763.156	39.71

Tablica IV-11. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT5

OT5			
LABEL	X	Y	Z
T17	392779.3442	4866614.722	36.777
T3	392779.3388	4866614.725	36.776
T23	392779.3341	4866614.726	36.779
T14	392779.3355	4866614.726	36.777
T10	392779.3375	4866614.725	36.774
T11	392779.3355	4866614.726	36.781
T2	392779.3355	4866614.719	36.778
T6	392779.3361	4866614.72	36.783
T8	392779.339	4866614.717	36.78
T7	392779.3421	4866614.724	36.782
MEAN	392779.3378	4866614.723	36.7787

Tablica IV-12. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT6

OT6			
LABEL	X	Y	Z
T13	392657.4506	4866158.1	75.1267
T23	392657.45	4866158.097	75.1237
T12	392657.4536	4866158.092	75.1277
T11	392657.4503	4866158.1	75.1267
T7	392657.4575	4866158.096	75.1307
T15	392657.4508	4866158.091	75.1327
T21	392657.4493	4866158.095	75.1337
T6	392657.4538	4866158.097	75.1257
T17	392657.4509	4866158.093	75.1207
T2	392657.4489	4866158.096	75.1227
MEAN	392657.4516	4866158.096	75.1271

Tablica IV-13. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT7

OT7			
LABEL	X	Y	Z
T9	393061.3557	4867023.321	1.1655
T18	393061.3577	4867023.319	1.1675
T26	393061.3586	4867023.321	1.1655
T19	393061.3555	4867023.324	1.1625
T13	393061.3616	4867023.322	1.1615
T21	393061.3587	4867023.32	1.1635
T25	393061.3573	4867023.32	1.1565
T11	393061.3536	4867023.324	1.1695
T27	393061.3621	4867023.319	1.1615
T2	393061.3496	4867023.317	1.1655
MEAN	393061.357	4867023.321	1.1639

Tablica IV-14. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT8

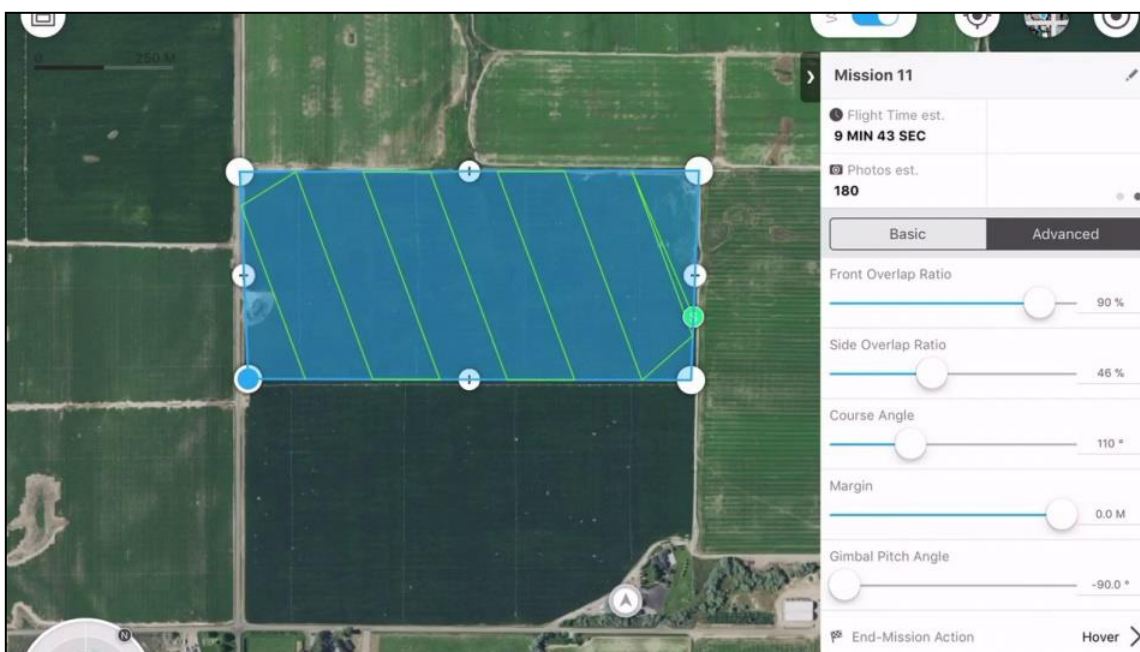
OT8			
LABEL	X	Y	Z
T17	392387.8861	4867090.728	32.4336
T12	392387.8894	4867090.728	32.4346
T10	392387.8863	4867090.728	32.4276
T13	392387.8842	4867090.733	32.4366
T5	392387.8869	4867090.73	32.4246
T14	392387.8874	4867090.734	32.4386
T18	392387.8877	4867090.72	32.4336
T22	392387.8848	4867090.737	32.4326
T21	392387.8885	4867090.723	32.4366
T16	392387.8852	4867090.728	32.4426
MEAN	392387.8867	4867090.729	32.4341

Tablica IV-15. Vrijednost X, Y i Z koordinate za orijentacijsku točku OT9

OT9			
LABEL	X	Y	Z
T12	392343.217	4867457.326	7.0007
T22	392343.219	4867457.325	7.0037
T11	392343.22	4867457.325	7.0027
T1	392343.219	4867457.324	7.0027
T9	392343.214	4867457.325	7.0017
T14	392343.216	4867457.323	6.9997
T2	392343.22	4867457.327	7.0047
T15	392343.219	4867457.326	6.9947
T4	392343.218	4867457.33	6.9977
T19	392343.221	4867457.326	7.0057
MEAN	392343.218	4867457.326	7.0014

Izrada plana snimanja

Izrada optimalnog plana snimanja uključivala je odabir vrsta misija s obzirom na morfologiju terena, objekt istraživanja te distribuciju OT-a. Izrada misija UAV-om je izvršena u softveru *DJI GS PRO* (Slika IV-30). Širi prostor uvale i naselja Sali snimljen je koristeći jednu vrstu misija: *Grid (Single mission) Mission* s prednjim i bočnim preklapanjem 80%.

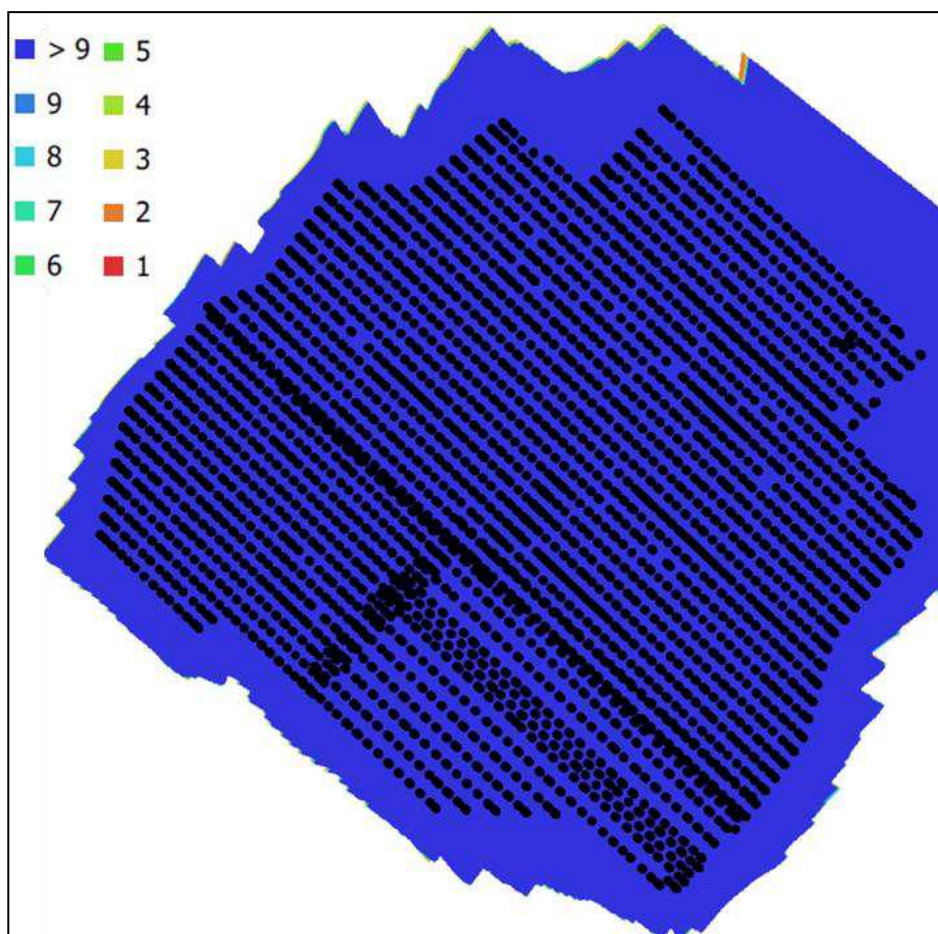


Slika IV-30. Primjer izgleda sučelja DJI GS Pro aplikacije

U softveru *DJI GS PRO* kreirana je jedna misija koja je obuhvaća cijeli drenažni bazen šireg područja uvale i naselja Sali. Vrijeme trajanja misije je bilo preveliko da bi mogla biti cijela snimljena s jednim setom baterija.

Stoga se snimanje odvijalo na način da je UAV u onom trenutku kad je set baterija došao do svog kapaciteta od 25% vraćen na polazišnu točku (*home point*). Potom mu je ubačen novi set baterija, a Matrice 600 Pro je nastavio snimati na onoj lokaciji gdje je u prethodnom letu došlo do prekida snimanja.

S obzirom na obuhvatnost terena, te željenu prostornu rezoluciju koja se u ovoj projektnoj aktivnosti željela postići prosječna visina leta odnosno snimanja bila je oko **80** metara. Za snimanje navedenog područja potrošeno je devet setova baterija. Na slici IV-31 prikazan je geografski položaj geokodiranih lokacija snimljenih multispektralnih snimaka i broj preklapanja u unutar snimljenog područja.



Slika IV-31. Geografski položaj geokodiranih lokacija snimanja multispektralnih snimaka s izračunatim preklapom

Izvođenje multispektralnog snimanja

Nakon prikupljanja točaka lokalne geodetske osnove (OT1-OT10) izvršena je radiometrijska kalibracija multispektralne kamere, kalibracija kompasa i IMU sustava. Kalibracija *Mica Sense RedEdge MX* kamere izvršena je pomoću refleksijskog kalibracijskog panela (CRP⁶) (Slika IV-32).



Slika IV-32. Izgled refleksijskog kalibracijskog panela te upute za kalibraciju

Radiometrijska kalibracija pretvara sirove vrijednosti piksela slike u apsolutne vrijednosti spektralnog zračenja. Korištenje spomenutog panela omogućuje precizniju kompenzaciju za upadne svjetlosne uvjete i generiranje kvalitetnijih podataka. CRP ima poznate vrijednosti refleksije u vidljivom i spektru infracrvenog svjetla.

Prema primjerima najbolje prakse CRP slike trebaju se snimiti prije i nakon svakog leta kako bi se osigurao precizan prikaz svjetlosnih uvjeta tijekom leta. Tako je napravljeno u slučaju multispektralnog snimanja uvale Sali (Slika IV-33).

⁶ Calibrated Reflectance Panel



Slika IV-33. Slike refleksijskog kalibracijskog panela A) prije i B) nakon izvođenja misije

Proces kalibracije je izvršen na način da je panel spušten na ravnu podlogu. Potom je putem Wi-Fi mreže kamera spojena s konfiguracijskom stranicom. Posebna pozornost je obraćena na to da panel ne bude na sjeni prilikom snimanja kalibracijske fotografije. Ako je fotografija kalibracijskog panela uspješno snimljena senzori s unutarnjim zvučnicima reproducirat će zvuk dok sensor ne prepozna ploču refleksije MicaSense i QR kod. Potrebno je držati senzor (UAV + senzor) najmanje 1 metar iznad MicaSense kalibrirane ploče refleksije. Bitno je pokušati centrirati ploču i QR kod u vidnom polju. Nakon reprodukcije zvuka bljeska plavo LED svjetlo koje pokazuje da je kalibracijski panel snimljen. Ako senzor ne prepozna ploču, nastavit će proizvoditi zvuk sve dok korisnik ne pritisne gumb "Stop" (Slika IV-34).



Slika IV-34. Kalibracija multispektralne kamere Mica Sense Red Edge na terenu

Nakon kalibracije UAV je spojen s tabletom i aplikacijom *DJI GS Pro* te je pokrenuta isplanirana misija (Slika IV-35).



Slika IV-35 Uzlijetanje *Matrice 600 Pro* u isplaniranu misiju

Cijela snimljena misija sadržavala je ukupno 7256 lokacija snimanja. Iz toga proizlazi da je ukupno snimljeno ($7245 * 5 = 36\ 280$ fotografija). Naime, na svakoj lokaciji snimanja prikupljeno je 5 fotografija za svaki kanal (*red, green, blue, red-edge, near infra red*) koji multispektralna kamera snima. Iz izvješća generiranog u Agisoft Metashapeu utvrđeno je da je cijeli prostor snimanja uvale i naselja Sali vidljiv na više od 9 fotografija (Slika IV-31).

Obrada snimaka - izrada multispektralnog snimka

U procesu obrade snimki korišten je računalni program *Agisoft Metashape Professional 1.5.1* specijaliziran SfM-MVS za fotogrametriju. To je napredni softver za 3D modeliranje koji kroz obradu digitalnih fotografija stvara visokokvalitetne 3D prostorne podatke. Primjenjuje metodu SfM koja omogućuje da se tehnikom prilagođavanja snopova (BA) istodobno odredi orijentacija i položaj kamere u prostoru (vanjski orijentacijski parametri) kao i 3D koordinate točaka objekata za veliki broj snimki. Uz vanjske, istodobno se određuju i unutarnji orijentacijski parametri kamere. Povezivanje snimki i rekonstrukcija 3D modela u programu su potpuno automatizirani. Proces obrade snimki i generiranja izlaznih modela (digitalnog modela površina (DSM), digitalnog ortofota (DOF), oblaka točaka i 3D modela) izvršen je u nekoliko koraka.

Prvi korak odnosio se na ubacivanje svih fotografija u kreirani projekt Sali.psx te provjeru uvezenih podataka. Potom je izvršena provjera prikupljenih snimaka kroz automatsku procjenu kvalitete *Image quality*. Zamućene i loše fokusirane snimke mogu negativno utjecati na rezultate spajanja snimaka (*align*). Prema službenim uputama *Agisoft Metashape* preporuka je da granična vrijednost kvalitete bude 0,5. Slijedeće primjere dobre prakse navedene vrijednosti je uzeta u ovoj analizi.

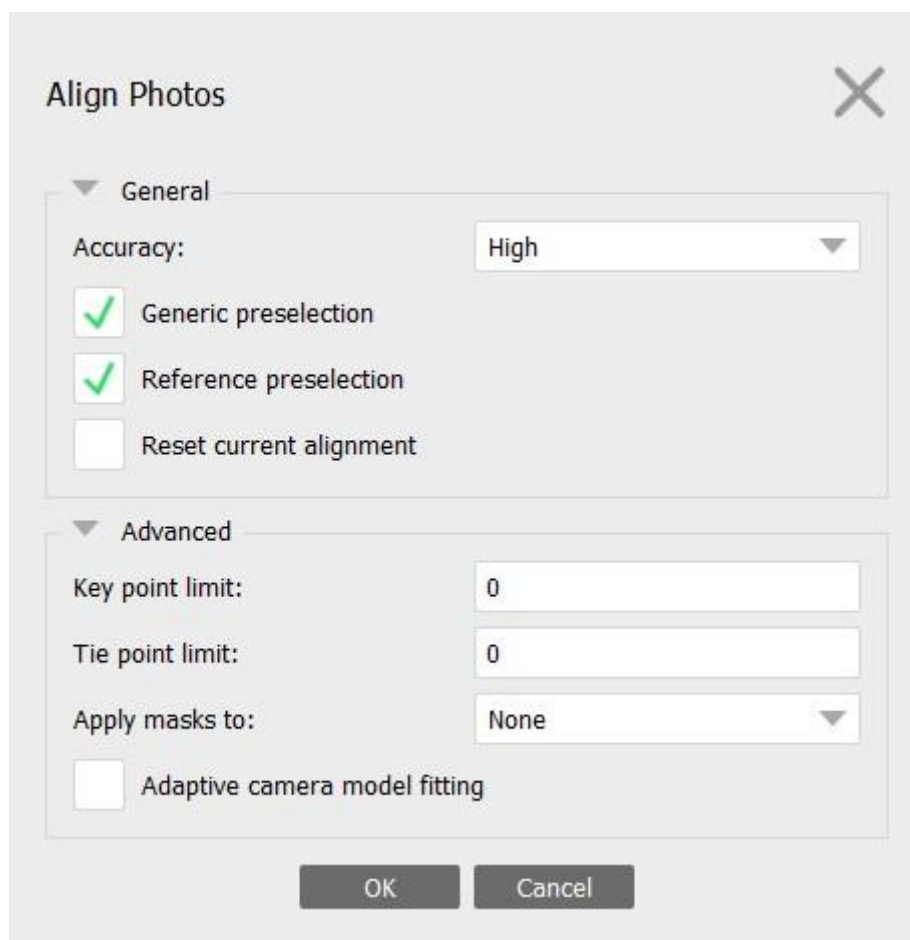
Nakon detekcije fotografija koje imaju vrijednost manju od 0,5 odabrana je opcija *Disable camera*. Pri tome je vođeno računa da se ne brišu uzastopne snimke, npr. ako tri snimke za redom imaju kvalitetu manju od 0,5, trebalo bi izbrisati prvu i treću snimku, a drugu ostaviti jer je važnije da imamo izrađen multispektralni snimak za cijelo područje uvale i naselja Sali na osnovi svih snimki od toga da su sve snimke oštre.

Nakon procjene kvalitete fotografija izvršeno je ručno brisanje snimaka u kojima je očigledno došlo do pogreške. Pogreška se u ovom slučaju odnosi na fotografije koje su snimljene prije polijetanja ili tijekom dizanja drona. Potom su isključeni (maskirani) pomični i nepotrebni dijelovi (npr. nebo, ljudi u pokretu) na snimkama koje prilikom izvođenja rijetkog i gustog oblaka točaka mogu otežati povezivanje snimki. Maskirana područja algoritam ne koristi prilikom procesa fototriangulacije.

Prije inicijalne izrade modela izvršena je orijentacija i spajanje snimki (*align*). Zbog velike količine snimaka align je napravljen prema sljedećim parametrima *Accuracy* je postavljen na *High*, odabrane su

opcije *Generic* i *Reference preselection*, *Key point limit* je postavljen na 0, a *tie point limit* na 0 (Slika IV-36).

Cijeli proces spajanja je trajao 14 sati i 25 minuta.

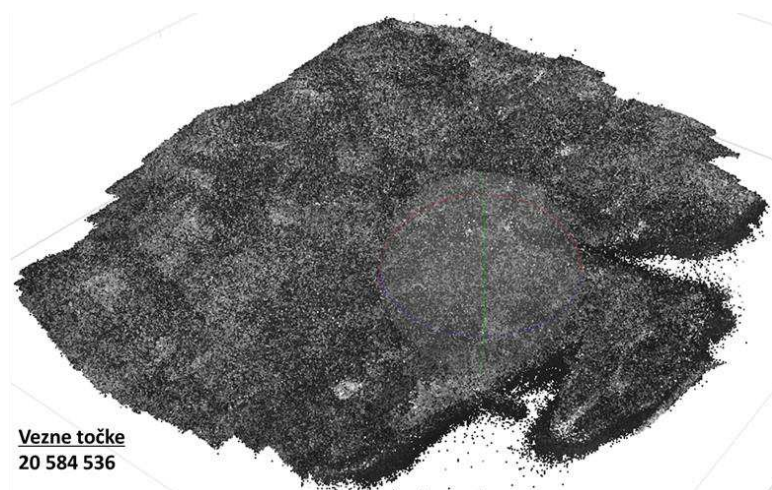


Slika IV-36. Primjer postavljenih parametara u procesu spajanja fotografija

Nakon inicijalnog povezivanja izvršeno je resetiranje *aligna* za netočno pozicionirane snimke (snimke bez *aligna*). U prozoru *Photos* označene su sve nepovezane fotografije → desni klik → *Reset Camera Alignment*. Sljedeći korak se odnosio na ručno brisanje veznih točaka koje sugeriraju na grubu pogrešku.

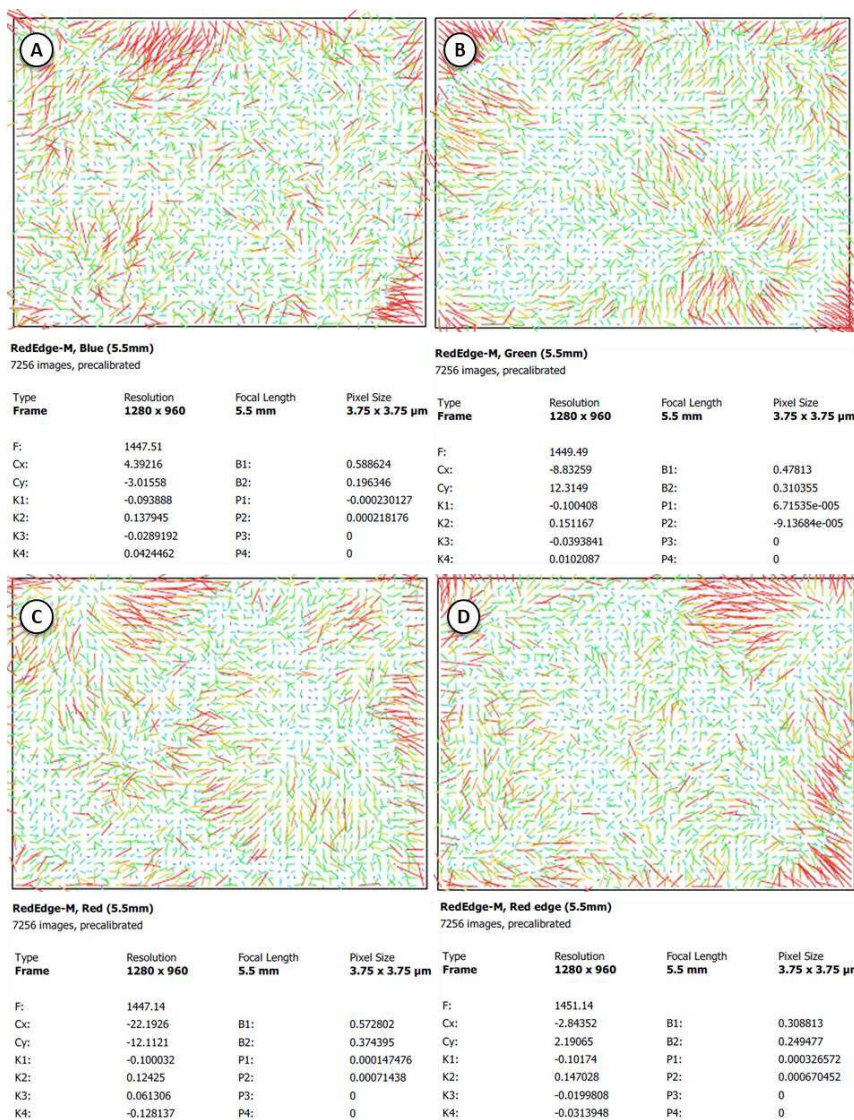
Spomenute vezne točke nastale su kao pogreška pri alignu snimki. U glavnom prozoru *Metashapea* pomoću jednog od alata za označavanje označene su grube pogreške točaka nastalih pri alignu snimke te su izbrisane. Potom je pomoću seta alata *Gradual selection* izvršena reoptimizacija snimki kroz

poluautomatsko brisanje veznih točaka prema zadanim parametrima. U Gradual selectionu korištena su dva parametra: reprojekcijska pogreška (*Reprojection error*) i rekonstrukcijska nesigurnost (*Reconstruction uncertainty*). Od ukupnog broja veznih točaka označeno je i izbrisano njih 10% koji imaju najveći reprojekciju pogrešku. Nakon brisanja izvršena je optimizacija kamera (*Optimize Cameras*) nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametara (f , c_x , c_y , k_1 , k_2 ...itd). Potom je od preostalog broja veznih točaka označeno i izbrisano njih 10% koji imaju najveću nesigurnost rekonstrukcije (Slika IV-37). Opet je nakon brisanja izvršena optimizacija kamera nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametar.

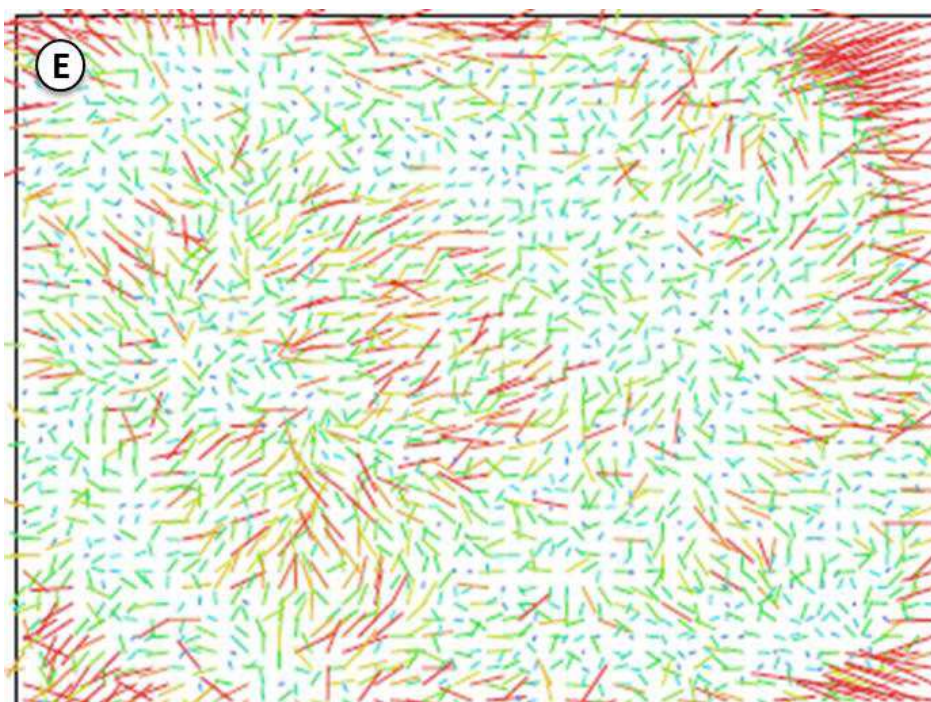


Slika IV-37. Preostale vezne točke nakon izvršene gradualne selekcije

Dakle, softver je unutarnje kalibracijske parametre kamere za svaki kanal nakon svake optimizacije ažurirao (Slika IV-38-39). Očitani parametri kalibracije su u softveru uzeti kao početni elementi za izračun elemenata orijentacije u procesu fototriangulacije. Inicijalno je generirano preko 24 milijuna veznih točaka, međutim kroz ručno brisanje grubih pogrešaka i primjenu alata gradualne selekcije u konačnici je ostalo njih 20 584 536 s RMS reprojection error od 0.401pix.



Slika IV-38. Residuali i procijenjeni kalibracijski parametri za A) blue, B) green, C) red, D) red-edge kanal



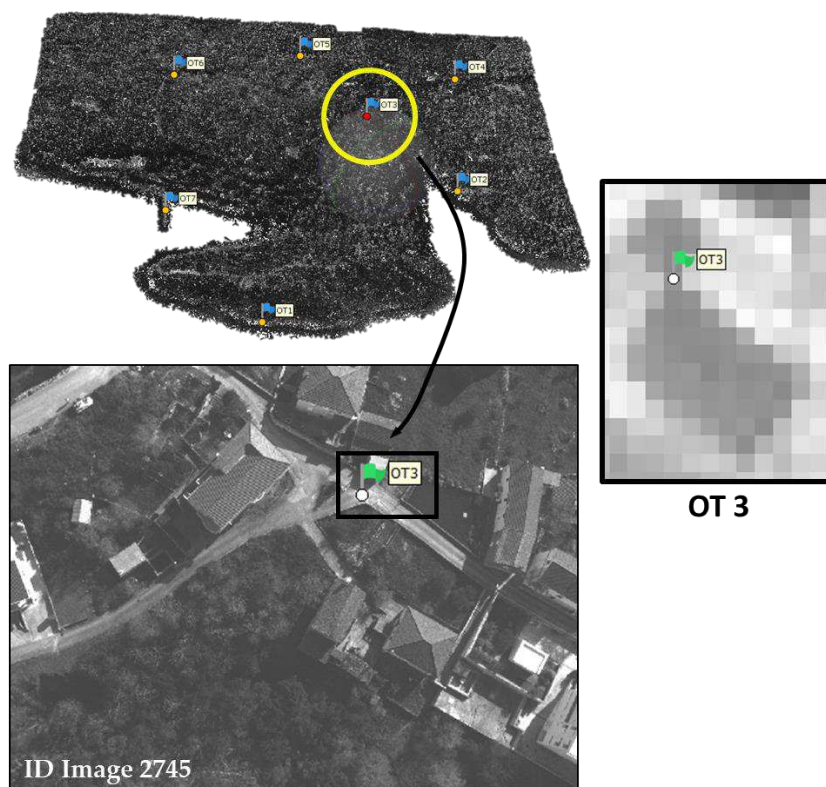
RedEdge-M, NIR (5.5mm)

7256 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	1280 x 960	5.5 mm	3.75 x 3.75 μm
F:	1456.11		
Cx:	17.362	B1:	0.422728
Cy:	9.45195	B2:	0.235681
K1:	-0.103485	P1:	0.000447436
K2:	0.15053	P2:	9.46296e-005
K3:	-0.0350306	P3:	0
K4:	-0.0320731	P4:	0

Slika IV-38. Residuali i procijenjeni kalibracijski parametri za E) infra-red kanal

Nakon izgradnje rijetkog oblaka (*sparse cloud*) točaka sljedeći korak se odnosio na izvođenje i vizualizaciju gustog oblaka (*dense cloud*) točaka. Na osnovi procijenjenih lokacija kamera izračunava se dubina za svaku kameru. Tim procesom izvodi se oblak točaka koji može biti jednake gustoće ili čak gušći od oblaka točaka dobivenog LiDAR-om. Inicijalno je generiran gusti oblak točaka po parametrom kvalitete *Low*. Razlog tome je taj jer je spomenuti model poslužio kao osnova za dodavanje orijentacijskih točaka. Iz izvedenog gustog oblaka točaka potom je rekonstruirana 3D mreža poligona kao prikaz površine objekta. Ona je izvedena primjenom algoritamske metode *Height field*. Rezultat rekonstrukcije geometrije, odnosno izrade mreže poligona u daljnjem procesu je teksturiran. Teksturirana mreža poligona poslužila je kao osnova za dodavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka prikupljenih na terenu s RTK GNSS Stonex S10 (Slika IV-40).



Slika IV-40. *Primjer pozicioniranja OT3 na odabranom snimku*

Nakon što su dodane i pozicionirane sve orijentacijske točke (Slika IV-41) na inicijalno izgrađenom modelu izvršen je *Update* te ponovna optimizacija kamere.



Slika IV-41. *Prikaz svih dodanih orijentacijskih točaka na orijentiranom modelu*

Nakon dodavanja orijentacijskih točaka izračunata je točnost izvedenih modela (Tablica IV-16). Korišteni su sljedeći statistički pokazatelji: srednja apsolutna pogreška (*mean absolute error* – MAE) te srednja kvadratna pogreška (*root mean square error* – RMSE). RMSE se uobičajeno navodi i koristi se kao metrika provjere kvalitete površine modela, dok MAE pruža prirodnu i usporedivu mjeru performansi modela i indicaciju ne usmjerenih visinskih pogrešaka.

Kvaliteta modela (točnost i preciznost) uvjetovana je širokim spektrom čimbenika koji uključuju: odabrane postavke snimanje, površinu snimanog područja, kalibraciju kamere, performanse podudaranja fotografija, teksturu površine snimanog objekta, uvjete osvjetljenja te najvažnijih obilježja korištenih orijentacijskih točaka (ovisno o RTK GPS-u).

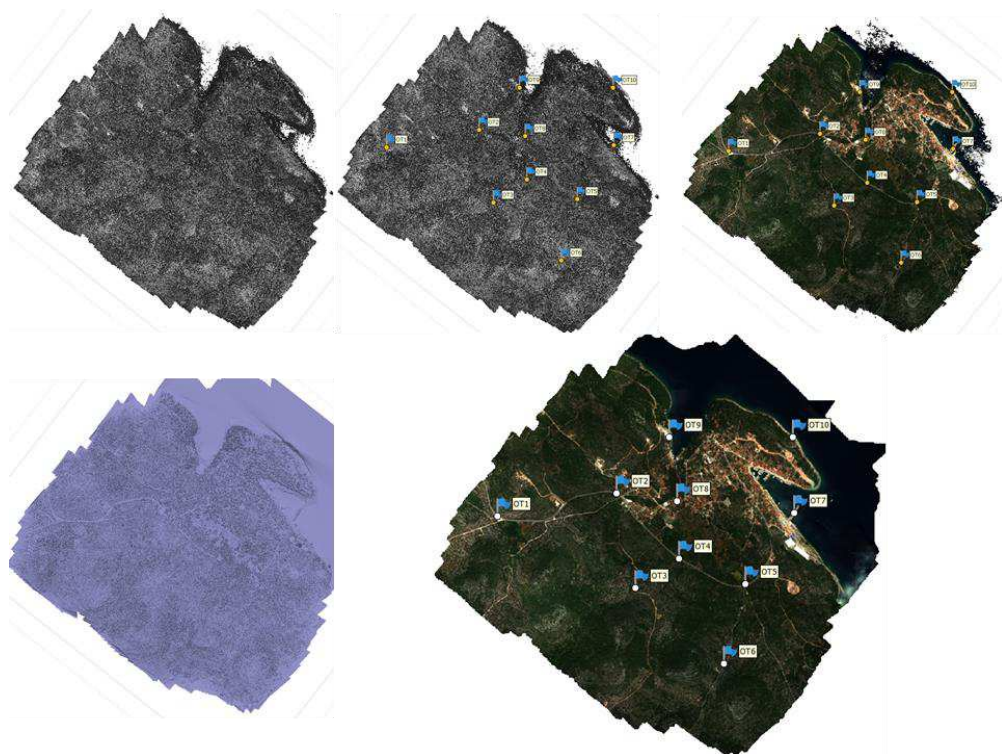
Tablica IV-16. Izračun točnosti modela iz orijentacijskih točaka

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)
OT1	31,8895	7,41758	143,101	146,798
OT2	-1,43194	-13,6552	-35,2381	37,8185
OT3	5,19771	-6,47009	-34,1041	35,0994
OT4	-8,16034	-12,4829	-86,3708	87,6489
OT5	-25,223	-25,5968	-61,9276	71,599
OT6	-25,5836	-0,513378	42,1816	49,3364
OT7	-22,3652	48,3474	163,612	172,065
OT8	-12,7271	-28,4268	-70,3089	76,8987
OT9	-1,11885	-23,7533	-39,4481	46,0611
OT10	58,992	56,0643	-2,56648	81,4239
RMSE	25,59	28,19	83,21	91,50
MAE	19,27	22,27	67,89	80,47

RMSE orijentacijskih točaka za X os iznosi 0,2559 m, za Y os 0,2819 m, a za Z os 0,8321 m. Ukupna RMSE orijentacijskih točaka iznosi 0,9159 m. Ukupna pogreška pomaka odgovara vrijednostima koje su postignute u sličnim studijama i radovima, a orijentacijske točke se nalaze unutar oštrog prostora slike (DoF).

Nakon preciznijeg apsolutnog orijentiranja modela te optimizacije veznih točaka generiran je gusti oblak točaka (dense cloud). Odabrani su sljedeći parametri: Quality: *High* i Depth filtering: *Aggressive*. Generirani oblak točaka se sastoji od nešto više od 400 milijuna točaka.

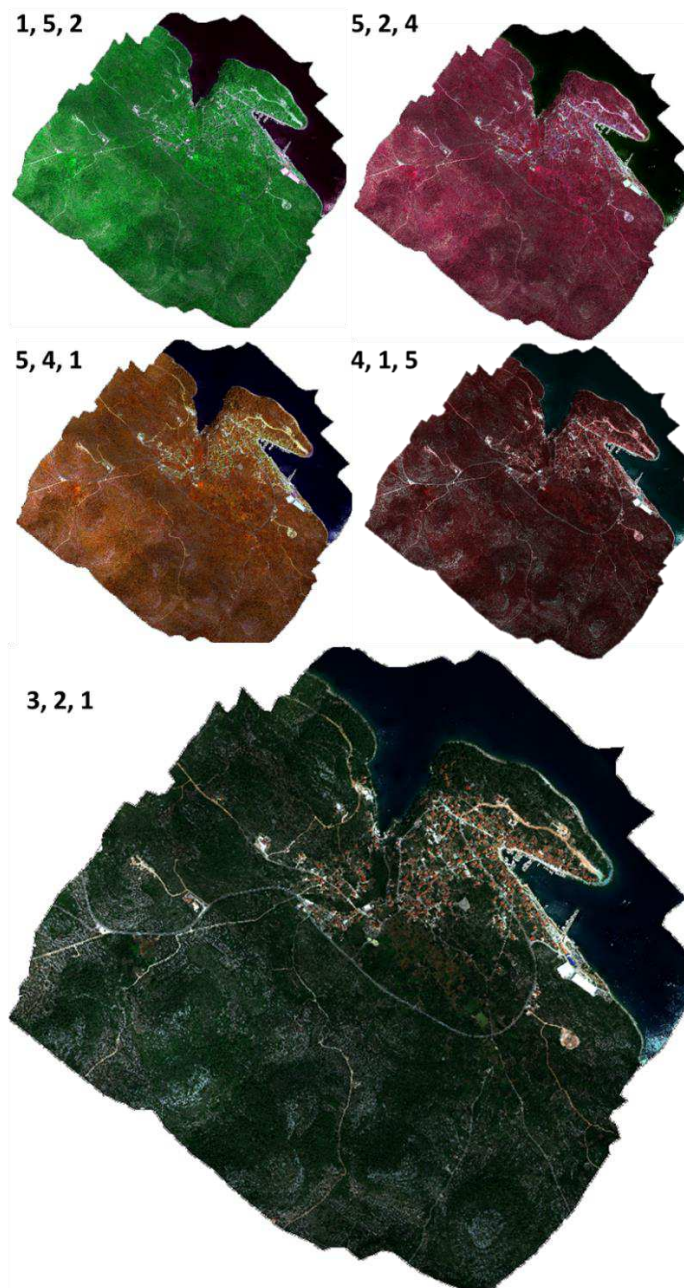
Iz gustog oblaka točaka generiran je poligonski model uvale i naselja Sali. Odabrane su sljedeće postavke: *Source data* (Dense cloud), *Surface type* (Height), *Face count* (High). Generirani poligonski model jezera je u konačnici teksturiran (Slika IV-42).



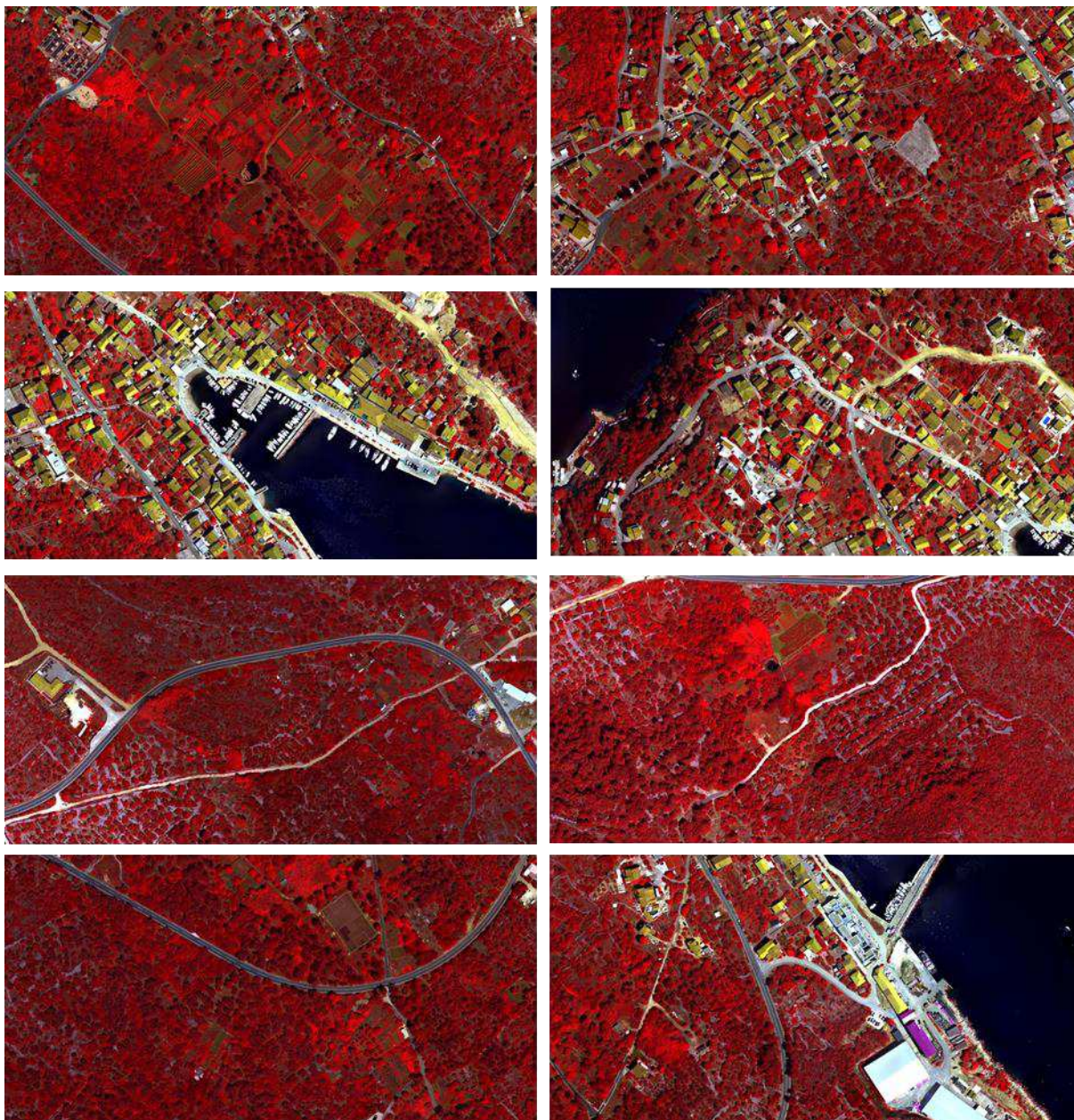
Slika IV-42. *Cijeli proces izvođenja multispektralnog snimka naselja i uvale Sali: vezne točke, dodavanje orijentacijskih točaka, gusti oblak točaka, izgradnja poligonske mreže, generiranje DEM-a te generiranje multispektralnog snimka*

U konačnici je iz aerofotogrametrijskog snimanja provedenog 27. i 28. lipnja 2020. izveden sljedeći modeli:

- 1) Visoko-rezolucijski (5 cm) multispektralni snimak (DOF) (Slika IV-43-44) površine oko 450 ha.



Slika IV-43. Visoko-rezolucijski multispektralni snimak naselja i uvale Sali



Slika IV-44. *Isječci multispektralnog snimka*

b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno orijentiranih analiza

Nakon izvođenja zračnog multispektralnog snimanja izvedeno je prikupljanje vegetacijskih uzoraka. Terenski (*in-situ*) uzorci su prikupljeni s ciljem lakšeg prepoznavanja vegetacijskih vrsta u procesu klasifikacije multispektralnog snimka (uzimanje elemenata signatura) te za procjenu točnosti izvedenog modela.

Prikupljanje su na terenu izvršili izv. prof. dr. sc Ante Šiljeg i dr. sc. Ivan Marić. Terenskim obilascima uočena je dominacija invazivne vrste pajasena (Slika IV-45), bajama, masline (Slika IV-46) i primorskog bora.

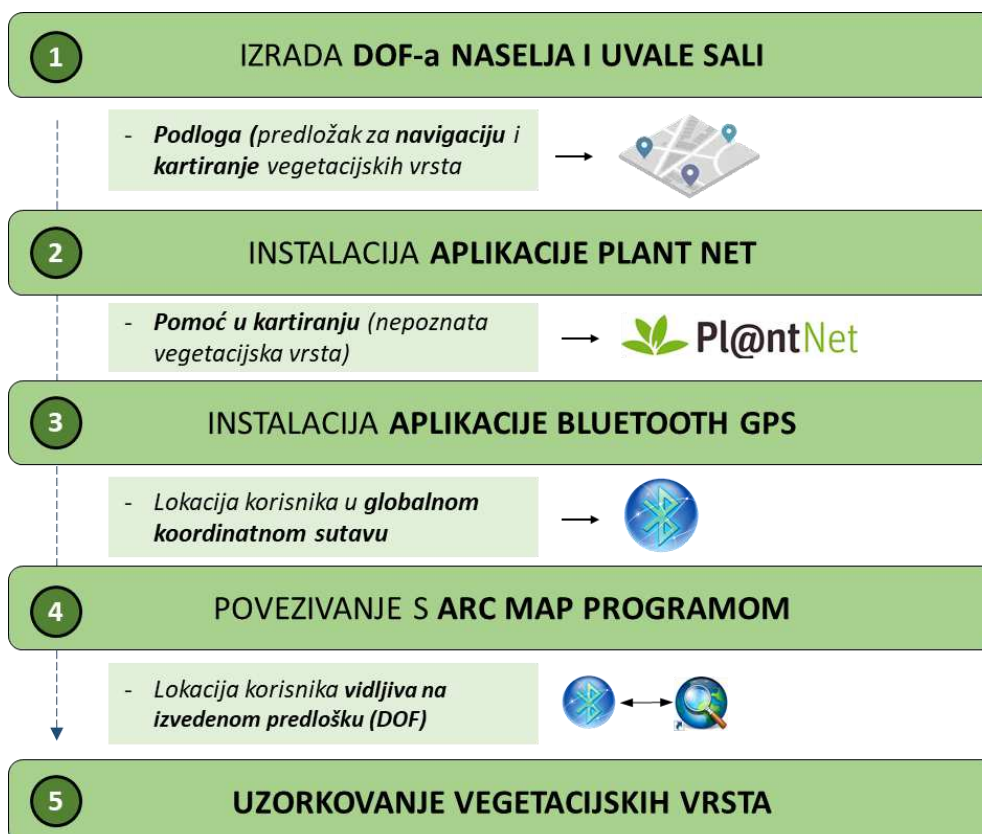


Slika IV-45. Primjeri prikupljenih uzoraka pajasena



Slika IV-46. *Primjeri prikupljenih uzoraka masline*

Prikupljanje vegetacijskih uzoraka vegetacijskih vrsta napravljeno je kroz sljedeći proces. Generalno proces se može podijeliti u nekoliko koraka (Slika IV-47):



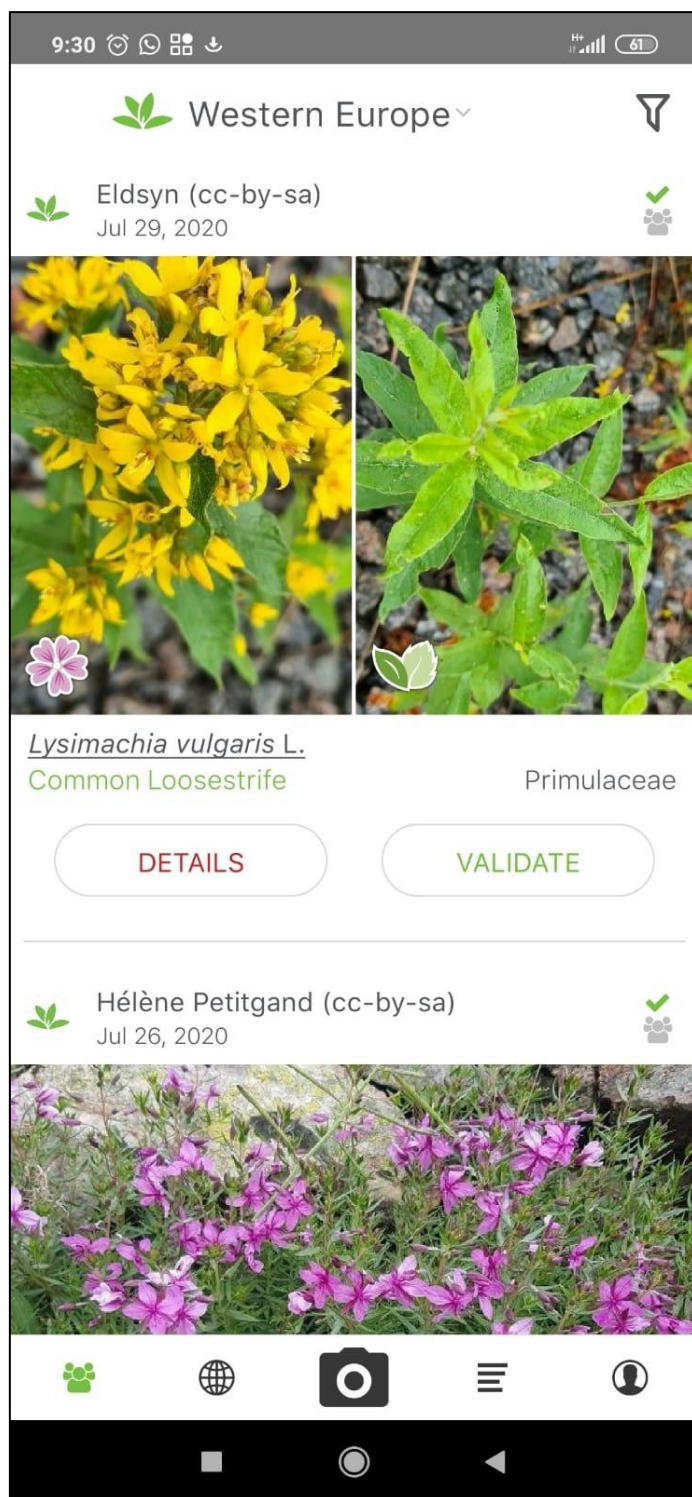
Slika IV-47. Shematski prikaz procesa kartiranja vegetacijskih vrsta

1) Izrada DOF-a (digitalni ortofoto) uvale i naselja Sali

Prvi korak se odnosio na izradu visokorezolucijskog DOF-a proučavanog područja. Cilj ovog koraka je bio osigurati prostorno točan (u odnosu na zadan projekcijski koordinatni sustav) i visokorezolucijski (velika detaljnost prikaza) model naselja i uvale Sali. Funkcija izvedenog DOF-a je da posluži kao predložak (*basemap*) u navigaciji proučavanim područjem. Postojeći, besplatno dostupni, *basemap* layeri u GIS-u i službeni DOF Republike Hrvatske nemaju zadovoljavajuću detaljnost prikaza. Korišten je DOF koji je generiran u prethodnim aktivnostima ovog projekta s prostornom rezolucijom od 5 cm.

2) Instalacija aplikacije Plant Net na mobilni uređaj

U slučaju nemogućnosti identifikacije nekih vegetacijskih vrsta korištena je aplikacija *Plant net*. *Plant net* je aplikacija koja omogućava identifikaciju biljaka kroz jednostavno fotografiranje pametnim telefonom (Slika IV-48). Trenutno se u bazi podataka navedene aplikacije nalazi preko 20 000 vrsta.



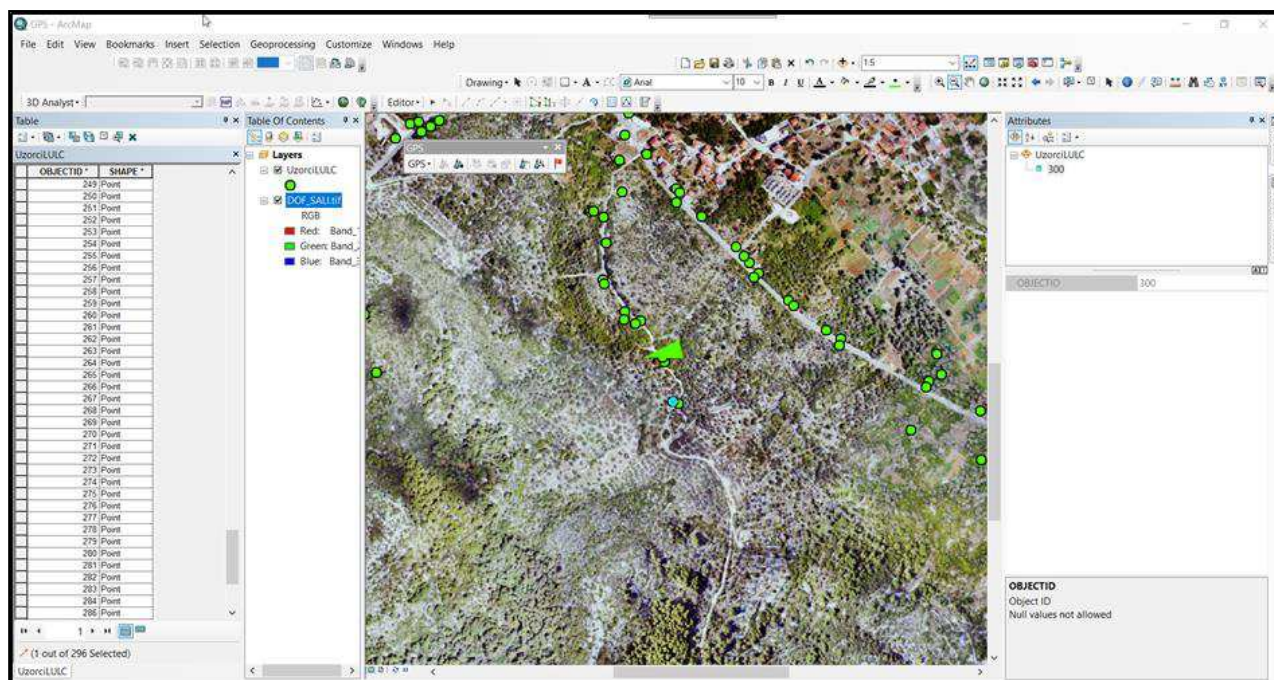
Slika IV-48. Screen shot korištene aplikacije

- 3) Instalacija aplikacije Bluetooth GPS (bilo koja druga aplikacija koja u realnom vremenu prikazuje lokaciju korisnika u globalnom koordinatnom sustavu, a ima mogućnost bluetooth spajanja s laptopom, odnosno ArcMap programom)

Nakon instalacija, potrebno je upaliti aplikaciju, izaći vani (otvoren prostor, bez zapreka) te se pričekati da lokacija korisnika fiksira, odnosno provjeriti koliko je satelita pronađeno. Na sučelju *smartphona* potrebno je provjeriti svoju lokaciju.

- 4) Povezivanje instalirane aplikacije s ArcMap programom

Nakon izvršenja prethodnog koraka pali se ArcMap program. Preko bluetootha se povezuje *smartphone* i laptop. Potom se pod Customize - Toolbars - GPS pali GPS alat. U padajućem izborniku se bira *GPS Connection Setup*, odabire se odgovarajući komunikacijski port i ostali korisničko-definirani parametri - *Detect GPS Start*. Izvršenjem ovog koraka na odabranom predlošku (DOF) se prikazuje simbol koji ukazuje na lokaciju korisnika u globalnom koordinatnom sustavu (Slika IV-49).



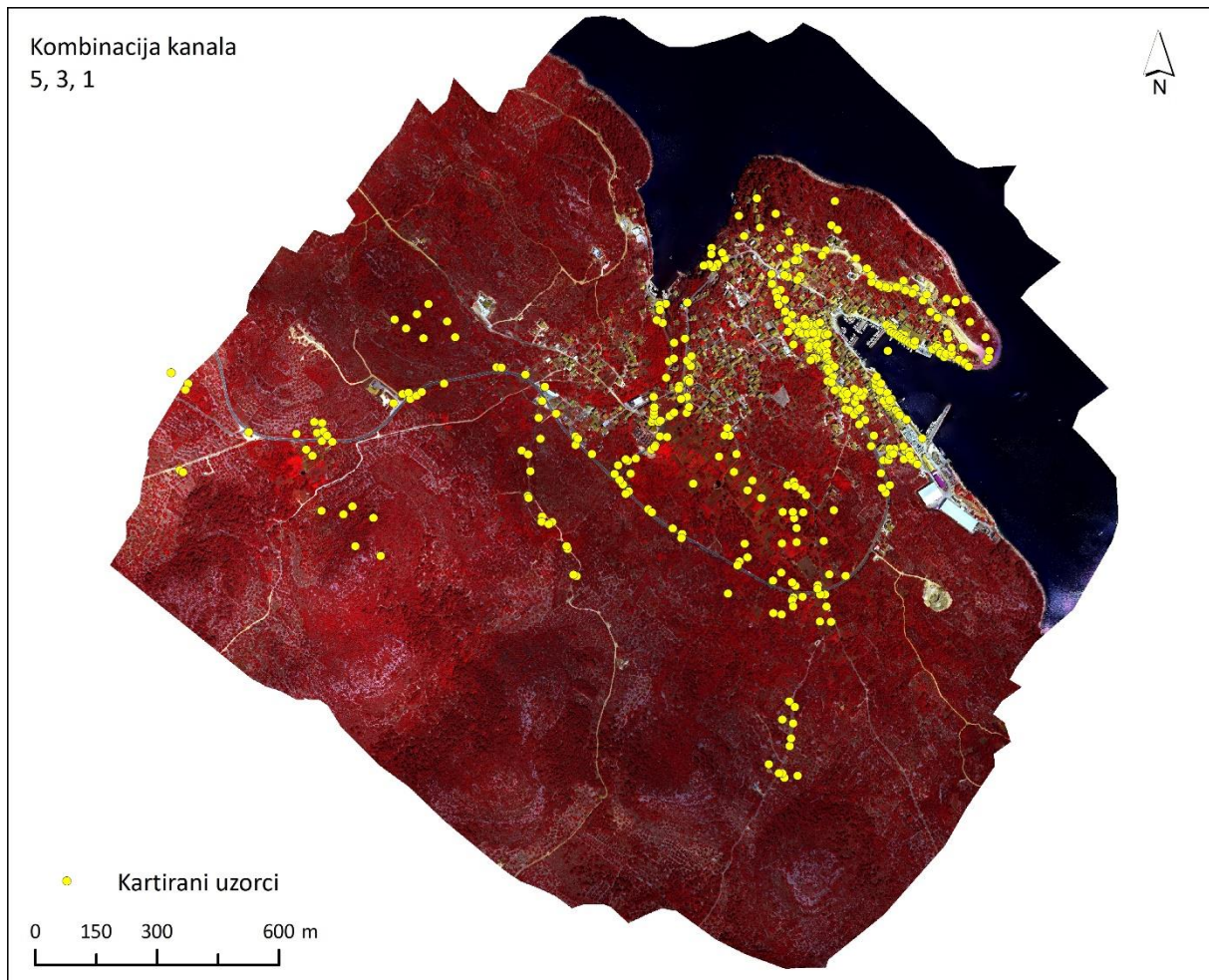
Slika IV-49. Predložak (DOF) s označenom lokacijom korisnika

5) Uzorkovanje vegetacijskih vrsta

Izvršenjem prethodnog koraka napravljeni su svi preduvjeti potrebni za obavljanje procesa uzorkovanja. Potom korisnici (izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg i dr. sc. Ivan Marić) obilaze teren osobnim automobilom navodeći se preko GPS-a koji njihovu lokaciju pokazuje na predlošku DOF-a. Uzorkovanje izvršavaju na način da vektoriziraju specifičan vegetacijski oblik na DOF-u, daju mu specifičnu šifru te zapisuju u kojoj se vegetacijskoj vrsti radi. U slučaju da ne mogu odrediti tip vegetacijske vrste služe se aplikacijom *Plant net*. Terenskim istraživanjem ukupno je prikupljeno 390 uzoraka (Slika IV-50-51).



Slika IV-50. Uzorkovanje vegetacijskih vrsta



Slika IV-51. Kartirani vegetacijski uzorci na širem području uvale i naselja Sali

c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Uvod - teorijska osnova

Klasifikacija multispektralnih snimki je složen proces, koji uključuje rigoroznu provjeru testnog uzorka (*signature*) ovisnog o upotrijebljenom klasifikacijskom algoritmu. Klasifikacija multispektralnih snimaka provodi se radi lakšeg identificiranja i prepoznavanja objekata na snimkama. Postupak i izbor klasifikacije vrlo su važni prilikom izrade klasificirane snimke (Rumora i dr., 2018). Pogrešan izbor metode klasifikacije ili pogrešno definiran uzorak (*signatura*) mogu dovesti do značajnih pogrešaka u izlaznom modelu. To povlači za sobom i daljnje pogreške u primjeni izvedenih informacija. Istraživanje krajolika na lokalnim i regionalnim razinama moguće je već na satelitskim multispektralnim snimkama prostorne rezolucije <0,5 m. Najjednostavnija definicija klasifikacije bi bila grupiranje određenih dijelova snimke u spektralne, te potom informacijske klase (Janeš, 2019) na temelju sličnosti. Osnovni element multispektralne snimke i svakog rasterskog podatka je piksel. On se tretira kao zasebna jedinica koja u sebi sadrži vrijednosti (DN⁷) od nekoliko spektralnih pojaseva. Broj DN-a se zapisuje ovisno o radiometrijskoj rezoluciji satelitskog snimka (6-bit, 18 bit...). Međusobnom usporedbom piksela moguće je odrediti klase (grupe) koje se potom povezuju s informacijskim kategorijama koje su od interesa korisnicima. Klase u pravilu predstavljaju zemljišni pokrov (*land cover*).

Zemljišni pokrov mogu činiti prirodne ili umjetne strukture koje prekrivaju određeni dio Zemljine površine, kao što su: vegetacija, vodena površina, zgrade, put, itd.

S obzirom na to da snimke sadrže informacije u više dijelova elektromagnetnog spektra (izvan čovjekove vizualne percepcije), za klasifikaciju se koriste spektralne informacije predstavljene vrijednostima piksela u različitim spektralnim opsezima.

Skupovi piksela čije su vrijednosti međusobno slične predstavljaju spektralne klase. Za korisnika klasifikacije od interesa su, međutim, informacijske klase. Informacijske klase mogu biti, npr. različiti tipovi zemljišnog pokrova: vegetacija, rijeka, urbano zemljište, poljoprivreda, krš. Osnovni problem klasifikacije slika je uspostavljanje povezanosti između spektralnih i informacijskih klasa. Problem komplicira činjenica da unutar jedne informacijske klase može postojati varijabilnost tako da njeni pikseli pripadaju različitim spektralnim klasama.

S druge strane, moguće je i da pikseli koji posjeduju iste spektralne vrijednosti pripadaju različitim informacijskim klasama.

⁷ Digital Number

Metode klasifikacije generalno se mogu grupirati u (Weih i Riggan 2010)

- **Nadzirane** (polu-automatske) klasifikacijske metode
- **Nenadzirane** (automatske) klasifikacijske metode
- **Objektno orijentirane** (*object-based*) klasifikacijske metode

Nadzirana metoda klasifikacije predstavlja klasifikaciju određene scene/snimka temeljem uzoraka (*signatura*) koje je definirao korisnik. Uzorci se koriste kako bi se definirale klase pokrova zemljišta, a određivanje klase se vrši na spektralnim karakteristikama svakog uzorka. Najpoznatiji algoritmi nadzirane klasifikacije su maksimalna sličnost (*maximum-likelihood*) i minimalna udaljenost (*minimum distance*) (Weih i Riggan 2010).

U nadziranoj klasifikaciji se uzimaju uzorci poznatog identiteta za klasifikaciju piksela nepoznatog identiteta (smještaj neklasificiranih piksela u jednu od informacijskih klasa). Uzorci poznatog identiteta su oni pikseli koji se nalaze unutar označenih uzoraka (*signature*). Operator definira uzorke tako što identificira regije na snimci koje se mogu jasno parirati s područjima poznatog identiteta. Takva područja bi trebala definirati spektralne karakteristike one kategorije (npr. šuma) koju reprezentiraju te ujedno biti homogene u odnosu na informacijsku kategoriju koja se u tom trenutku klasificira. Označeni uzorci, koji su sastavljeni od velike količine piksela, uzrokuju spektralne karakteristike informacijskih kategorija.

Ove informacije pružaju bazu za klasifikaciju preostalih piksela izvan uzorkovanog područja. Kao generalna preporuka, operator bi trebao osigurati da označena područja sadrže najmanje 100 piksela za svaku kategoriju (Janeš, 2019).

Prednosti nadzirane klasifikacije su sljedeće. Operator ima kontrolu nad odabranim izbornikom informacijskih kategorija predviđenih za određeni prostor. Ovo je veoma bitno jer omogućuje izvođenje klasifikacije za specifičnu svrhu usporedbe s drugom klasifikacijom istog područja, ali različitog datuma. Zbog toga, nepredvidive kvalitete kategorija generirane nenadziranom klasifikacijom mogu biti nepogodne ili neodgovarajuće. Drugo, nadzirana klasifikacija je vezana uz specifična područja poznatih identiteta, određena kroz proces odabira područja za obuku. Zadnja prednost uključuje sposobnost analitičara da pronađe probleme ili greške pri klasifikaciji proučavanjem podataka za obuku kako bi se utvrdilo jesu li točno klasificirani tijekom postupka (Janeš, 2019). Mane nadzirane klasifikacije su sljedeće. Prva mana je ta što operator sam definira klasifikacijsku strukturu podataka. Ove klase ne moraju se podudarati prirodnim klasama.

Drugo, uzroci su često definirani primarno u odnosu na informacijske kategorije, a sekundarno u odnosu na spektralne karakteristike. Treće, uzorci koje je odabrao operator mogu biti neprecizna slika onih uvjeta koji se odvijaju unutar ostatka snimke.

Sljedeća mana uključuje sam rad koji analitičar mora odraditi kako bi završio analizu. Sam odabir podataka za uzorke može oduzeti izuzetnu količinu vremena. Preostala značajna mana nadzirane klasifikacije opisuje ograničenost čovjeka kao klasifikatora.

S obzirom na to da operator sam definira informacijske kategorije velika je mogućnost da se kategorija koja je trebala biti prisutna izostavi zato što samom operatora nije poznata (Janeš, 2019)

Nenadzirana metoda klasifikacije automatski klasificira scenu na temelju statističkog grupiranja spektralnih značajki i obilježja (Rumora i dr., 2018). Zasniva se na grupiranju piksela tako da njihove spektralne vrijednosti zadovoljavaju neki kriterij homogenosti. Kod nekih algoritama ovaj kriterij se može unaprijed zadati navođenjem dozvoljene varijabilnosti vrijednosti piksela, dok se kod nekih algoritama samo navodi željeni broj klastera. Polazeći od zadanih parametara algoritam za klasterizaciju pronalazi prirodnu strukturu u skupu podataka. Rezultat klasterizacije je skup spektralnih klasa koje je, zatim, potrebno upariti s informacijskim klasama. Korisnik treba definirati samo broj klasa koje će se kreirati. Razni algoritmi grupiranja se koriste kako bi se odredila prirodna, statistička skupina podataka. Pikseli se grupiraju zajedno ovisno o njihovoj spektralnoj sličnosti. Računalo zatim svaku skupinu analizira te posebno kategorizira u odgovarajuće klase. Ako analitičar odredi da se snimka klasificira u 10 različitih klasa, algoritam će prema spektralnoj sličnosti piksela kreirati predloženih 10 klasa. Najpoznatiji algoritmi su *K-means* i *ISODATA*.

Nekolicina prednosti nenadzirane klasifikacije su automatizacija, olakšan rad analitičara, smanjen prostor za ljudsku grešku te nije potrebno temeljito poznavanje snimke koja se obrađuje. U nenadziranoj klasifikaciji većina procesa je automatizirana i utjecaj analitičara na sam proces klasifikacije je minimaliziran.

Mane te ograničenja nenadzirane klasifikacije najviše proizlaze iz oslanjanja na „prirodno“ grupiranje, te poteškoća kategoriziranja navedenih u informacijske kategorije koje su od interesa analitičaru.

Nadzirana i nenadzirana metoda klasifikacije je temeljena na analizi spektralnih svojstava svakog piksela unutar njegov područja interesa, zanemarujući prostorne i kontekstualne informacije okružujućih piksela. Istraživanja su pokazala da kad se ovakvi piksel-temeljeni pristupi koriste na visoko-rezolucijskim slikama može doći do pojave efekta "soli i papra" što doprinosi netočnosti klasifikacije (Campagnolo and Cerdeira, 2007; Van de Voorde et al., 2004).

S ciljem uklanjanja navedenih problema došlo je do razvoja **objektno-orijentiranih klasifikacijskih procedura** koji analiziraju spektralna i prostorno/kontekstualna svojstva piksela te koriste segmentacijske procese i iterativne algoritme učenja u postizanju točnijih klasifikacijskih rezultata primjenom u odnosu na pixel-temeljene metode (Hay and Castilla, 2006). Objektno orijentirana

klasifikacijska metoda (OBIA) je metoda koja kreira objekte različitih oblika i veličina, dok metode temeljene na klasifikaciji piksela generiraju kvadrate (oblik piksela) (Weih i Riggan 2010).

Tradicionalna klasifikacija slika na temelju piksela (*pixel based*) određuje klasu zemljišnog pokrova isključivo za pojedini piksel.

Svi pikseli su iste veličine, istog oblika te u takvim analizama ne postoji spoznaja o okružujućim obrascima. Međutim, GEOBIA⁸ segmentira sliku grupirajući "slične" piksele u vektorske objekte (oblike).

Pomoću ovih segmentiranih objekata te poznavajući njihove spektralne, geometrijske i prostorne karakteristike generira se model zemljišnog pokrova. Suprotno, ako se koriste tradicionalne klasifikacije tehnike, često se dobije efekt "soli i papra" (Slika IV-52) u klasifikacijskom rezultatu.



Slika IV-52. Efekt "soli i papra" koji se javlja u *pixel-based* procesu klasifikacije na visoko-rezolucijskim slikama

⁸ GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis)

Sumirano dva su osnovna načela OBIA: **segmentacija** i **klasifikacija**. Ipak, objektno-orientirani postupak izvlačenja značajki uključuje proces rada koji pokriva tri glavna funkcionalna područja:

1) Segmentaciju slike

2) Generiranje analitičkih podataka o segmentiranim dijelovima

3) Klasifikaciju

Izlazni podatak iz jednog koraka ili alata predstavlja ulazni podatak za sljedeći korak/alata. Može se reći da je OBIA sličan proces tradicionalnom pixel-based klasifikacijskom pristupu nadzirane i nenadzirane klasifikacije, samo što se umjesto klasificiranja pojedinačnog piksela klasificira segment ("super pixel"). Svaki segment ili super piksel je predstavljen skupom atributa prema kojima se u konačnici određuje kojoj klasi spada.

Prilikom **segmentacijom** slike, proces grupira piksele radi formiranja objekata. Segmentacijom se grupiraju pikseli sličnih spektralnih karakteristika koji se nalaze u neposrednoj blizini u jedan segment. Segmenti koji pokazuju određene spektralne, prostorne i slične karakteristike oblika mogu se dalje grupirati u objekte. Objekti se zatim mogu grupirati u klase koje predstavljaju značajke stvarnog svijeta na terenu.

Segmentacija slika u GIS-u se temelji na **Mean Shift** (srednji pomak) pristupu. Ova tehnika koristi pomičnu matricu kvadrata (prozor) prilikom izračuna prosječne vrijednosti piksela s ciljem utvrđivanja koji pikseli mogu biti uključeni u određeni segment. Kako se pomična mreža kvadrata pomiče preko multispektralne slike, iterativno se izračunavaju vrijednosti piksela kako bi se provjerila prikladnost svakog segmenta. Rezultat je grupiranje piksela slike u segmente koje karakterizira spektralna sličnost refleksije.

Izlazni rezultat *Mean Shift* alata je 3-kanalna, 8-bit rezolucijska segmentirana slika.

Obilježja segmenata slike ovise o četiri parametra:

a) spektralnoj detaljnosti (*spectral detail*) - parametar kojim se postavlja razina važnost koja se daje spektralnim razlikama u vašoj multispektralnoj slici. U GIS-u varira od 1 do 20. Veće vrijednosti znače da se u procesu segmentacije daje veća važnost spektralnim razlikama između piksela. Drugim riječima, veće vrijednosti se koriste kad neke značajke na multispektralnom modelu imaju slične spektralne karakteristike, ali Vi ih želite klasificirati u odvojene klase.

Manje vrijednosti kreiraju spektralno glatke izlazne rezultate. Primjerice, veće vrijednosti omogućuju diferencijaciju između različitih vrsta drveća, dok niže vrijednosti promatraju sve kao jednu klasu.

b) prostornoj detaljnosti (*spatial detail*) - parametar kojim se kojim se utvrđuje važnost blizine između značajki u multispektralnom modelu. Važeće vrijednosti u GIS-u su od 1 do 20. Viša vrijednost prikladna

je za scenu u kojoj se žele izdvojiti male zbijene značajke, dok manje vrijednosti stvaraju prostorno gladak rezultat. Primjerice, ako se u sceni urbanog krajobraza postave visoke vrijednosti zgrade i ceste se mogu klasificirati kao posebne klase (veća prostorna detaljnost). S druge strane, ako se u istoj sceni odaberu manje vrijednosti urbana scena će biti klasificirana kao jedinstvena klasa (manja prostorna detaljnost).

c) minimalnoj jedinici segmenta (*min_segment_size*) - parametar koji se izražava u pikselima. Spoja segmente manje od ove veličine sa svojim najprikladnijim susjednim segmentom.

d) band_indexes - parametar koji se odnosi na odabir jednog ili više kanala koji će se koristiti u segmentiranju multispektralnog snimka. Odabiru se oni kanali u kojima su razlike između značajki najuočljivije.

Veličina objekata koji nastaju segmentacijom slike ovisi o detaljnosti željenog modela zemljišnog pokrova te ulaznom podatku. Nakon segmentacije, dolazi do **klasifikacije** izdvojenih objekata. Oni se klasificiraju na temelju statističkih parametara koji su specifični za svaki objekt. Primjerice, objekti se mogu klasificirati na temelju **geometrije, boje (refleksije), površine, oblika, teksture, susjednosti (blizine oblika)** itd. Potrebno je istaknuti da ne postoji najbolji način klasificiranja značajki zemljišnog pokrova koristeći OBIA. Ipak, analitičari često koriste ove statistike za klasificiranje zemljišnog pokrova primjenom OBIA:

- **Vodne površine:** ravne plohe (niske vrijednosti DSM), akumulira se u depresijama (visok TWI ili nizak TPI), niska temperatura (termalne karakteristike) i visoka apsorpcija near-infrared zračenja (NDVI-a je negativan)
- **Stabla:** neravne plohe (velika varijabilnosti u visinama, visoka SD u DSM-u), velika vrijednost refleksije infra-crvenog zračenja kod zdrave vegetacije (visok NDVI).
- **Građevine:** često pravokutnog oblika, visoka vrijednost DSM-a u odnosu na okolne oblike, veliki nagibi.
- **Trava:** uglavnom ravne površine, visoke vrijednosti u DSM-u (niska SD-a), umjerena refleksija infracrvenog zračenja (umjeren NDVI)
- **Ceste:** velika refleksija svjetlosti (visok RGB), uglavnom ravne plohe, nizak ili negativan NDVI.

Proces izrade modela zemljišnog pokrova primjenom GEOBIA u GIS-u se generalno može podijeliti na 5 koraka. Ovaj metodološki okvir bit će primijenjen u sljedećoj fazi projekta PEPSEA Sali za potrebe generiranja modela zemljišnog pokrova uvale i naselja (Slika IV-53).

1. Izvođenje i segmentacija multispektralnog snimka

- Ulazni podatak može biti multispektralna i/ili crno-bijela slika.
- Odabir odgovarajućih vrijednosti parametara prilikom segmentacije slike.
- Odabir kanala u kojima su razlike u značajkama najuočljivije.
- Mora se postaviti kompromis između parametara prostorne i spektralne detaljnosti. U pravilu je dominantna spektralna detaljnost.
- Minimalna jedinica segmenta ovisi o minimalnoj jedinici kartirana (MMU⁹).
- Brzina procesiranja ovisi o razinama prostorne i spektralne detaljnosti. Veća detaljnost - duže vrijeme procesiranja.

2. Označavanje i dodavanje uzoraka - *data augmentation*

- Definiranje klasifikacijske sheme.
- Prikupljanje poligonskih testnih uzoraka
- Provjera testnih uzoraka primjenom metode cross-validacije.
- *Data augmentation* ili povećanje podataka, koje se naziva i transformacija ili distorzija podataka, koristi se za umjetno povećanje broja uzoraka u testnom setu kroz primjenu specifičnih deformacija inputa (ulaznog podataka). Te deformacije uključuju: rotaciju, translaciju, rezanje te promjenu svjetline piksela.

3. Odabir klasifikatora (*train the classifier*)

- Odabir klasifikacije metode (*Support Vector Machine - SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster, Deep Learning*).
- Input uključuje: segmentiranu sliku, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata (boja, mean, sd., kvadratičnost, broj itd.).
- Izlazni rezultat je datoteka definicije klasifikator (*classifier definition .ecd*).

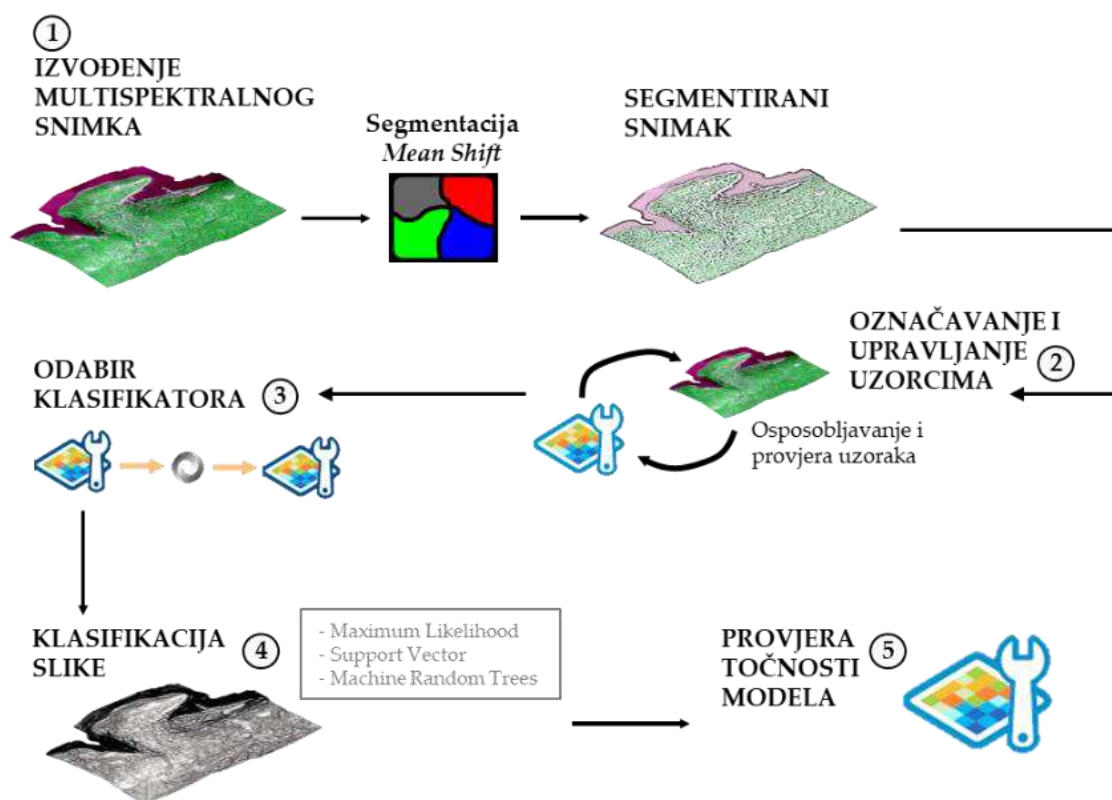
4. Klasifikacija slike

- Izvođenje klasifikacije (SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster (unsupervised)).
- Input uključuje: segmentirani rasterski fajl, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata

⁹ Minimal Mapping Unit

5. Procjena točnosti modela zemljišnog pokrova

- Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova
- Usporedba izvedenih klasa s referentnim terenskim podacima (*GRD*).
- Primjena različitih tehnika uzorkovanja
- Izvođenje matrice konfuzije.



Slika IV-53. Metodološki okvir izvođenja zemljišnog pokrova

Segmentacija i klasifikacija multispektralnog snimka

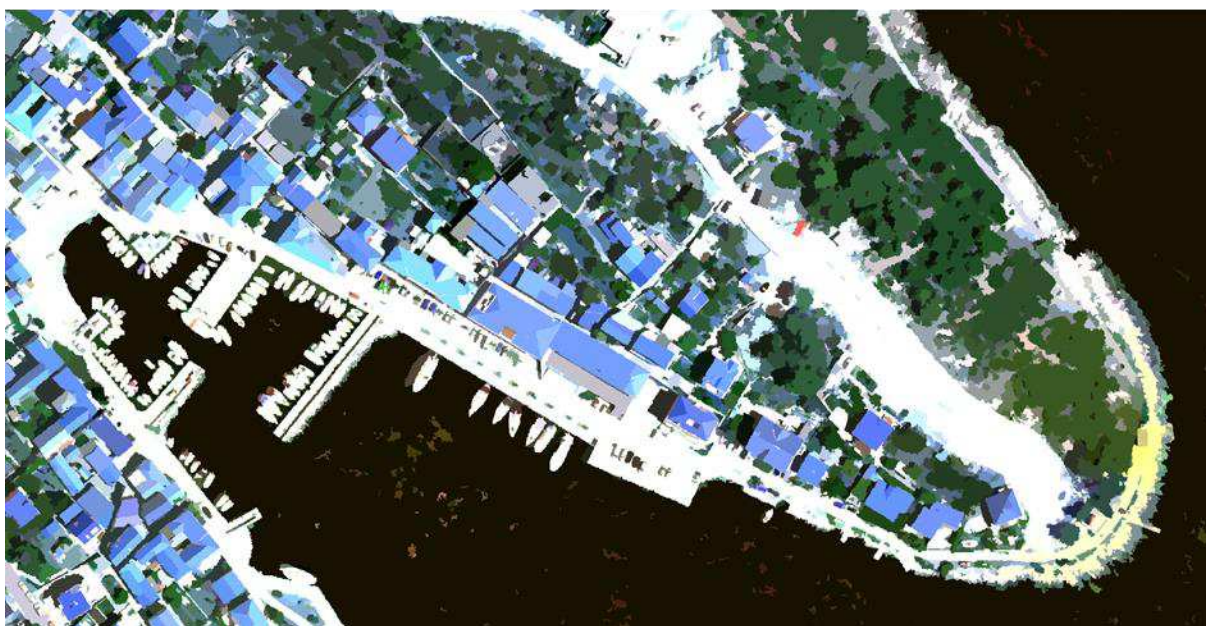
Unaprjeđenjem tehnologije satelitskih senzora prostorna rezolucija satelitskih snimaka se značajno povećala. U snimcima visoke prostorne rezolucije često se događa da različite klase (npr. betonske površine i krš) imaju slične spektralne značajke (refleksiju) ili da vrijednosti istih klasa imaju različite spektralne značajke (npr. cesta ili cesta u sjeni, cesta od makadama - snažna spektralna varijabilnost između klasa). Dakle, pixel-based pristup u takvim situacijama ne dovodi samo do pogrešne klasifikacije već i do rezultata koje karakteriziraju "razlomljeni" uzorci (površine).

Međutim, pravi izazov u OBIA metodi predstavlja definiranje odgovarajućih parametara segmentacije. Segmentacija multispektralnog snimka (*Segment Mean Shift*) je lokalna tehnika homogenizacije koja je vrlo korisna za prigušivanje sjenčanja ili razlike tona u lokaliziranim objektima. Njome se zamjenjuje svaki piksel s prosjekom piksela u rasponu (r) susjedstva i čija se vrijednost nalazi unutar udaljenosti (d). Na izlazne rezultate multispektralnog snimka najviše utječu prostorna i spektralna domena slike (parametri *spectral* and *spatial detail*). Naime, multispektralni snimak je kombinacija između prostorne i spektralne domene, gdje prostorna domena znači prostor koordinata slikovnih piksela, dok spektralna domena znači vrijednosti piksela digitalnog broja (DN).

U procesu je pomoću alata *Segment Mean Shift* generiran je segmentirani multispektralni snimak (Slika IV-54-55) šireg područja uvale i naselja Sali, pod sljedećim postavkama: *Spectral Detail* = **18**, *Spatial Detail* = **15**, *Min. Segment Size* = **10**.

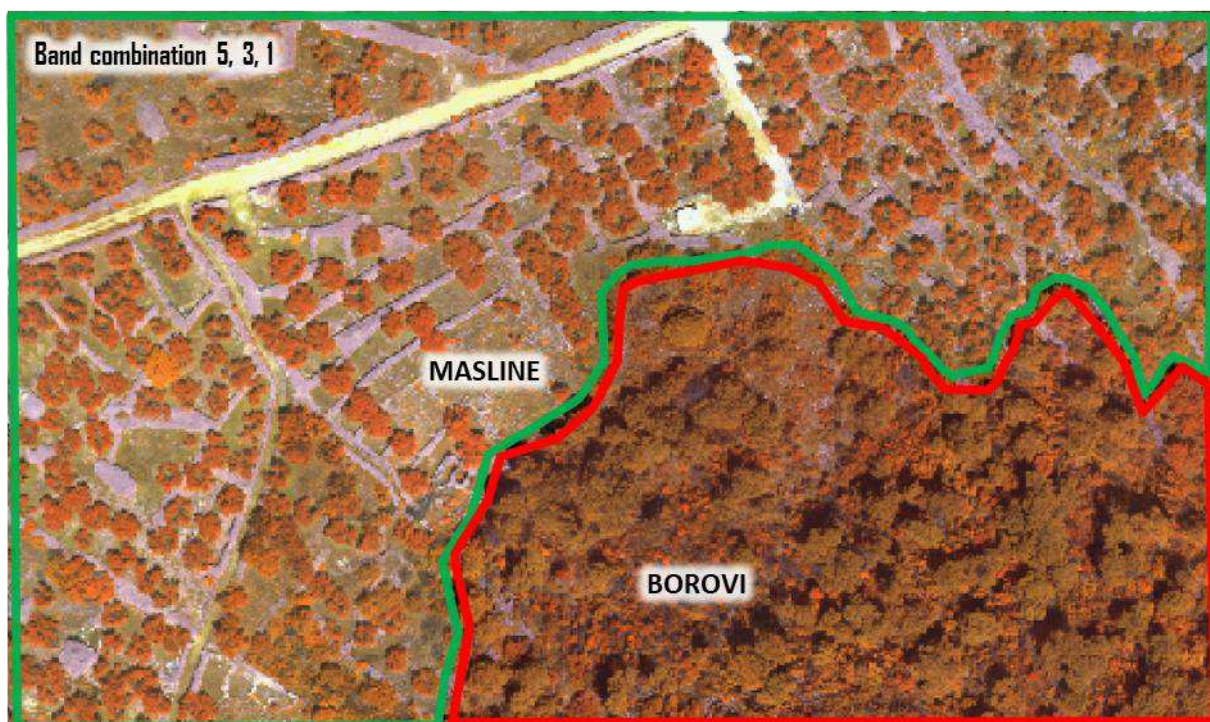


Slika IV-54. *Primjer multispektralnog i segmentiranog snimka (1)*



Slika IV-55. Primjer multispektralnog i segmentiranog snimka (2)

Kombinacijom kanala utvrđeno je da se na rasporedu kanala 5, 4, 1 najbolje uočavaju razlike između vegetacijskih vrsta. Na slici IV-56 prikazani su primjeri različitih vegetacijskih vrsta.



Slika IV-56. Kombinacija kanala 5, 4, 1 na kojoj se mogu uočiti razlike između borova i maslina

- **Označavanje i upravljanje uzorcima**

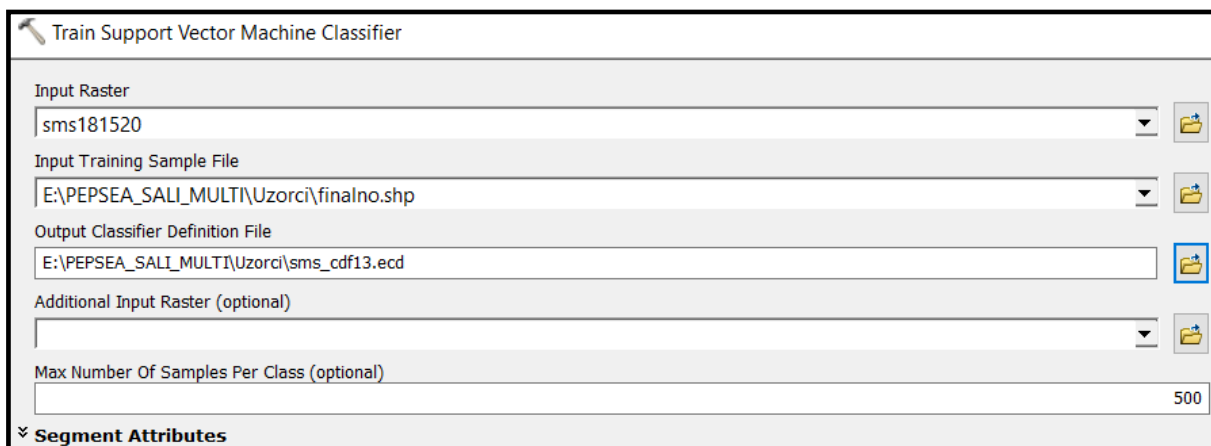
Potom su u *Training Sample Manageru* uzorkovani elementi klasa. Elementi klasa su uzorkovani prema izvedenom segmentiranom snimku. U procesu uzorkovanja nastojalo se da sve klase budu, koliko je to moguće s obzirom na dominantnost određenih vrsta na proučavanom području, zastupljene s jednakim brojem piksela unutar elemenata. Ukupno je uzorkovano oko 30 klasa od kojih su neke u iterativnim uzorkovanjima duplo uzorkovane (npr. masline, krovovi).

Dodavanje duplih klasa je napravljeno s ciljem bolje detekcije onih klasa koje u inicijalnoj klasifikaciji nisu prepoznate ili su krivo klasificirane (Slika IV-57). U konačnici su elementi duplih klasa spojeni u jednu.

ID	Class Name	Value	Color	Count
1	Bor	2		2142
2	Maslina	13		15099
3	Tlo i trava	28		13761
4	Smede	37		6822
5	Voden_povrsina	54		469
6	Beton	55		23567
7	Urban_krov	56		8414
8	Suhozid	57		410
9	Kamen_krs_goli	59		1979
10	Makadam_zemlja	61		4406
11	Bajam	62		710
12	Limeni_krov	31		14964
13	Kostila	24		1927
14	Mirta	27		652
15	Smokva	32		400
16	Trava	63		630
17	Sjena	65		642
18	Pajasen	66		2241
19	Visoka plima	45		1319
20	More	105		446303
21	Tlo_zemlja	155		1520
22	Igraliste	175		5004
23	Kamenolom	177		4290
24	Draca	226		18165
25	Murva	271		637
26	Maslina2	46		863
27	Maslina3	57		655
28	Smede1	63		421
29	Pajasen1	64		1920
30	Urban_krov1	65		739

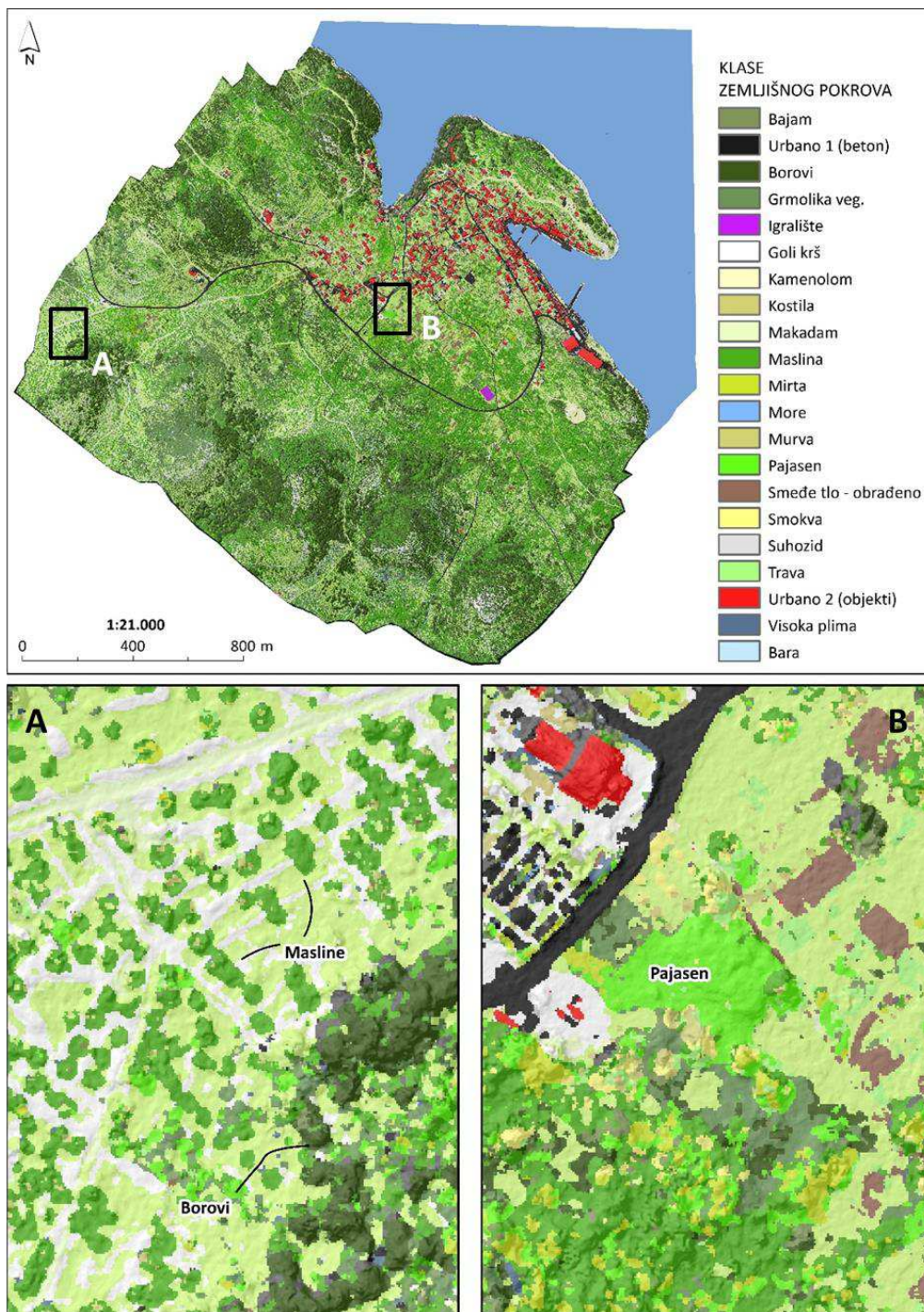
Slika IV-57 Uzorci klasa u Training Sample Manageru

Dakle, na odabranom segmentiranom snimku označeni su testni uzorci. U nastavku procesa korišten je klasifikator *Train Support Vector Machine* (SVM). SVM klasifikator predstavlja snažnu, popularnu klasifikacijsku metodu koja može analizirati segmentirani rasterski unos ili standardnu sliku. Ovo je relativno nova metoda klasifikacije koja se široko koristi među istraživačima. Klasifikator SVM ima nekoliko prednosti, za razliku od tradicionalnih metoda klasifikacije. SVM klasifikator može obraditi vrlo velike segmentirane slike, čija tablica atributa može postati prilično velika, što je posebno korisno kod slika visoke razlučivosti. Manje je podložan buci, koreliranim pojasevima i neuravnoteženom broju. Bilo koji raster koji podržava Esri prihvaćen je kao ulaz, uključujući rasterske proizvode, segmentirani raster, mozaike, usluge slike ili generičke skupove rasterskih podataka. Segmentirani rasteri moraju biti 8-bitni rasteri s 3-opsegom (Slika IV-58).

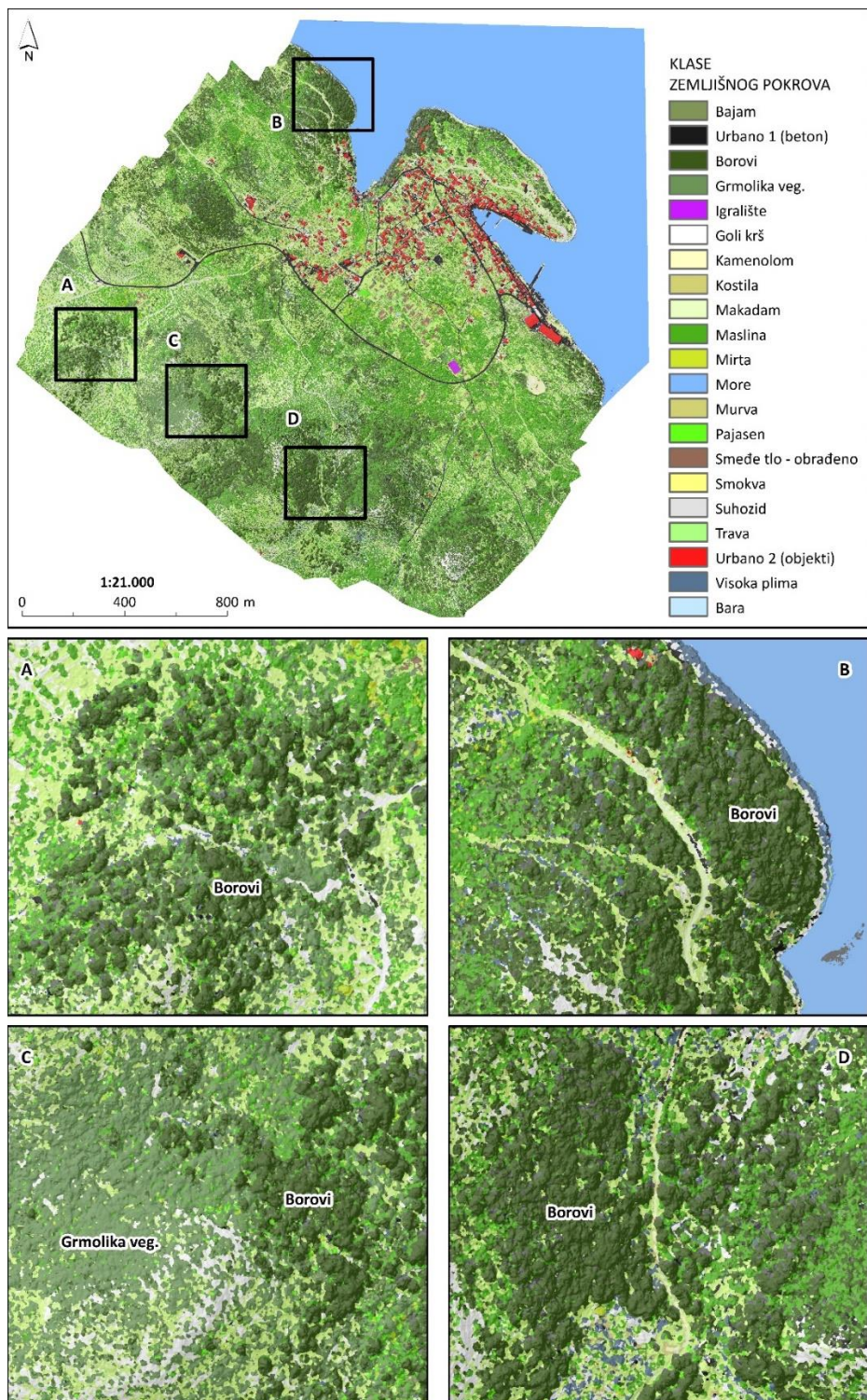


Slika IV-58. Primjena klasifikatora *Train Support Vector Machine* (SVM).

Klasifikacija slike je napravljena prema definiranoj datoteci klasifikatora (.ecd). Input je bio segmentirani snimak te definirana datoteka klasifikatora (.ecd). Izlazni rezultat je tematski klasificiran skup podataka (Model 2) s definiranim klasama simboliziranim prilikom procesa označavanja uzoraka (Slika IV-59-60).

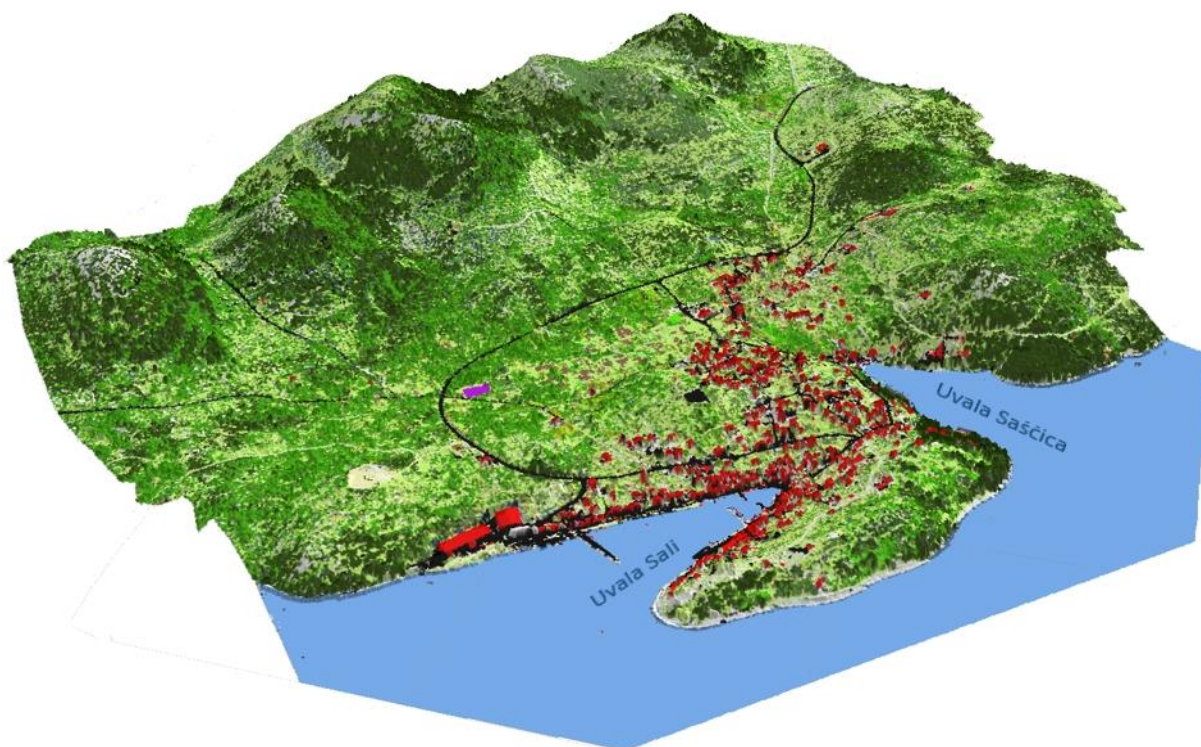


Slika IV-59. Zemljišni pokrov šireg prostora uvale i naselja Sali (model 2- verzija 1)



Slika IV-60. Zemljišni pokrov šireg prostora uvale i naselja Sali (model 2-verzija 1)

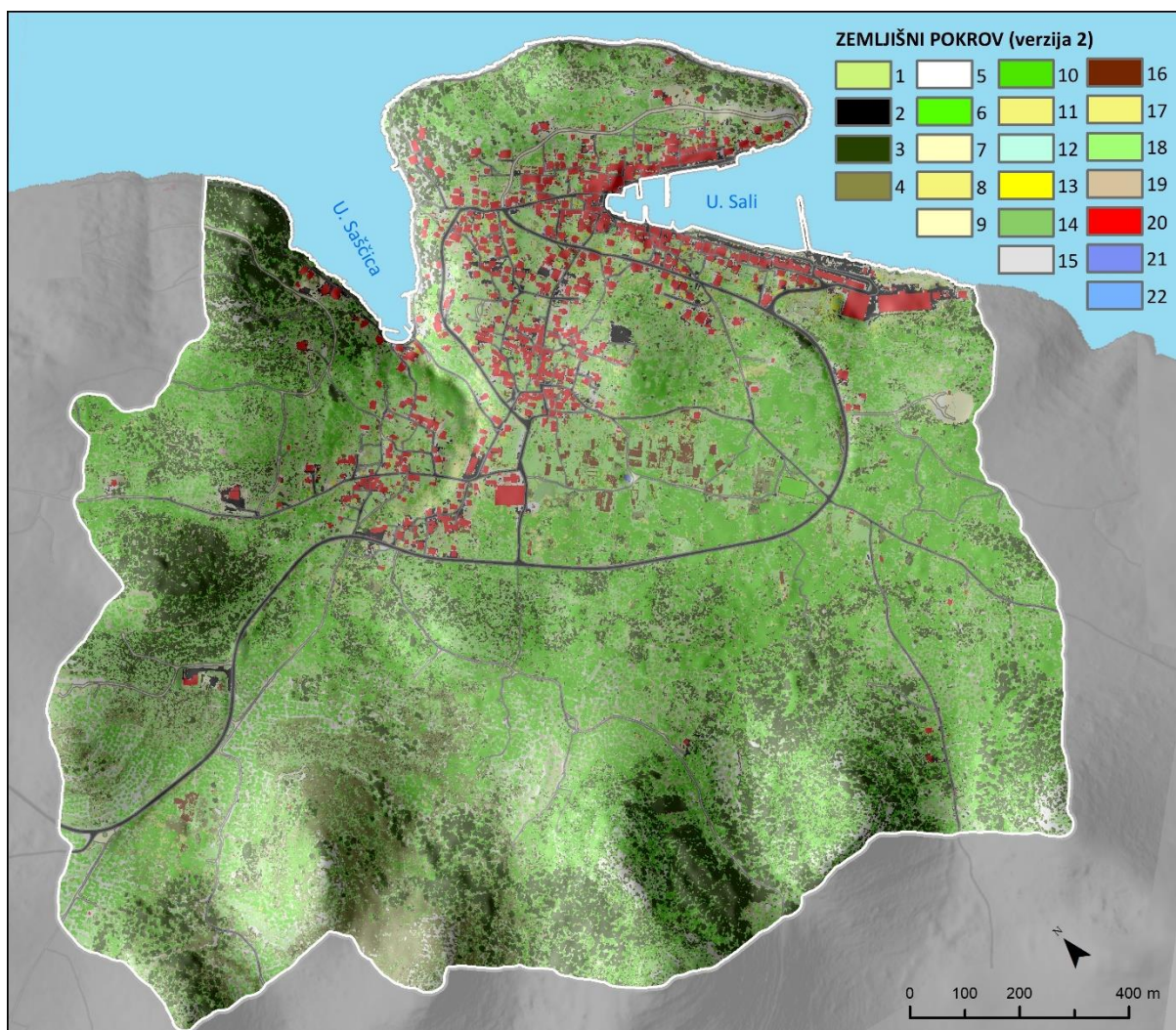
Na slici IV-61. prikazan je 3D model zemljišnog pokrova šireg područja uvale i naselja Sali.



Slika IV-61. 3D model zemljišnog pokrova uvale i naselja Sali (model 2-verzija 1)

Generirana je i druga verzija zemljišnog pokrova koja u odnosu na prvu verziju ima gotovo slične klase uz manje izmjene (par dodanih). Klasa *Trava* je podijeljena na *Tlo (trava)* i *Tlo (zemlja)*, dodana je klasa *Sjena* (prostor gdje nije jednostavno determinirati tip zemljišnog pokrova (Slika IV-62)). Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora (drenažni bazen). Rasterski model zemljišnog pokrova pretvoren je poligon. Potom su poligonski elementi okupljeni na temelju sličnosti atributa klase i identifikacijskog broja. Nakon okupljanja izračunata je površina svake klase te njezin udjel u ukupnoj površini drenažnog bazena.

U procesu izračuna izostavljene su klase *More* i *Sjene* (Tablica IV-17). Od vegetacijskog pokrova najdominantnije su očekivano *Masline*, *Borovi*, *Grmolika vegetacija* i *tlo s dominacijom trave*.



Slika IV-62. Zemljišni pokrov šireg prostora uvale i naselja Sali (model 2-verzija 2)

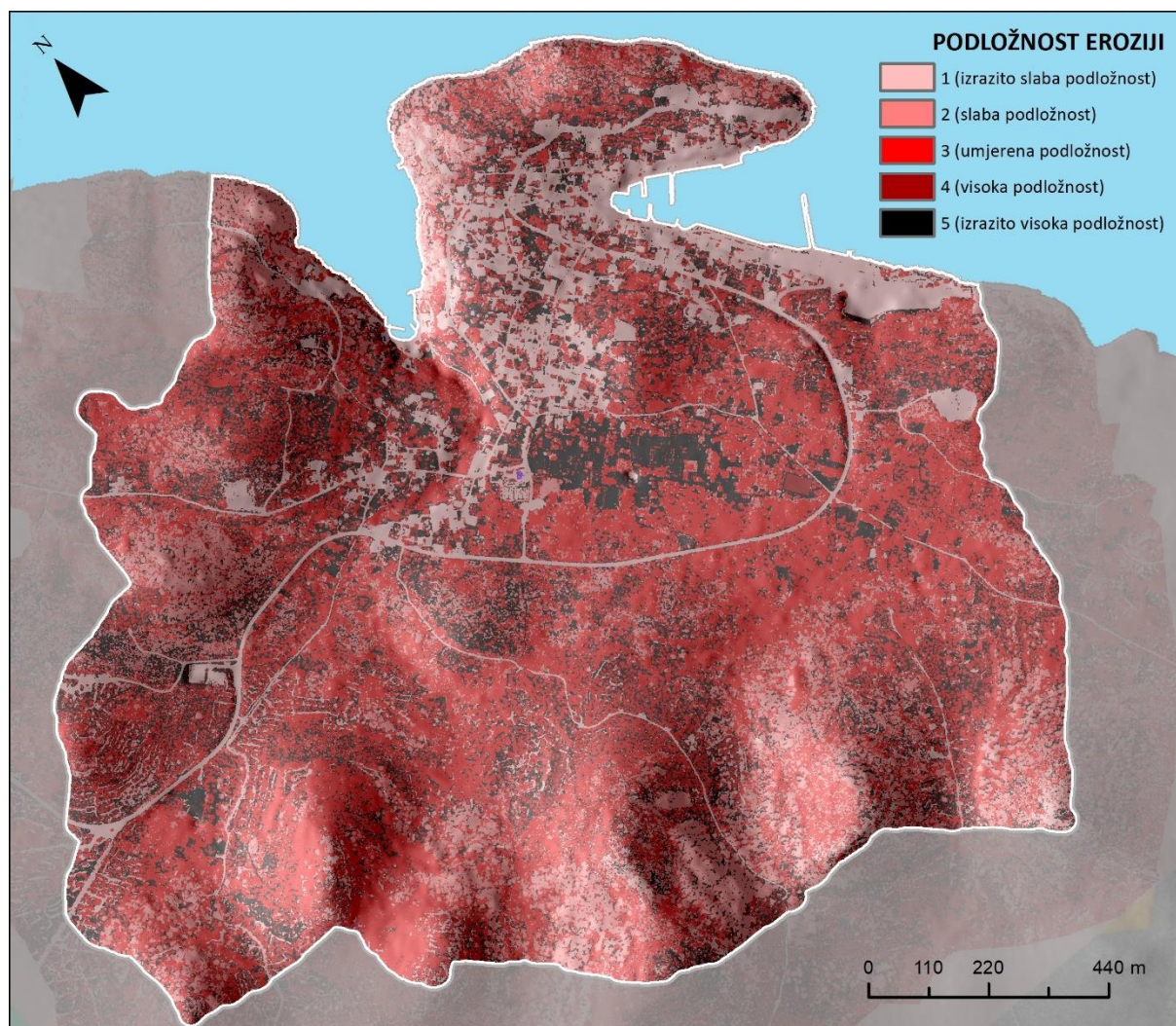
1-Bajam, 2-Urbano 1 (betonska površina), 3-Borovi, 4-Grmolika vegetacija (drača, makija), 5-Goli krš, suhozid, 6-Igralište, 7-Kamenolom, 8-Kostila, 9-Makadam, 10-Maslina, 11-Mirta, 12-More, 13-Murva, 14-Pajasen, 15-Sjene, 16-Smeđe tlo, 17-Smokva, 18-Tlo (trava), 19-Tlo (zemlja), 20-Urbano 2 (objekti), 21-Vodene površine (jezero), 22-Visoka plima.

Tablica IV-17. *Deskriptivna statistika modela zemljišnog pokrova*

Klase zemljišnog pokrova	Površina (ha)	Udio (%)
Bajam	11,05	4,75
Urbano 1 (betonska pov.)	8,03	3,46
Bor	35,63	15,33
Grmolika veg. (drača, makija)	15,31	6,59
Igraliste	0,15	0,06
Goli krš, suhozid	11,91	5,12
Kamenolom	1,32	0,57
Kostila	2,58	1,11
Urbano 2 (objekti)	5,31	2,28
Makadam	3,49	1,50
Maslina	52,53	22,60
Mirta	3,89	1,67
Murva	2,84	1,22
Pajasen	9,54	4,10
Smeđe tlo	3,29	1,41
Smokva	3,30	1,42
Tlo (trava)	45,28	19,48
Tlo (zemlja)	16,33	7,03
Visoka plima	0,41	0,18
Vodene površine (jezero)	0,27	0,12

Druga varijanta modela zemljišnog pokrova je poslužila kao jedan od kriterija u analizama rizika od erozije tla. Naime, generirane klase zemljišnog pokrova su reklasificirane prema podložnosti erozije tla u 5 klasa (Slika IV-63).

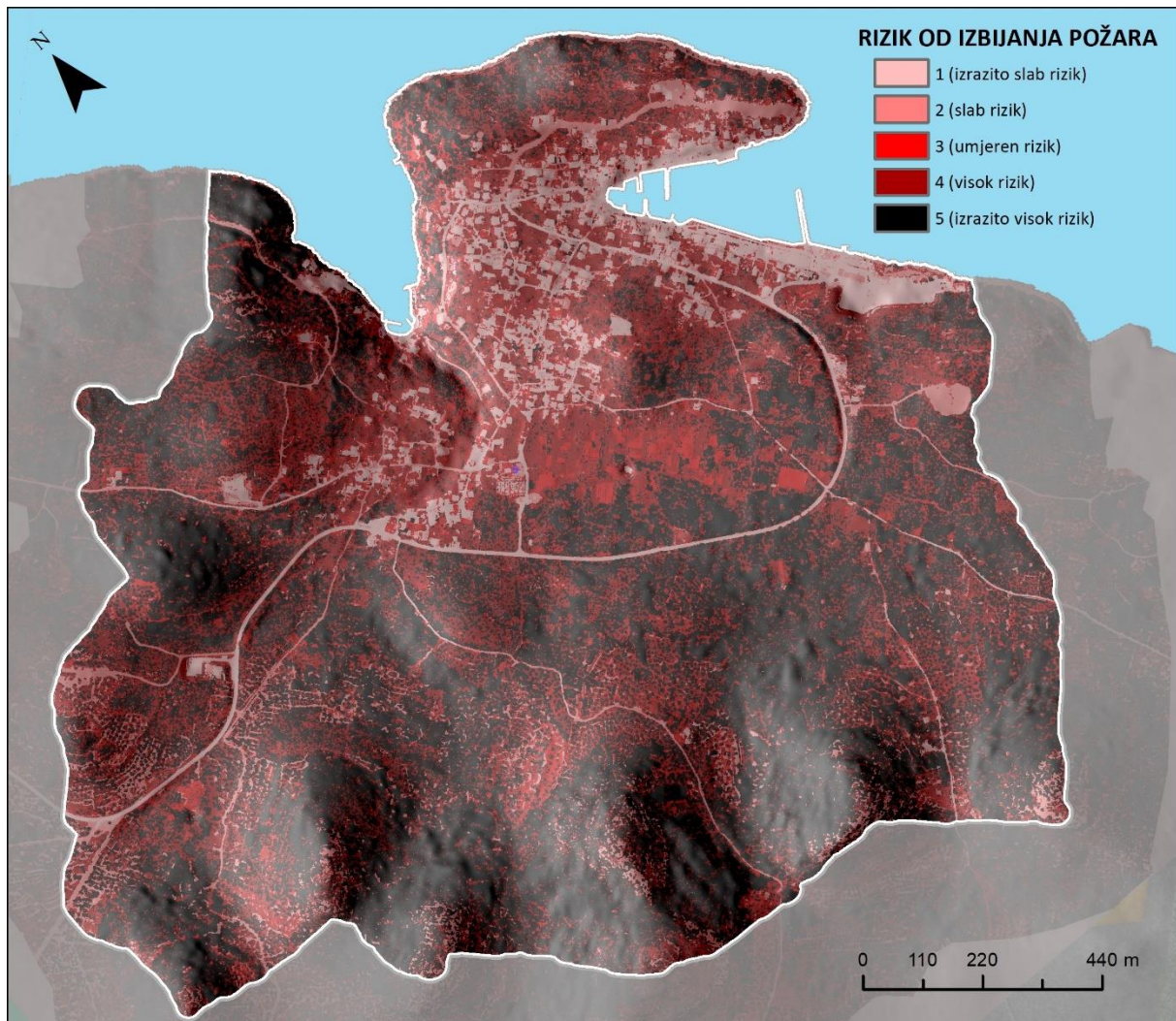
- 1 = *izrazito slaba podložnost*
- 2 = *slaba podložnost*
- 3 = *umjerena podložnost*
- 4 = *visoka podložnost*
- 5 = *izrazito visoka podložnost*



Slika IV-63. Klase zemljišnog pokrova reklasificirane po podložnosti erozije tla

Nadalje, model zemljišnog pokrova je poslužio kao jedan od kriterija u analizama rizika od izbijanja požara raslinja. Naime, generirane klase zemljišnog pokrova su reklasificirane prema i rizika od izbijanja požara u 5 klasa (Slika IV-64).

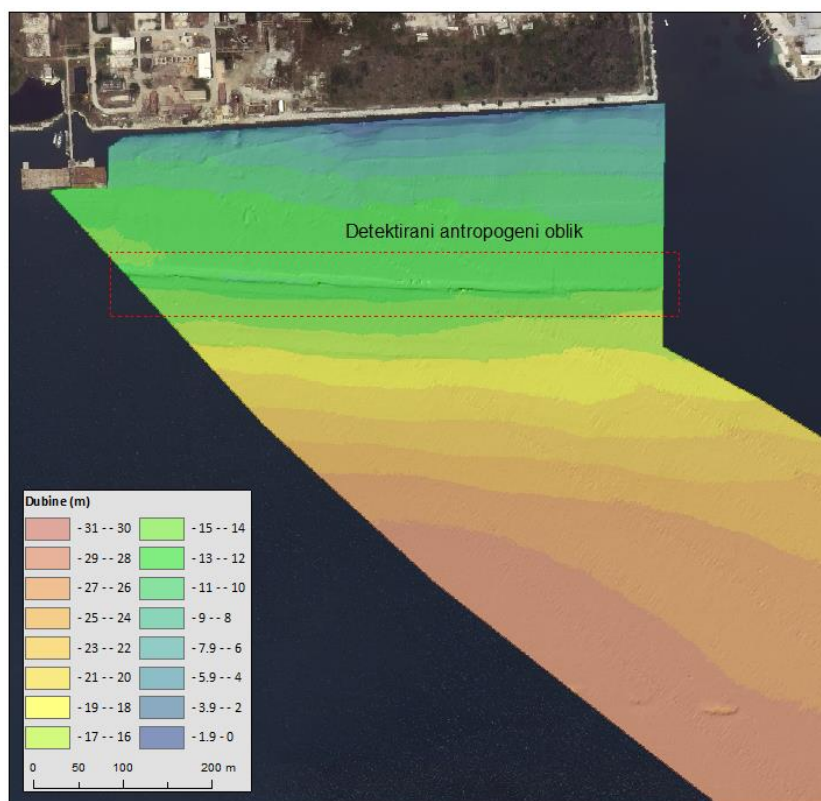
- 1 = *izrazito slab rizik*
- 2 = *slab rizik*
- 3 = *umjeren rizik*
- 4 = *visok rizik*
- 5 = *izrazito visok rizik*



Slika IV-64. Klase zemljišnog pokrova reklasificirane po riziku izbijanja požara

B. PROJECT PARTNER 3 – SPLIT-DALMATIA COUNTY

I. BATIMETRIJSKA I GEODETSKA IZMJERA OKO TOČAKA UZORKOVANJA SEDIMENATA INTEGRALNIM MJERNIM SUSTAVOM



Abstract

The object of measurement and research is the modeling of the test area of the eastern part of Kaštela Bay using geospatial technologies. Bathymetric research, as the primary goal of the first project activity, was performed using a multi-beam depth sounder to obtain data on the depth and hardness of the bottom.

The bathymetric survey covered the area of the eastern part of the Kaštela Bay, and a bottom model was generated. Satellite photogrammetry was used to record the water surface of the bay area, to obtain data on the length of the coastline and to develop a high resolution model for better visualization of the research area (topographic area of the eastern part of Kastela Bay).

The total area of the test area is 1.13 km². The minimum depth value is -31 m. Depth values are classified into 16 classes (equidistance 2 meters).

In the water area in front of the former Jugovinil factory, at an average distance of 195 m from the shore and a depth of about 13 m, a rectilinear shape was detected, which most likely represents a pipe.

Sažetak

Objekt izmjere i istraživanja je modeliranje testnog područja istočnog dijela Kaštelaskog zaljeva primjenom geoprostornih tehnologija. Batimetrijsko istraživanje, kao primarni cilj prve projektne aktivnosti je izvršeno pomoću višesnopnog dubinomjera da bi se dobili podaci o dubini i tvrdoći dna.

Batimetrijskom izmjerom je bilo obuhvaćeno područje istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva, te je generiran model dna. Satelitska fotogrametrija je korištena za snimanje vodnog lica područja zaljeva, dobivanja podatka o duljini obalne linije kao i zbog izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja (topografsko područje istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva).

Ukupna površina testnog područja je 1.13 km². Minimalna vrijednost dubine je -31 m. Vrijednosti dubina klasificirane su u 16 klasa (ekvidistanca 2 metra).

U akvatoriju ispred bivše tvornice Jugovinila na prosječnoj udaljenosti 195 m od obale i dubini oko 13 m detektiran je pravocrtni oblik koji najvjerojatnije reprezentira cijev.

a) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka, izrada modela tvrdoće

1.Uvod

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju prirodnih procesa na Zemljinoj površini (Blaszczynski, 1997; Bishop i dr., 2012). U početcima terenskih istraživanja, modeliranje Zemljine površine vršilo se na licu mjesta (Blaszczynski, 1997; Shroder i Bishop, 2003), no razvojem geoprostornih tehnologija (geografski informacijski sustav (GIS), globalni položajni sustav (GPS) i daljinska istraživanja (RS – *remote sensing*)) za prikupljanje i obradu podataka (Bodzin i Cirucci, 2009; Mareddy i dr., 2017; Šiljeg i dr., 2018), u posljednjih dvadesetak godina (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018), došlo je do revolucije u geomorfometriji (Pike, 2000; Gessler i dr. 2009; Guth, 2013). Proces izrade digitalnog modela reljefa i izvođenja analiza na temelju njega naziva se digitalno modeliranje reljefa (Šiljeg i dr, 2018). Model je objekt ili koncept koji se koristi za predstavljanje nečega drugog, odnosno pojednostavljena stvarnost pretvorena u oblik koji možemo razumjeti (Meyer, 1995; Wu i Marceau, 2002). Prema tome, modeliranje je proces kojim se uspostavlja veza između oblika i procesa na Zemljinoj površini i modela. Ovisno o svrsi istraživanja, geoprostorne tehnologije u modeliranju kompleksnih procesa i oblika omogućuju različite razine detaljnosti (Šiljeg, 2019). U svrhu poboljšanja kvalitete modela, s ciljem analize, vizualizacije i interpretacije, izrađuju se integralni modeli. To su modeli izrađeni od podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (Fabris i dr., 2010; Abdalla, 2016). Ovisno o objektu, cilju i svrsi istraživanja primjenjuju se različite vrste geoprostornih tehnologija.

Batimetrija, kao znanost o mjerenju i kartiranju dubina, izuzetno je bitna pri izradi modela koji uključuju vodene površine (Kearns i Breman, 2010), dok primjerice aerofotogrametrija i laserska (LiDAR) tehnologija imaju veoma važnu ulogu pri stvaranju kvalitetnih digitalnih modela kopnenih područja (Fabris i dr. 2010).

Hidrografska izmjera obuhvaća proces mjerenja i proučavanja konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vode na Zemlji (NOAA, 1976). Glavni cilj većine hidrografskih istraživanja je dobiti egzaktnu podatke za izradu pomorskih karata s posebnim naglaskom na mogućnosti koje mogu utjecati na sigurnost plovidbe. Ostali ciljevi uključuju dobivanje informacija vezanih za upravljanje i zaštitu obalnim područjem, eksploataciju resursa, znanost, nacionalnu prostornu infrastrukturu podataka, turizam itd. (IHO, 2005). Suvremena batimetrija je, kao grana hidrografije, znanost o određivanju dubina, odnosno generalnom utvrđivanju fizičkih značajki dna na temelju analize podatka iz snimljenih

profila. Svi podatci o dubinama moraju biti svedeni na razinu referentnog datuma i imati x i y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i z koordinate (predstavljaju dubinu).

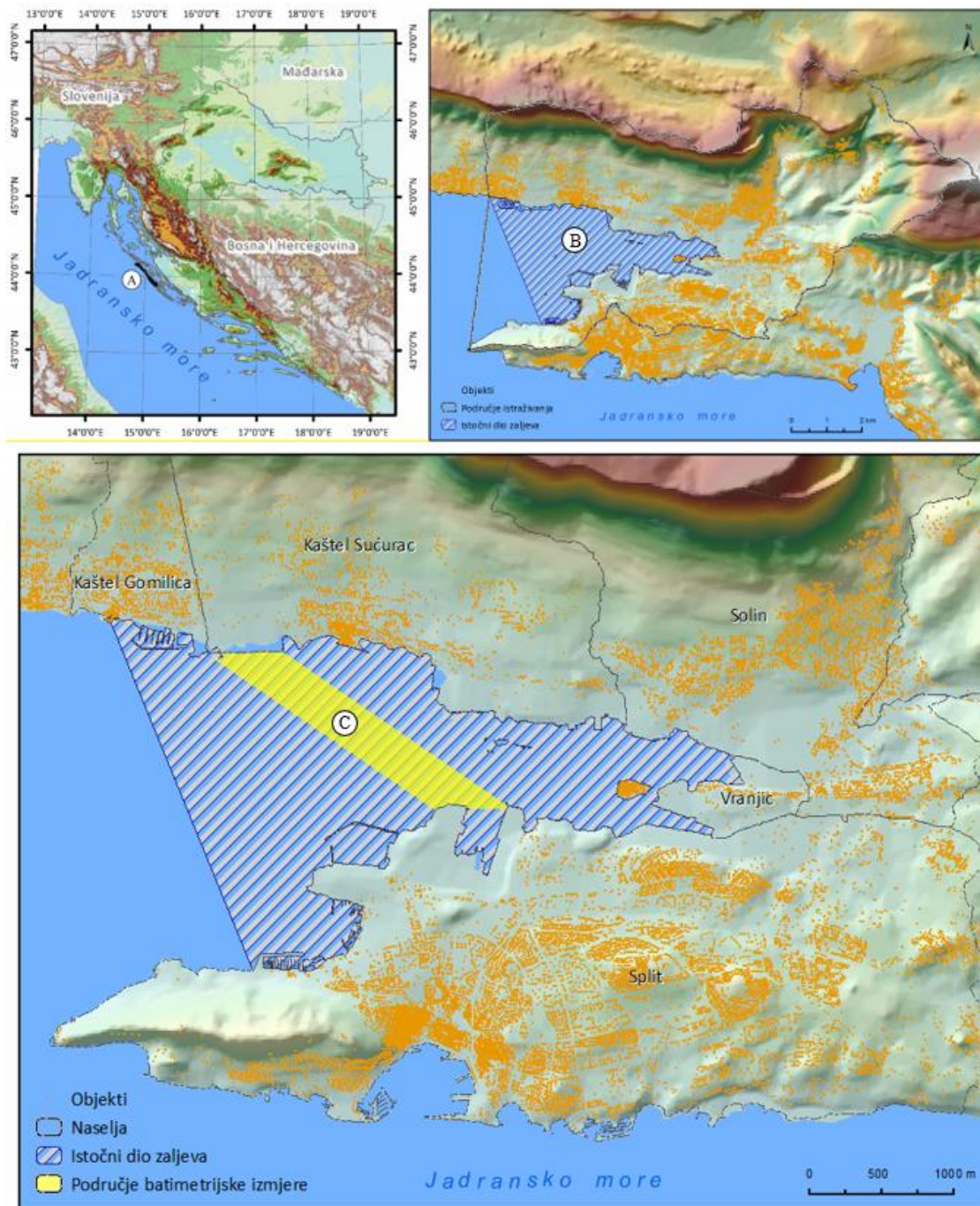
Postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje ovise o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja). One se mogu klasificirati na 3 razine: 1) komercijalni projekti – standard točnosti je najveći, 2) projekt stanja – standard točnosti je srednji i 3) projekt generalnog poznavanja – standard točnosti je najniži (IHO, 2005, Sciortino, 2010).

Mjerenje dubina može se obaviti pomoću: 1) dubinomjerne motke, 2) dubinomjernog viska, 3) jednostavnog inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i 4) naprednog inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno ili indirektno (IHO, 2005, Šiljeg i dr., 2015).

U ovom istraživanju koristit će se višesnopni dubinomjer. Oni se brzo razvijaju i imaju veliki potencijal, međutim zahtijevaju poznavanje i korištenje odgovarajućih postupaka u procesu izmjere koji su nužni za pravilno detektiranje (detaljno poznavanje tehnologije, dugogodišnju praksu, način tumačenja i vrednovanja dobivenih podataka itd.) (MSA, 2004). Prednosti višesnopnih dubinomjera su: mjerenje više vrijednosti dubina u isto vrijeme pokrivajući tako veću površinu, izrada točnog morfološkog modela podvodnog dna. Nedostatci su visoka cijena opreme, zahtjevnija obrada podataka itd. Sve veći broj nacionalnih hidrografskih organizacija prihvatio je ovu tehnologiju kao standardnu metodu prikupljanja batimetrijskih podataka, s ciljem proizvodnje najkvalitetnijih navigacijskih karata koje jamče sigurnost plovidbe (IHO, 2005, Ernsten i dr., 2006). Višesnopni dubinomjeri koriste se u različitim disciplinama poput podvodne gradnje (Pickrill i Tod, 2003; Caress i dr., 2008.), praćenja ribljih jata (Graham i dr., 2004; Kang, 2011), u podvodnoj arheologiji (Lawrence, 2004), sanaciji divljih odlagališta u moru (Wienberg i dr., 2004) i dr. Istraživanja kvalitete dubinomjera najčešće provodi Međunarodna hidrografska organizacija. Horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera korištenjem RTK-GPS-a iznosi između ± 20 i ± 25 centimetara, a vertikalna između ± 2 i ± 8 centimetara (Ernsten i dr., 2006; Kaufman i Nemet, 2011.). One ovise prvenstveno o frekvenciji dubinomjera, širini snopa i obliku snopa.

1.1. Objekt i cilj batimetrijske i geodetske izmjere

Objekt izmjere i istraživanja je modeliranje testnog područja (oko točaka uzorkovanja sedimenata) istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva (Slika I-1) primjenom geoprostornih tehnologija. Satelitska fotogrametrija je korištena za snimanje vodnog lica područja zaljeva, dobivanja podatka o duljini obalne linije kao i zbog izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja (topografsko područje istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva). Batimetrijsko istraživanje, kao primarni cilj prve projektne aktivnosti je izvršeno pomoću višesopnog dubinomjera da bi se dobili podaci o dubini i tvrdoći dna. Također cilj istraživanja je utvrditi vertikalnu i horizontalnu preciznost integralnoga mjernog sustava kombinacija RTK GPS i višesopnog dubinomjera s obzirom na to da je isti prvi put korišten u Republici Hrvatskoj te dobiti informacije o osnovnim karakteristikama testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva.



Slika I-1. Geografski položaj A) Republike Hrvatske, B) šireg područja istraživanja i C) područja batimetrijske izmjere

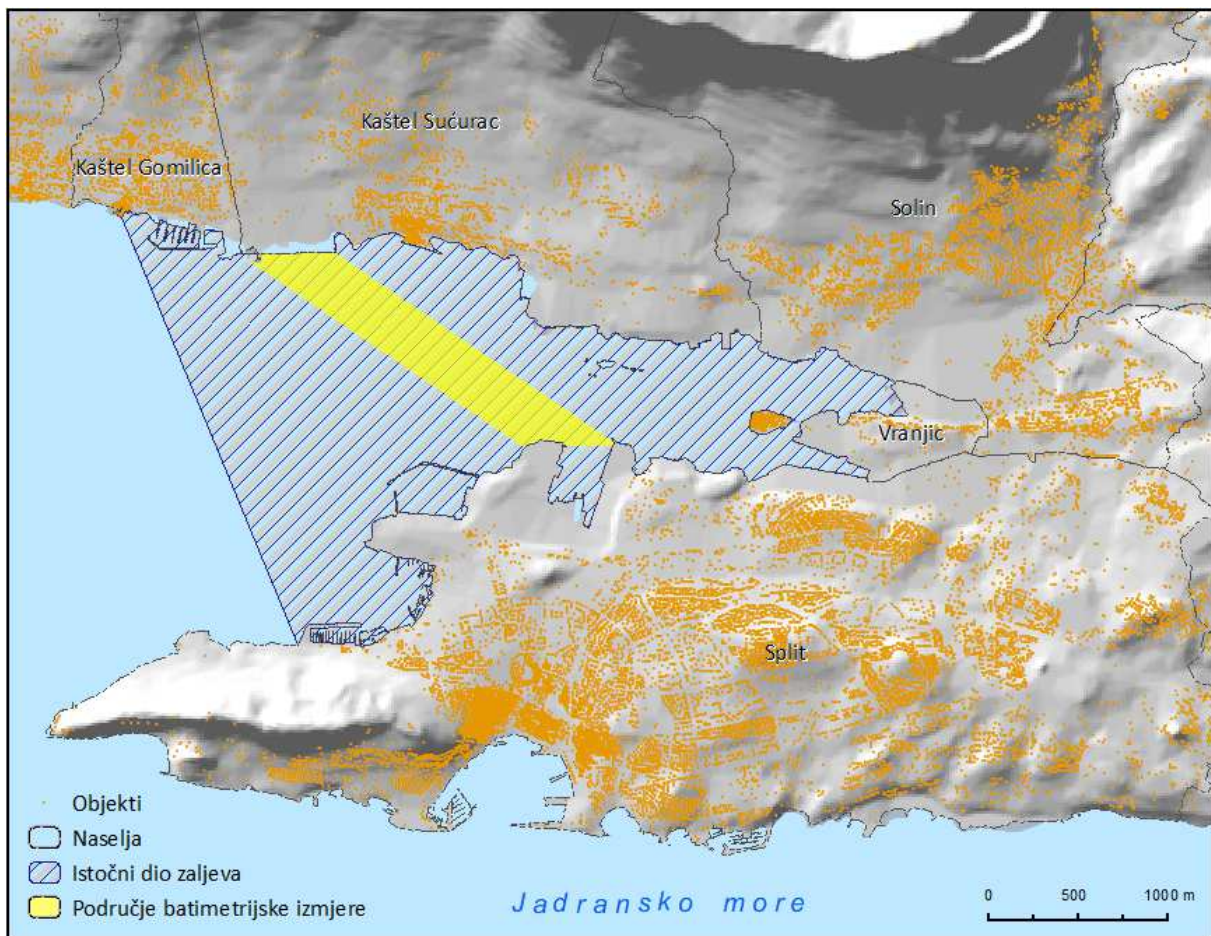
1.2. Svrha izmjere

Izmjera i istraživanje testnog područja oko točaka uzorkovanja sedimenata provedeno je iz više razloga: izrade batimetrijske karte (modela visoke rezolucije), kartiranja tvrdoće dna, određivanja lokacija za uzorkovanje sedimenata, dokumentacije trenutnog stanja i vizualizacija. Primarna svrha istraživanja je izrada detaljne batimetrijske karte upotrebom *WASSP S3* višesnog dubinomjera.

2. Područje izmjere

Batimetrijskom izmjerom bilo je obuhvaćeno je testno područje (oko točaka uzorkovanja sedimenata) istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva (Slika 1-2), dok je satelitskim snimanjem, bilo obuhvaćeno topografsko područje istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva.

Područje zaljeva je specifična cjelina koju karakterizira slaba vertikalna raščlanjenost na velikom području (oko 30 metra), blizina bivših i sadašnjih tvornica, koje su imale ili imaju štetan utjecaj na okoliš. Testno područje smješteno je u istočnom dijelu Kaštelanskog zaljeva na potezu od bivše tvornice Jugovinila do brodogradilišta Split. Ukupna površina snimljenog područja je oko 1,5 km², prosječna dužina je 2,6 km, a prosječna širina područja oko 750 metara. Navedene specifičnosti te definirane projektne aktivnosti utjecale su na izbor metoda batimetrijske izmjere te na odabir satelitskih snimaka. Za batimetrijsku izmjeru korištena je najmodernija tehnika – integralni mjerni sustav, kombinacija višesnog ultrazvučnog dubinomjera i RTK-GPS-a.



Slika I-2. Područje batimetrijske izmjere

3. Teorijska osnova

3.1. Geoprostorne tehnologije

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju svih procesa na Zemljinoj površini (Bishop i dr., 2012). Pojavom geoprostornih tehnologija, odnosno GIS-a, GPS-a i RS-a, ostvaren je brz napredak u kvaliteti modeliranja (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018). Geoprostorni podaci dostupni su na internetu te im je moguće pristupiti sa svih platformi koje imaju mogućnost povezivanja na internetsku mrežu. Geoprostorne tehnologije omogućuju vizualizaciju, kartiranje i analizu više slojeva georeferenciranih podataka te su se dokazale kao vrijedan alat u procesu razumijevanja okoliša i donošenja odluka. Sposobnost korištenja, analize te tumačenja slika i karata postaje sve važnije u mnogim znanstvenim i ekonomskim područjima. Prostorno razmišljanje obuhvaća znanje i vještine korištenja prostornih koncepata, karata i grafova te procesa zaključivanja u svrhu organiziranja i rješavanja problema (Bodzin i Cirucci, 2009).

3.1.1. Satelitska fotogrametrija

Fotogrametrija je znanstvena disciplina i tehnologija dobivanja pouzdanih kvantitativnih informacija o objektima na Zemlji, procesom snimanja, označavanja, mjerenja, analiziranja i interpretacije fotografskih snimaka i prikaza elektromagnetskog zračenja dobivenih senzorskim sustavima (Matthews, 2008; Ahmad i Samad, 2010; Barilar i dr., 2015). Najširu primjenu ima satelitska i aerofotogrametrija, metoda u kojoj su senzori pričvršćeni na posebna žiroskopski stabilizirana postolja (Wawro, 2013). Obilježava je velika gustoća prikupljanja podataka koja se prilagođava konkretnom projektu i morfološkim osobinama terena. Zahtijeva manje terenskog rada, pokriva velika područja, pogodna je za mjerenja u opasnim i nepristupačnim područjima i primjenjuje se u različitim oblastima. Najveći problem kod ove metode predstavlja vegetacija i optička vidljivost terena sa snimališta.

3.1.2. Batimetrijska izmjera

Kartiranje dna oceana, mora, rijeka i jezera jedna je od najstarijih aktivnosti čiji je cilj izrada karata i kartama srodnih prikaza. Pomorci već tisućama godina mjere dubine kako bi omogućili sigurnu plovidbu (Kearns i Breman, 2010). U današnje vrijeme, nacionalne vlade, vojska, telekomunikacijske kompanije, naftne korporacije i akademske institucije kartiraju dno s ciljem dobivanja egzaktnih podataka koji imaju

višestruku primjenu u brojnim granama gospodarstva (IHO, 2005; Kearns i Breman, 2010) poput turizma (Ferreira i dr., 2009), eksploatacije prirodnih resursa (Medved i dr., 2010), proširenja lučkih terminala (Šiljeg i dr., 2019), gradnje mostova (Kuspilić i dr., 2010), podzemnih tunela (Aykut i Akpınar, 2013) ili pak komunalne infrastrukture (Snellen i dr., 2011; Nonnis i dr., 2016) te zaštite prirodnih dobara (Wilson i dr., 2007; Medak i dr., 2008; Letessier i dr., 2016). Hidrografija je grana fizičke oceanografije koja se bavi mjerenjima i definiranjem konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vodenih površina na Zemlji (NOAA, 1976; IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Batimetrija je grana hidrografije koja se odnosi na mjerenje i kartiranje dubina za određivanje topografskih obilježja dna vodenih površina. Svi podaci o dubinama trebaju imati koordinate u nekom od koordinatnih sustava, u pravokutnom koordinatnom sustavu to su X i Y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i Z koordinate (predstavljaju dubinu ili vertikalnu poziciju) koji vrijede za ravninu u odgovarajućoj kartografskoj projekciji, a u geografskom koordinatnom sustavu to su geografska širina (ϕ), geografska dužina (λ) i dubina (h). Batimetrija se može vršiti pomoću raznih sredstava poput satelita, zrakoplova, brodova, podmornica i podmorskih platformi korištenjem raznih metoda i tehnika (Kearns i Breman, 2010).

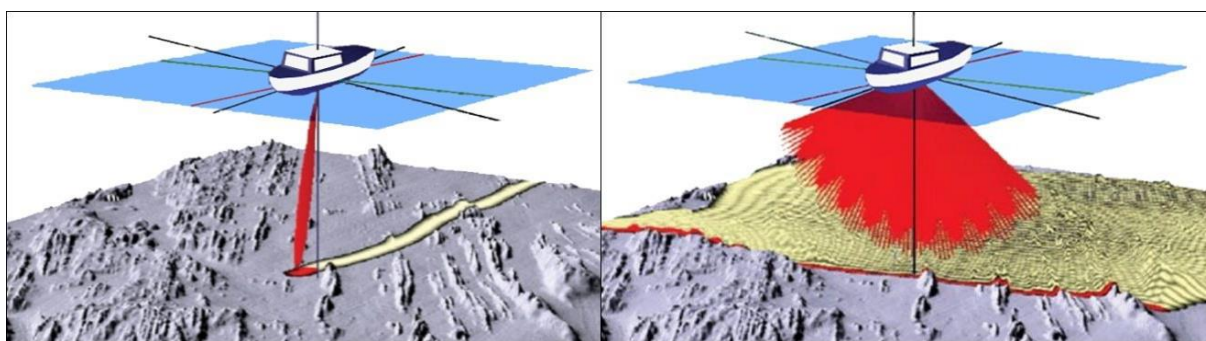
3.1.2.1. Metode i tehnike batimetrijske izmjere

Ovisno o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja), postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje se razlikuju prema standardu točnosti. Najveći standard točnosti je na komercijalnim projektima. Srednji standard točnosti je na projektima stanja, dok je najniži na projektima generalnog poznavanja (IHO, 2005; Sciortino, 2010).

Batimetrija se može obaviti pomoću dubinomjernog viska, dubinomjerne motke, jednostavnoga inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i naprednoga inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno i indirektno (IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Posljednjih nekoliko desetljeća batimetrijsko istraživanje je napredovalo pojavom jednosnopnih (*singlebeam*) i višesnopnih dubinomjera (*multibeam*) te zračnih laserskih sustava (*airborne laser sounding*) koji imaju mogućnost prikupljanja podataka velike gustoće i omogućuju realističan prikaz dna (Šiljeg i dr., 2018). Jednosnopni i višesnopni ultrazvučni dubinomjeri funkcioniraju na principu mjerenja vremenskog zaostatka zvučnog signala odaslanog iz sonde, dok zračni laserski sustavi funkcioniraju na principu mjerenja vremena potrebnog laserskim zrakama (infracrvenim i zelenim) da se vrate u laserski altimetar (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpınar, 2013; Šiljeg, 2013). Ultrazvučni dubinomjeri su najčešće korištene metode batimetrijske izmjere jer imaju najbolji omjer cijene i kvalitete prikupljenih podataka (Šiljeg, 2013).

3.1.2.1.1. Jednosnopni dubinomjeri

Ultrazvučna tehnologija je široko primijenjena metoda prikupljanja podataka o dnu vodenih površina koja na temelju vremenskog zaostatka i intenziteta zvuka daje korisne podatke o izgledu i sastavu dna (Amiri-Simkooei i dr., 2011; Ferretti i dr., 2015). Jednosnopni dubinomjer je ultrazvučni dubinomjer koji na temelju vremenskog zaostatka zvučnih impulsa odaslanih sa sonde uronjene u vodu računa dubinu. (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpinar, 2013; Šiljeg, 2013). Vremenski zaostatak se računa na temelju brzine zvuka u vodi koja ovisi o salinitetu, temperaturi i tlaku (dubini) (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013). Osim za trup broda (Kearns i Breman, 2010), sonda (*transducer*) može biti montirana i na šipku ili može biti vučena za brodom (Letessier i dr., 2016). Jednosnopni dubinomjeri prikladni su za generiranje profila dna i najčešće su korišteni za mjerenje dubina neposredno ispod plovila, odnosno za snimanje manjih dijelova uskih ponora s ciljem utvrđivanja njihove dubine (Kearns i Breman, 2010). S obzirom na to da kut snimanja iznosi manje od 3°, potrebno je jako puno vremena kako bi se snimilo dno određene vodene površine pa se preporučuje snimanje po unaprijed isplaniranim i jednako udaljenim profilima kako bi prostor koji nije obuhvaćen snimanjem mogao biti interpoliran prikladnom metodom interpolacije (Medak i dr., 2008; Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Kvaliteta podataka prikupljenih jednosnopnim dubinomjerom ovisi o karakteristikama senzora, dubini vode i definiranom planu snimanja (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Važno je istaknuti kako se kod jednosnopnih dubinomjera upotrebom metoda interpolacije, pri određivanju vrijednosti između dva profila, vertikalna i horizontalna greška povećavaju (Šiljeg, 2013). Snimanje je moguće u rasponu frekvencija između 12 i 710 kHz (Šiljeg i dr., 2018), ovisno o tome što se točno želi detektirati: morfologija dna, olupine brodova, riba itd. (Biffard, 2011).



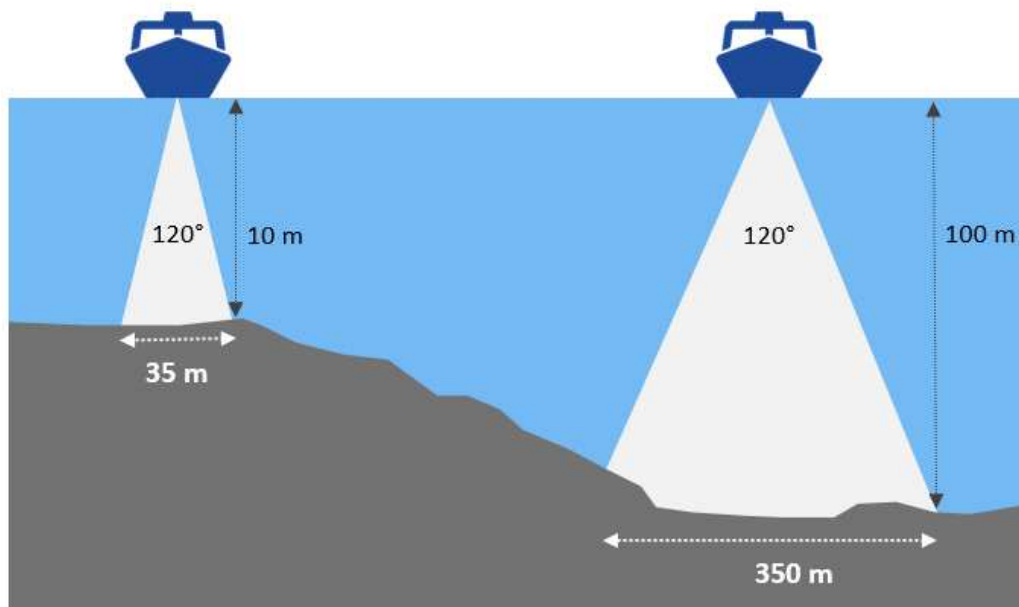
Slika I-3. Princip rada jednosnopnog i višesnopnog dubinomjera (Šiljeg, 2103)

3.1.2.1.2. Višesnopni dubinomjeri

Mjerenja dubina vode, posebice u dubokim oceanima, bila su gotovo nemoguća prije razvoja tehnologije ultrazvučnih dubinomjera. To se posebno odnosi na višesnopni dubinomjer koji je omogućio snimanje velikih vodenih površina u relativno kratkom vremenskom roku (Whiteway, 2009). U usporedbi s jednosnopnim, prednost višesnopnog dubinomjera je mjerenje veće površine dna u isto vrijeme koja omogućava veliku pokrivenost dna (Slika I-3). No postoje i nedostaci poput veće cijene opreme te više vremena potrebnog za obradu prikupljenih podataka (Biffard, 2011; Šiljeg i dr., 2019). Tehnologija višesnopnih dubinomjera ima višestruku primjenu poput batimetrije, nadzora i održavanja okoliša, ribarstva, istraživanja ugljikovodika, upravljanja obalnim područjima ili podvodne arheologije (Lurton, 2016). Da bi rezultati mjerenja bili reprezentativni, potrebno je prikupiti podatke potrebne za kalibraciju dubinomjera (salinitet, temperatura) na referentnom području (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Eleftherakis i dr., 2018).

Korištenjem RTK-GPS-a horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera iznosi ± 20 i ± 30 centimetara, dok vertikalna iznosi između ± 2 i ± 8 centimetara. Točnost ponajviše ovisi o radnoj frekvenciji dubinomjera, kao i o širini i obliku snopa (Šiljeg, 2013). Veliku ulogu u točnosti podataka ima i dubina jer s njom raste i *footprint* (okvir snimka), a prostorna rezolucija snimljenog područja opada (Slika I-4). Sustavi poput zračnog laserskog skenera ili višesnopnog dubinomjera upotrebljavaju čimbenik preklapanja kako bi osigurali potpunu i kontinuiranu pokrivenost dna. (Kearns i Breman, 2010).

Osim prema broju snopova, dubinomjeri se dijele i prema broju frekvencija (jednofrekventni i višefrekventni) (Lurton, 2016; Eleftherakis i dr., 2018; Janowski i dr., 2018), zatim prema obliku snopa (uskosnopni i širokosnopni) te prema broju kanala (jednokanalni i višekanalni) (Lurton, 2016; Clarke, 2006).

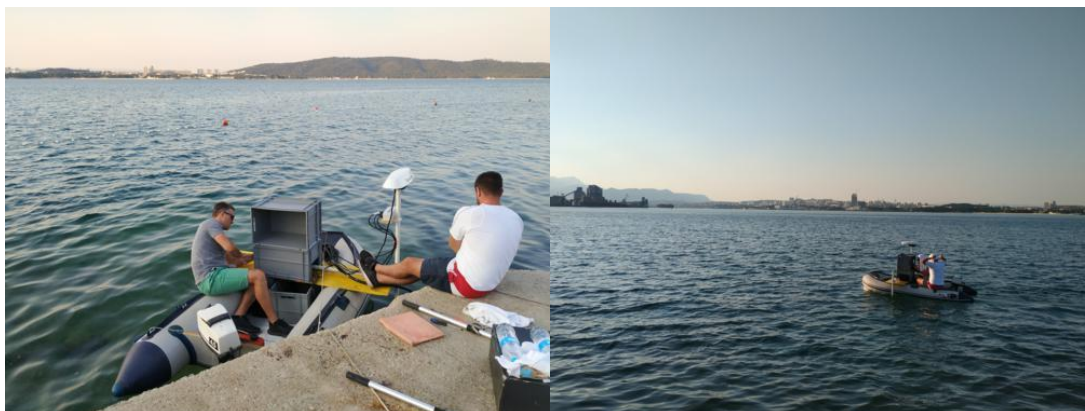


Slika I-4. Veza dubine i footprint-a snimka (Kearns i Breman, 2010)

4. Metodologija istraživanja

4.1. Batimetrijska izmjera testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva

Batimetrijskom izmjerom obuhvaćeno je testno područje (oko točaka za uzorkovanje sedimenata) istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva. Za batimetrijsku izmjeru korišten je gumenjак *Luna* duljine oko 2,5 m, koji se zbog manjih dimenzija i gaza te lake mogućnosti ugrađivanja komponenti mjernog sustava pokazao kao optimalno rješenje (Slika I-5).



Slika I-5. Gumenjak Luna na kojem je instaliran integralni mjerni sustav

4.1.1. Plan batimetrijske izmjere

Tijekom batimetrijske izmjere iznimno je važno detaljno planiranje koje omogućava praćenje razvoja i organizaciju izmjere od početka do kraja (IHO, 2005). Plan izmjere obuhvaćao je širok spektar aktivnosti koje su se sastojale od nekoliko faza:

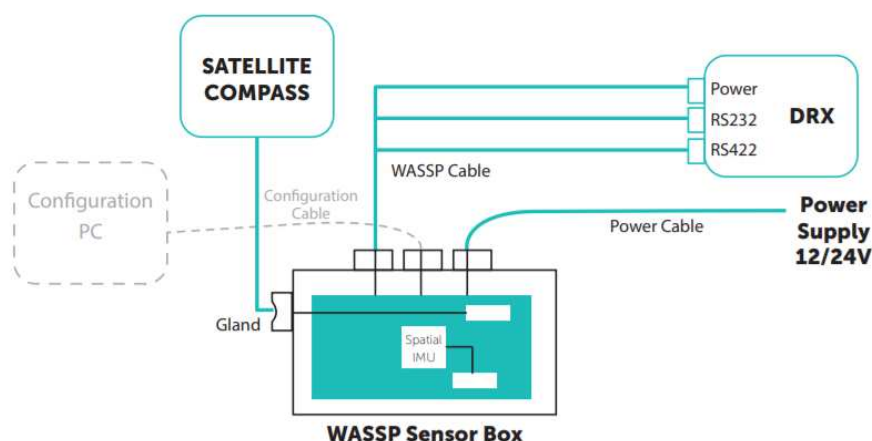
- 1) određivanje točnog područja izmjere;
- 2) utvrđivanje svrhe batimetrijske izmjere;
- 3) primjena metode izmjere (tehnika, točnost, horizontalni i vertikalni referentni geodetski sustav, oprema itd.);
- 4) vremenski rok (duži ili kraći);
- 5) prikupljanje sekundarnih podataka (aero snimke, salinitet, temperatura itd.);
- 6) uzimanje u obzir ograničavajućih čimbenika (proračun, logistika itd.).

4.1.2. Integralni mjerni sustav kombinacija RTK GPS i višesnog dubinomjera

Batimetrijska mjerenja izvršena su integriranim mjernim sustavom (Slika I-6) koji je uključivao šest glavnih sastavnica:

- a) *WASSP S3 Multibeam Wideband Sounder c/w DRX* (Slika I-7);
- b) *WASSP Sensor Box* s integriranim *Spatial IMU* (Slika I-15);
- c) *Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna* (mFreq, mGNSS, RTK, SBAS) (Slika I-16);
- d) akumulator i kabel za napajanje;
- e) konfiguracijsko računalo i kabel;
- f) softveri za konfiguraciju (*PocketMax*, *NtripClient*, *DRX Setup Webpages*);
- g) softveri za navođenje (*CDX*) i eksportiranje podataka (*Data Manager*).

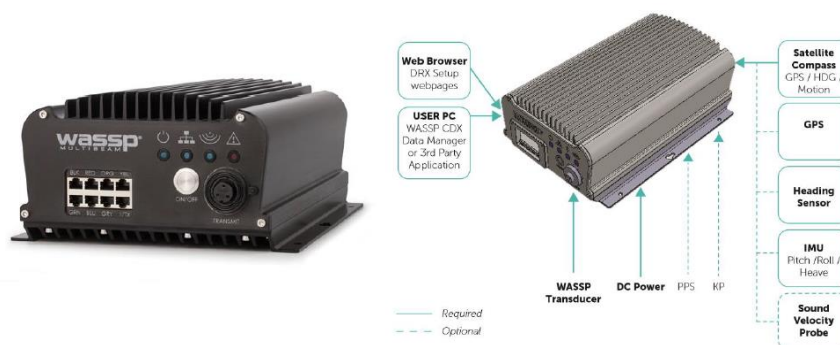
Sve komponente su povezane i konfigurirane prema uputama proizvođača i međunarodnih standarda s obzirom na obilježja korištenog broda s ciljem minimaliziranja korisničko definiranih parametara koji mogu utjecati na izlazne rezultate. Uz navedenu konfiguraciju sustava prilikom izmjere bitno je kalibrirati sondu, pri čemu na izlazne rezultate mjerenja dubine i tvrdoće dna treba izračunati optimalnu brzinu zvuka u vodi (ENL Group, 2016).



Slika I-6. Komponente integralnog mjernog sustava (ENL Group, 2016)

4.1.2.1. Višesnopni dubinomjer WASSP S3 Multibeam

WASSP (*Wide Angle Sonar Seafloor Profiler*) je višenamjenski ultrazvučni dubinomjer koji omogućava istraživanje, generiranje modela visoke rezolucije i detaljno kartiranje dna mora, jezera, rijeka itd. Verzija S3 (*Survey*) treća je i najnovija generacija višesnopnih dubinomjera koja koristi širokopoljnu tehnologiju. Ocijenjen je certifikatom IP53 koji je potvrda da je kućište novog DRX-32 primopredajnika (Slika I-7) djelomično zaštićeno od prašine i otporno na prskanje vode (URL5). To ga uz njegovu kompaktnost i ekonomičnost nameće kao prvi izbor pri izvođenju batimetrije na teže dostupnim mjestima pomoću manjih plovila gdje oprema ne može biti u potpunosti zaštićena od vanjskih utjecaja. Maksimalna vertikalna rezolucija mu iznosi 2 centimetra što ga čini idealnim rješenjem za istraživanje podvodnih područja s izrazitom vertikalnom raščlanjenosti terena do 400 m dubine. WASSP S3 karakterizira frekvencija od 160 kHz i 224 snopa, a mogući raspon snopova je od 4 do 120 stupnjeva (Tablica I-1) (URL6).



Slika I-7. Višesnopni dubinomjer WASSP S3 (prema: URL3 i URL6)

Tablica I-1. Osnovna specifikacija višesnopnog dubinomjera WASSP S3

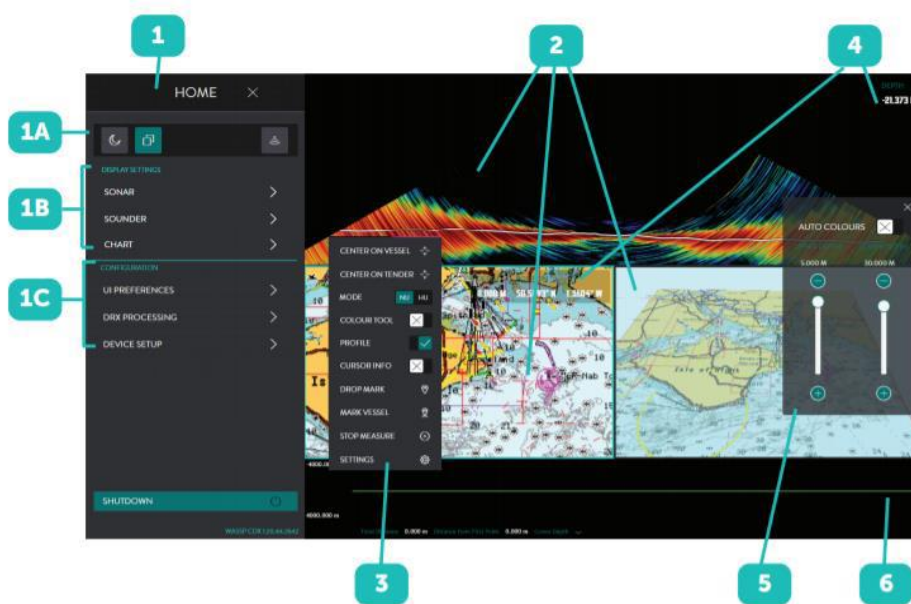
MODEL	S3
Frequency	160 kHz (WideBand Variable)
Transceiver type	DRX-32
Transducers supported	WMB - 160
IMU supported	External
Depth - swath	200 m
Depth - max	400 m
Effective beamwidth (athwartships x fore-aft)	120° x 4°
Beam width PS (deg)	4.4
Beam width FA (deg)	3.2
Beam spacing (nominal)	0.54° over 120° (224 beams)
Max vertical resolution (cm)	2
Sensor connectivity	DRX
PSU	9-32VDC (30W)
Bottom detections	Amplitude & Phase
Interface	RS232/422/NMEA0183
Tide correction	Fully Geo Referenced
Bathymetry 2D / 3D	Yes
Sonar polar view	Yes
Sounder (quint beam)	No

Izvor: URL6

4.1.2.1.1. Softveri CDX i Data Manager

CDX je WASSP-ov operativni sustav koji služi za kontrolu, vizualizaciju i upravljanje prikupljenim podacima. On omogućava kartiranje dna u visokoj rezoluciji te prikaz snimanog područja u realnom vremenu na pojednostavljenom korisničkom sučelju. Pametni algoritam uzima najbolje podatke sa starih i novih snimaka generirajući tako visoko kvalitetne batimetrijske karte bez grubih granica između snimljenih profila. Baza podataka je višerezolucijska i organizirana tako da se s približavanjem prema karti prostorna rezolucija povećava (URL6). Aplikacija CDX sastoji se od 6 sastavnica (Slika I-8):

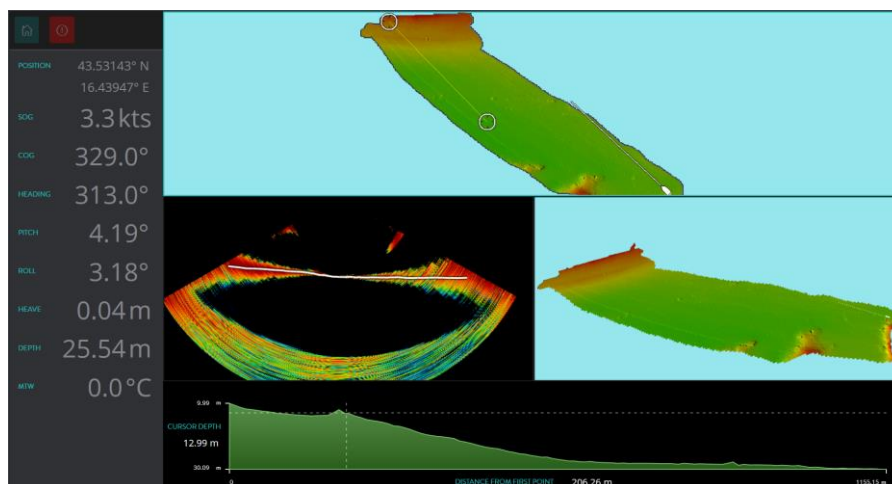
- 1) Home pristup – pruža mogućnosti konfiguracije zaslona, ploče, izgleda, alata, postavljanje sustava i korisničkih postavki;
- 2) Okviri zaslona – zasloni su povezani su s određenim tipovima podataka za vizualizacija i kontrola;
- 3) CS (*context sensitive*) meni – omogućuje postavljanje i konfiguraciju specifičnih ploča za prikaz kojima se pristupa desnim klikom na bilo kojoj ploči;
- 4) Zaslonske informacije – mogućnost preklapanja informacija na ploči zaslona s CS izbornikom;
- 5) Alati za kontrolu – omogućuju kontrolu preklapanja upravljačke ploče na zaslonu;
- 6) Opcijski alati – služe za prikaz općih podataka.



Slika I-8. Sastavnice aplikacije CDX

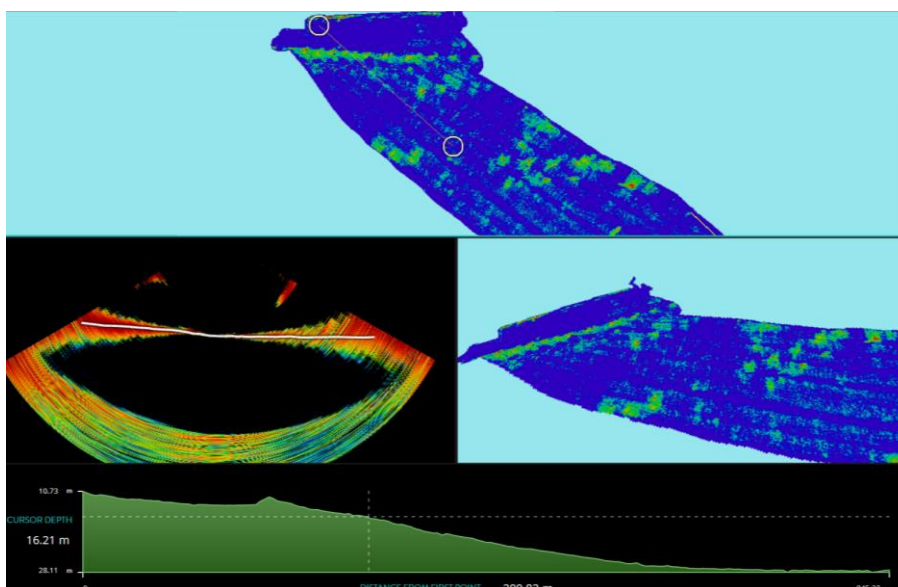
Sučelje aplikacije CDX sadrži osnovne podatke o značajkama specifičnog položaja broda i okvire za prikaz. Sustav je opremljen naprednim sastavnicama koje omogućuju uvid u realnom vremenu u

vizualnu kvalitetu modela kroz čak 4 prikaza testnog područja: a) dvodimenzionalni, b) perspektivni (3D), c) sonarno polje i d) profil (Slika I-9).

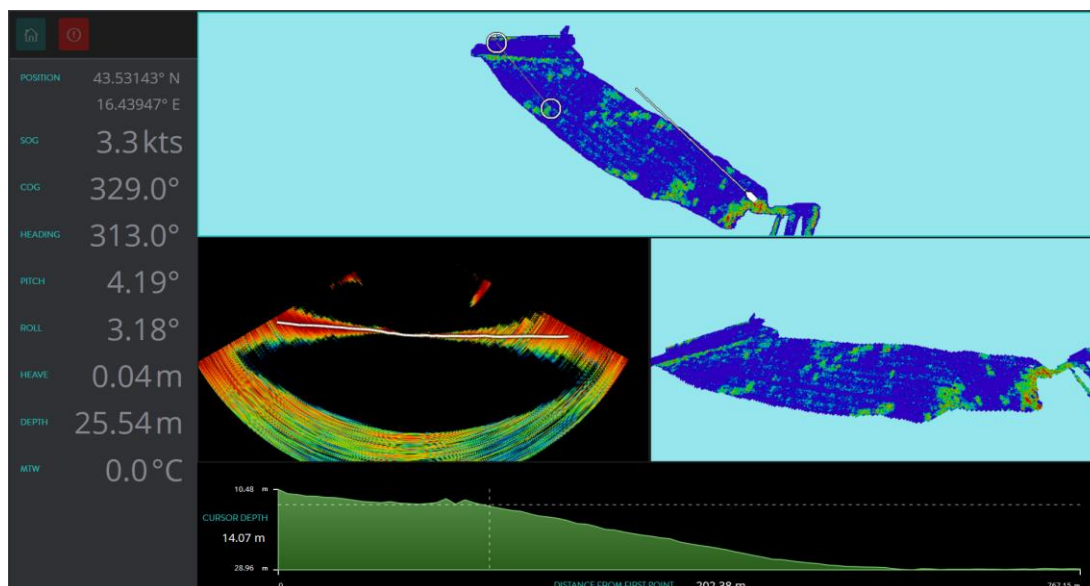


Slika I-9. Prikaz testnog područja: a) dvodimenzionalni; b) perspektivni (3D); c) sonarno polje; d) profilni

Na slici I-10. je primjer snimljenog dna (dubina) testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva (3D, profil) s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3, dok je na slici I-11. prikazano kako uređaj kartira tvrdoću dna.



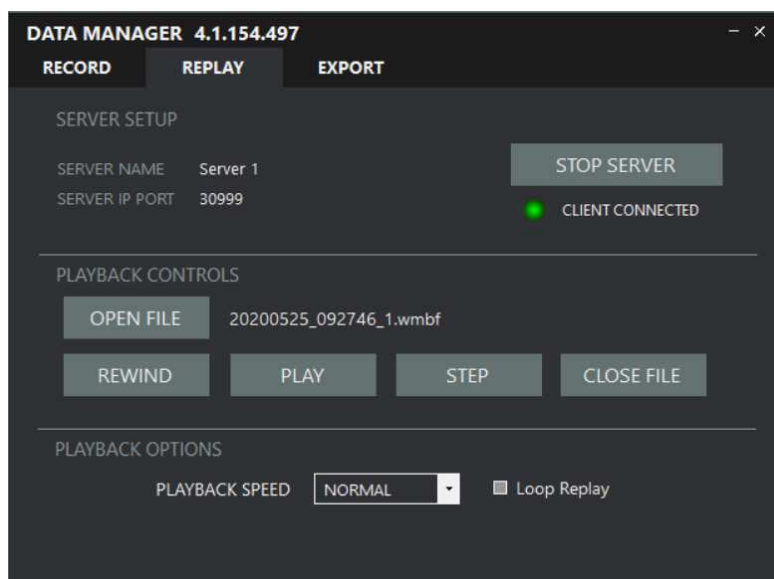
Slika I-10. Primjer snimljenog dna (dubina) djela testnog područja s višesopnim dubinomjerom WASSP S3



Slika I-11. Primjer snimljenog dna (tvrdoća) testnog područja s višesopnim dubinomjerom WASSP S3

Data Manager je programski paket za upravljanje podacima. On se generalno sastoji od tri komponente (Slika I-12):

- 1) Snimanje podataka;
- 2) Ponovni prikaz;
- 3) Izvoz podataka



Slika I-12. Sučelje softvera Data Manager

4.1.2.1.2. Sonda

Sonda ili *transducer* je uređaj koji pretvara energiju iz jednog oblika u drugi (Song i Lee, 2008). U slučaju batimetrije to se odnosi na pretvaranje elektronskog signala u ultrazvučni i obrnuto. Na temelju vremenske razlike između odaslano i primljenog zvučnog signala bilježi se vertikalna udaljenost od dna do sonde.

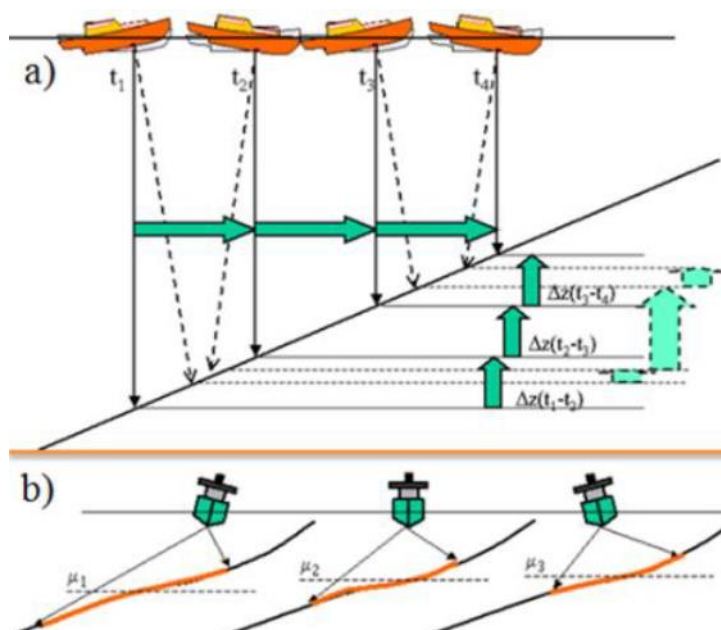
Pri batimetriji testnog područja korištena je sonda *WMB-160* čija je operativna frekvencija 160 kHz (Slika I-13). Ona je čvrsto pričvršćena za čeličnu motku kako se prilikom izmjere ne bi pomicala i samim time utjecala na izlazne rezultate. Uronjena je na dubinu od 60 cm te je razlika udaljenosti između nje i vodene površine uračunata u izmjeru. Orijentirana je pod kutem od 90° kako bi zvučni signal putovao najkraćim mogućim putem i bio pravilno georeferenciran. Također je veoma važna i pozicija sonde s obzirom na turbulencije uzrokovane radom propelera koje mogu utjecati na kvalitetu prikupljenih podataka. Stoga je cijeli sustav pozicioniran što je dalje bilo moguće od pente. Kako bi prikupljeni podaci bili na točnoj X,Y koordinati, odnosno kako bi horizontalna točnost bila kvalitetna, antena je montirana točno iznad sonde (Slika I-13).



Slika I-13. Sonda WMB-160 (URL9) i njezina pozicija u integralnom mjernom sustavu

4.1.2.1.3. Inercijalni mjerni sustav

Kvaliteta prikupljenih podataka oscilira s obzirom na to da je pri batimetrijskoj izmjeri prisutan utjecaj prednjih i bočnih valova zbog kretanja plovila po vodenoj površini (Slika I-14) (Šiljeg, 2013). Stoga veliku važnost pri prikupljanju podataka, korištenjem integralnog mjernog sustava - kombinacije RTK GPS-a i višesnopnog dubinomjera, ima integrirani inercijalni mjerni sustav (IMU) koji omogućuje registraciju podataka po X, Y i Z osi.



Slika I-14. Utjecaj a) prednjih i b) bočnih valova na registraciju podataka (Šiljeg, 2013)

Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-INU smješten u senzornoj kutiji (Slika I-15) je minijaturni navigacijski sustav s inernim navigacijskim sustavom GPS-a i AHRS (*attitude and heading reference system*). On osigurava točnu poziciju, brzinu, ubrzanje i orijentaciju u najzahtjevnijim uvjetima te je zbog svoje visoke preciznosti u kombinaciji s *Hemisphere V320 GNSS* pametnom antenom (Slika I-16) idealan za sustave na malim plovilima koji su pod velikim utjecajem prednjih i bočnih valova (URL10). Kombinira temperaturno kalibrirane, akcelerometre, žiroskope, magnetometre i senzor tlaka s naprednim GNSS prijemnikom. Oni su spojeni u sofisticiranom fuzijskom algoritmu kako bi pružili točnu i pouzdanu navigaciju i orijentaciju (Pao, 2018).



Slika I-15. WASSP Sensor Box s integriranim Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-INU (prema: ENL Group, 2016; URL10)

4.1.2.2. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna

Hemisphere V320 (Slika I-16) prva je višenamjenska GNSS pametna antena, koja omogućava RTK precizno usmjerenje.

Tablica I-2. Specifikacija GNSS senzora

MODEL	V320
Receiver type	Vector GNSS L1 Compass
Signals received	GPS and GLONASS
Channels	540
GPS sensitivity	-142 dBm
SBAS tracking	2-channel, parallel tracking
Update rate	20 Hz standard
Position accuracy: RMS	Horizontal Vertical
Position accuracy: Single point	1.2 m 2.5 m
Position accuracy: SBAS (WAAS)	0.3 m 0.6 m
Position accuracy: Code differential GPS	0.3 m 0.6 m
Heading accuracy	0.30°
Pitch/Roll accuracy	1°
Heave accuracy	30 cm 3
Timing (1 PPS) accuracy	20 ns
Rate of turn	90°/s maximum
Compass safe distance	75 cm (with enclosure)
Cold start	60 s (no almanac or RTC)
Warm start	20 s typical (almanac and RTC)
Hot start	1 s typical (almanac, RTC and
Heading fix	10 s typical (valid position)
Maximum speed	1,850 mph (999 kts)

Maximum altitude	18,288 m (60,000 ft)
Differential options	SBAS Beacon, External RTCM

Izvor: URL11

Dizajnirana je tako da i u različitim vremenskim uvjetima omogućava kvalitetno dinamičko pozicioniranje pri profesionalnom istraživanju dubina (Tablica I-2). S postavljenim odvajanjem, V320 pruža konzistentnu i pouzdanu točnost položaja i smjera. Vector 320 može koristiti Atlas L-opseg i SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, itd.) za korekciju GNSS signala (URL11).



Slika I-16. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna (URL11)

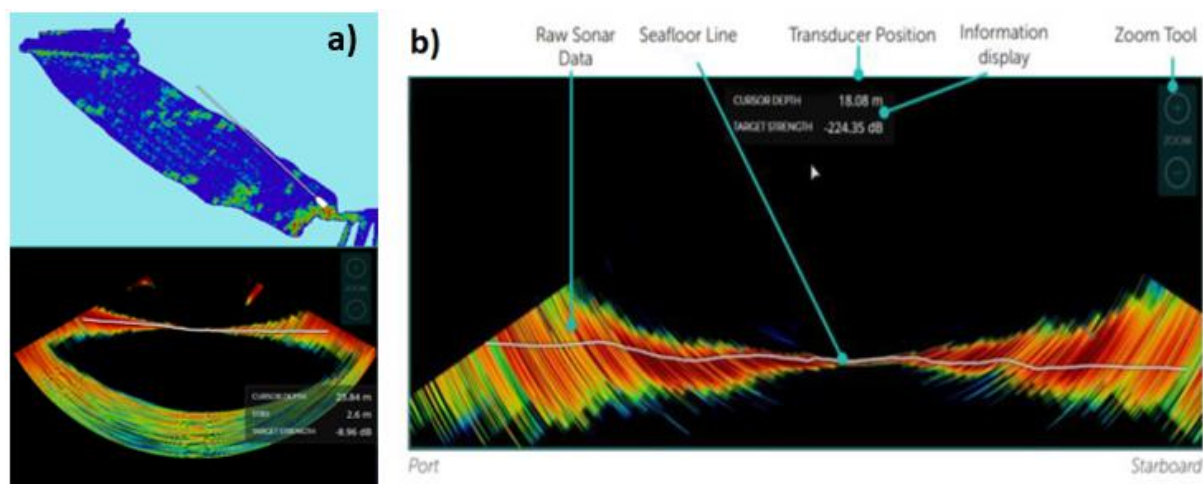
4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka

Dobivanje sekundarnih podataka predstavljalo je proces koji je uključivao prikupljanje svih podataka koji su neophodni za optimalno planiranje batimetrijske izmjere. DOF i HOK korišteni su kao podloge za iscrtavanje granice obale i profila. Podatci o temperaturi su bitni zbog izračuna brzine zvuka u vodi. Dobivena vrijednost brzine zvuka važan je parametar prilikom kalibracije dubinomjera. Unos brzine zvuka potreban je za kompenzaciju netočnosti raspona uzrokovanih zvukom varijacije u brzini. Te se promjene mogu dogoditi, sezonski i s geografskim područjima, posebno u obalnim područjima gdje će na brzinu zvuka utjecati temperatura vode i zraka te razlike u slanosti vode. Na brzinu zvuka u vodi utječu i temperatura i slanost. Ovu vrijednost treba redovito prilagoditi ovisno o radnom okruženju, jer će imati izravan utjecaj na točnost kartiranja. Što je brzina zvuka preciznija definirana, to je preciznije kartiranje dna. Vizualni učinak neispravne brzine zvuka očituje se tako da će se prikaz ravnog morskog dna konkavno ili konveksno zakriviti (Dong i dr., 2007; Dong i dr., 2011) (Slika I-17).

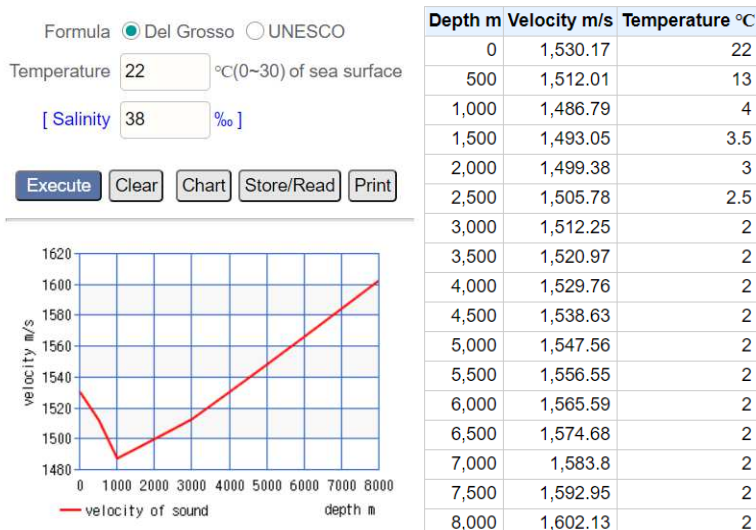


Slika I-17. Netočnosti prikaza morskog dna zbog pogrešne brzine zvuka

Stoga je uređaj kalibriran na zaravnjenom dijelu s ciljem minimaliziranja grešaka prilikom izmjere. S obzirom na karakteristike temperature i saliniteta na dan izmjere brzina zvuka iznosila je 1530,17 m/s (Slika I-19).

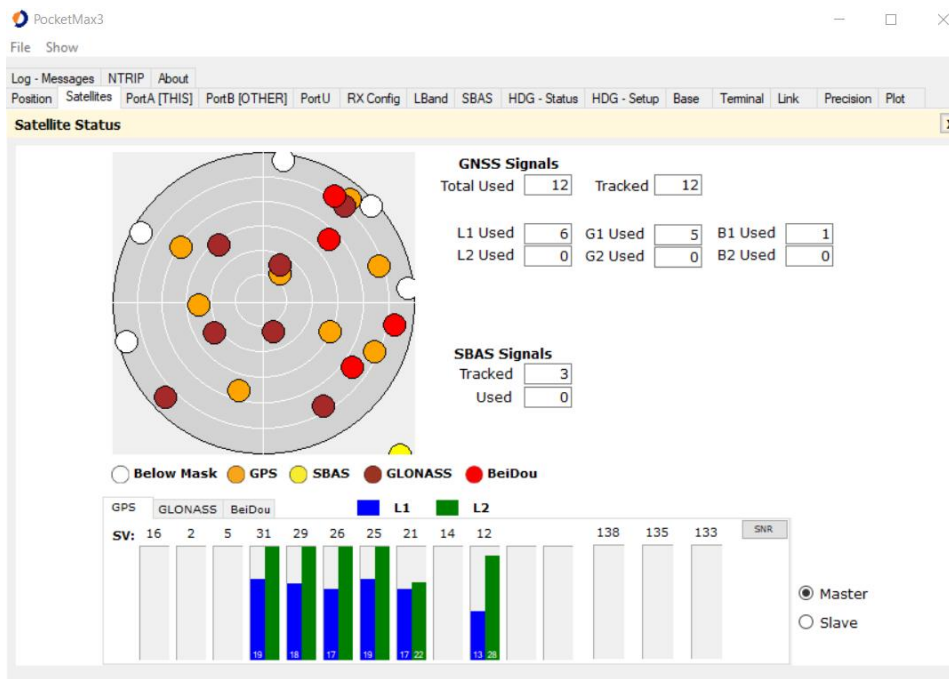


Slika I-18. Prikaz Sonarne ploče koja prikazuje vodeni stup i profil morskog dna ispod sonde a) primjer testnog područja; b) generalan primjer sa sastavnicama

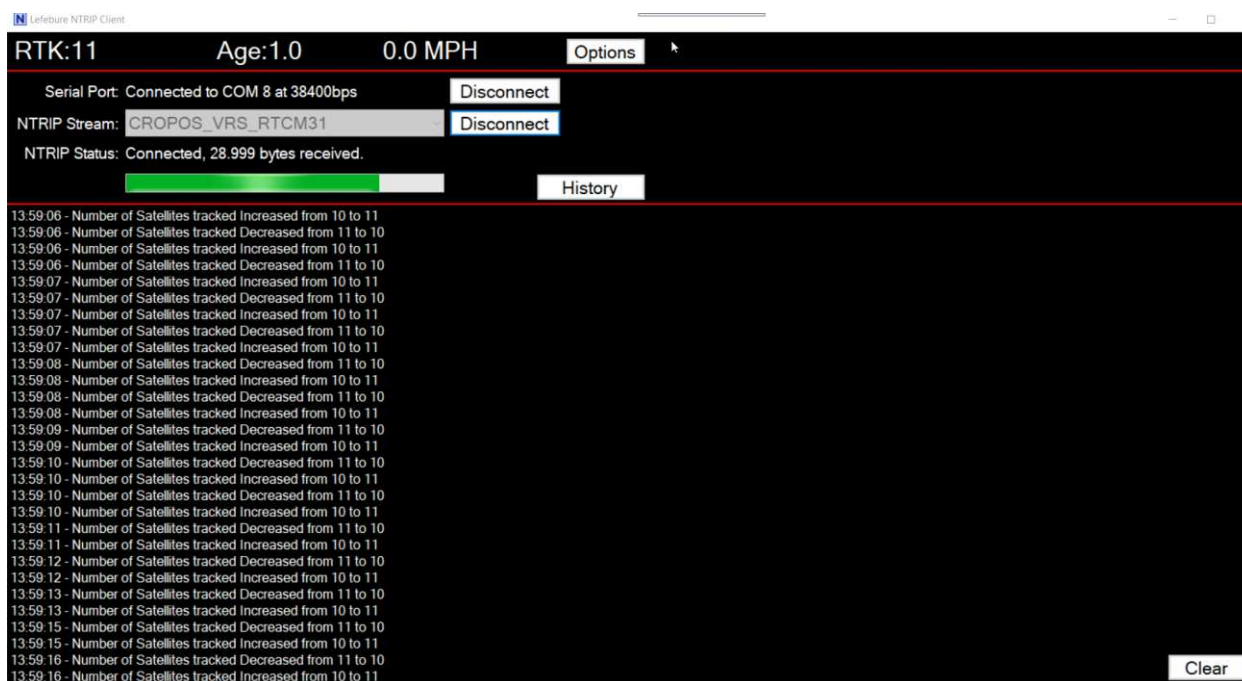


Slika I-19. Korištena formula za izračun brzine zvuka u vodi

Uz podešavanje brzine zvuka u vodi, bitna faza procesa kalibracije sustava odnosi se na konfiguraciju GPS antene, za što je korišten softver PocketMax3. Antena je na CROPOS_VRS_RTCM31 sustav spojena preko NTRIP Client softvera čime je omogućena registracija podataka u realnom vremenu vrlo visoke preciznosti.



Slika I-20. Sučelje softvea PocketMax3

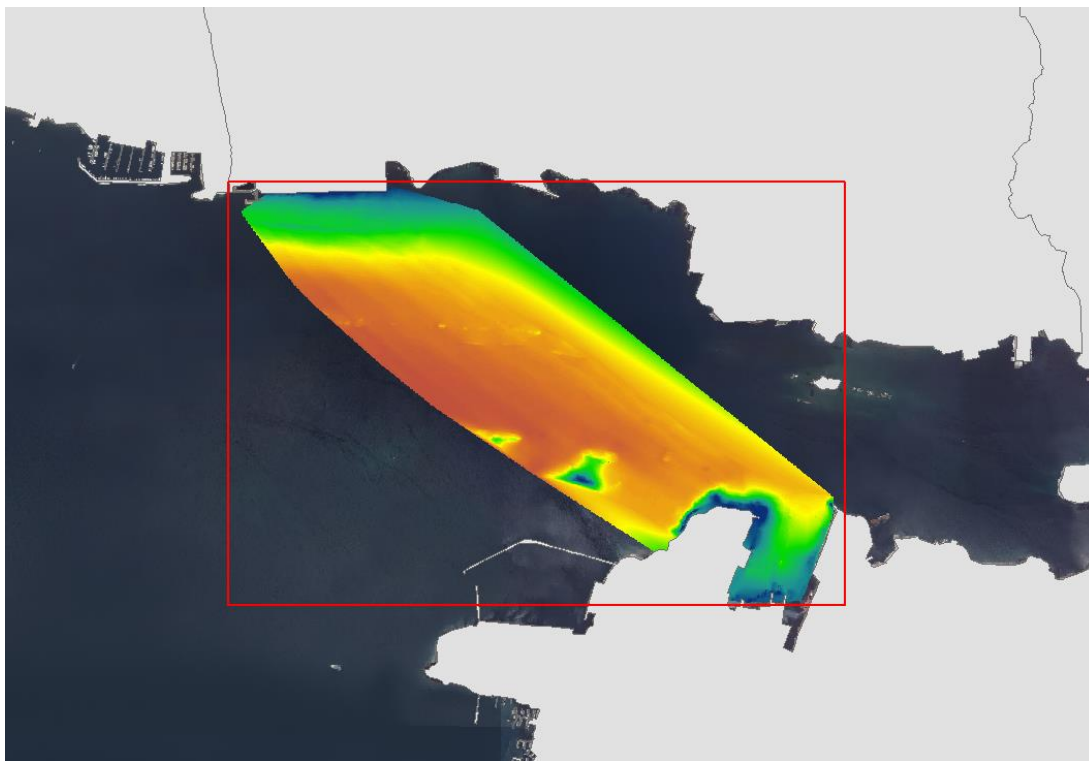


Slika I-21. Sučelje softvera NTRIP Client

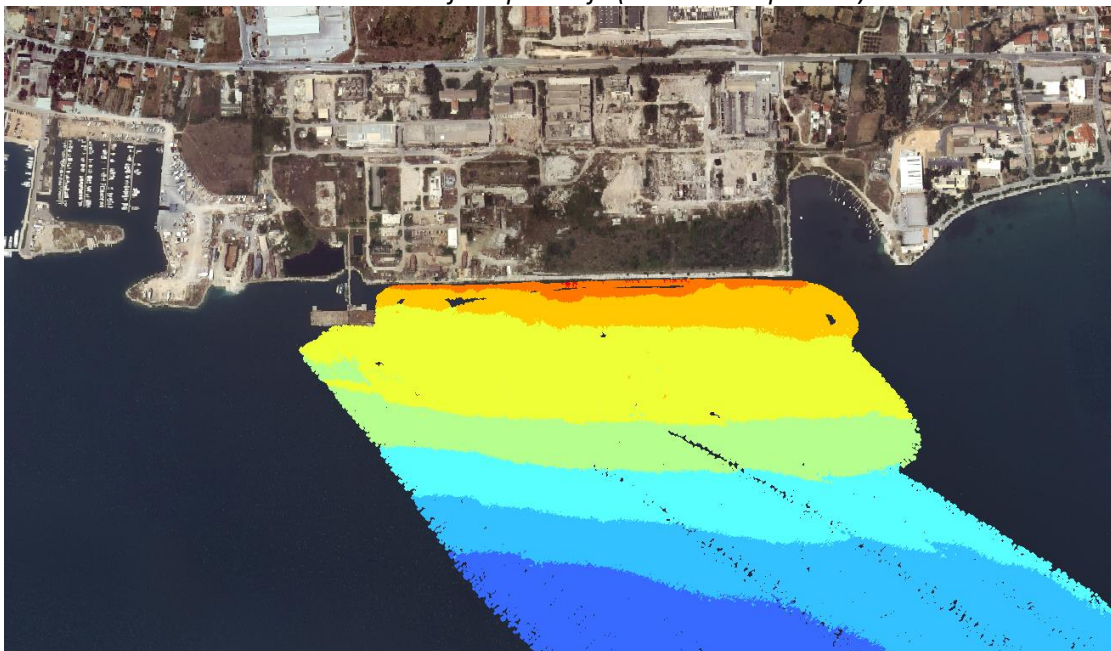
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka

Prilikom prikupljanja podataka postotak preklapanja snimaka iznosio je oko 45% s ciljem dobivanja kvalitetnijih modela i provjere preciznosti integralnog mjernog sustava. Operativna frekvencija iznosila je 160 kHz, dok je operativna širina snopa bila 20°. Stopa pinga varirala je od 10 do 14/sek. Također, uređaj je u realnom vremenu prikupljao i prikazivao podatke o položaju broda, brzini, azimutu, odstupanju od ravnine i dubini na temelju unaprijed definiranih korisničko definiranih postavki sustava. Prilikom prikupljanja podataka GPS antena je preko GSM mreže spojena na CROPOS sustav. To je omogućilo vrlo visoku preciznost prikupljenih podataka. Sustav je prikupljao podatke u WGS84_UTM_N33 projekciji. U procesu obrade s ciljem standardizacije svi podatci transformirani su u HTRS96 projekciju.

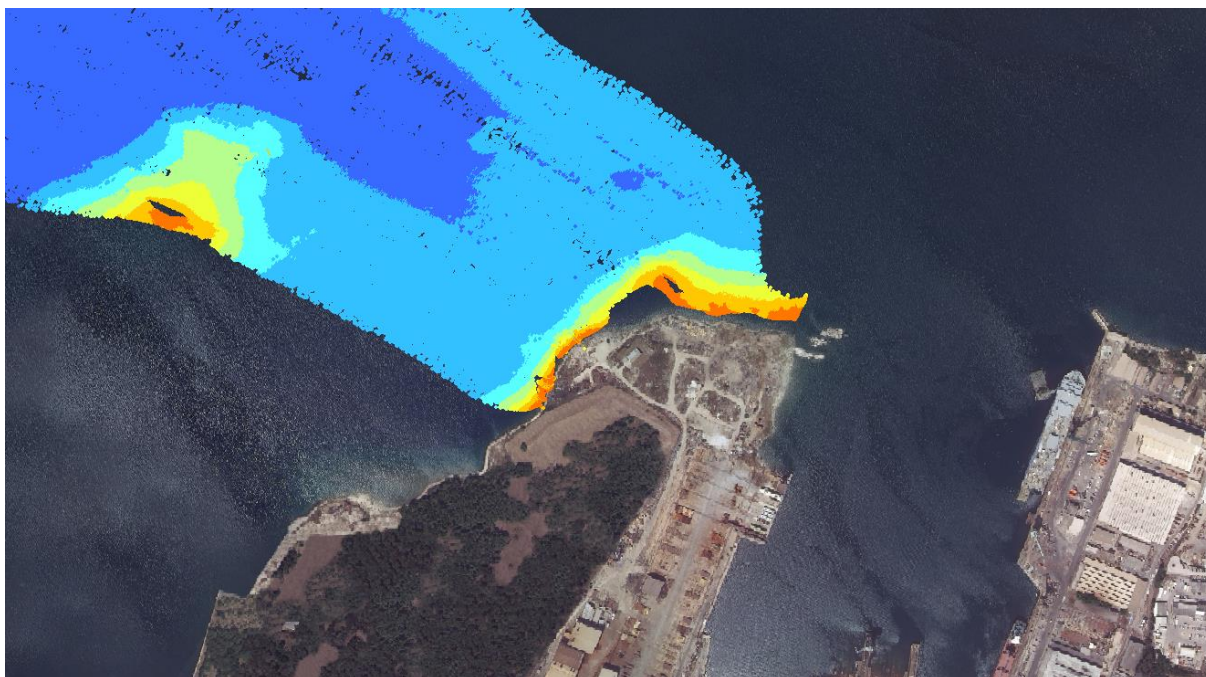
Mjerenje testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva izvršeno je dana 6. srpnja 2020. (Slika I-22). Ukupno je prikupljeno 34407607 točaka (Slika I-22 i I-23) koje su pospremljene u 4 direktorija (52 .wbmf dokumenata). Minimalna prikupljena vrijednost dubine iznosila je u -1,36 m, a maksimalna dubina -31,59 m. Raspon vodostaja na dan snimanja praćen je s uređajem *Stonex S10*. Kao srednja vrijednost uzet je srednji vodostaj koji je praćen na rivi (kod restorana Nautilus) u 10 ponovljenih mjerenja.



Slika I-22. Snimljeno područje (neobrađeni podatci)



Slika I-23. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka na području kraj bivše tvornice Jugovinila



Slika I-24. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka na područja kraj brodogradilišta Split

Izmjereni podatci su preko programskih paketa (aplikacija) za navođenje *CDX* i upravljanje podacima *Data Manager* (Slika I-12) prebačeni na stolno računalo na daljnju obradu i interpretaciju. Korišteni programski paketi tijekom mjerenja kreiraju zasebnu datoteku s informacijama o položaju točke, vremenu u kojem je točka registrirana, dubini i atributima o tvrdoći u svakoj točki. Programski paketi imaju samo mogućnost eksportiranja točaka u *.xyz* formatu. S obzirom na raspored, gustoću i brojnost uzoraka navedeni format nije prikladan za daljnju obradu, analizu, vizualizaciju i interpretaciju podataka. Stoga su sve točke pomoću alata, unutar softverskog paketa *ArcMap 10.1.*, konvertirane u *.las* format (preporuka američkog društva za fotogrametriju i daljinska istraživanja).

4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava

Za ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava bilo je potrebno usporediti vertikalne i horizontalne vrijednosti minimalno dva nefiltrirana gusta oblaka točaka koji pokrivaju isto područje. U alatu *C2C (Cloud to Cloud)* unutar programa *CloudCompare* uspoređeni su gusti oblaci točaka.

U opciji *Distance computation* unutar alata *C2C* podešeni su parametri za izradu modela apsolutnih udaljenosti uspoređenih oblaka. Za izračun udaljenosti u opciji *General parameters* razina ekstrahiranja (*Octree level*) je postavljena na automatsko, dok je maksimalna udaljenost postavljena na 1 m jer se preko 90% točaka nalazi unutar udaljenosti od 1 m, a maksimalna greška, provjerena u opciji *Approximate distances* iznosi 0,579 m.

Alat *M3C2* unutar *CloudCompare*-a omogućava generiranje pozitivnih i negativnih vrijednosti udaljenosti na temelju čega se izračunava standardna devijacija (SD), koja je korištena kao glavna statistička metoda za provjeru vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava. To je zapravo najčešća mjera odstupanja vrijednosti od aritmetičke sredine, a izračunava se po formuli:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - M)^2}{N - 1}}$$

U formuli x_i predstavlja sve vrijednosti točaka, M je aritmetička sredina, a N ukupan broj točaka (Streiner, 1996).

Najvažniji parametar unutar *M3C2* je *subsample cloud #1* u kojem je određeno da minimalna udaljenost između točaka bude 0,1 m. Upravo ovaj parametar utječe na konačan broj uzoraka na temelju kojih će se ispitati vertikalna preciznost. *Max depth* je postavljen na 1 m iz istih razloga kao i u opciji *General parameters* unutar alata *C2C*. Vertikalna i horizontalna preciznost su u konačnici ispitane na temelju 823 722 uzorka.

Standardna devijacija za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava je računata i na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s cikličnim snimcima (OP_0, OP_2 i OP_3). Sva tri uspoređena uzorka su postavljena u uloge referentnog i uspoređenog oblaka. U alatu *M3C2* ponovno su postavljeni isti parametri kao i prvi put, osim što je *Max depth* postavljen na 0,2 m. SD je izračunata za svih šest mogućih kombinacija, a konačna vrijednost SD je srednja vrijednost svih SD-a.

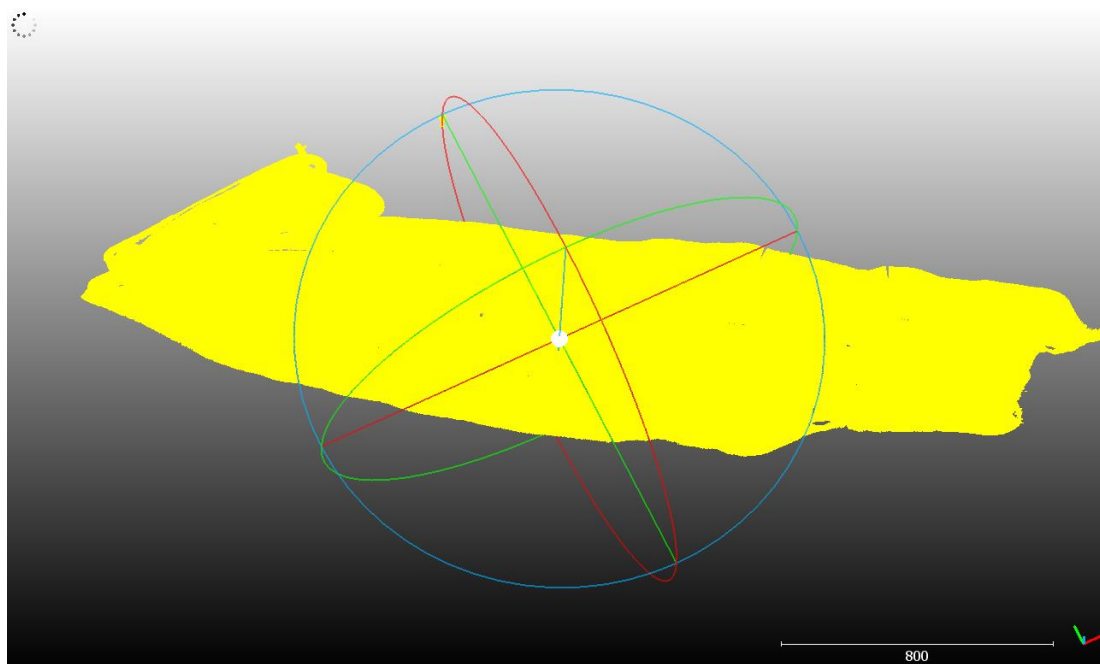
Standardna devijacija za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava također je ispitana na odabranom testnom području i to na temelju odnosa snimaka OP_2 i OP_3, odnosno OP_3 i OP_2, koji je najreprezentativniji. Konačna vrijednost SD je srednjak dobivene dvije vrijednosti.

4.1.6. Uređivanje podataka

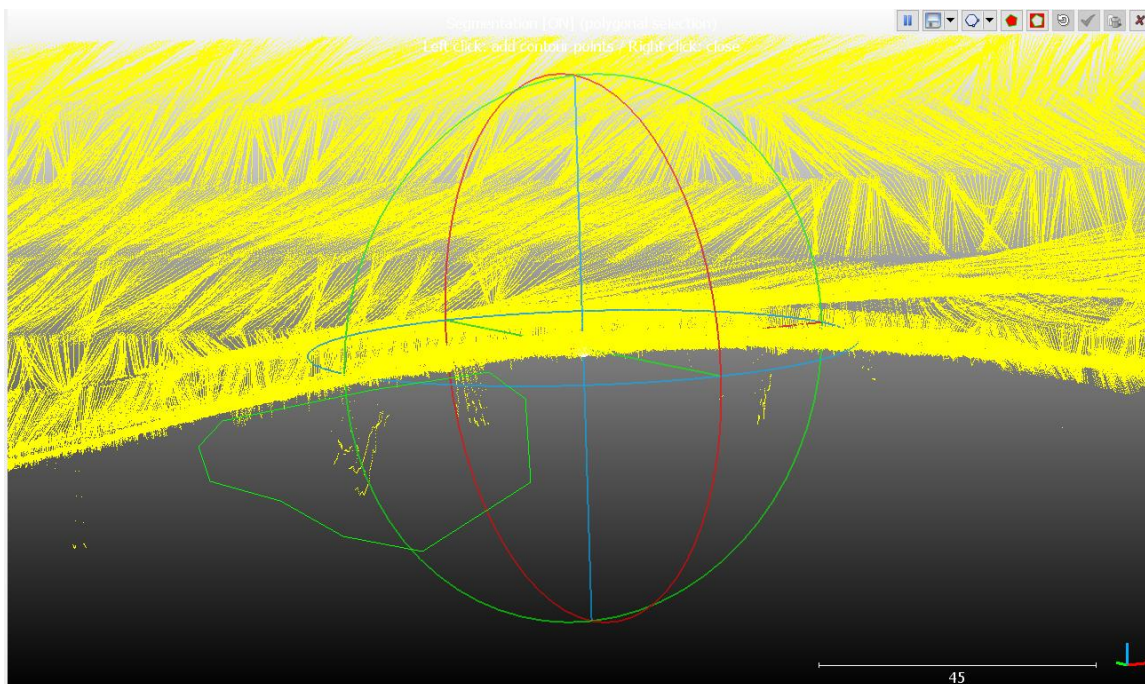
S ciljem izrade kvalitetnog modela, prema standardima Međunarodne hidrografske organizacije, jedan od najzahtjevnijih zadataka u procesu modeliranja je filtracija podataka. Naime, sustav prikupi mnoštvo visinskih podataka koji ne reprezentiraju morfologiju dna, već mogu biti različiti šumovi i greške koje je potrebno pročitati.

S obzirom na specifičnosti testnog područja teško je iz gustog oblaka točaka uočiti i zaključiti jesu li značajnija odstupanja od prosječnih vrijednosti za pojedina područja greške ili pak pukotine. U procesu

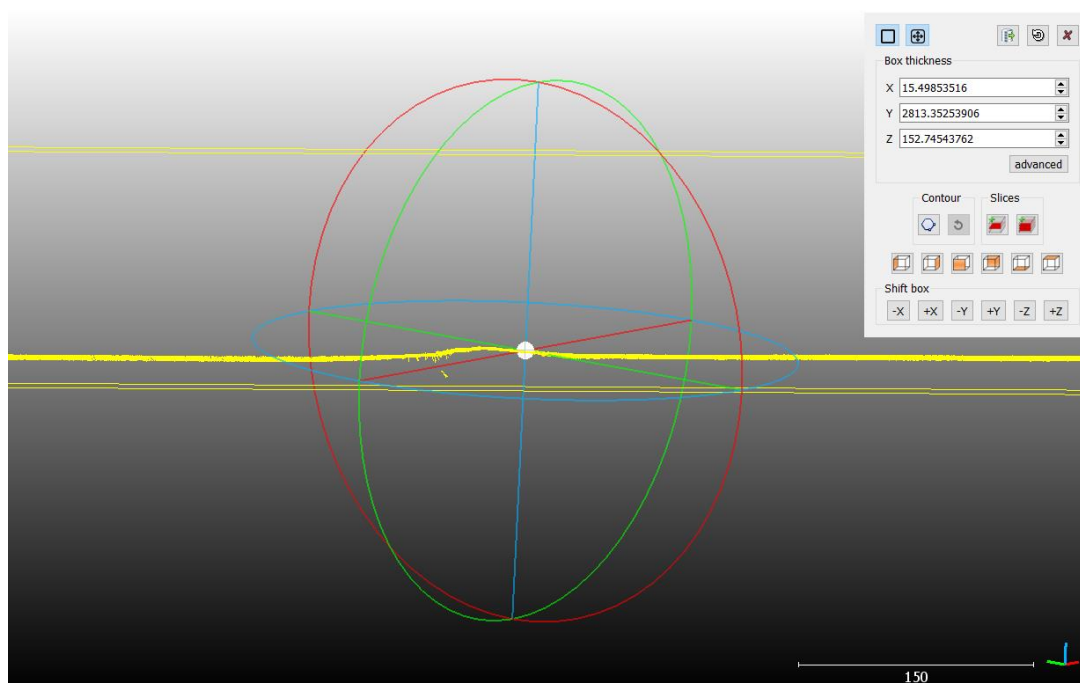
filtracije podataka korištene su tri metode u softveru *CloudCompare*: ručna metoda (iz 3D prikaza i profila) (Slika I-26 i I-27), metoda segmentacije (Slika I-28 i I-29) i CSF filter (Slika I-31). Ručna metoda uklanjanja grešaka je izrazito dugotrajan i zahtjevan proces u kojem istraživač na temelju iskustva iz 3D prikaza i uzdužnih i poprečnih profila uklanja greške, prateći pritom konfiguraciju dominantnog terena.



Slika I-25. Gusti oblak točkaka u softveru *CloudCompare*

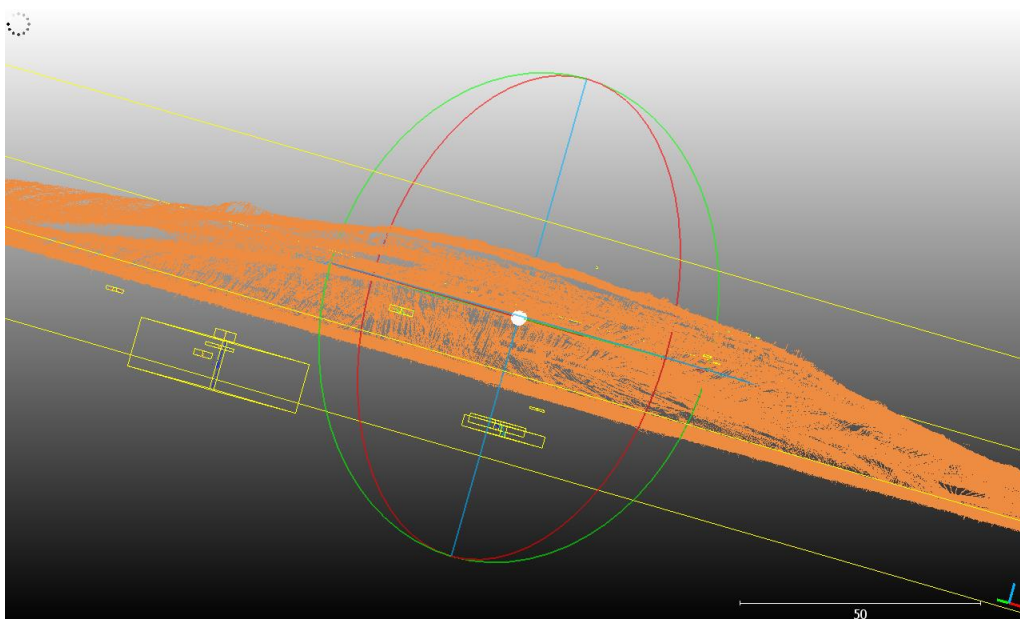


Slika I-26. *Primjer ručnog uklanjanja grešaka iz 3D prikaza u softveru CloudCompare*

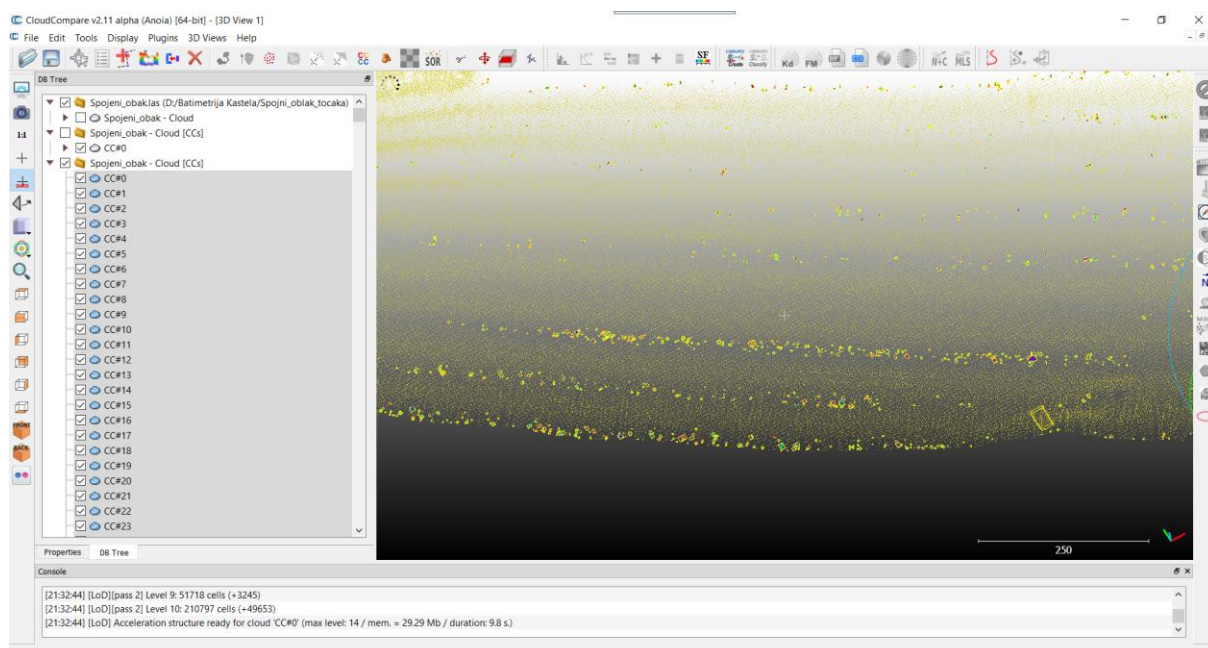


Slika I-27. *Primjer ručnog uklanjanja grešaka iz profila u softveru CloudCompare*

Automatsko uklanjanje grešaka obavljeno je pomoću alata *LabelConnected Components* u *CloudCompare*-u koji koristi 3D rešetku za ekstrahiranje povezanih komponenti. Ovaj alat segmentira odabrane oblake u manje dijelove odvojene minimalnom udaljenošću, pri čemu je svaki dio povezana komponenta (tj. skup 'spojenih' točaka). Alat zahtjeva poznavanje nekoliko važnih parametara. Prvi je Razina ekstrahiranja (*Octree level*) kojim se definira minimalni razmak između dvije komponente. Što je razina viša to je razmak između komponenti manji što rezultira gušćom ćelijom, odnosno dobiva se više oblaka točaka koji su podskupine izvornog oblaka. Razina ovisi o ukupnom broju i gustoći prikupljenih točaka te je s obzirom na to postavljena razina 13. Sljedeći parametar je Minimalan broj točaka po komponenti (*Minimum points per component*). On je također uvjetovan brojem i gustoćom prikupljenih točaka te je definirano da se sve komponente koje imaju manje od 10 točaka zanemare. Na poslijetku je označena i opcija Slučajne boje (*Random colors*) kojom je svakoj komponenti dodijeljena slučajna boja kako bi se lakše uočile razlike među komponentama. Po završetku *CloudCompare* je stvorio više oblaka kao komponenti (1767) koji su zapravo odgovarajuća podskupina izvornog oblaka s istim značajkama (skalarna polja, normale, boje itd.). Označeni su oblaci koji predstavljaju šumove i greške nastale u procesu prikupljanja podataka te opcijom *Izbriši (Delete)* uklonjeni iz skupa točaka koji ide u daljnji proces obrade.



Slika I-28. Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru *CloudCompare*



Slika I-29. Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru *CloudCompare*

4.1.7. Filtracija podataka primjenom *SOR filter-a*

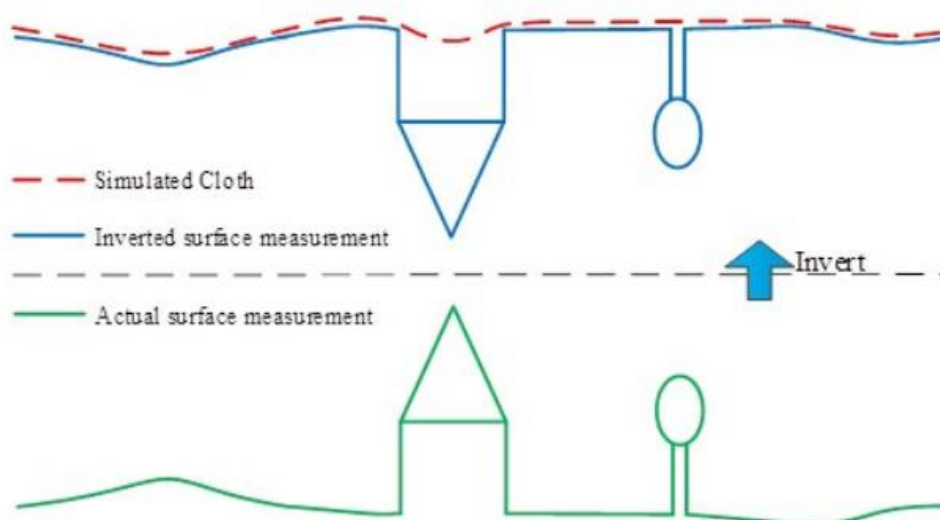
Za uspješnije filtriranje točaka korišten je napredni *SOR filter* (*Statistical Outlier Removal*) unutar *CloudCompare-a*. On filtraciju podataka vrši na sljedeći način. Za početak izračunava prosječnu udaljenost svake točke do svojih susjeda. Potom odbacuje, odnosno briše sve točke čija je udaljenost od susjednih točaka izvan intervala definiranog prosječnom udaljenosti i standardnim odstupanjem. *SOR filter* ima dva parametra. U prvom (*Number of points to use for mean distance*) se definira broj susjednih točaka koji će se koristiti za izračun 'udaljenosti do susjeda' za svaku točku. Prema zadanim postavkama određeno je da je to broj 6. Drugi parametar (*Standard deviation multiplier threshold (nSigma)*) odnosi se na množitelja standardnog odstupanja koji može biti bilo koji realni broj između 0 i 10 uključujući i njih. *SOR filter* je veoma osjetljiv te se za ovaj parametar predlaže odabir veće vrijednosti od broja točaka unutar klastera (Shen i dr., 2011). Stoga je određeno da sve točke čije je standardno odstupanje veće od onog pomnoženog s brojem 8 bude označeno te na posljepku filtrirano. Dobiven je u potpunosti 'čist' oblak točaka bez šumova i pogrešnih očitavanja koji je spreman za interpolaciju.

4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF)

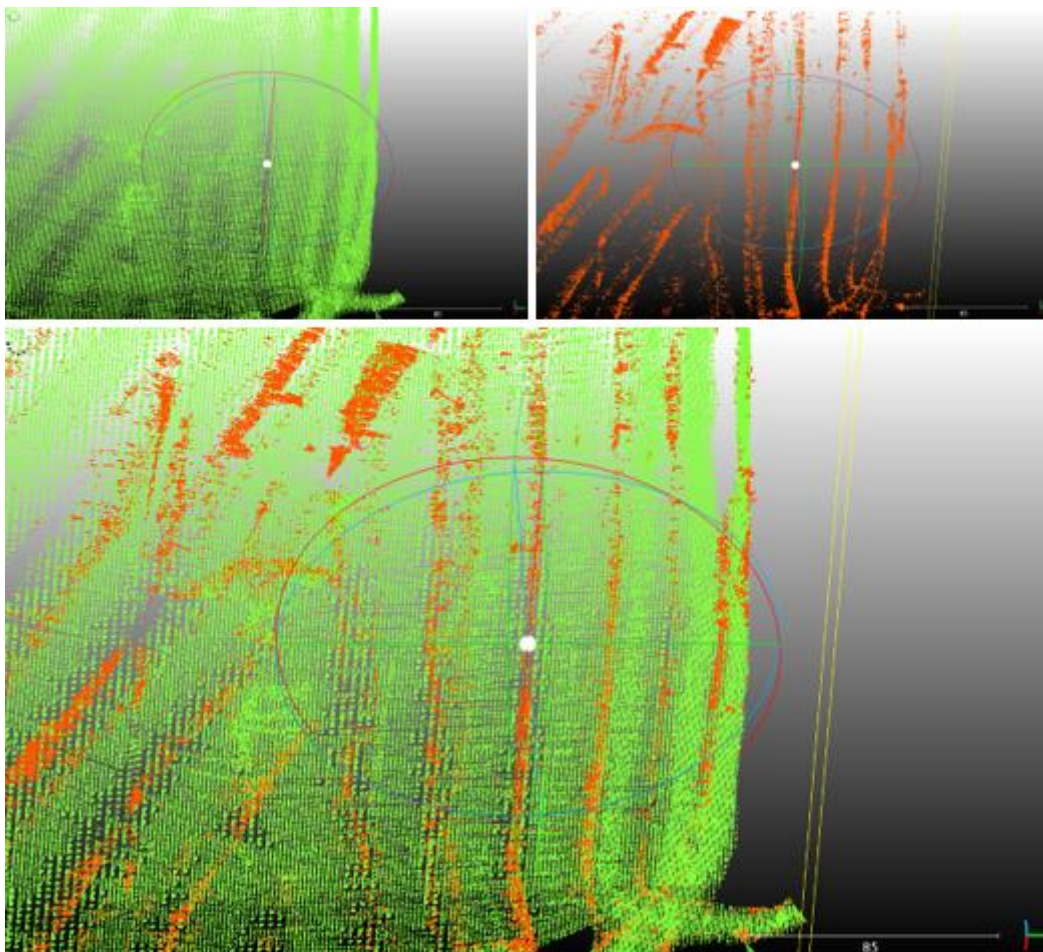
Cloth Simulacijski filter (CSF) je alat za izdvajanje temeljnih točaka u diskretnim povratnim točkama prikupljenim različitim tehnologijama, a posebice LiDAR. Razdvajanje oblaka točaka u zemaljska i nezemaljska mjerenja važan je korak za generiranje digitalnih modela terena (DTM) iz različitih podataka. Razvijeni su mnogi algoritmi filtriranja. Međutim, čak i najmoderniji algoritmi za filtriranje trebaju pažljivo postaviti brojne složene parametre kako bi se postigla visoka točnost.

U svrhu smanjenja parametara koje korisnici postavljaju i promoviranja algoritama filtriranja, CSF je nova metoda filtriranja za koju je potrebno nekoliko jednostavno postavljenih cjelobrojnih i logičnih parametara. Ova metoda temelji se na simulaciji platna, algoritam 3D računalne grafike i koristi se za simulaciju platna unutar računalnog programa. U ovom predloženom pristupu obrnut je gusti točka, a zatim se krutom tkaninom prekriva obrnuta površina. Analizom interakcija između platnenih čvorova i odgovarajućih točaka mogu se odrediti lokacije platnenih čvorova kako bi se stvorila aproksimacija površine zemlje. Konačno, točke tla mogu se izdvojiti iz oblaka točaka usporedbom izvornih točaka i generirane površine.

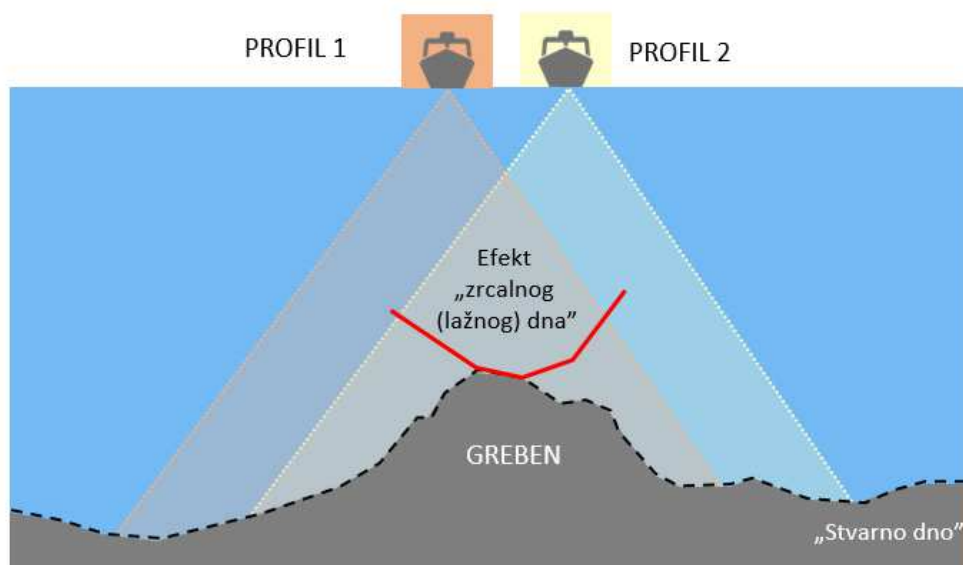
Glavni razlog primjene metode su brojni artefakti uvjetovani karakteristikama opreme i morfologije dna. Na slici I-31. prikazan je primjer pojave „zrcalnog (lažnog) dna“.



Slika I-30. Princip rada CSF metode



Slika I-31. *Primjer uklanjanja oblaka točaka korištenjem CSF algoritma*



Slika I-32. Primjer pojave efekta „zrcalnog (lažnog) dna“

4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom

Da bi se dobile kontinuirane površine (visoko rezolucijski modeli) koje su neophodne za proučavanje, a time i poznavanje dna bilo je potrebno procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pritom optimalnu interpolacijsku metodu i prostornu rezoluciju. Interpolacija je proces računanja vrijednosti za određenu točku uz pomoć dviju ili više susjednih točaka s poznatim vrijednostima. Nova vrijednost u točki nikad ne prelazi interval određen susjednim točkama, a procijenjena vrijednost se svrstava u područje mogućega (Šiljeg i dr, 2018). Slijedeći primjere dobre prakse unutar digitalnog modeliranja reljefa odabrana je metoda interpolacije prirodni susjed (*natural neighbor*).

„Prirodni susjed je jedna od najpopularnijih metoda interpolacija, sa širokom primjenom u geografskom i geofizičkom modeliranju, mehanici itd. Ona kombinira najbolje značajke metoda najbližih susjeda i triangulacijske nepravilne mreže. To je metoda ponderiranog prosjeka koja procjenjuje vrijednost pomoću lokalnih koordinata prirodnog susjeda na temelju Voronoijeve teselacije (proces stvaranja dvodimenzionalne ravnine ponavljanjem geometrijskih oblika bez preklapanja i praznina)“ (Šiljeg i dr., 2018:45).

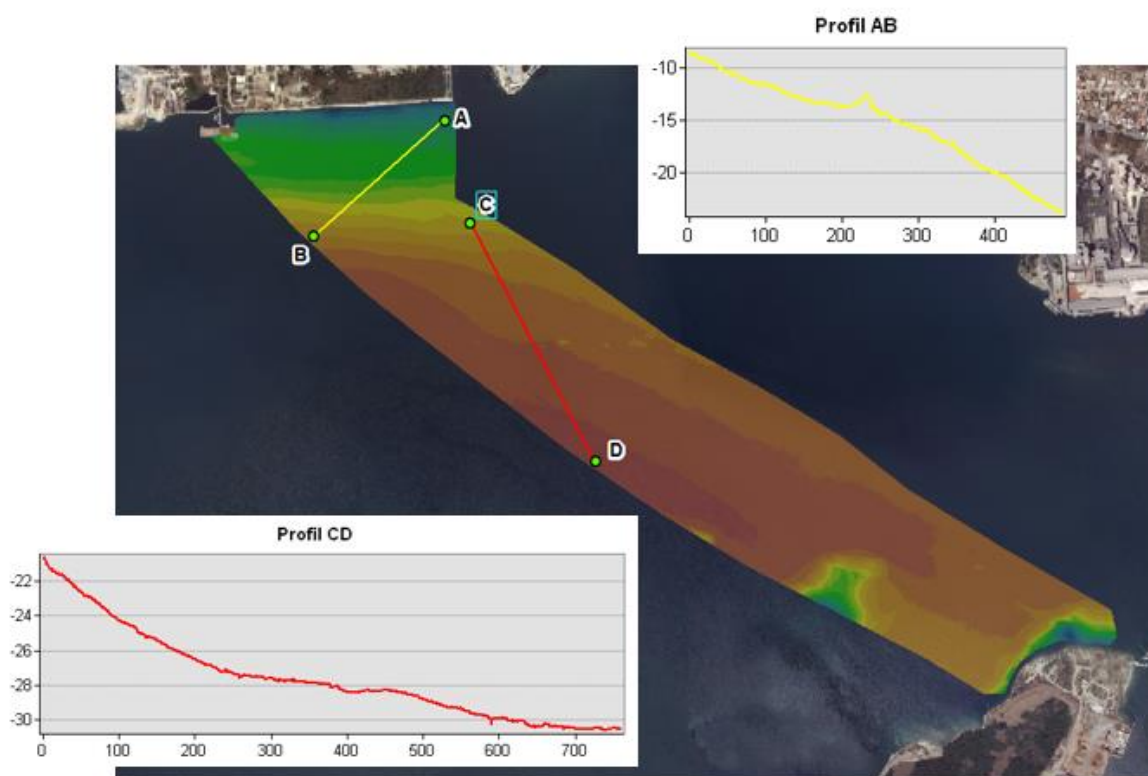
4.1.10. Prostorna rezolucija

Nakon procesa usporedbe metoda interpolacije, sljedeći korak je proces odabira pravilne prostorne mreže ili *grid-a*. Najveći problem za većinu znanstvenika, pri izradi digitalnih modela, predstavlja odabir prostorne rezolucije ili veličine piksela. Ona je izračunata pomoću *Grid calculator-a* i metode analize uzoraka točaka (Hengl, 2006). Prilikom izrade integralnog modela (digitalni model dubina + digitalni model površina) odabrana je optimalna prostorna rezolucija od 10 cm (*point pattern analysis*). Ona predstavlja kompromis između gustoće uzorkovanja visinskih i dubinskih točaka te površine područja snimanja. Za potrebe vizualizacije rezolucija modela je smanjena na vrijednost od 1 m.

5. Rezultati

5.1. Prikaz profilima

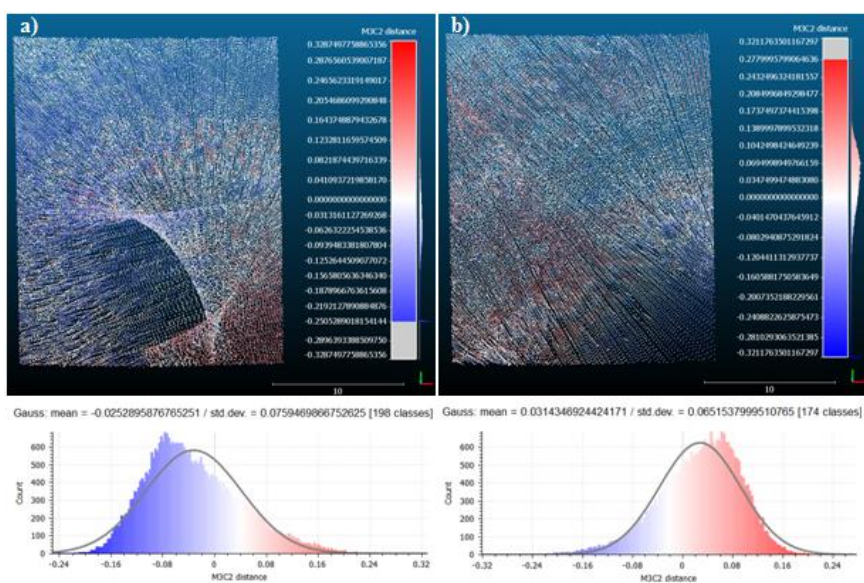
Iz generiranih 2.5D i 3D modela testnog područja moguće je izvoditi različite primarne i sekundarne parametre (morfometrijske, hidrološke itd). Tako je primjerice na slici I-33 prikazana izmjera specifičnih profila unutar testnog područja kroz odabrane poprečne presjeke. Naime, da bi se što bolje razumjela prostorno-vremenska evolucija pojedinih dijelova dna potrebno je provesti detaljnu morfometrijsku i tipološku klasifikaciju određenih promatranih profila i to kroz kvantitativno opisivanje recentnih promjena u širini i dubini promatranih poprečnih presjeka.



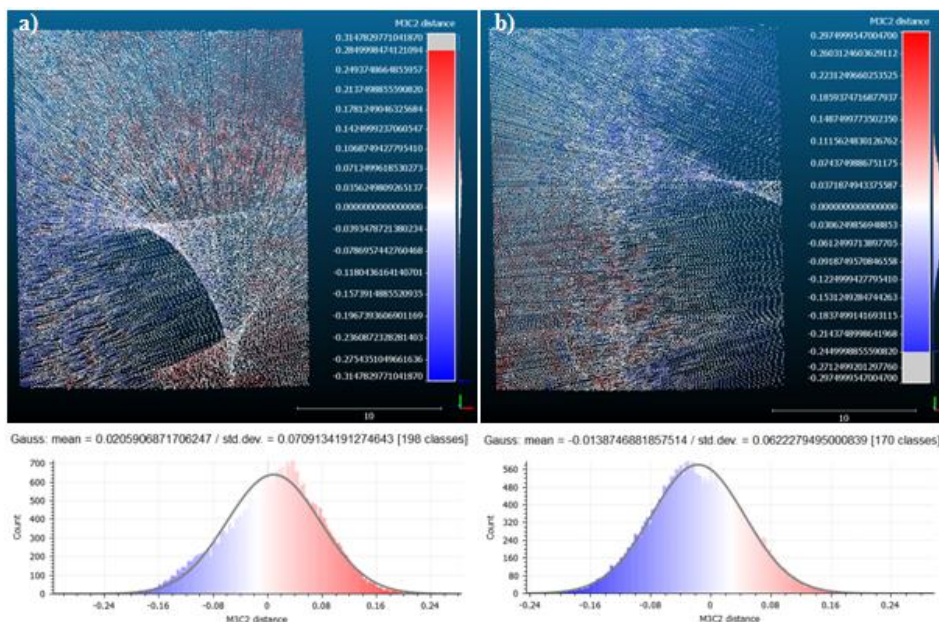
Slika I-33. Poprečni AB i uzdužni CD profili unutar testnog područja

5.2. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava

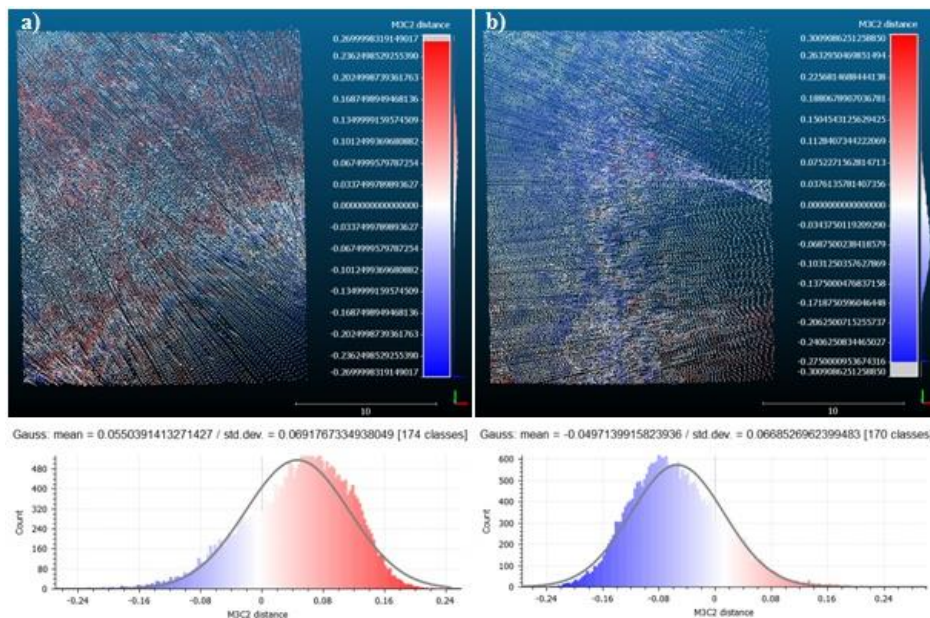
Standardna devijacija je računata, ali ovaj put na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s tri ciklična snimanja na kojima je približno jednaka gustoća uzorkovanja (OP_0, OP_2 i OP_3). SD je računata za svih mogućih šest kombinacija pri kojima uzorak svakog cikličnog snimka bio u ulozi referentnog i uspoređenog oblaka točaka (Slika I-34 - I-36).



Slika I-34. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_0 - OP_2 i b) OP_2 - OP_0



Slika I-35. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_0 - OP_3 i b) OP_3 - OP_0



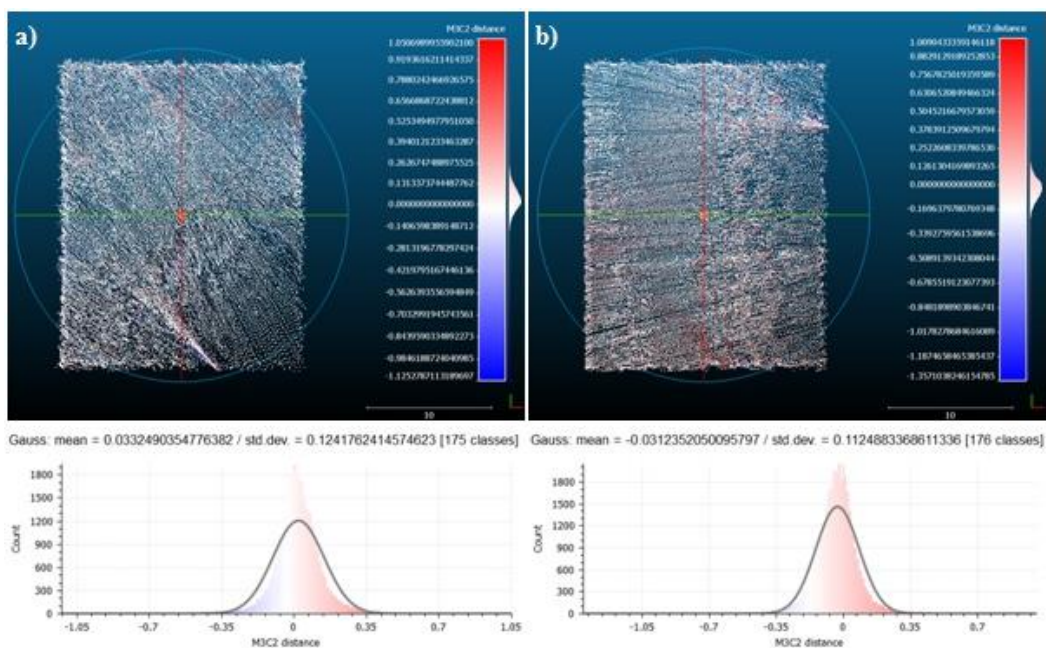
Slika I-36. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_2 - OP_3 i b) OP_3 - OP_2

Dobivene su vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava. SD za vertikalnu preciznost izračunata je kao srednja vrijednost svih šest kombinacija. Ona iznosi 6,8 cm (Tablica I-3).

Tablica I-3. Vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka

Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_0 - OP_2	7,6
OP_2 - OP_0	6,5
OP_0 - OP_3	7,1
OP_3 - OP_0	6,2
OP_2 - OP_3	6,9
OP_3 - OP_2	6,7
Ukupno	6,8

Ispitivanje horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava provedeno je na temelju usporedbe testnog područja trećeg (OP_2) i četvrtog (OP_3) cikličnog snimka (Slika I-37).



Slika I-37. Horizontalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_2 - OP_3 i b) OP_3 - OP_2

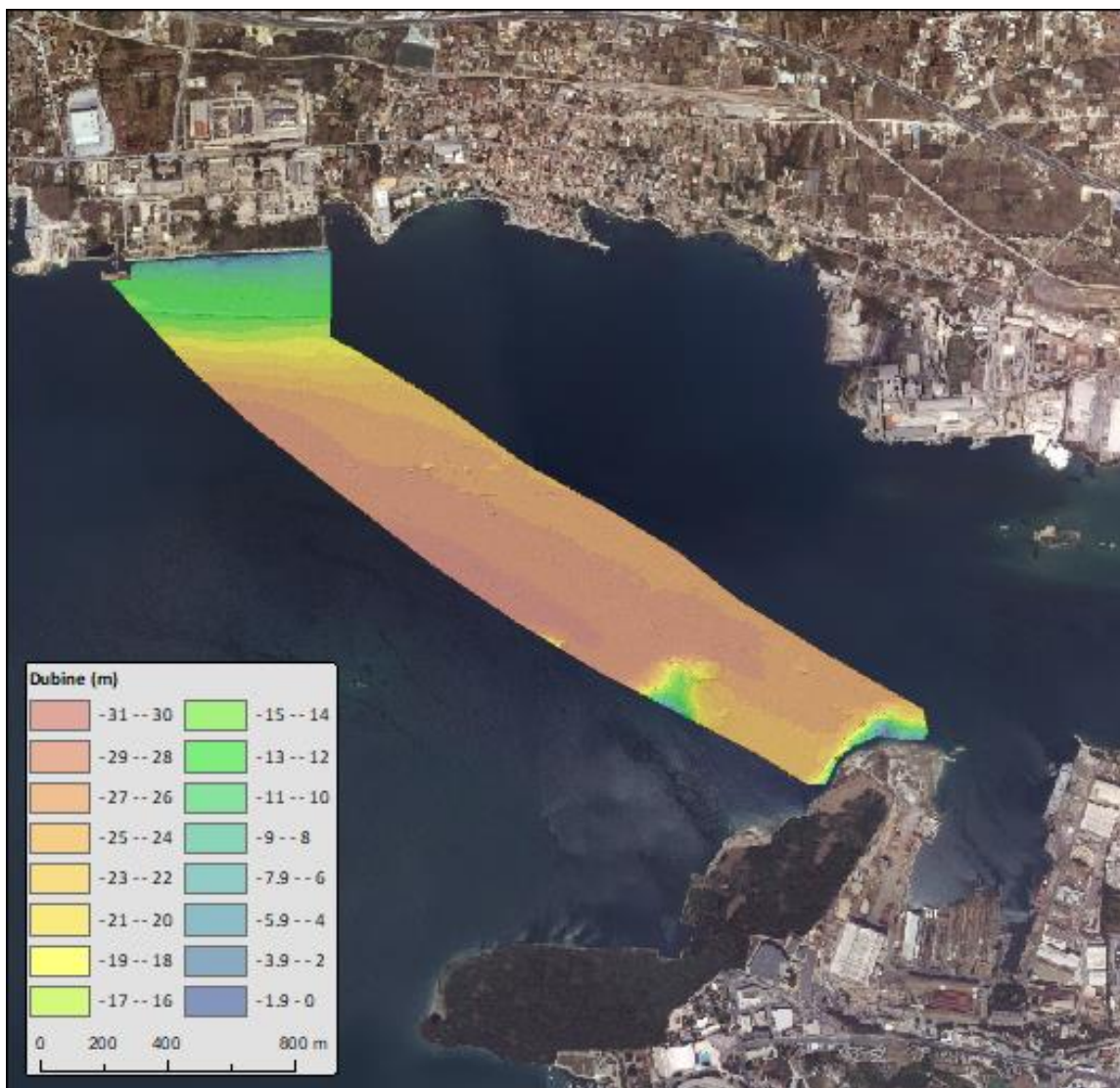
Srednja vrijednost standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava iznosi 11,8 cm (Tablica I-4).

Tablica I-4. *Vrijednosti standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka*

Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_2 - OP_3	12,4
OP_3 - OP_2	11,2
Ukupno	11,8

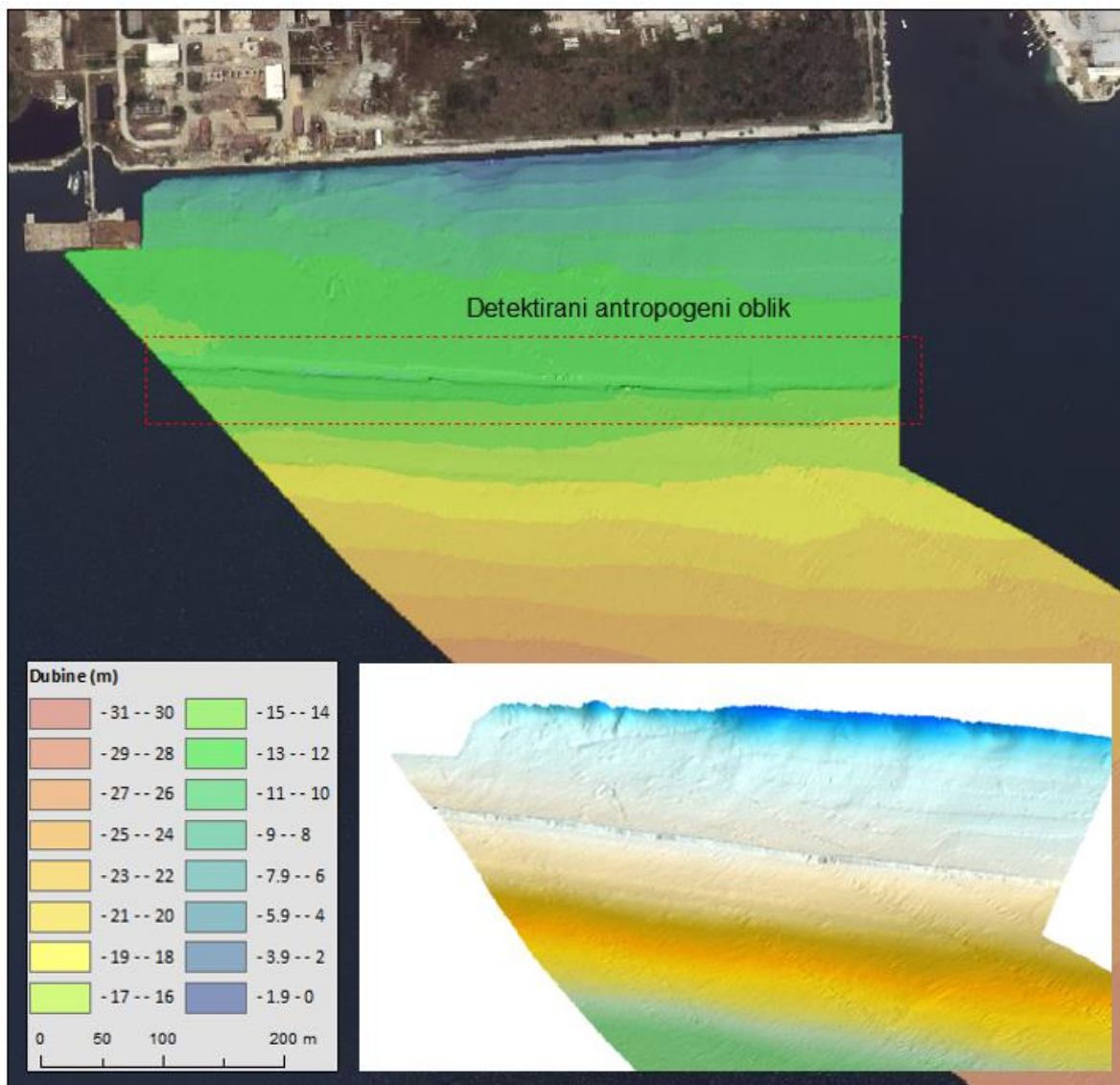
5.3. Batimetrijska karta testnog područja

Ukupna površina testnog područja prikazanog na slici I-38 je 1.13 km². Minimalna vrijednost dubine je - 31 m. Vrijednosti dubina klasificirane su u 16 klasa (ekvidistanca 2 metra). S obzirom na detaljnost kartiranja integralnog mjernog sustava unutar testnog područja detektirani su specifični objekti i oblici (Slika I-39 i I-40) koje bi trebalo identificirati sustavnim terenskim istraživanjem (zaronom).

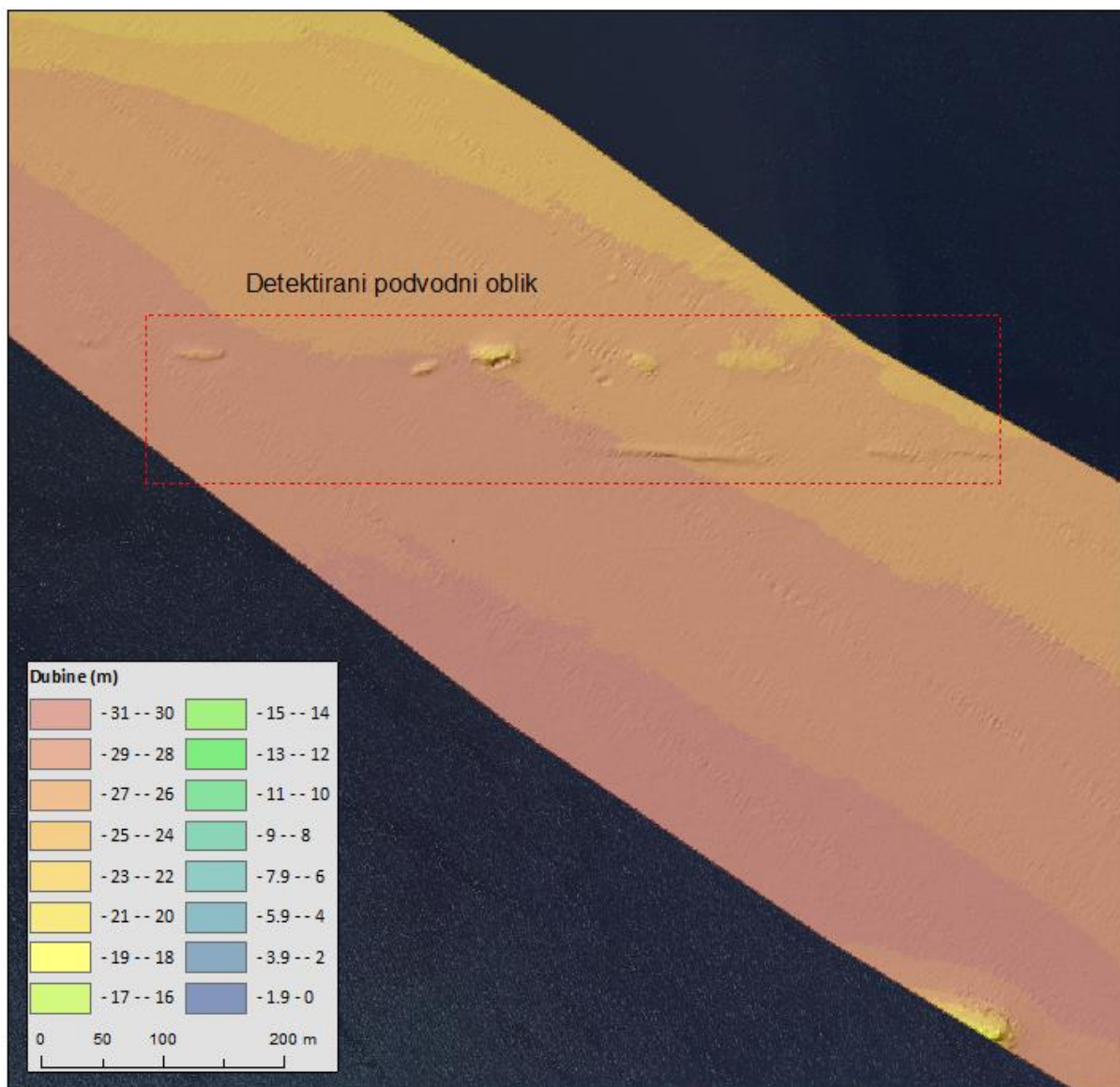


Slika I-38. Batimetrijska karta testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva (Batimetrijska karta (A3) u krupnijem mjerilu s izobatama nalazi se u poglavlju 11. Dodaci)

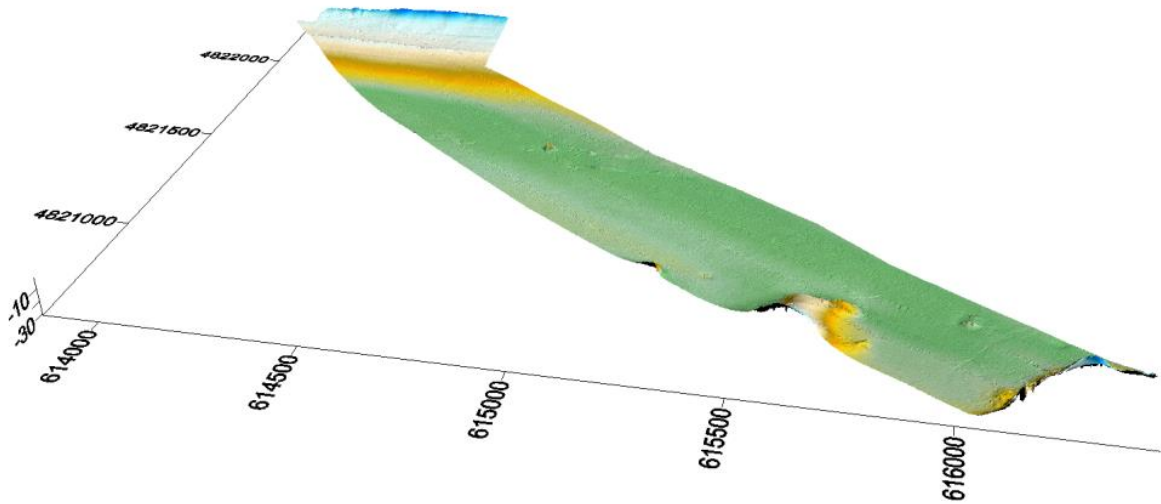
Na području ispred bivše tvornice Jugovinila na prosječnoj udaljenosti 195 m od obale i dubini oko 13 m detektiran je pravocrtni oblik koji najvjerojatnije reprezentira cijev (Slika I-39). Također, u središnjem dijelu testnog područja na dubinama od oko 25 m detektirani su podvodni oblici (Slika I-40). S obzirom na oblik i položaj pretpostavljamo da su antropogenog karaktera, točnije da se odnose na nakupine materijala.



Slika I-39. Detektirani antropogeni oblik „cijev“



Slika I-40. Detektirani podvodni oblici



Slika I-41. Perspektivni prikaz testnog područja

6. Izrada modela tvrdoće dna

Detaljan opis korištenih metoda, tehnika i procedura prilikom prikupljanja i obrade podataka je detaljno pojašnjen u poglavlju I. Batimetrijska i geodetska izmjera oko točaka uzorkovanja sedimenata integralnim mjernim sustavom (multibeam, IMU, RTK-GPS).

Uvod

Kartiranje površinskih facijesa morskog dna (pijesak, mulj, blatni pijesak, stijene i drugo) trebao bi biti prvi korak u marinskim geološkim studijama jer je presudan za modeliranje procesa sedimentacije, transporta zagađenja, praćenja tektonike i definiranja bentičkih staništa (Dartnell i Gardner 2004; Huang i dr. 2014).

Tvrdoća je svojstvo otpornosti materijala na prodiranje drugoga tijela te je specifična za svaku kemijsku tvar ili mineral. Ona ovisi o rastezljivosti, elastičnoj krutosti, plastičnosti, naprezanju, čvrstoći, žilavosti, viskoelastičnosti i viskoznosti (URL1). Tvrdoća dna je nekoć kartirana interpolacijom analiziranih podataka prikupljenih direktnim uzimanjem uzoraka s dna. Razvoj najnovijih geoprostornih tehnologija poput višesopnog dubinomjera omogućio je izmjeru dubine i intenziteta povratne energije (radarski signal) za utvrđivanje tvrdoće i hrapavosti dna u realnom vremenu sa stopostotnom pokrivenošću (Dartnell i Gardner 2004; Lucieer i Jordan 2007; Brown i dr. 2011; Lucieer i dr. 2013).

"Ispitivanje ultrazvukom (UT) zasniva se na svojstvu širenja ultrazvučnog impulsa kroz homogene materijale i reflektiranja od granice materijala različitih akustičnih impedancija, odnosno od nepravilnosti u materijalu.

Korištenjem ultrazvučnih uređaja i sondi, najčešće na osnovi piezoelektričnog efekta, u ispitni materijal se odašilju ultrazvučni impulsi te primaju odzivi ultrazvučnih impulsa iz materijala uzorka koji se ispituje. Osnovni parametri koji su određeni vrstom vala i njegovim širenjem kroz materijale su frekvencija, valna duljina i brzina širenja vala, koji su povezani jednadžbom:

$$v = \lambda * f$$

gdje je:

v - brzina širenja vala, m/s,

λ - valna duljina, m,

f - frekvencija vala, Hz.

Brzina širenja vala (v) konstantna je i različita za svaki materijal, tako da se promjenom frekvencije mijenja valna duljina (Grozđanić, 2019)".

Povratni radarski signal obično se koristi u medicini kada je riječ o ultrazvucima za razumijevanje obilježja ljudskog tijela, a u svijetu hidrografije i znanosti o moru on pomaže razumjeti obilježja morskog dna. Višesnopni dubinomjeri prikupljaju dva tipa 3D podataka: dubinu dna i povratni radarski signal. Dubina dna izračunava se mjerenjem vremena potrebnog da zvuk napusti sondu uronjenu u vodu te se odbije od dna natrag u nju, dok se povratni radarski signal izračunava mjerenjem količine zvuka koja se odbija od dna i vraća u sondu (URL2). Intenzitet povratnog radarskog signala u velikoj mjeri kontroliraju tri fizička svojstva morskog dna: kontrast akustičke impedancije (tvrdoća), prividna hrapavost i volumna nehomogenost (Jackson 1996, Ferrini and Flood 2006).

Različite vrste dna različito "raspršuju" zvučnu energiju te se na temelju tih podataka dobivaju informacije o relativnoj tvrdoći i hrapavosti dna.

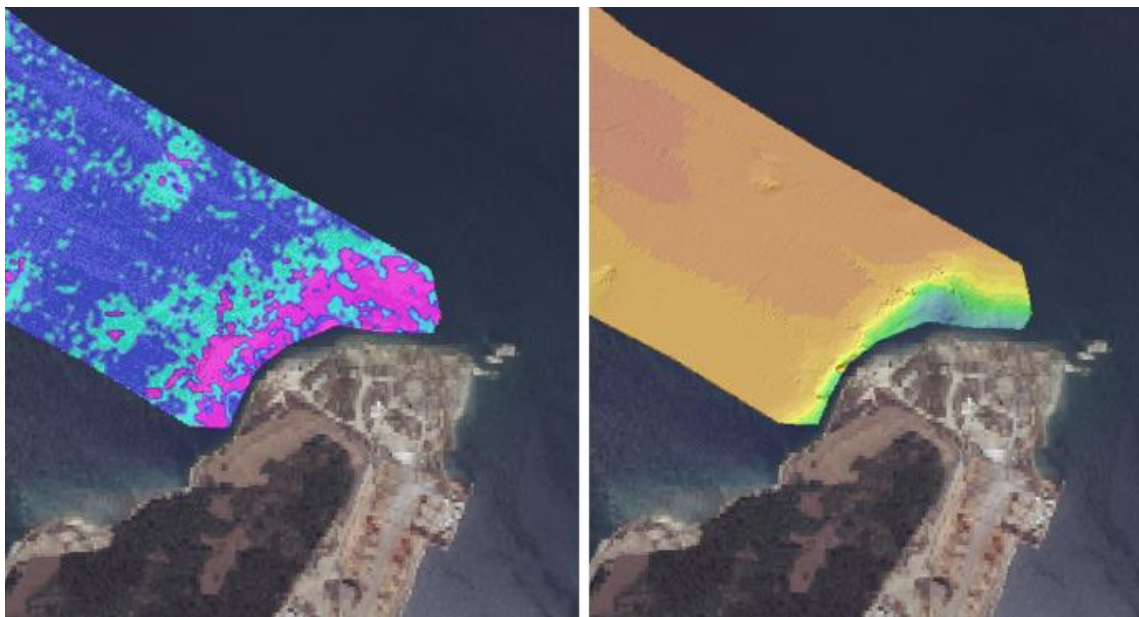
Tvrde vrste dna koje imaju slabu poroznost, a samim time i veću gustoću (npr. stijene) reflektiraju više zvuka od mekših tipova dna koji su porozniji i manje gustoće (npr. blato) (Ferrini and Flood 2006), dok zaglađena dna reflektiraju više zvuka od neravnog dna (npr. koraljni greben) (Lucieer 2008; Huang i dr. 2013; Huang i dr. 2014; URL2).

Kombinacija prikupljenih podataka o dubini i tvrdoći dna omogućuje izradu vrlo detaljnih 3D prikaza dna i staništa koja su tamo prisutna. Dobivene informacije koriste se u svrhu zaštite morskog, riječnog i jezerskog ekosustava, upravljanje obalnim područjima i sigurnosti plovidbe (Huang i dr., 2013; URL2). Visokorezolucijske višesnopne dubinomjere trenutno koristi većina svjetskih hidrografskih servisa, mornarica i komercijalnih marinskih istraživača zbog visoke kvalitete prikupljenih podataka i mogućnosti snimanja velikih površina dna (Dartnell i Gardner 2004). Korišteni WASSP S3 Multibeam omogućava prikupljanje i prikaz u realnom vremenu podataka o tvrdoći dna u različitim bojama ovisno o tvrdoći same podloge.

6.1. Model tvrdoće dna testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva

Model tvrdoće dna izrađen je na temelju 2 grupe kriterija (Slika I-42):

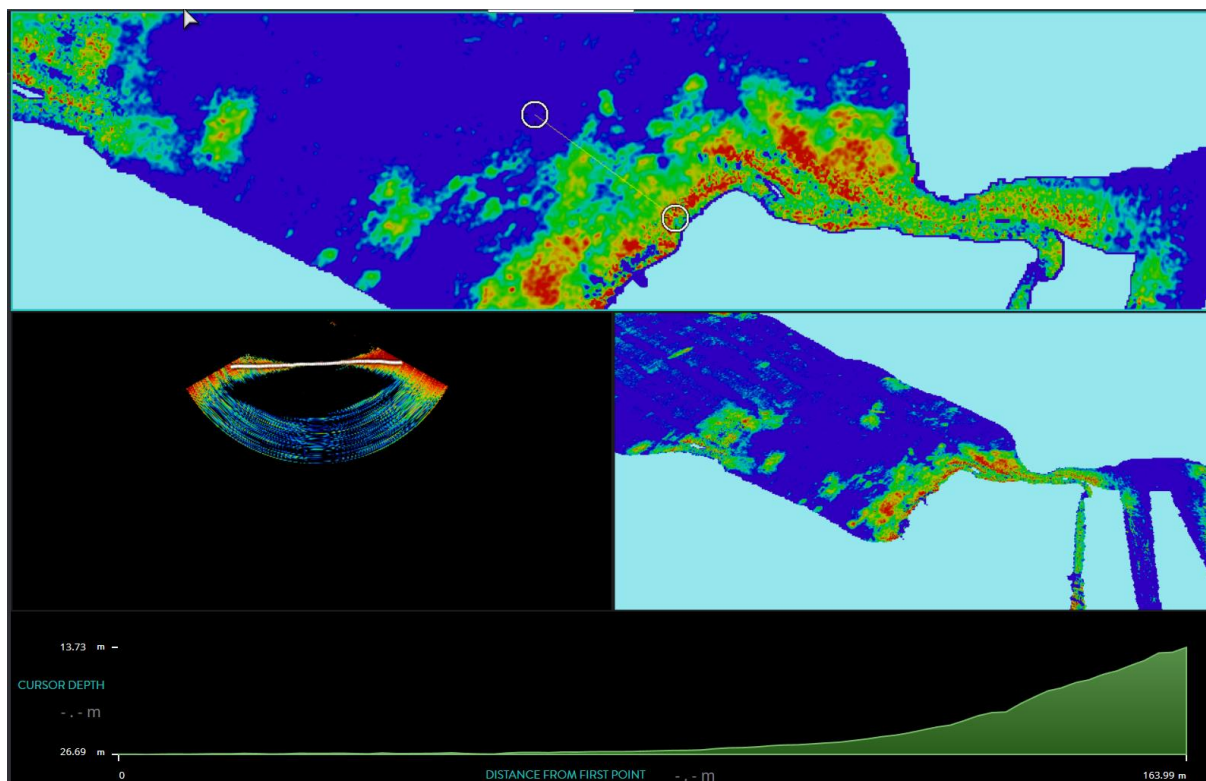
- a) Model dubina
- b) Modela tvrdoće dna



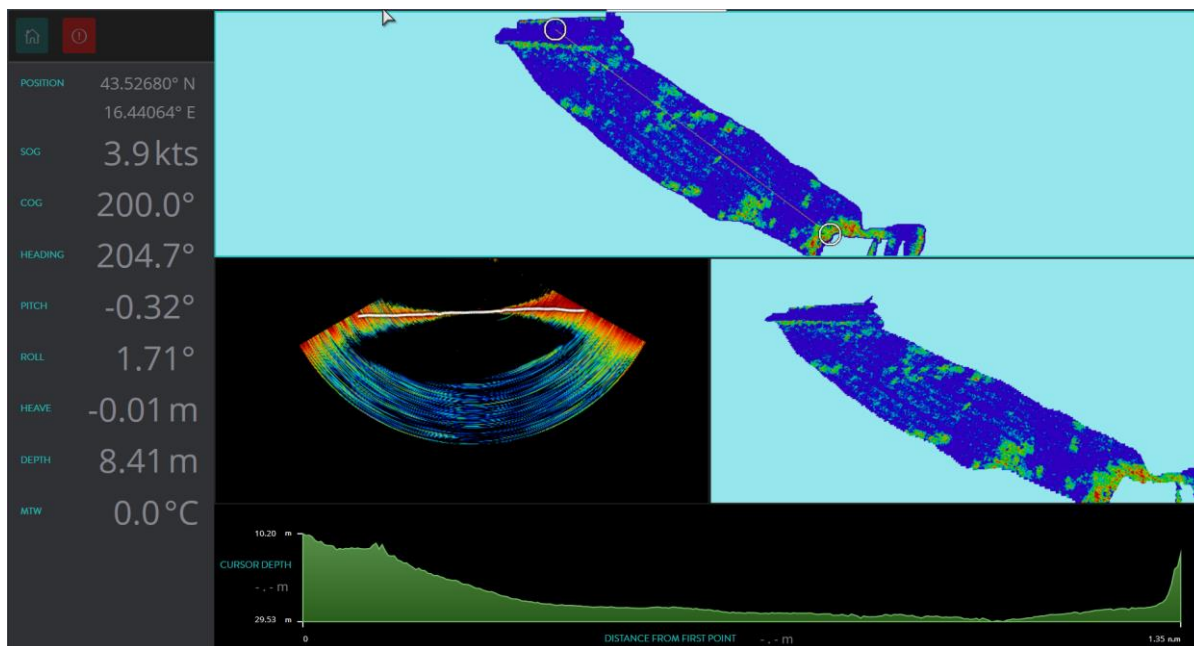
Slika I-42. Kriteriji za izradu karte tvrdoće dna

Kombinacija prikupljenih podataka o dubini i tvrdoći dna omogućuje izradu vrlo detaljnih 3D prikaza dna. Podatci za izradu modela dubina i tvrdoće prikupljeni su pomoću integralnog mjernog sustava višesnopni dubinomjer WASSP S3 i RTK-GPS uređaja (detaljan opis korištenih metoda, tehnika i procedura prilikom prikupljanja i obrade podataka je detaljno pojašnjen u poglavlju I. Batimetrijska i geodetska izmjera oko točka uzorkovanja sedimenata integralnim mjernim sustavom (multibeam, IMU, RTK-GPS).

Na slici I-43. je primjer snimljenog dna (dubina) testnog područja (3D, profil) s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3, dok je na slici I-44. prikazano kako uređaj kartira tvrdoću dna.



Slika I-43. Primjer snimljenog dna (dubina) testnog područja s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3



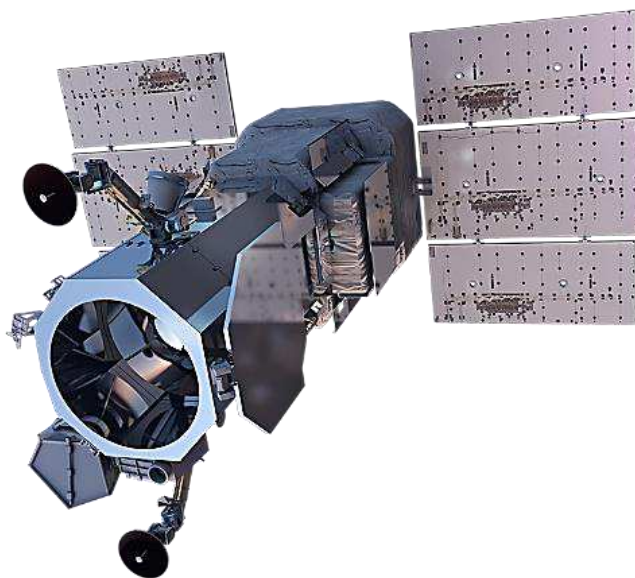
Slika I-44. Primjer snimljenog dna (tvrdoća) testnog područja s višesopnim dubinomjerom WASSP S3

Na slici I-45. prikazana je karta tvrdoće dna. Područja označena rozom bojom ukazuju na najtvrđe podvodne terene (dno) na kojima su zastupljene različite vrste stijena (rastresita i kompaktna stijenska podloga). Na slikama se jasno uočavaju hrid i nasuta obala zapadno od brodogradilišta Split. Područja označena tamnijom plavom bojom ukazuju na mekše podvodne terene na kojima je najzastupljeniji pijesak ili pijesak u kombinaciji s muljem. Treba napomenuti da na izlazne rezultate tvrdoće dna značajno utječe uz brojne korisničko definirane parametre i biljni pokrov koji se nalazi na morskom dnu.



Slika I-45. Karta tvrdoće testnog područja istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva

II. PRIKUPLJANJE I OBRADA STEREO SNIMAKA VISOKE REZOLUCIJE



Abstract

By modeling the purchased WV-3 multispectral stereo (OR2A) satellite images, the following wider space models were created:

- I. Digital area model (DMP) of a wider space representing the relief and all natural and anthropogenic surfaces located on it.
- II. Digital relief model (DMR) representing the bare surface of the relief without anthropogenic and natural elements.
- III. Normalized digital surface model (nDMP) that represents a raster display of the heights of all aboveground anthropogenic and natural objects in space

The developed models cover a wider area of about 100 km oko, which enabled the study of hydrological characteristics and potential terrestrial threats in the entire wider area related to the eastern part of Kaštela Bay.

Sažetak

Modeliranjem kupljenih WV-3 multispektralnih stereo (OR2A) satelitskih snimaka izrađeni sljedeći modeli šireg prostora:

- I. Digitalni model površina (DMP) šireg prostora koji reprezentira reljef i sve prirodne i antropogene površine koje se nalaze na njemu.
- II. Digitalni model reljefa (DMR) koji reprezentira голу površinu reljefa bez antropogenih i prirodnih elemenata.
- III. Normalizirani digitalni model površina (nDMP) koji predstavlja rasterski prikaz visina svih nadzemnih antropogenih i prirodnih objekata u prostoru

Izrađeni modeli šireg prostora pokrivaju površinu od oko 100 km², što je omogućilo proučavanje hidroloških karakteristika i potencijalnih kopnenih ugroza na čitavom širem prostoru vezanom za istočni dio Kaštelanskog zaljeva.

a) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 60 cm

Worldview-3 satelitski snimci

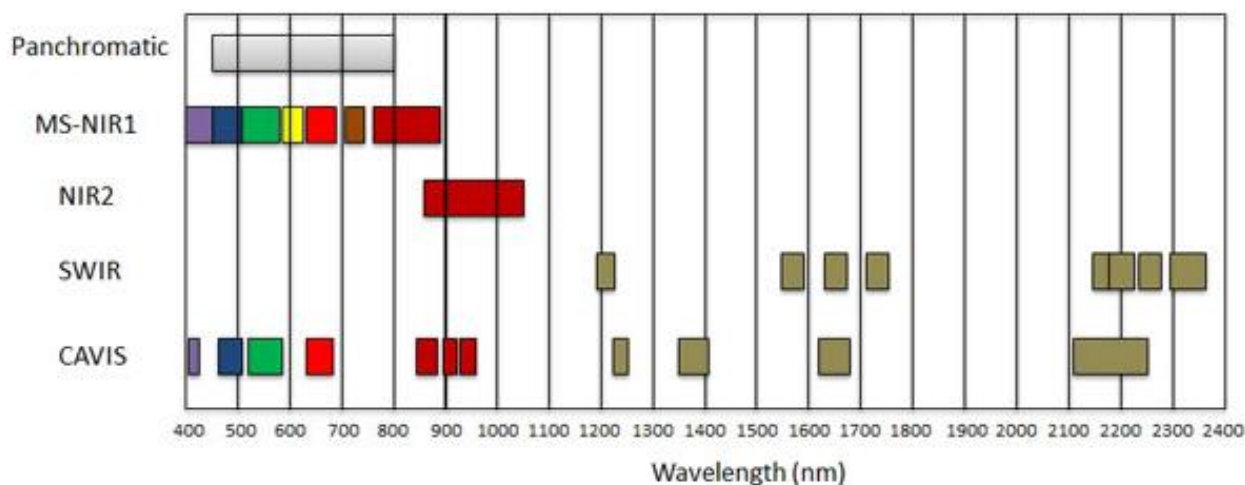
WorldView-3 (u nastavku WV-3) satelitske snimke prikuplja komercijalni multispektralni Worldview-3 satelit lansiran 13. kolovoza 2014. godine. Trenutačno WV-3 satelit predstavlja najmoderniji komercijalni satelit iz DigitalGlobe konstelacije (Slika II-1.) s najvećim rasponom multispektralnih kanala. Osim pankromatskog kanala prostorne rezolucije 0.31 m, WV-3 satelit prikuplja 8 multispektralnih kanala iz vidljivog i bliskog infracrvenog dijela spektra, prostorne rezolucije 1.24 m, 8 kanala prostorne rezolucije 3.70 m iz kratkovalnog infracrvenog (engl. *shortwave-infrared* (SWIR)) dijela spektra, te 12 CAVIS (engl. *Clouds, Aerosols, Water Vapor, Ice and Snow*) kanala prostorne rezolucije 30 m (Slika II-2.).



Slika II-1. Suvremeni komercijalni sateliti iz DigitalGlobe konstelacije

WV-3 satelit prikuplja snimke u kružnoj orbiti, sinkroniziranoj sa Suncem, unutar koje kruži oko Zemlje na visini od otprilike 617 km s ophodnim vremenom od 97 minute.

(Maxar, 2020c). Vremenska rezolucija iznosi 1 dan, dok vidno polje WV-3 satelita obuhvaća 112 km x 65.5 km kod mono snimaka te 112 km x 26.2 km kod stereo snimaka.



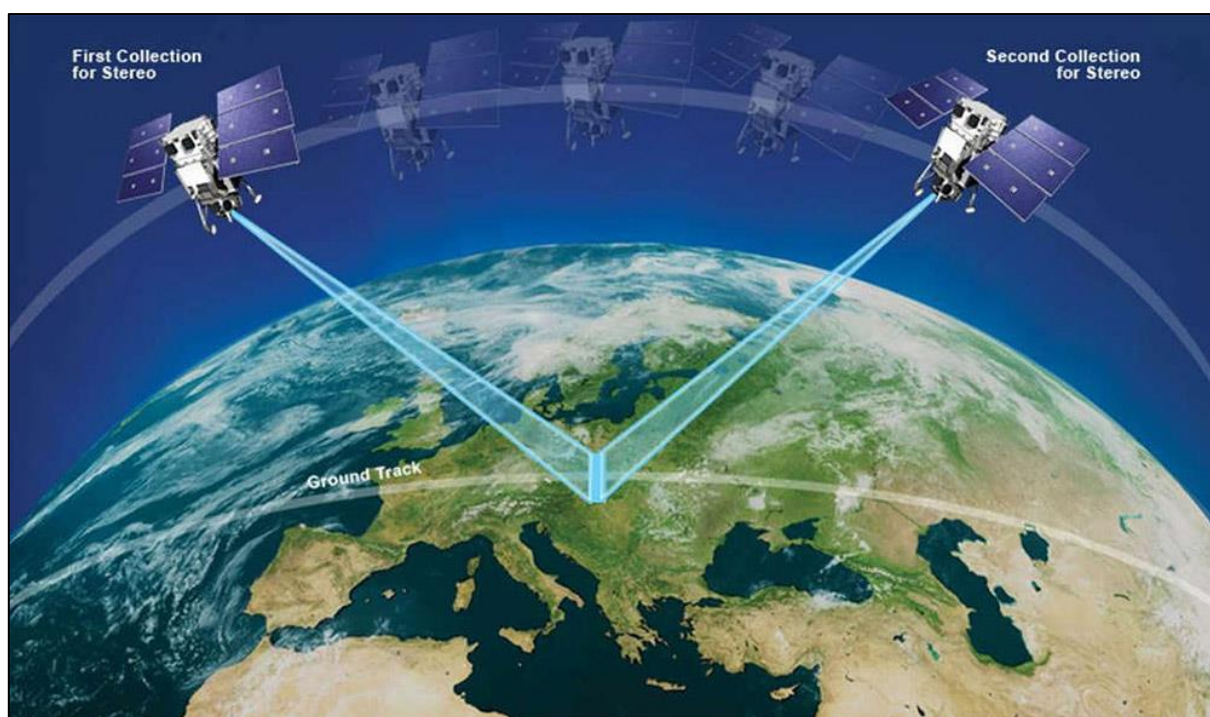
Slika II-2. Raspored multispektralnih kanala WV-3 satelita unutar spektra elektromagnetskog zračenja

WorldView satelitski snimci isporučuju se, ovisno o primijenjenoj predobradi i korekcijama, u sljedećih 6 različitih osnovnih tipova proizvoda: osnovni snimci (engl. *Basic 1B Imagery*) (1), osnovni stereo snimci (engl. *Basic (1B) Stereo Imagery*) (2), standardni snimci (engl. *Standard 2A Imagery*) (3), orthoready snimci (engl. *OrthoReady (OR2A) Imagery*) (4), orthoready stereo snimci (engl. *OrthoReady Stereo (OR2A Stereo) Imagery*) (5) te ortorektificirani snimci (engl. *Orthorectified imagery*) (6) (DigitalGlobe, 2010b). Osnovni (1B) snimci (1) predstavljaju osnovni satelitski proizvod sa minimalnom primijenjenom predobradom, koja uključuje tek ispravke radiometrijskih i optičkih distorzija te distorzija uzrokovanih unutrašnjom geometrijom senzora. Za razliku od ostalih, naprednijih tipova satelitskih snimaka 1B snimci nisu georeferencirani, te su zbog toga pogodni za sofisticiranu daljnju predobradu, ali i za korištenje u kompleksnim znanstvenim istraživanjima (DigitalGlobe, 2010b). Osnovni (1B) stereo snimci (2) predstavljaju stereo-par osnovnih satelitskih snimaka prikupljenih unutar iste orbite, pri čemu kut prikupljanja snimaka omogućava snimanje istog područja sa dvije različite pozicije sa stopostotnim preklapanjem i vrlo malim vremenskim intervalom između dva prikupljena snimka (Slika II-3.). Zahvaljujući ovakvom prikupljanju stereo snimci su pogodni za daljnju stereorestituciju i izradu detaljnih DMP-ova visoke rezolucije (DigitalGlobe, 2010b).

Standardni (Standard 2A) snimci (3) također uključuju ispravke radiometrijskih i senzorski uzrokovanih distorzija, ali su za razliku od osnovnih snimaka georeferencirani uz pomoć određene korisničko definirane geografske projekcije. Standardni (2A) snimci se isporučuju u poprečnom Mercatorovom rešetkastom projekcijskom koordinatnom sustavu (engl. Universal Transverse Mercator (UTM)) zasnovanom na WGS84 geodetskom datumu. Za razliku od ostalih tipova satelitskih snimaka standardni 2A snimci dolaze s već primijenjenom topografskom korekcijom, zasnovanom na primjeni DMR-a sitnijeg

mjerila za normalizaciju utjecaja reljefa na prikupljene satelitske snimke (DigitalGlobe, 2010b). Iako je na ovakvim snimcima primijenjena topografska korekcija, oni se ne smatraju ortorektificiranim, prvenstveno jer je zbog niske rezolucije intenzitet normalizacije vrlo slab. Također, s obzirom da je na ovakvim snimcima već primijenjena topografska korekcija oni nisu pogodni za daljnju ortorektifikaciju od strane korisnika (Cheng & Chaapel, 2010.).

OrthoReady (OR2A) satelitski snimci (4) sadrže sve značajke kao i Standardni (2A) snimci, međutim nemaju primijenjenu topografsku korekciju zasnovanu na DMR-u sitnog mjerila. Zbog toga su OR2A satelitski snimci pogodni za daljnju obradu i ortorektifikaciju uz pomoć korisničko definiranog DMP-a visoke rezolucije (DigitalGlobe, 2010b). OR2A satelitski snimci su projicirani na konstantnu visinsku bazu, koja je izračunata kao prosjek visine terena unutar određenog poligona (DigitalGlobe, 2010b). Drugi oblik OR2A snimaka su stereo OR2A snimci (5), koji su pogodni za daljnju stereorestituciju i izradu detaljnog digitalnog modela površina. Prednost stereo OR2A snimaka je mogućnost prvo izrade digitalnog modela površina visoke rezolucije, kojega se zatim može koristiti za ortorektifikaciju multispektralnog WV snimka.



Slika II-3. Princip prikupljanja stereo satelitskih snimaka in-track metodom

Ortorektificirani snimci (6) predstavljaju krajnji, najviše obrađeni tip satelitskih snimaka, koji uz sve ostale, ranije napomenute dijelove procesa predobrade, uključuje i ortorektifikaciju (DigitalGlobe, 2010b).

Kako je za širi prostor istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva planirana izrada ortorektificiranog multispektralnog snimka i digitalnog modela reljefa (DMR) vrlo visoke rezolucije, odlučeno je da će se nabaviti orthoready stereo (OR2A) satelitski WV-3 podaci. S obzirom da su unutar arhive DigitalGlobe satelitskih snimaka dostupni snimci snimljeni tijekom 2019. godine, zaključeno je da naručivanje novog snimanja područja istraživanja nije potrebno. Naime, cijena novog snimanja satelitima Worldview konstelacije znatno nadilazi cijenu arhivskih snimaka. Unutar arhive bilo je dostupno nekoliko snimaka (WV-2 i WV-3) koji su obuhvaćali šire područje Kaštelanskog zaljeva, zbog čega su odabrani oni recentni snimci koji su imali optimalan kut odstupanja od nadira (engl. off-nadir) i minimalnu pokrivenost oblacima. Tehničke specifikacije kupljenih WV-3 satelitskih snimaka vrlo visoke rezolucije dane su u tablici II-1.

Tablica II-1. Pregled specifikacija kupljenih satelitskih snimaka vrlo visoke rezolucije

ID	Tip snimka	Satelit	Spektralni kanali	Prostorna rezolucija	Točnost (CE90 ¹⁰ /LE90 ¹¹)	Cijena (\$/km ²) ¹²
1.	OR2A Stereo	WV-3	PAN	0.3 m	5 m	19
2.	OR2A Stereo	WV-3	8 MS	1.2 m	5 m	24
CIJENA (\$/km ²)						43

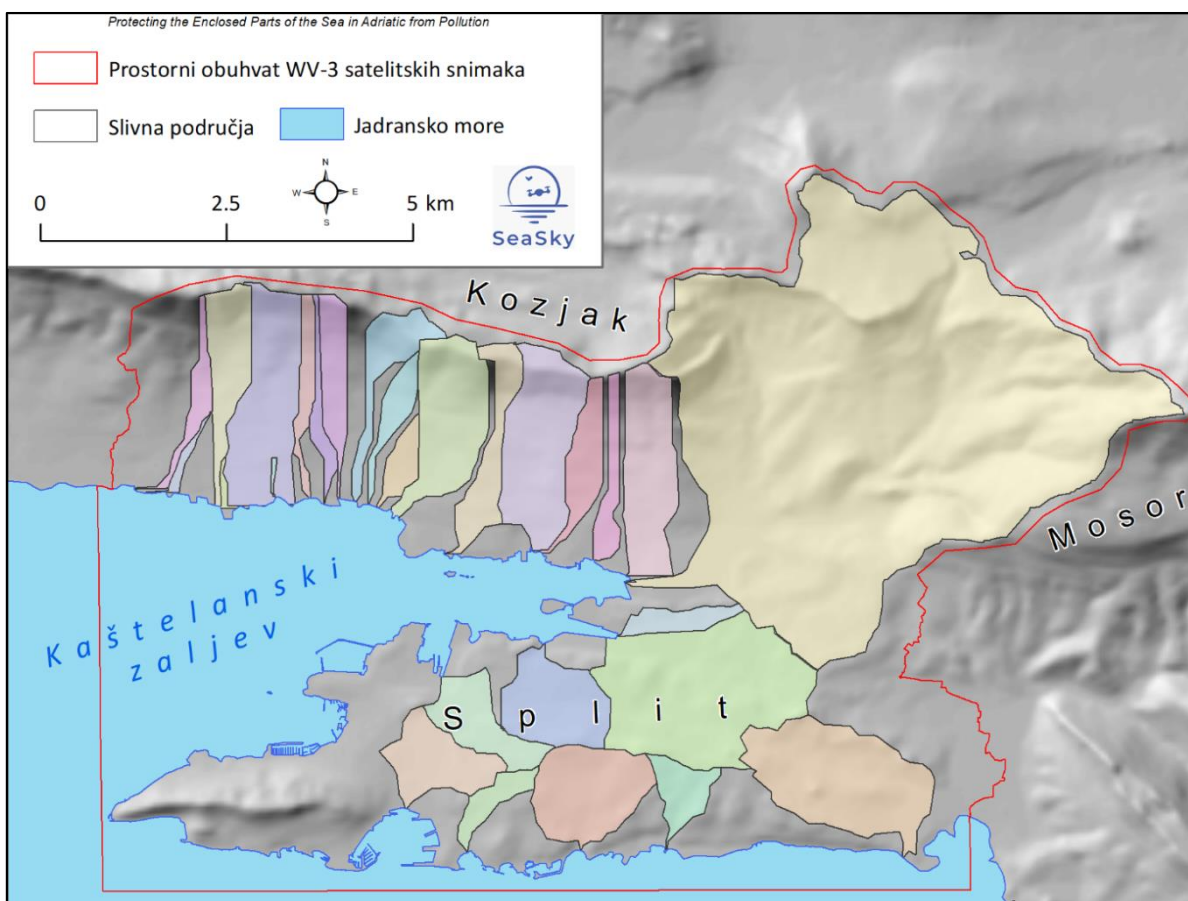
¹⁰ LE90 – devedeset postotna linearna pogreška, gdje najmanje 90% svih vertikalnih pogrešaka spada unutar navedene LE90 vrijednosti.

¹¹ CE90 predstavlja kružnu pogrešku na 90 percentila, što znači da najmanje 90% svih izmjerenih točaka ima manju pogrešku od navedene vrijednosti.

¹² Vrijednost snimaka je izražene prema cjeniku tvrtke European Space Imaging za arhivske satelitske snimke (<https://www.euspaceimaging.com>)

Definiranje prostornog obuhvata satelitskih snimaka

Prije naručivanja WV-3 satelitskih snimaka bilo je potrebno prvo definirati područje za koje će se naručiti snimci. Da bi se mogle provesti različite morfometrijske i hidrološke analize, te detekcija određenih kopnenih ugroza i onečišćivača mora bilo je potrebno napraviti modele za znatno šire kopneno područje, koje obuhvaća sva slivna područja vezana za istočni dio Kaštelanskog zaljeva. Zbog toga su prije naručivanja snimaka iz besplatno dostupnog DMR-a prostorne rezolucije 30 m (EUDEM, 2020.) izdvojena sva slivna područja vezana za istočni dio Kaštelanskog zaljeva (Slika II-4.). Slivna područja su izdvojena uz pomoć alata (*Fill, Flow Direction, Flow Accumulation, Watershed*) iz *Hydrology* seta alata *Spatial Analyst* ekstenzije ArcGIS 10.1 softvera.



Slika II-4. Prostorni obuhvat kupljenih WV-3 satelitskih snimaka određene prema slivnim područjima istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva

Obrada WV-3 stereo satelitskih snimaka

Kupljeni OR2A stereo snimci prikupljeni su WV-3 satelitom 27.04.2018. godine između 10:25:10 i 10:26:28 h. Detaljan pregled specifikacija kupljenih stereo WV snimaka dan je u tablici 2.

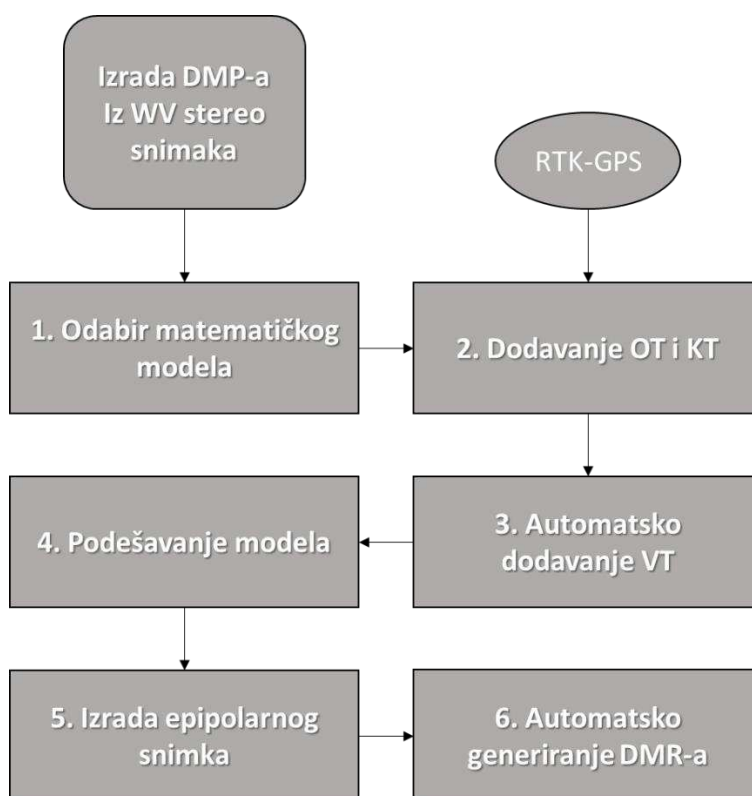
Tablica II-2. Specifikacije ustupljenih stereo WV satelitskih snimaka

ID	Stereo par	Tip snimka	Datum prikupljanja	Vrijeme prikupljanja	Off-NADIR (°)	Pokrivenost oblacima (%)
1	WV3-A	Stereo OR2A	27.04.2018.	10:25:10	25.1	0
2	WV3-B	Stereo OR2A	27.04.2018.	10:26:28	29.8	0
ID	Položaj snimanja	Azimet sunca (°)	Visina sunca (°)	DMR korekcija	GSD (PAN)	GSD (MS)
1	Forward	333.9	62.4	Base	0.3	1.2
2	Backward	225.8	55.6	Base	0.3	1.2

Svi korišteni stereo snimci su OR2A Stereo tipa, što ih čini pogodnim za daljnju stereorestitucijsku obradu, koja je detaljno pojašnjena u nastavku.

Izrada digitalnog modela površina

DMP šireg prostora napravljen je iz ustupljenih WV-3 stereo snimaka u *OrthoEngine 2018* ekstenziji *Geomatica 2018* softvera. Cijeli proces izrade DMP-a u OrthoEngine ekstenziji može se podijeliti u sljedeće korake: odabir matematičkog modela (1), dodavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka potrebnih za orijentaciju stereo snimaka (2), automatsko dodavanje veznih točaka (3), podešavanje modela (engl. *bundle adjustment*) (4), izrada epipolarnog snimka (5), automatska izrada DMP-a (6) te ručna filtracija pogrešaka (7) (Slika II-5.).



Slika II-5. Koraci izrade DMP-a iz WV stereo snimaka uz pomoć Orthoengine ekstenzije

Odabir odgovarajućeg matematičkog modela (1)

Prvi korak izrade DMP-a uključuje odabir odgovarajućeg matematičkog modela (1) koji služi kao matematička osnova za korelaciju dvodimenzionalnih (2D) piksela stereo snimaka sa točnim trodimenzionalnim (3D) lokacijama (X,Y,Z) na Zemljinoj površini (Barazzetti et al., 2016.). Za odgovarajući matematički model odabrano je *optičko satelitsko modeliranje* (engl. *Optical Satellite modeling*) zasnovano na ustupljenim racionalnim polinomnim koeficijentima (engl. *rational polynomial coefficients* (RPC)) i nultim polinomnim podešavanjem (engl. *zero-order polynomial adjustment*), kao jednim od najčešće korištenih matematičkih modela za izradu DMP-a iz WV stereo snimaka (Aguilar et al., 2013; Aguilar et al., 2019; Goldbergs et al., 2019.).

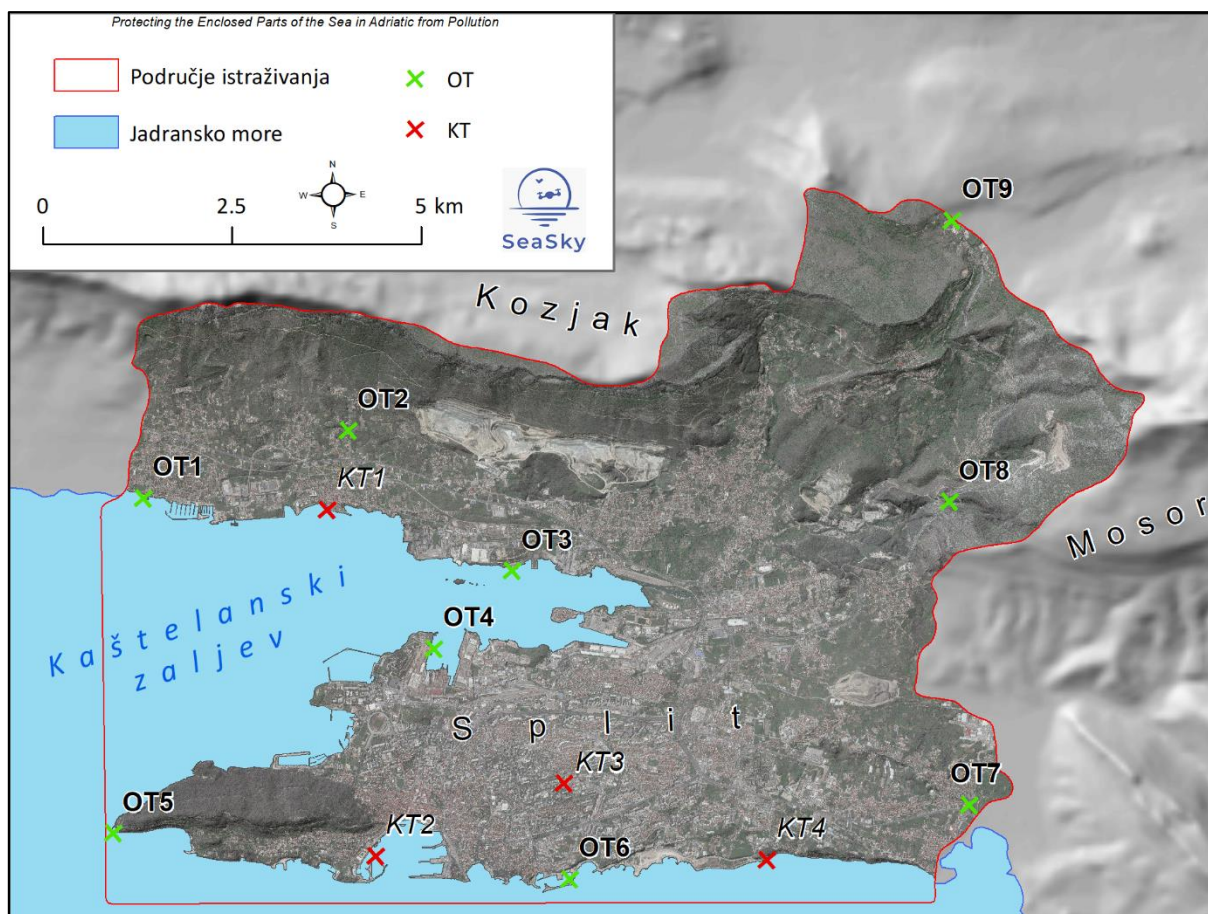
Dodavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka (2)

Da bi se napravio DMP visoke točnosti potrebno je uz ustupljene RPC dodati i integrirati orijentacijske i kontrolne točke (2), čije precizne koordinate su prikupljene na terenu *real-time kinematic* (RTK) GPS-om. Orijetacijske točke (OT) (engl. *ground control pointsd – GCPs*) služe za poboljšanje sveukupne točnosti georeferenciranja stereo snimaka, kroz sistematsku kompenzaciju RPC uzrokovanih pogrešaka (Aguilar et al., 2013; Goldbergs et al., 2019.). Za razliku od OT koje se koriste za izračun matematičkog modela, kontrolne točke (KT) (engl. *Check points – CPs*) služe za provjeru točnosti izrađenog modela, pri čemu algoritam provjerava odstupanje između pozicije KT i odgovarajuće pozicije na izrađenom modelu (PCI Geomatics Enterprises, 2018.).



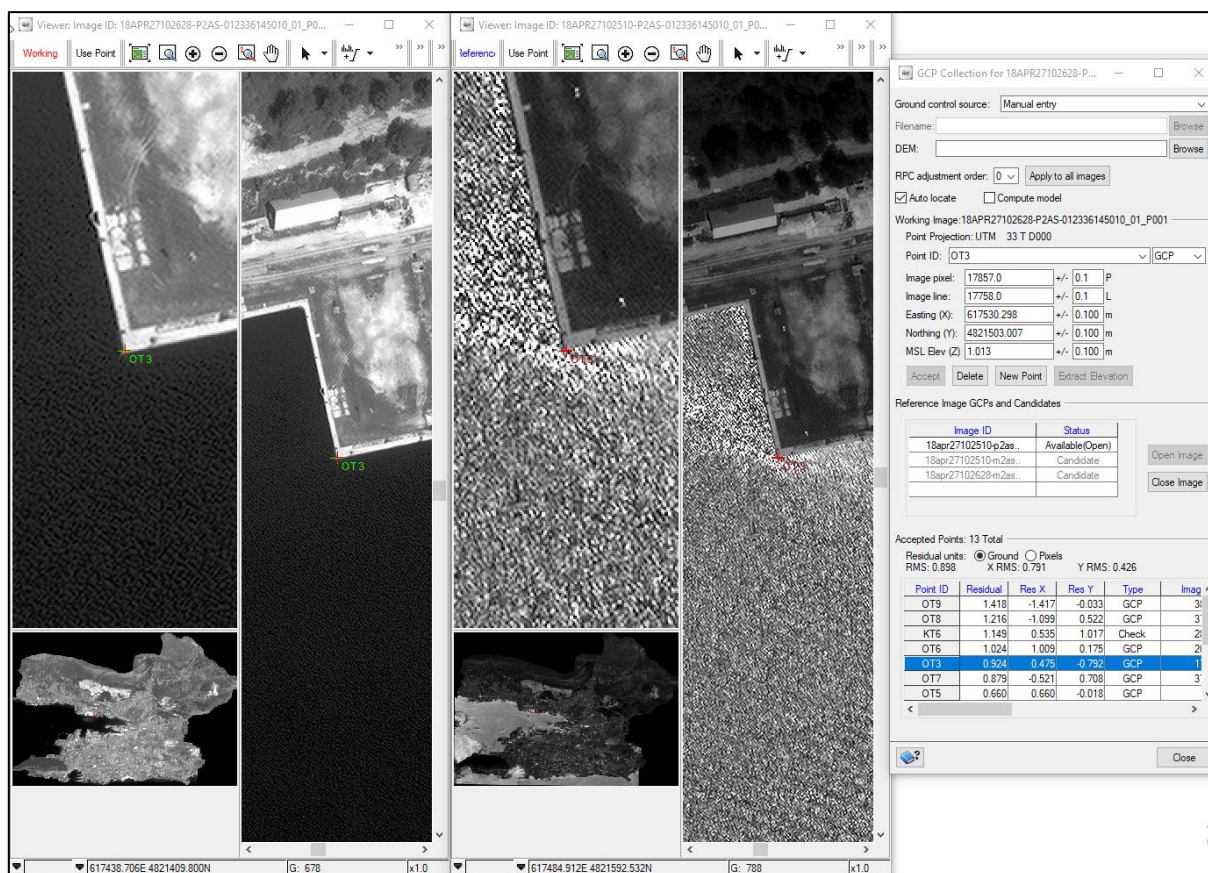
Slika II-6. Terensko prikupljanje OT i KT sa Stonex S10 RTK GPS-om

Prije terenskog prikupljanja, odabrane su optimalne lokacije za OT i KT na WV stereo snimcima, koje pretežito čine različite specifične oznake (Slika II-6. - lijevo) i od ranije postojeće geodetske oznake (Slika II-6. - desno). Specifične oznake predstavljaju različite elemente krajolika koje je moguće jednostavno i precizno izdvojiti u prostoru, a vidljivi su i prepoznatljivi i na WV stereo snimcima. Uglavnom su kao prepoznatljive specifične oznake korišteni različiti antropogeni elementi krajolika (npr. cestovne oznake, ribarski molovi, kontrasti u asfaltu, itd.) koje je bilo moguće detektirati na WV snimcima te kasnije pronaći i prikupiti precizne XYZ koordinate na terenu. Terensko prikupljanje OT i KT izvršeno je 12. svibnja 2020. godine sa Stonex S10 RTK GPS-om, pri čemu su ukupno prikupljene precizne XYZ koordinate na 13 različitih lokacija, raspodijeljene unutar cijelog prostora istraživanja (Slika II-7.).



Slika II-7. Prostorni raspored korištenih WV-3 snimaka i prikupljenih RTK-GPS podataka (OT/KT)

Ukupno je prikupljeno i ručno dodano (Slika II-8.) 13 OT, čime su zadovoljene preporuke dane u istraživanjima koja su proučavala optimalan raspored i broj OT za izradu točnih modela iz WV stereo snimaka (Aguilar i dr., 2013.). U tablicama II-3. i II-4. dan je pregled RMSE za korištene OT i KT za cijeli izrađeni DMP. Prosječna vrijednosti RMSE za izrađeni DMP iznosi 0.567 m za OT i 0.491 m za KT, što je u skladu sa vrijednostima navedenim u sličnim istraživanjima (Aguilar i dr., 2013).

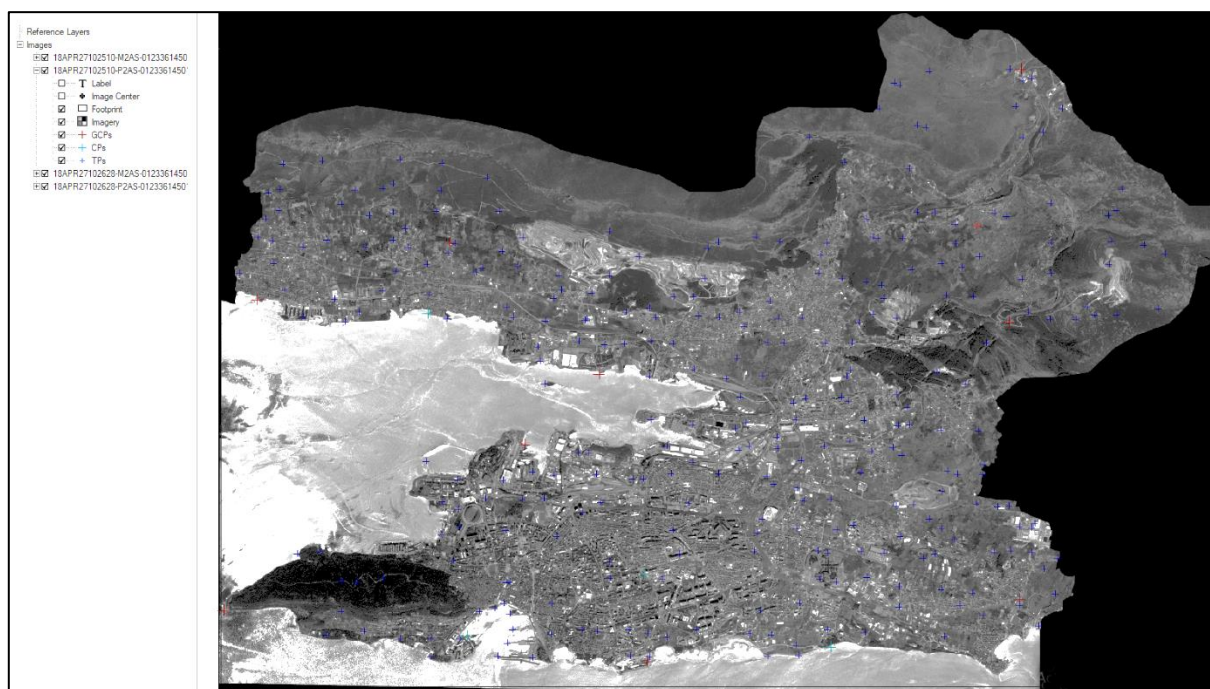


Slika II-8. Ručno prikupljanje OT na stereo satelitskim snimcima

Automatsko dodavanje veznih točaka (3)

Nakon dodavanja OT i KT uslijedilo je automatsko dodavanje veznih točaka (engl. *tie points (VTs)*), referentnih točaka, koje je moguće jasno detektirati na dva ili više snimka, a služe sveukupnom poboljšavanju međusobnog poravnanja stereo snimaka (PCI Geomatics Enterprises, 2018.). Za razliku od OT i KT, vezne točke nemaju poznate XYZ koordinate, već služe za poboljšanje georeferenciranja snimaka u područjima gdje OT nisu dostupne.

Zahvaljujući implementiranim algoritmima za korelaciju piksela stereo snimaka, Orthoengine omogućava automatsko prikupljanje velikog broja veznih točaka (PCI Geomatics Enterprises, 2018.). Pri tome algoritam za korelaciju snimaka koristi hijerarhijski pristup za pronalaženje odgovarajućih veznih točaka na dva ili više stereo snimka. Automatsko prikupljanje veznih točaka izvršeno je unutar preklopa zadanih stereo snimaka, pri čemu su korišteni sljedeći korisničko definirani parametri: *Fast Fourier Transfer Phase (FFTP) metoda korelacije snimaka*.



Slika II-9. Prostorni raspored automatski prikupljenih veznih točaka (plave oznake)

U konačnici je ukupno prikupljeno 325 veznih točaka. Nakon što su VT automatski prikupljene, uklonjeno je nekoliko desetaka točaka sa najvećim vrijednostima RMSE. Ove točke odnosile su se pretežito na pokretne točke (npr. automobili, brodice, itd.), koje je algoritam za automatsko prepoznavanje točno detektirao na dva snimka, ali se lokacija ovih točaka u međuvremenu promijenila. Prostorna distribucija prikupljenih VT vidljiv je na slici II-9.

Tablica II-3. Srednja kvadratna pogreška za OT korištene u izradi DMP-a

ID	Naziv	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	MEAN RMSE (m)
1	OT1	0.022	0.078	0.102	0.067333
2	OT2	0.277	0.464	1.576	0.772333
3	OT3	0.537	0.842	0.372	0.583667
4	OT4	0.621	0.029	1.259	0.636333
5	OT5	0.697	0.019	0.111	0.275667
6	OT6	1.071	0.181	0.235	0.495667
7	OT7	0.543	0.729	0.44	0.570667
8	OT8	1.32	0.574	0.515	0.803
9	OT9	1.364	0.052	1.288	0.901333
UKUPNO		0.716889	0.329777778	0.655333	0.567333

Tablica II-4. Srednja kvadratna pogreška za KT korištene u izradi DMP-a

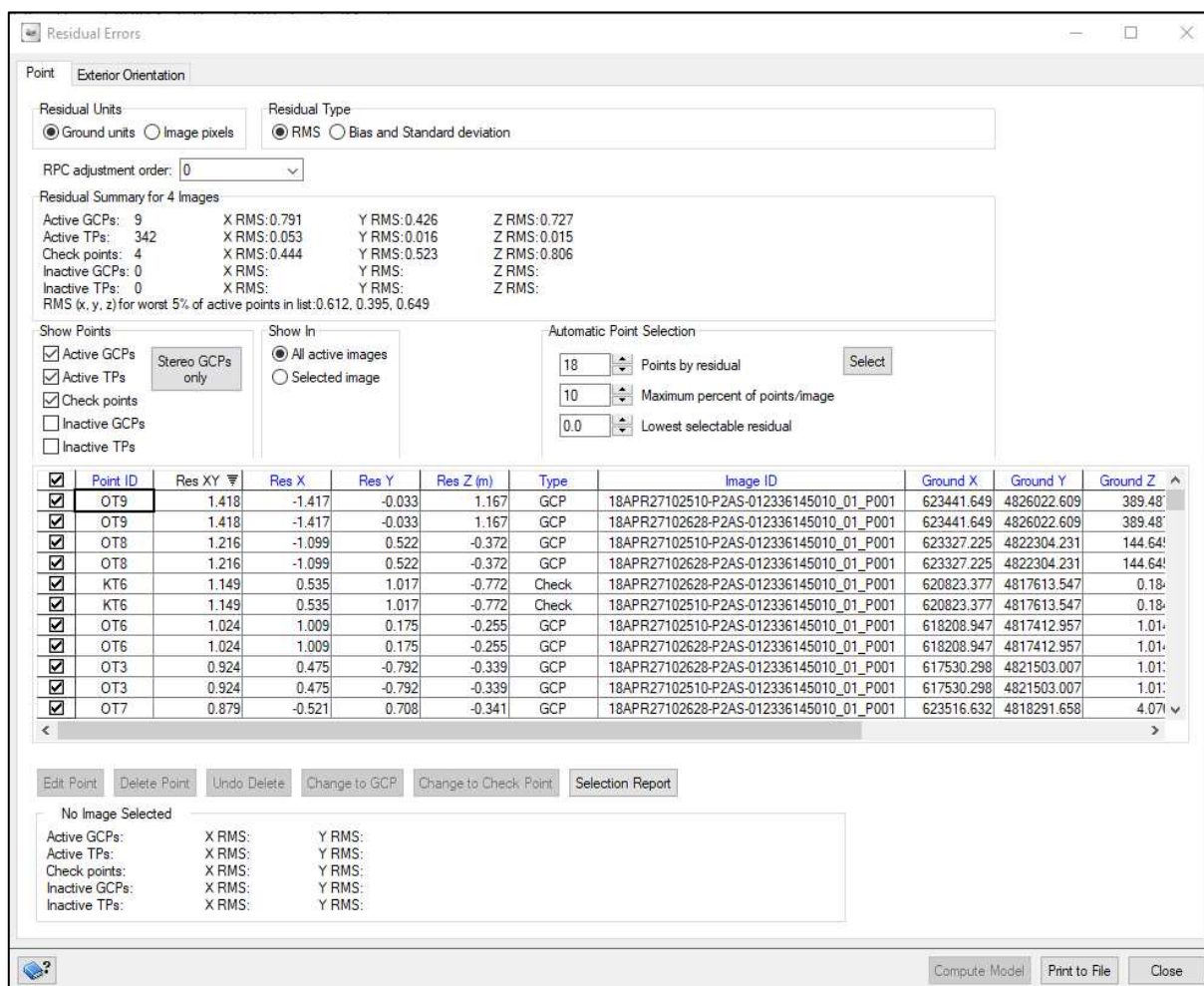
ID	Naziv	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	MEAN RMSE (m)
1	KT1	0.048	0.191	0.289	0.176
2	KT2	0.463	0.134	0.435	0.344
3	KT3	0.586	0.088	1.315	0.663
4	KT4	0.561	1.01	0.772	0.781
UKUPNO		0.4145	0.35575	0.70275	0.491

Tablica II-5. Prosječna srednja kvadratna pogreška za korištene OT, KT i VT

Tip točke	N_0	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)	MEAN RMSE (m)
OT	9	0.716	0.329	0.655	0.567
KT	4	0.4145	0.35575	0.70275	0.491
VT	325	0.051	0.016	0.015	0.027
UKUPNO	338	0.394	0.234	0.458	0.362

Podešavanje modela (4)

Nakon ručnog dodavanja OT i KT te automatskog povezivanja VT slijedi podešavanje modela (engl. bundle adjustment). U ovom koraku dodane OT se koriste, zajedno sa geometrijom senzora generiranom iz ustupljenih RPC koeficijenata, za izračun točne pozicije satelita za vrijeme prikupljanja satelitskih snimaka.



Residual Errors

Point Exterior Orientation

Residual Units: Ground units Image pixels

Residual Type: RMS Bias and Standard deviation

RPC adjustment order: 0

Residual Summary for 4 Images:

Active GCPs: 9	X RMS: 0.791	Y RMS: 0.426	Z RMS: 0.727
Active TPs: 342	X RMS: 0.053	Y RMS: 0.016	Z RMS: 0.015
Check points: 4	X RMS: 0.444	Y RMS: 0.523	Z RMS: 0.806
Inactive GCPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:
Inactive TPs: 0	X RMS:	Y RMS:	Z RMS:

RMS (x, y, z) for worst 5% of active points in list: 0.612, 0.395, 0.649

Show Points: Active GCPs Active TPs Check points Inactive GCPs Inactive TPs

Automatic Point Selection: All active images Selected image

Points by residual: 18
Maximum percent of points/image: 10
Lowest selectable residual: 0.0

<input checked="" type="checkbox"/>	Point ID	Res XY	Res X	Res Y	Res Z (m)	Type	Image ID	Ground X	Ground Y	Ground Z
<input checked="" type="checkbox"/>	OT9	1.418	-1.417	-0.033	1.167	GCP	18APR27102510-P2AS-012336145010_01_P001	623441.649	4826022.609	389.48
<input checked="" type="checkbox"/>	OT9	1.418	-1.417	-0.033	1.167	GCP	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	623441.649	4826022.609	389.48
<input checked="" type="checkbox"/>	OT8	1.216	-1.099	0.522	-0.372	GCP	18APR27102510-P2AS-012336145010_01_P001	623327.225	4822304.231	144.64
<input checked="" type="checkbox"/>	OT8	1.216	-1.099	0.522	-0.372	GCP	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	623327.225	4822304.231	144.64
<input checked="" type="checkbox"/>	KT6	1.149	0.535	1.017	-0.772	Check	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	620823.377	4817613.547	0.18
<input checked="" type="checkbox"/>	KT6	1.149	0.535	1.017	-0.772	Check	18APR27102510-P2AS-012336145010_01_P001	620823.377	4817613.547	0.18
<input checked="" type="checkbox"/>	OT6	1.024	1.009	0.175	-0.255	GCP	18APR27102510-P2AS-012336145010_01_P001	618208.947	4817412.957	1.01
<input checked="" type="checkbox"/>	OT6	1.024	1.009	0.175	-0.255	GCP	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	618208.947	4817412.957	1.01
<input checked="" type="checkbox"/>	OT3	0.924	0.475	-0.792	-0.339	GCP	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	617530.298	4821503.007	1.01
<input checked="" type="checkbox"/>	OT3	0.924	0.475	-0.792	-0.339	GCP	18APR27102510-P2AS-012336145010_01_P001	617530.298	4821503.007	1.01
<input checked="" type="checkbox"/>	OT7	0.879	-0.521	0.708	-0.341	GCP	18APR27102628-P2AS-012336145010_01_P001	623516.632	4818291.658	4.071

Edit Point Delete Point Undo Delete Change to GCP Change to Check Point Selection Report

No Image Selected

Active GCPs:	X RMS:	Y RMS:
Active TPs:	X RMS:	Y RMS:
Check points:	X RMS:	Y RMS:
Inactive GCPs:	X RMS:	Y RMS:
Inactive TPs:	X RMS:	Y RMS:

Compute Model Print to File Close

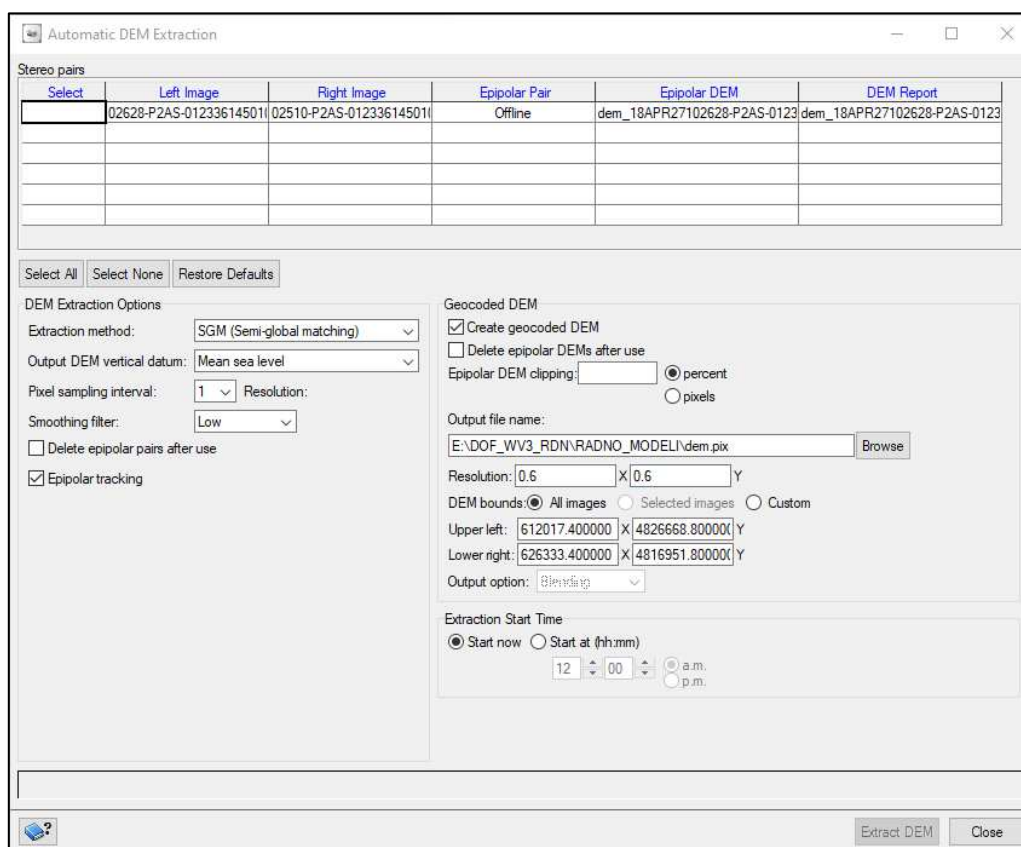
Slika II-10. Srednja kvadratna pogreška u OT, KT i VT nakon podešavanja modela

Izrada epipolarnog snimka (5)

Sljedeći korak obuhvaća izradu epipolarnog snimka (engl. *epipolar image*) (4), koja reprezentira stereo par snimaka, kod kojega su oba snimka reprojicirana tako da imaju zajedničku orijentaciju i distribuciju duž zajedničke x osi (PCI Geomatics Enterprises, 2018.). Na temelju izrađenog epipolarnog snimka moguće je započeti proces automatske izrade DMP-a.

Automatsko generiranje DMP-a (6)

Završni step izrade DMP-a u Orthoengine ekstenziji Geomatica softvera je automatsko generiranje DMP-a iz izrađenog epipolarnog snimka. Pri tome je korištena metoda polu globalnog generiranja (engl. *semi global matching*) DMP-a. Da bi se postigla maksimalna moguća prostorna rezolucija izrađenog DMP-a, interval prikupljanja piksela (engl. *pixel sampling interval*) je podešen na vrijednost 1. Time je korelacija stereo snimaka i izrada DMP-a izvršena sa maksimalnom rezolucijom snimaka, omogućavajući generiranje modela s detaljnim prikazom različitih elemenata DMP-a (npr. vegetacija, zgrade, prometnice, itd.) (PCI Geomatics Enterprises, 2018.).



Slika II-11. Korisničko-definirani parametri automatskog generiranja DMP-a

Izrada digitalnog modela reljefa

Za razliku od digitalnog modela reljefa (DMR), koji reprezentira visinu površine reljefa, izrađeni DMP reprezentira visinu svih prirodnih (npr. vegetacija) i antropogenih (npr. stambeni objekti, prometnice, industrijska postrojenja, itd.) površina, koje se nalaze na površini reljefa (Šiljeg, 2013). Za različite hidrološke i morfometrijske analize, koje će se provoditi u sklopu modeliranja erozije tla i poplavnog potencijala unutar šireg prostora, bitne su isključivo značajke površine reljefa. Zbog toga zadnji korak izrade konačnog modela šireg prostora obuhvaća generiranje digitalnog modela reljefa (DMR) šireg prostora, kroz korekciju i filtraciju izrađenog DMP-a.

Proces filtriranja DMP-a i izrade DMR-a može se podijeliti na *automatsku korekciju DMP-a u DMR* (1), *korekciju pogrešaka na vodenim površinama* (2) i *ručno filtriranje preostalih pogrešaka* (3). Automatska i ručna filtracija DMP-a i izrada DMR-a izvršeni su uz pomoć Geomatica 2018 softvera, dok je korekcija pogrešaka na vodenim površinama izvršena u ArcGIS 10.1 softveru.

Automatska konverzija DMP-a u DMR (1)

Prvi korak izrade DMR-a je automatska korekcija DMP-a u DMR, kojom se iz zadanog DMP-a automatski uklanja većina površina koje ne reprezentiraju površinu reljefa. Automatska korekcija DMP-a u DMR je unutar Geomatica 2018 softvera izvršena uz pomoć *DSM2DTM* algoritma, koji omogućava automatsku filtraciju DMP-a prema zadanim korisničko-definiranim parametrima. *DSM2DTM* algoritam automatski konvertira DMP u DMR primjenom niza filtracijskih koraka koji postupno uklanjaju antropogene i prirodne elemente te uglašavaju konačni model uklanjanjem preostalih nepravilnosti, poput udubljenja i ispupčenja, koje ne reprezentiraju površinu reljefa. Korisnik može kontrolirati proces konvertiranja DMP-a u DMR kroz definiranje različitih korisničko-definiranih parametara za svaki filter (npr. size – veličina, gradient – nagib, itd.). S obzirom da korisničko-definirani parametri *DSM2DTM* algoritma uvjetuju uspješnost automatske filtracije, potrebno ih je prilagoditi lokalnim značajkama reljefa odabranog područja. Detaljan prikaz odabranih korisničko-definiranih parametara dan je u tablici 6., dok je svaki pojedini parametar detaljnije pojašnjen u nastavku.

Tablica II-6. Parametri automatske filtracije DMP-a uz pomoć DSM2DTM algoritma

Parametar	Zadana vrijednost	Opis
Elevation failure value	0	Definira piksele u DMP-u koji će se zanemariti tijekom obrade i biti interpolirani.
Background elevation value	0	Definira vrijednost piksela bez podataka (No Data), koji će biti izuzeti tijekom obrade i kopirani u završni DMR.
Object removal dimension units	Geocoded	Definira mjernu jedinicu za parametar object size (m ili pix).
Object size	25	Veličina filtera koji se koristi za uklanjanje površina.
Gradient treshold	55	Značajke s nagibima manjim od ovog praga smatrat će se prirodnim značajkama i neće se uklanjati tijekom obrade.
Terrain type	Hilly	Određuje prevladavajući tip reljefa reprezentiranog na zadanom modelu.
Bump filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje filtere za uklanjanje izbočina preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih velikih značajki.
Pits filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje filtere za uklanjanje udubljenja preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih velikih značajki.
Median filter: <i>size (pixels)</i>	3	Definira intenzitet uglačavanja konačnog modela.
Clamp filter: <i>size, gradient</i>	5, 3	Fino uglačavanje - korigira sve piksele unutar zadanog područja do vrijednosti manje od prostorne rezolucije modela.

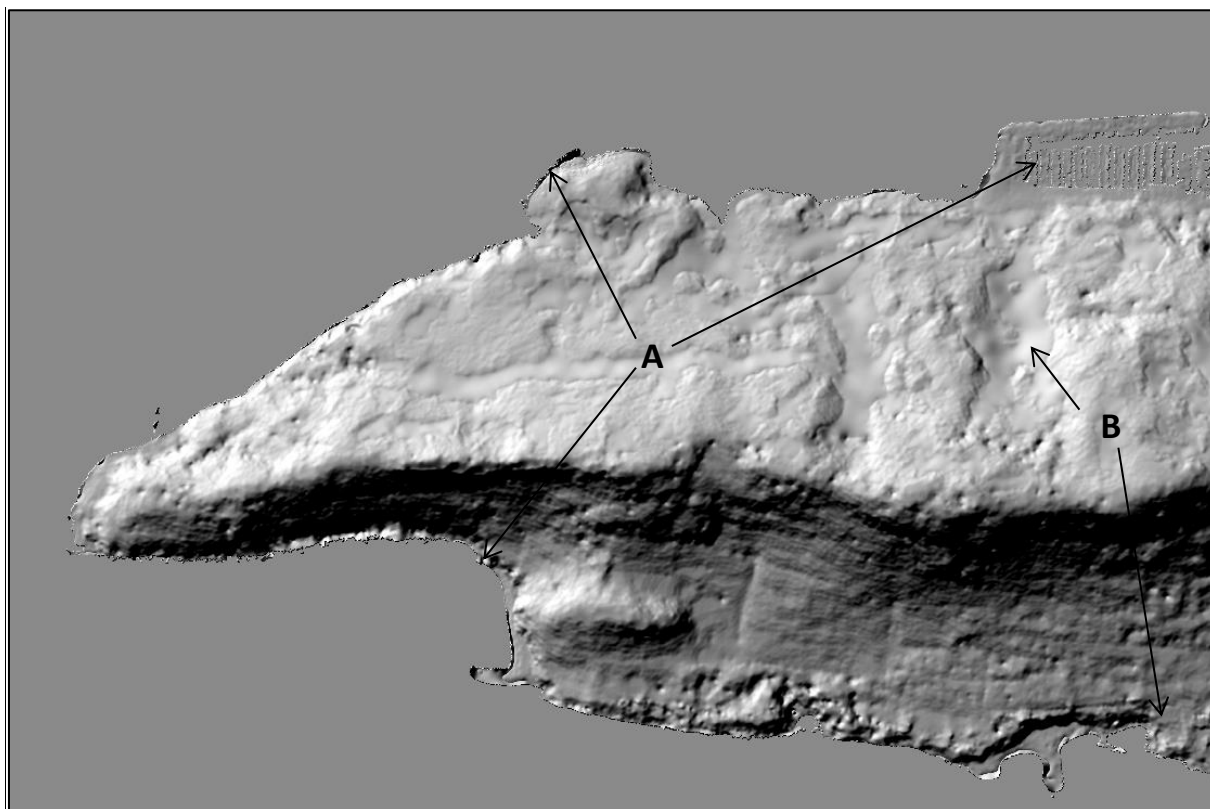
Iako širi prostor pretežito karakteriziraju blage uzvisine i padine, pojedine dijelove, poput strmijih padina Marjana, ili vršnih dijelova Kozjaka i Mosora, karakterizira znatno veća vertikalna raščlanjenost terena.

Zbog toga je bilo potrebno korisničko-definirane parametre korekcije DMP-a u DMR podesiti na način da uklone sve neželjene površine, a da pri tome ne devalviraju kvalitetu modela na vertikalno raščlanjenijim dijelovima reljefa.

Dva najvažnija korisničko-definirana parametra DSM2DTM algoritma su *veličina objekta (object size)* i *prag nagiba (gradient treshold)*. Veličina objekta definira dimenzije površina koje će biti uklonjene iz zadanog DMP-a, gdje se preporučuje da zadana vrijednost odgovara dimenzijama najvećih objekata (npr. zgrade, industrijska postrojenja), koje se želi ukloniti. Međutim, tako definirani parametar veličine objekta može utjecati na previše intenzivno filtriranje stvarne površine reljefa. U takvim slučajevima treba smanjiti vrijednost ovog parametra i prilagoditi ju prevladavajućoj veličini objekata koje se želi ukloniti. S obzirom da unutar šireg prostora istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva postoje različiti stambeni i industrijski objekti, heterogene strukture i dimenzija, nije bilo moguće podesiti parametar veličine objekta na jedinstvenu vrijednost koja bi automatski uklonila sve objekte. Također, ukoliko se podesi velika vrijednost parametra veličine objekta, DSM2DTM algoritam će ukloniti sve antropogene objekte, ali će i znatno devalvirati kvalitetu reljefnih formi u modelu. Posebice je takav slučaj primijećen

na prostoru golih padina Kozjaka i Mosora. Drugi parametar je prag nagiba, koji definira vrijednost nagiba ispod koje se sve padine smatraju prirodnima, te se kao takve izostavljaju iz procesa korekcije i filtracije. Kako bi se uklonili antropogeni objekti sa strmim, vertikalnim bočnim stranama, poput stambenih i industrijskih objekata, a sačuvala većina prirodnih padina, zadan je odgovarajući prag nagiba ($n = 55$).

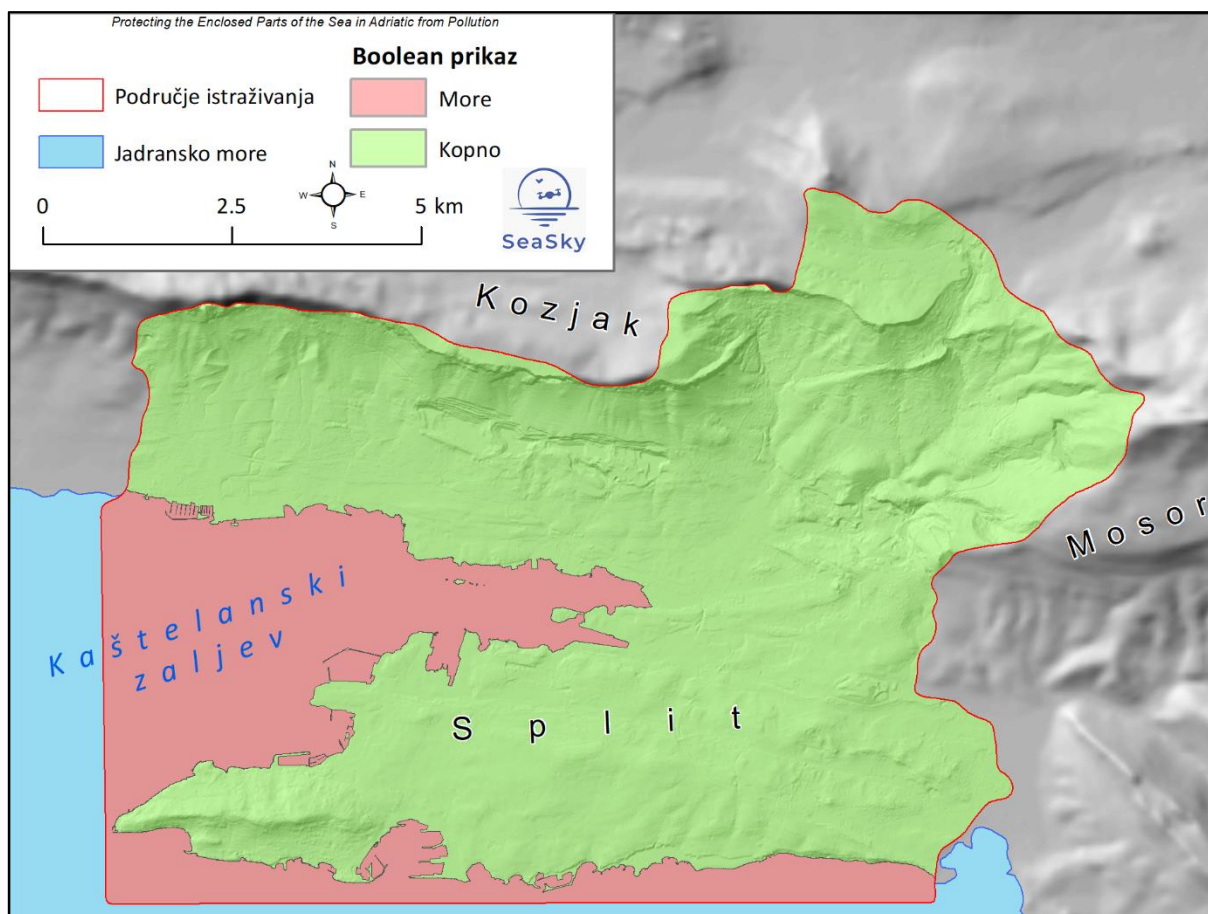
Na širem prostoru istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva zastupljeni različiti tipovi reljefa, od zaravnjenih priobalnih dijelova uz sami Kaštelanski zaljev, sve do strmih, gotovo vertikalnih litica južnih adina Mosora i Kozjaka. Zbog toga je zadan *hilly* prevladavajući tip reljefa, koji predstavlja prijelaz između zaravnjenog u planinski tip reljefa i koji najviše odgovara značajkama reljefa istraživanog područja. Filterima za uklanjanje preostalih nepravilnosti (*bump filter* i *pits filter*) i filteri za završno uglačavanje modela (*median filter* i *clamp filter*) zadane su odgovarajuće vrijednosti za iterativno uklanjanje nepravilnosti, od većih prema manjima. U konačnici je izrađen digitalni model reljefa, kojega je bilo potrebno dodatno popraviti kroz ručnu filtraciju (Slika II-12.). Najviše pogrešaka prisutno je na vodenim površinama, odnosno prostoru mora, te na mjestima uklonjenih većih objekata. Navedene pogreške uklonjene su u sljedeća dva koraka.



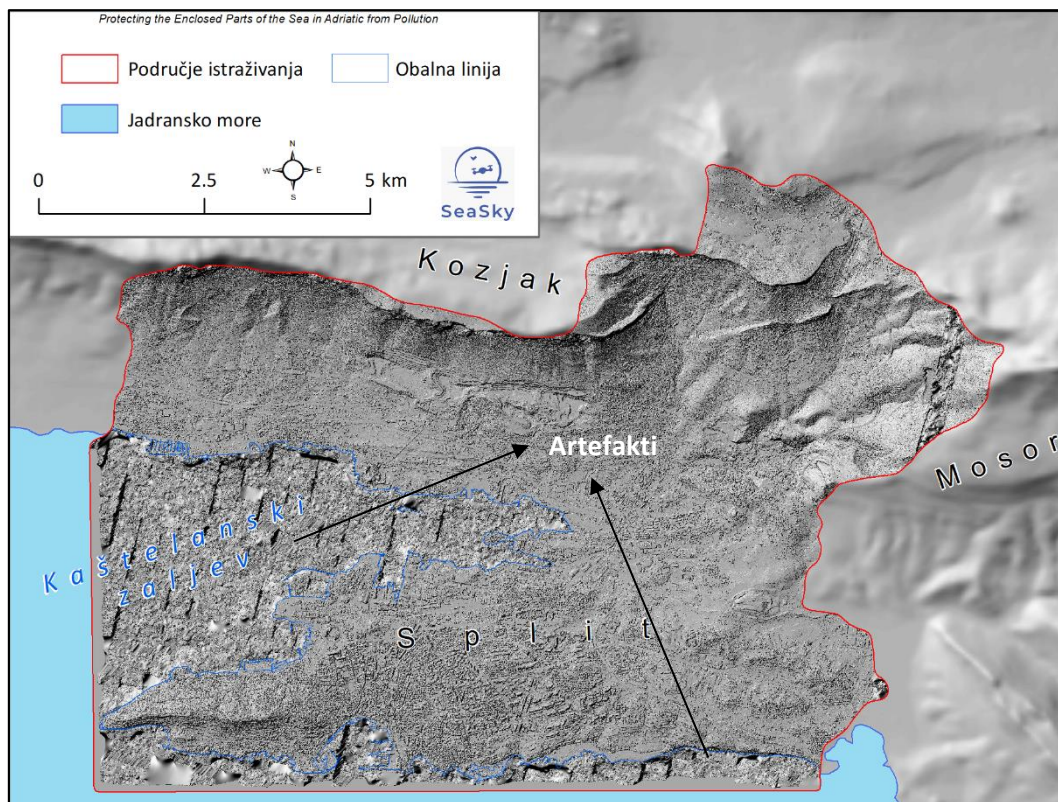
Slika II-12. DMR izrađen DSM2DTM algoritmom (A - pogreške u priobalnom dijelu; B - pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije i antropogenih objekata)

Filtracija pogrešaka na vodenim površinama (2)

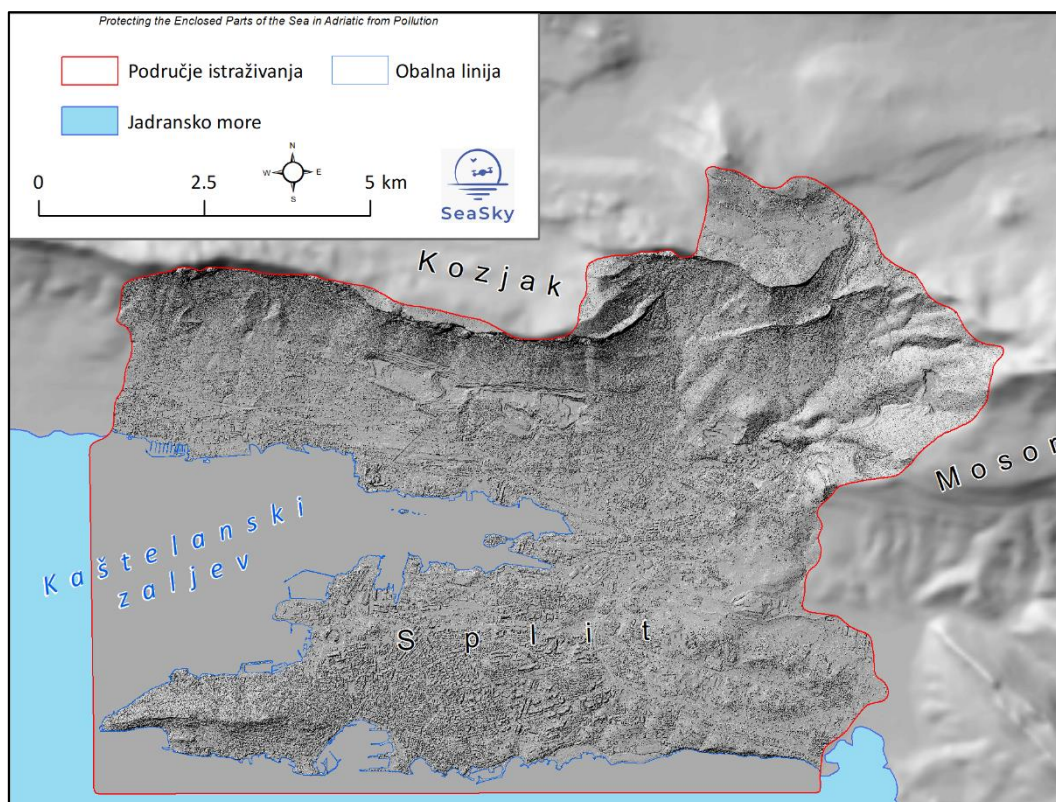
Nakon automatske konverzije DMP-a u DMR bilo je potrebno ručnom filtracijom ukloniti sve preostale pogreške, koje su proizašle iz procesa automatske filtracije. Pogreške u izrađenom modelu prvenstveno su se javljale na prostorima prekrivenim vodenim površinama (npr. more), gdje zbog jednoličnosti površine softver nije mogao provesti korelaciju i povezivanje piksela aerofotogrametrijskih snimaka. Pojava artefakata i pogrešaka nad vodenim površinama karakteristična je za izradu DMP-a i DMR-a iz aerofotogrametrijskih snimaka, zbog čega je filtriranje vodenih površina dio standardnog procesa post-obrade modela (Poli & Caravaggi, 2012.). Da bi se napravilo uklanjanje pogrešaka u modelu nad prostorima prekrivenim vodenim površinama (Slika II-14.), bilo je potrebno napraviti Boolean rasterski prikaz svih vodenih površina unutar područja istraživanja (Slika II-13.). S obzirom da detaljnost dostupnih podataka o vodenim površinama (npr. OpenStreetMap, DGU, itd.) nije bila dovoljna za filtriranje izrađenog DMP-a visoke rezolucije, sve vodene površine su izdvojene iz izrađenog MS WV-3 satelitskog snimka korištenjem nenadzirane klasifikacije. Kroz nenadziranu klasifikaciju izdvojene su sve klase koje predstavljaju vodene površine, kojima je zatim kroz reklasifikaciju dodijeljena vrijednost 0 (Slika II-13.). Svim ostalim klasama, koje predstavljaju kopneni dio područja istraživanja dodijeljena je vrijednost 1. Spajanjem izrađenog Boolean prikaza vodenih površina s generiranim DMR-om napravljen je model s uklonjenim artefaktima i pogreškama na područjima prekrivenim vodenim površinama (Slika II-15.).



Slika II-13. Izrađeni boolean prikaz mora i kopna (1 = kopno; 0 = more)



Slika II-14. Artefakti u izrađenom DMR-u na vodenim površinama



Slika II-15. Ispravljene pogreške u izrađenom DMR-u na vodenim površinama

Ručna filtracija preostalih pogrešaka (3)

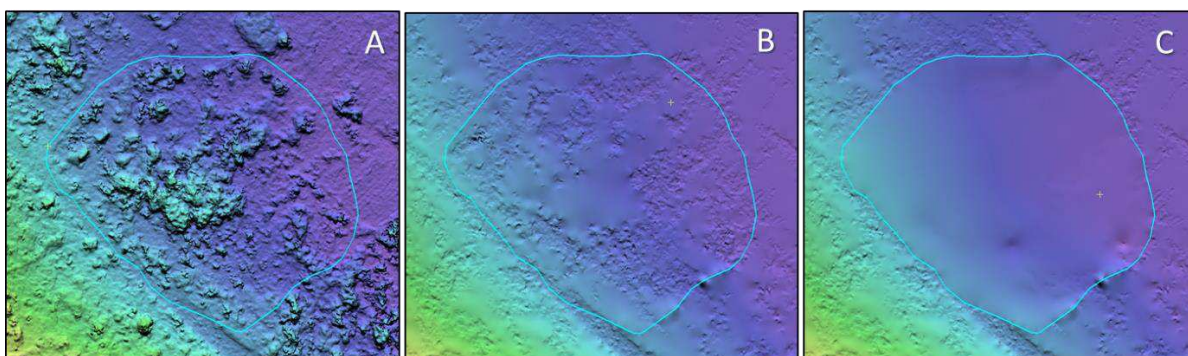
Usljedilo je ručno uklanjanje pogrešaka preostalih nakon automatske korekcije DMP-a u DMR. Za razliku od artefakata na vodenim površinama, koji obuhvaćaju kontinuirane dijelove modela, pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije i antropogenih objekata predstavljaju pojedinačne, prostorno heterogene pogreške, koje nije moguće automatski ukloniti. Zbog toga je primijenjeno ručno uklanjanje pogrešaka uz pomoć filtera za korekciju DMR-a iz *DEM Editing* ekstenzije Geomatica 2018 softvera (Tablica II-7.).

Tablica II-7. Filteri korišteni za ručnu korekciju izrađenog DMR-a

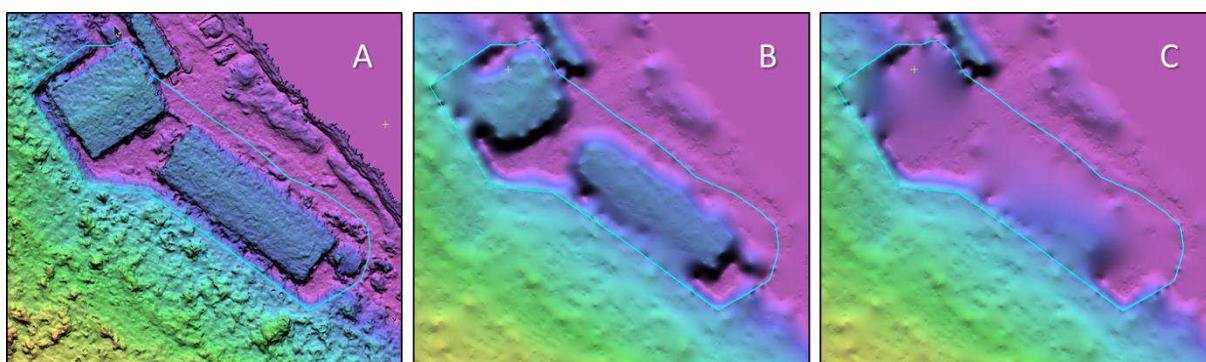
#	Filter	Primjena filtera
1	<i>Remove bumps</i>	Uklanjanje izbočina preostalih nakon korekcije DMP-a
2	<i>Remove bumps (keep linear)</i>	Uklanjanje nelinearnih izbočina
3	<i>Remove pits</i>	Uklanjanje udubljenja (rupa)
4	<i>Terrain (flat)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na zaravnjenim područjima
5	<i>Terrain (hilly)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na brežuljkastim područjima
6	<i>Average filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema prosječnoj vrijednosti unutar zadanog poligona
7	<i>Median filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema srednjoj vrijednosti unutar zadanog poligona
8	<i>Fill from edges</i>	Zapunjavanje reljefa prema rubovima definiranog poligona
9	<i>Average elevation</i>	Poravnjanje reljefa na prosječnu visinu
10	<i>Constant elevation</i>	Poravnjanje reljefa na zadanu visinu
11	<i>Clamp filter</i>	Zaglađivanje manjih neravnina

Pogreške u izrađenom DMR-u uglavnom su činili različiti artefakti preostali nakon uklanjanja gušće vegetacije (Slika II-16.), ili pak većih antropogenih objekata (Slika II-17.).

Primjenom različitih navedenih filtera uspješno su uklonjeni svi preostali artefakti, pri čemu je izrađen konačni DMR šireg prostora.



Slika II-16. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja vegetacije iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)



Slika II-17. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja antropogenih objekata iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)

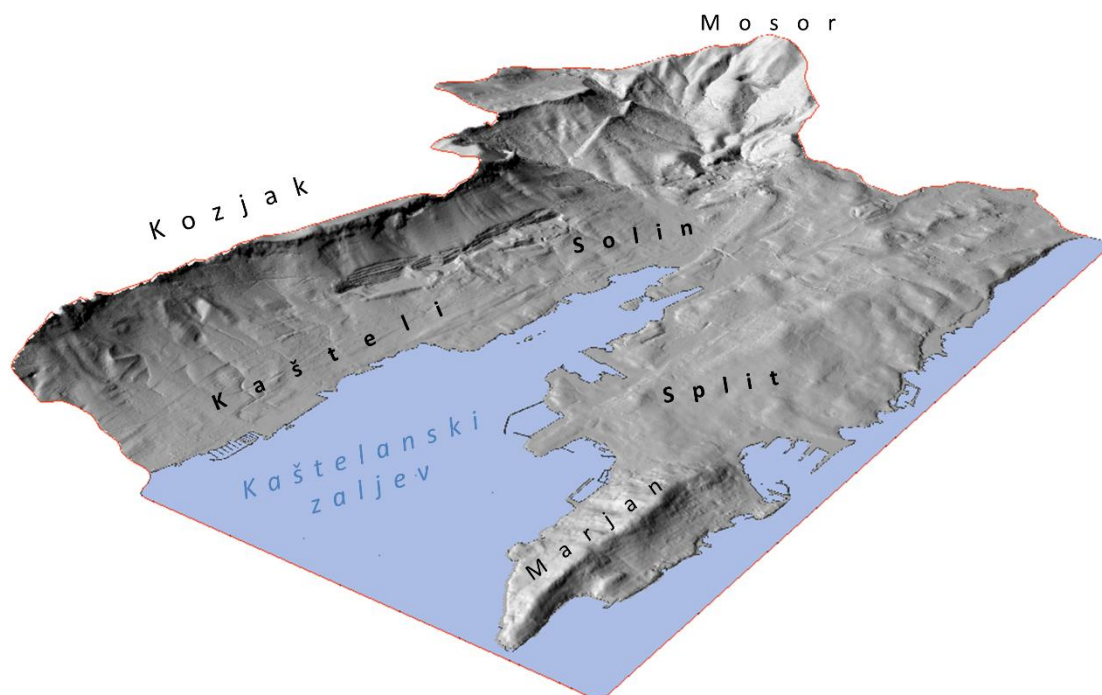
c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Konačni modeli šireg prostora

U konačnici su modeliranjem kupljenih WV-3 multispektralnih stereo (OR2A) satelitskih snimaka izrađeni sljedeći modeli šireg prostora:

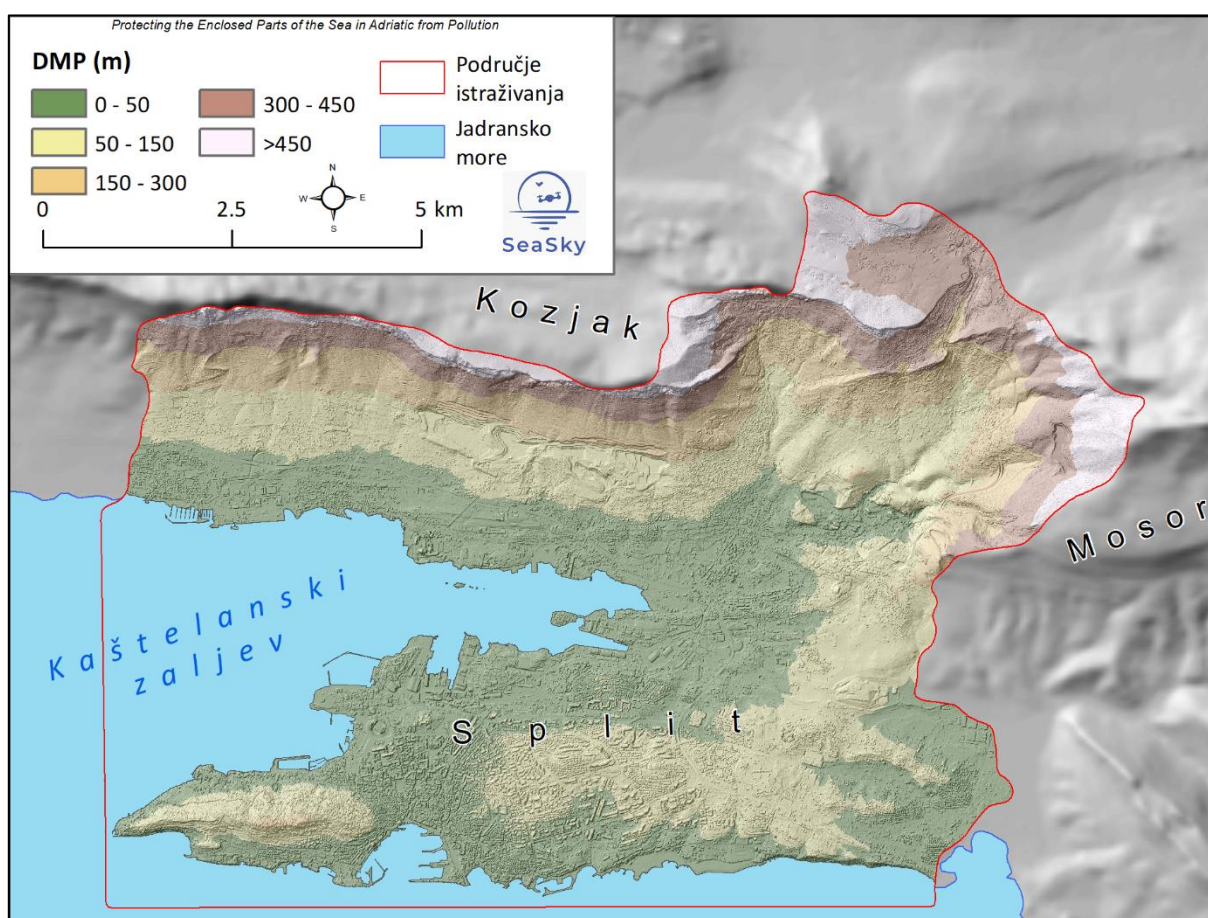
- I. Digitalni model površina (DMP)
- II. Digitalni model reljefa (DMR)
- III. Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

Izrađeni modeli šireg prostora pokrivaju površinu od **oko 100 km²**, što omogućava proučavanje hidroloških karakteristika i potencijalnih kopnenih ugroza na čitavom širem prostoru vezanom za istočni dio Kaštelanskog zaljeva.



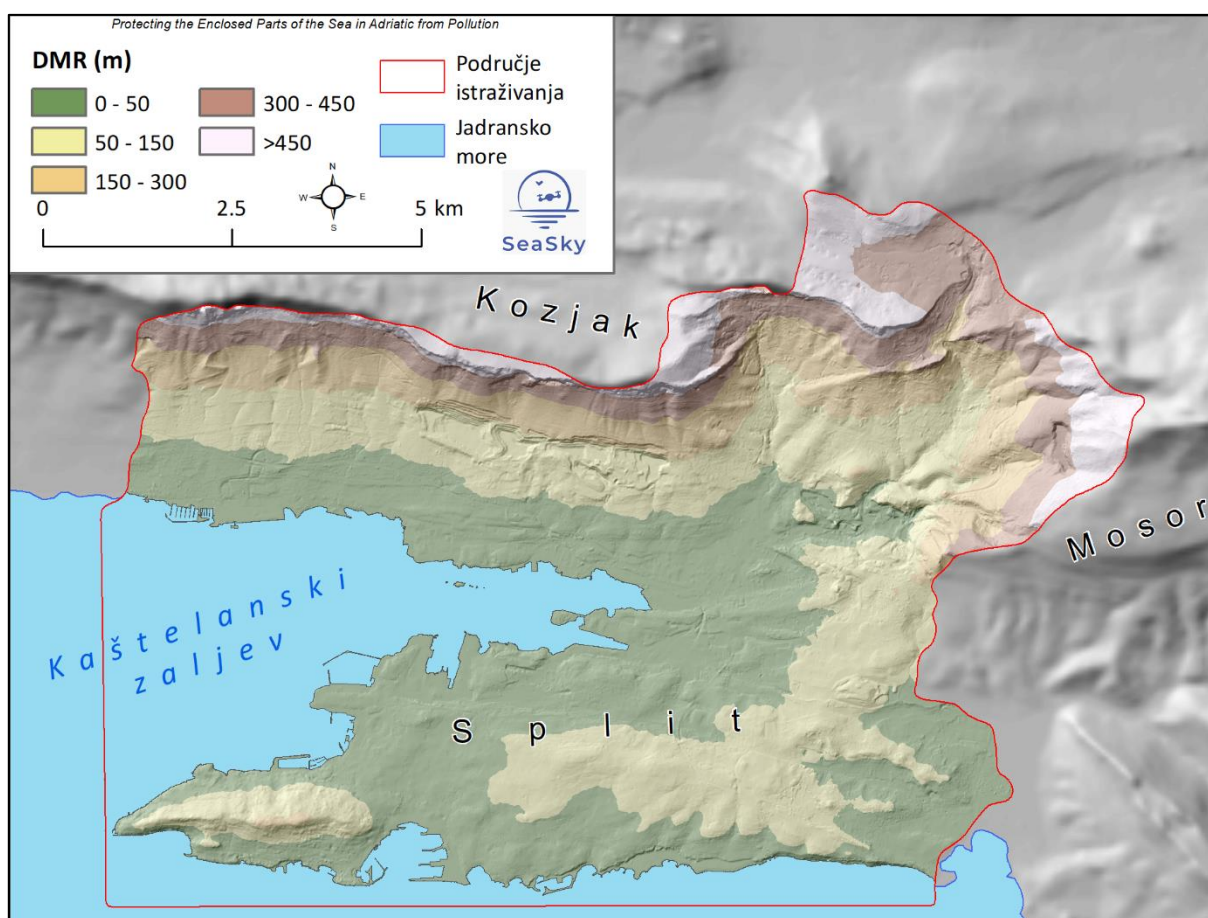
Slika II-18. 3D prikaz šireg prostora istočnog dijela Kaštelanskog zaljeva

Digitalni model površina (DMP) šireg prostora reprezentira reljef i sve prirodne i antropogene površine koje se nalaze na njemu (Slika II-26.). S obzirom da izrađeni DMP osim reljefa reprezentira i vegetaciju i antropogene objekte, zbog čega se ovaj model može primijeniti za proučavanje morfometrijskih značajki reprezentirane vegetacije i antropogenih objekata.



Slika II-19. Izrađeni digitalni model površina šireg prostora

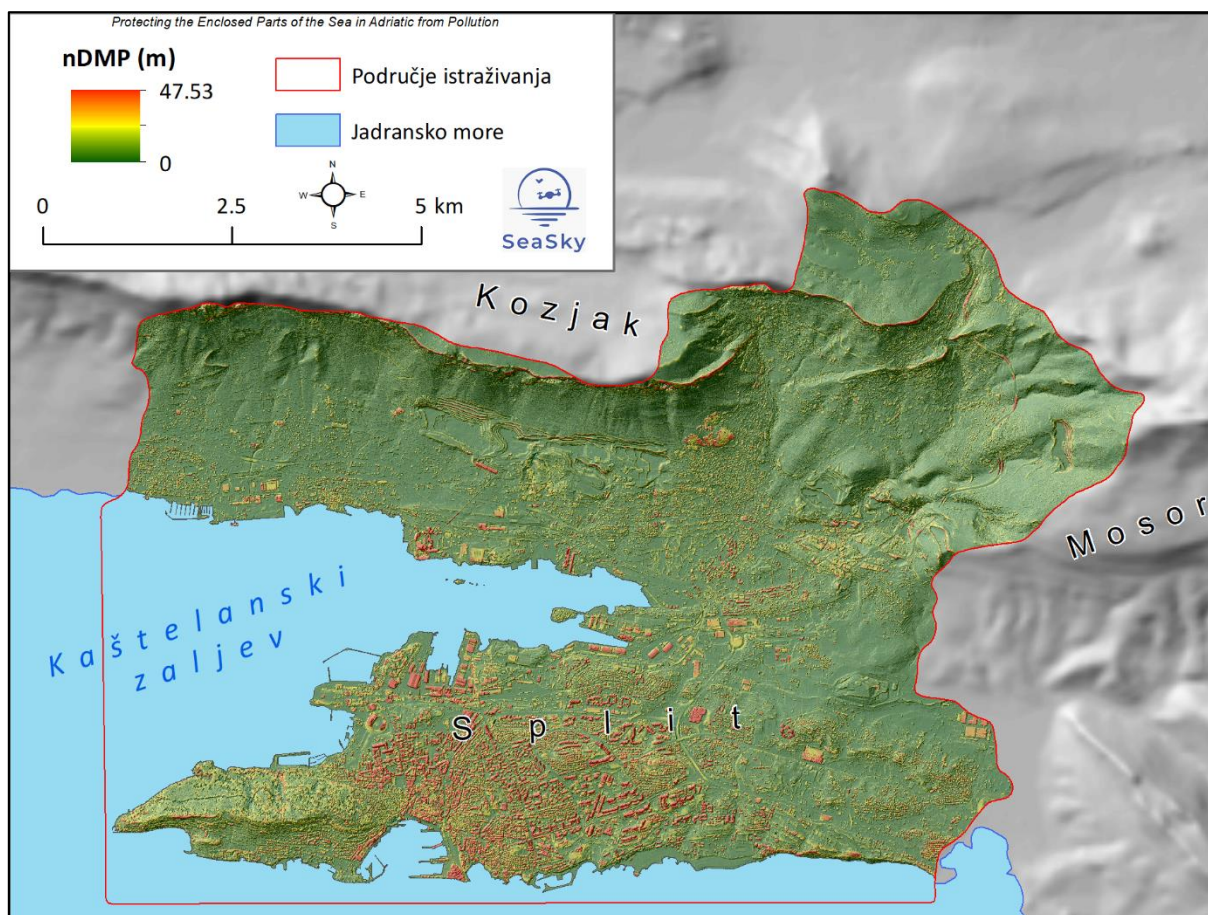
Digitalni model reljefa (DMR) šireg prostora reprezentira golu površinu reljefa bez antropogenih i prirodnih elemenata (Slika II-27.). Zahvaljujući tome ovaj model omogućava neometano proučavanje različitih značajki reljefa. Kao takav koristiti će se za morfometrijske ((npr. nagib, zakrivljenost i orijentacija padina, vertikalana raščlanjenost, itd.) i hidrološke analize (npr. model otjecanja, model akumulacije, kartiranje povremenih tokova, itd.) na temelju kojih će se izvršiti višekriterijsko GIS modeliranje podložnosti eroziji tla, ali i modeliranje poplavnog potencijala.



Slika II-20. Digitalni model reljefa šireg prostora

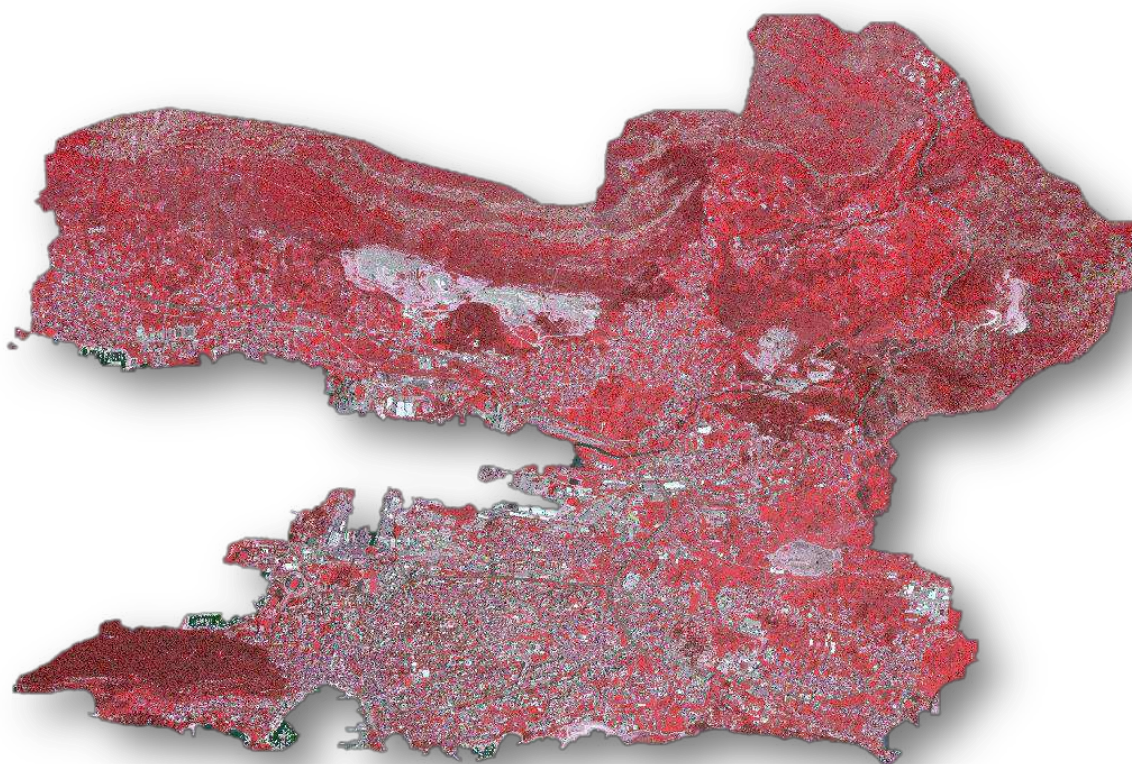
Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

Normalizirani digitalni model površina predstavlja rasterski prikaz visina svih nadzemnih antropogenih i prirodnih objekata u prostoru. Ovaj model nastaje oduzimanjem gole površine reljefa (DMR) od površine svih nadzemnih objekata (DMP). Kao takav ovaj model se može koristiti za klasifikaciju vegetacije ili antropogenih objekata prema njihovoj visini, što dodatno unaprjeđuje klasifikacijske mogućnosti. Primjerice ovaj model omogućava detekciju stambenih objekata koji nadilaze zakonski propisanu visinu.



Slika II-21. Normalizirani digitalni model površina šireg prostora

III. PRIKUPLJANJE I OBRADA MULTISPEKTRALNIH SNIMAKA VISOKE REZOLUCIJE (VIŠE OD 5 KANALA)



Abstract

For the purposes of this study, Worldview-3 multispectral satellite images with a spatial resolution of 1.2 m were used. A panchromatic channel and 8 multispectral channels of WV-3 satellite images were used.

The multispectral image was spatially enhanced using the Modified IHS Resolution Merge pan sharpen technique. The spatial resolution of the multispectral image after performing this method was 30 cm, compared to the initial input data of 1.24 m. The image was improved using a panchromatic channel because it is a high-resolution channel that, based on various methods allows to improve the resolution of multispectral channels.

From the multispectral drainage basin of Kaštela Bay, a land cover model was generated that contains a total of 11 classes if the Sea class is excluded. From the generated land cover model, descriptive statistics of the share of land cover classes within the studied area were calculated. In addition, the land cover model served as one of the criteria in the analysis of vegetation fire risk.

Sažetak

Za potrebe ovog istraživanja korišteni su Worldview-3 multispektralni satelitski snimci s prostornom rezolucijom od 1.2 m. Korišten je pankromatski kanal i 8 multispektralnih kanala WV-3 satelitskih snimaka.

Multispektralni snimak je prostorno unaprijeđen koristeći Modified IHS Resolution Merge pan sharpen tehniku. Prostorna rezolucija multispektralnog snimka je nakon izvođenja ove metode iznosila 30 cm, u odnosu na inicijalni ulazni podataka od 1,24 m. Snimka je unaprijeđena koristeći pankromatski kanal jer je to visokorazlučiv kanal koji, na temelju raznih metoda omogućuje poboljšanje razlučivosti multispektralnih kanala.

Iz multispektralnog drenažnog bazena Kaštelanskog zaljeva generiran je model zemljišnog pokrova koji sadrži ukupno 11 klasa ako se isključi klasa More. Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora. Uz to model zemljišnog pokrova je poslužio kao jedan od kriterija u analizama rizika od izbijanja požara raslinja.

a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije

Multispektralni WV-3 snimci

Sa ukupno 29 različitih spektralnih kanala (8 multispektralnih kanala, 8 SWIR kanala, 12 CAVIS kanala i 1 pankromatski kanal) i prostornom rezolucijom od 1.2 m Worldview-3 multispektralni satelitski snimci predstavljaju najmodernije trenutno javno dostupne komercijalne multispektralne snimke. Za potrebe ovog istraživanja nabavljeni su isključivo pankromatski kanal i 8 multispektralnih kanala (Tablica III-1.), jer je nabavljanje svih dostupnih multispektralnih kanala znatno skuplje, te preostali kanali i nisu toliko bitni za istraživanja koja će se provoditi u sklopu ovog projekta. 8 multispektralnih kanala WV-3 satelitskih snimaka omogućava njihovu pouzdanu upotrebu u različitim istraživanjima (Tablica III-1.).

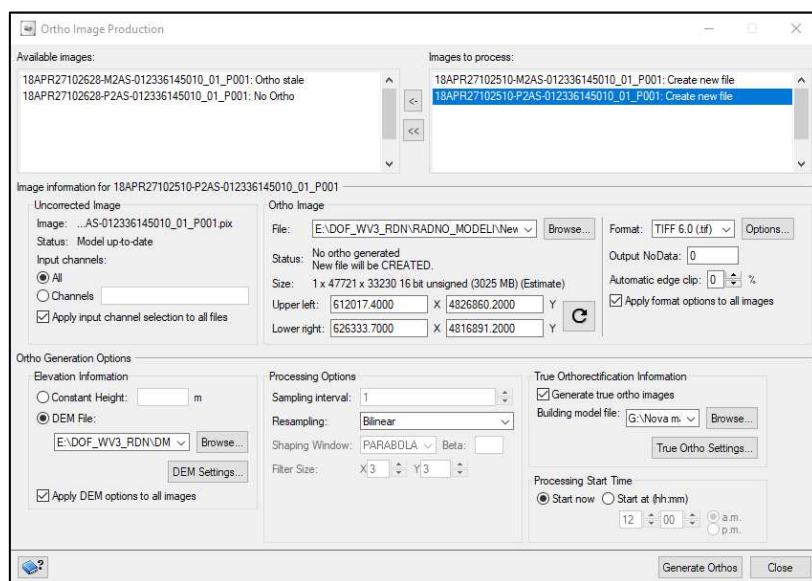
Tablica III-1. Spektralni kanali multispektralnog WV-3 snimka

ID	Spektralni kanal	Primjena za istraživanja
1	Coastal	Priobalna istraživanja; detekcija sjena; diferencijacija kopnenih i vodenih površina
2	Blue	Priobalna istraživanja; klasifikacija šuma; diferencijacija tla i vegetacije; vodene površine
3	Green	Tip poljoprivrednih usjeva; batimetrija; detekcija morske trave
4	Yellow	Koncentracija CO ₂ ; diferencijacija željeznih ruda; proučavanje sedimenata
5	Red	Klasifikacija i analiza vegetacije; apsorpcija klorofila;
6	RedEdge	Zdravlje, starost i tip vegetacije; morske trave i grebeni; izdvajanje kopna;
7	NIR1	Proučavanje biomase; stresa bilja; diferencijacija materijala; izdvajanje vodenih površina; detekcija vlažnosti tla
8	NIR2	Proučavanje biomase; stresa bilja; diferencijacija materijala

Ortorektifikacija multispektralnog WV-3 snimka

Ortorektifikacija WV snimaka napravljena je u Orthoengine 2018 softveru, na temelju DMR-a izrađenog ranije iz WV stereo snimaka. Pri tome je izvršena ortorektifikacija samo jednog multispektralnog i pankromatskog snimka (WV3-B), na kojemu je prikaz antropogenih objekata bio znatno bolji. Naime, drugi snimak (WV3-A) snimljen je pod izraženim kutem, zbog čega je većina antropogenih objekata izdužena i deformirana. Posebice je to slučaj kod viši objekti poput nebodera, ili industrijskih postrojenja.

Prilikom ortorektifikacije multispektralnog i pankromatskog snimka uz DMR na temelju kojega je provedena ortorektifikacija snimaka, korišteni su i dostupni poligoni antropogenih objekata. Na temelju zadanih poligona napravljena je točnija ortorektifikacija (engl. *true orthorectification*), koja se temeljila na korekciji objekata na snimcima prema zadanim poligonima koji reprezentiraju te snimke. U konačnici su ortorektificirani snimci izoštrani (engl. *pansharpning*), također korištenjem algoritma implementiranog u sklopu Geomatica 2018 softvera.



Slika III-1. Korisničko-definirani parametri ortorektifikacije snimaka

U konačnici su na temelju provedene ortorektifikacije izrađeni ortorektificirani multispektralni WV-3 snimak prostorne rezolucije 1.2 m i ortorektificirani pankromatski WV-3 snimak prostorne rezolucije 0.3 m. Provedenom ortorektifikacijom utemeljenoj na zadanom izrađenom DMR-u izvršena je geometrijska korekcija snimaka (Slika III-2.), čime su oni pripremljeni za završno izoštravanje (engl. *pansharpning*).

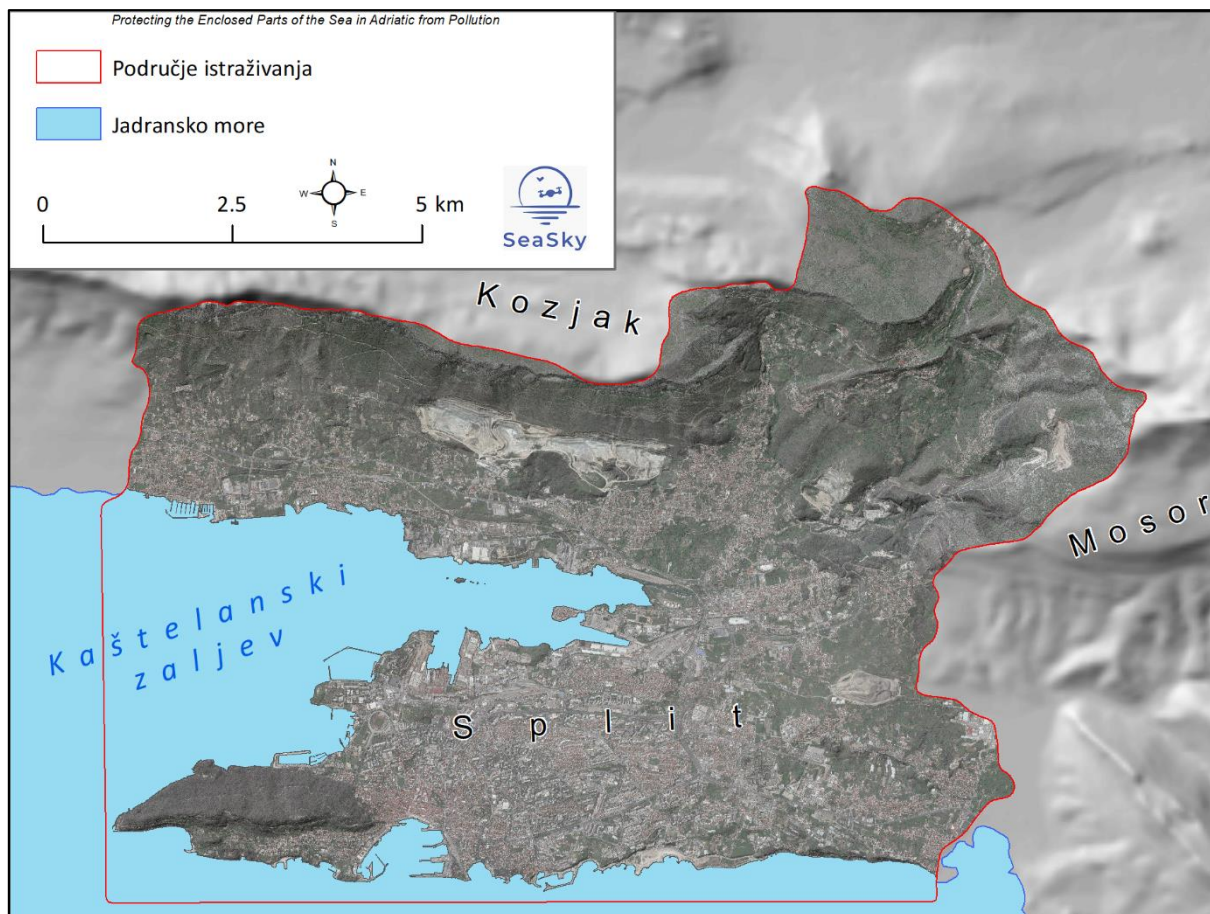


Slika III-2. Multispektralni snimak prije (A) i poslije (B) ortorektifikacije

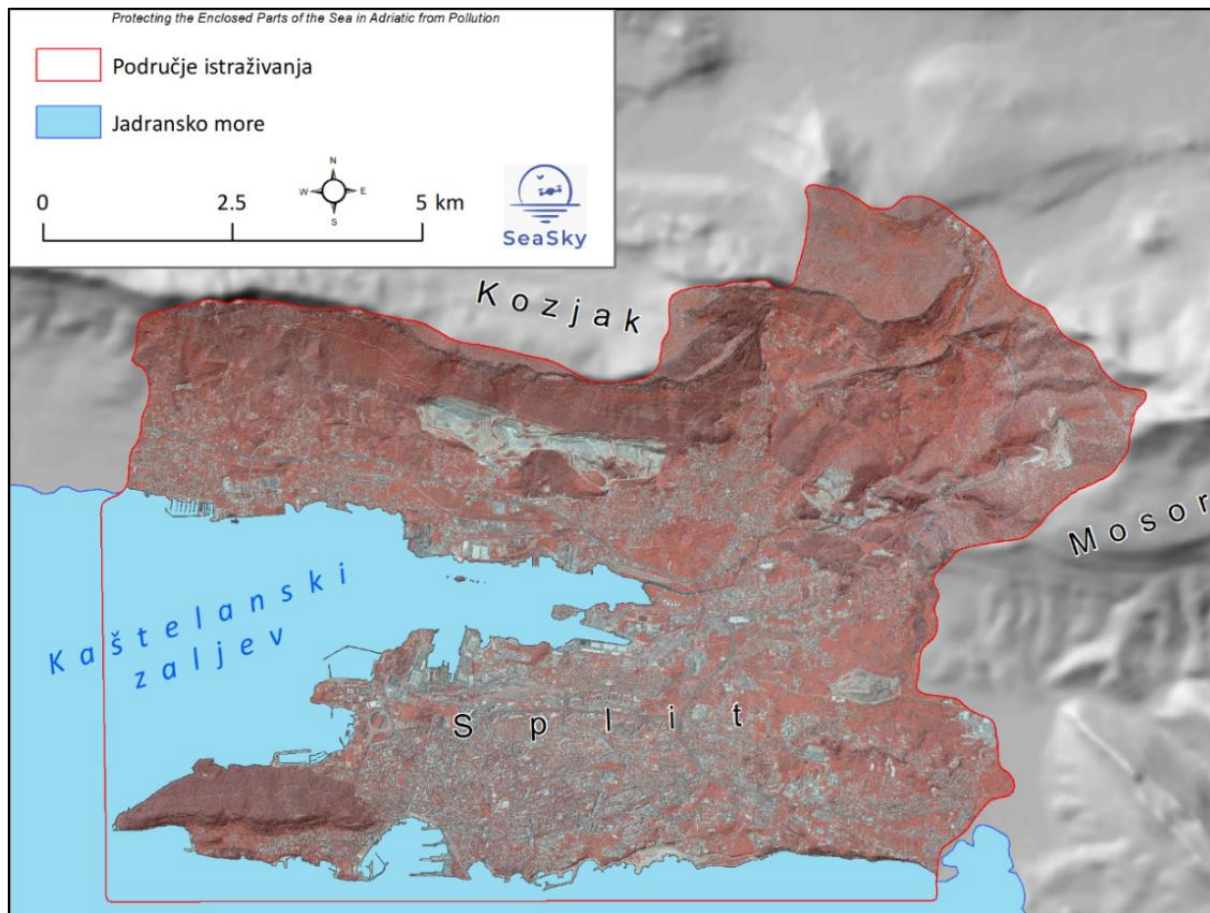
Pansharpening WV-3 multispektralnog snimka

Nakon završene ortorektifikacije multispektralnog i pankromatskog WV-3 snimka slijedi posljednji korak predobrade WV-3 satelitskih snimaka, koji obuhvaća izoštravanje (engl. *pansharpening*) ortorektificiranih snimaka. Pansharpening predstavlja proces fuziranja, odnosno spajanja pankromatskog snimka s višom prostornom rezolucijom s multispektralnim snimkom manje prostorne rezolucije, s ciljem generiranja jedinstvenog snimka visoke rezolucije. Takav izoštrani satelitski snimak sadrži spektralne informacije pohranjene u multispektralnom snimku te prostornu rezoluciju pankromatskog snimka. Postoje mnogobrojni različiti algoritmi za izoštravanje satelitskih snimaka, koji imaju svoje prednosti i nedostatke. Za izoštravanje WV-3 snimaka korišten je PANSHARP2 algoritam integriran unutar Geomatica 2018 softvera.

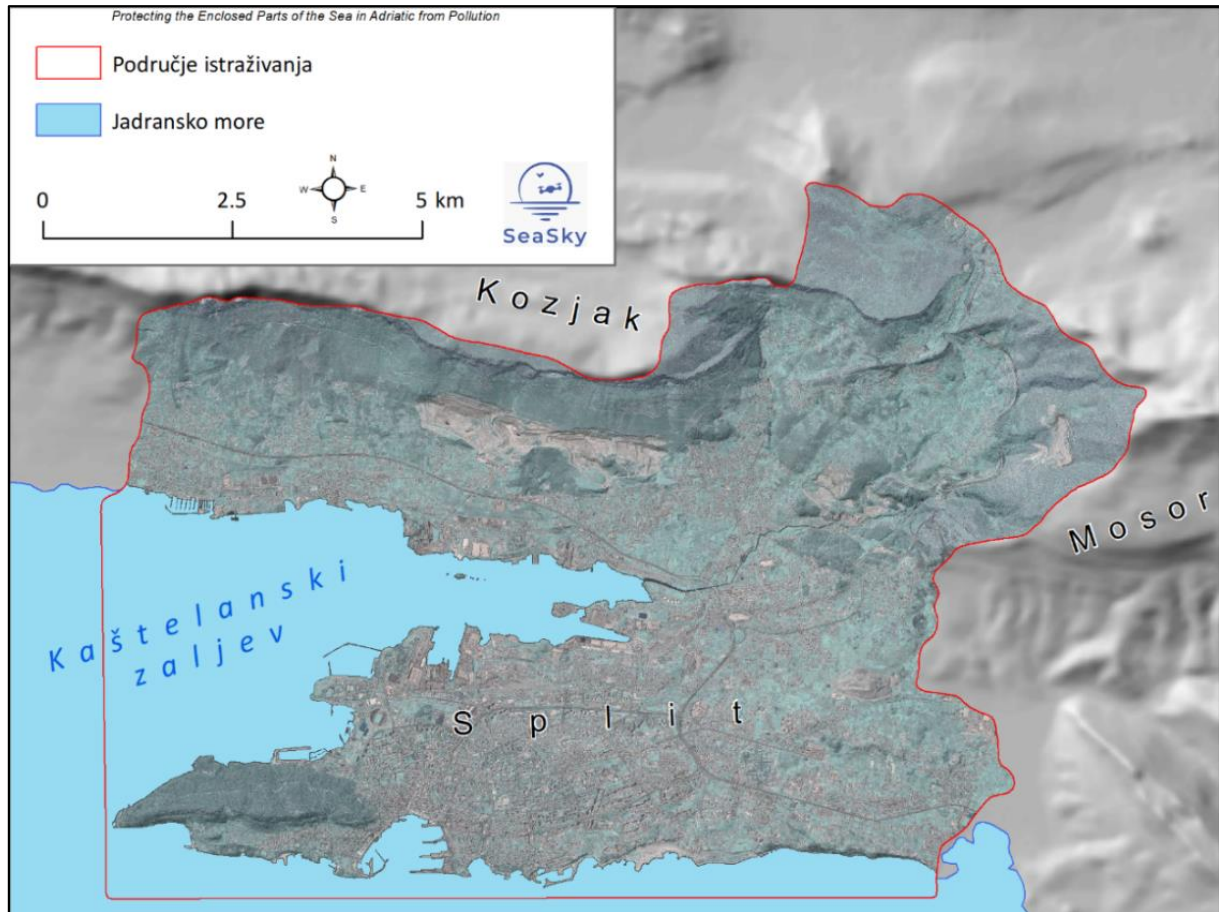
Multispektralni WV-3 snimak (MS WV-3) šireg prostora izrađen je u prostornoj rezoluciji od 0.3 m te sadrži tri kanala iz vidljivog dijela elektromagnetskog spektra (RGB) i 5 kanala iz nevidljivog dijela spektra (Coastal, Yellow, RedEdge, NIR1, NIR2). Zahvaljujući vrlo visokoj prostornoj rezoluciji izrađeni **MS WV-3** omogućava detekciju različitih antropogenih i prirodnih elemenata (npr. kartiranje i izradu baze stambenih objekata, poljoprivrednih parcela, prometnica, itd.). Zahvaljujući različitim multispektralnim kanalima izrađeni MS WV-3 omogućava proučavanje vegetacije, taloženja sedimenata, urbanih površina, itd.



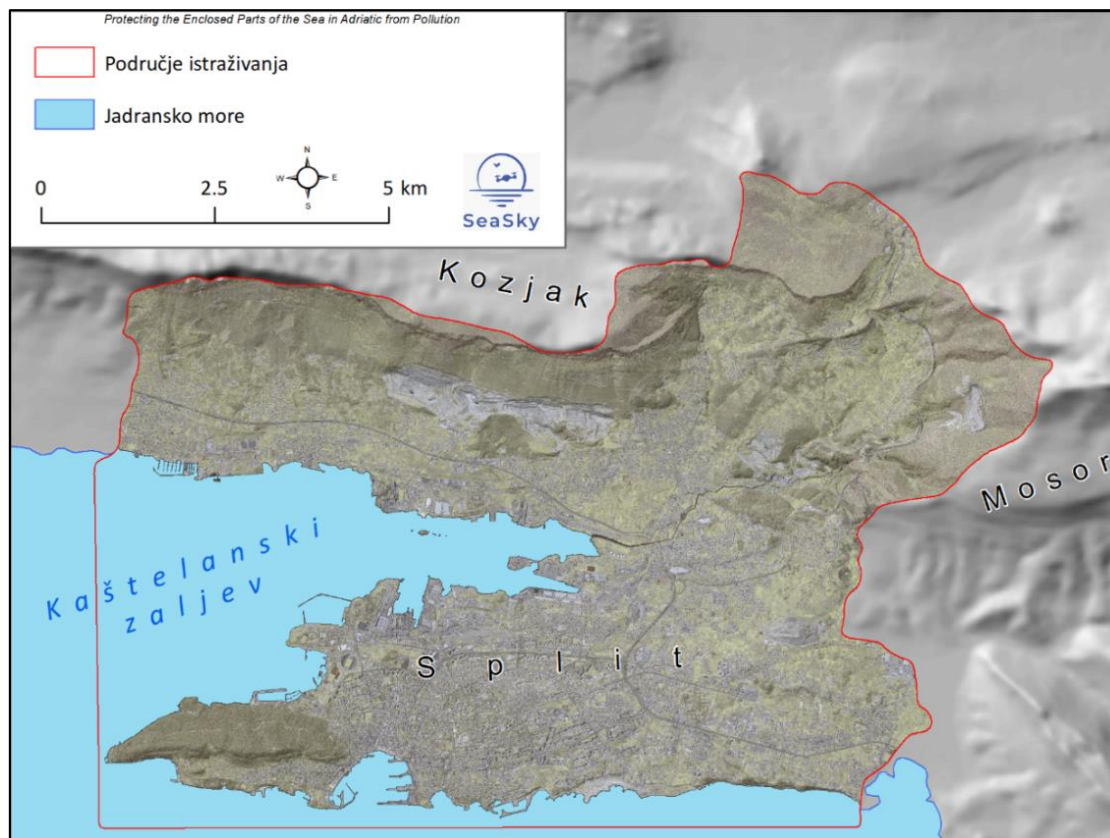
Slika III-3. Izrađeni RGB snimak šireg prostora



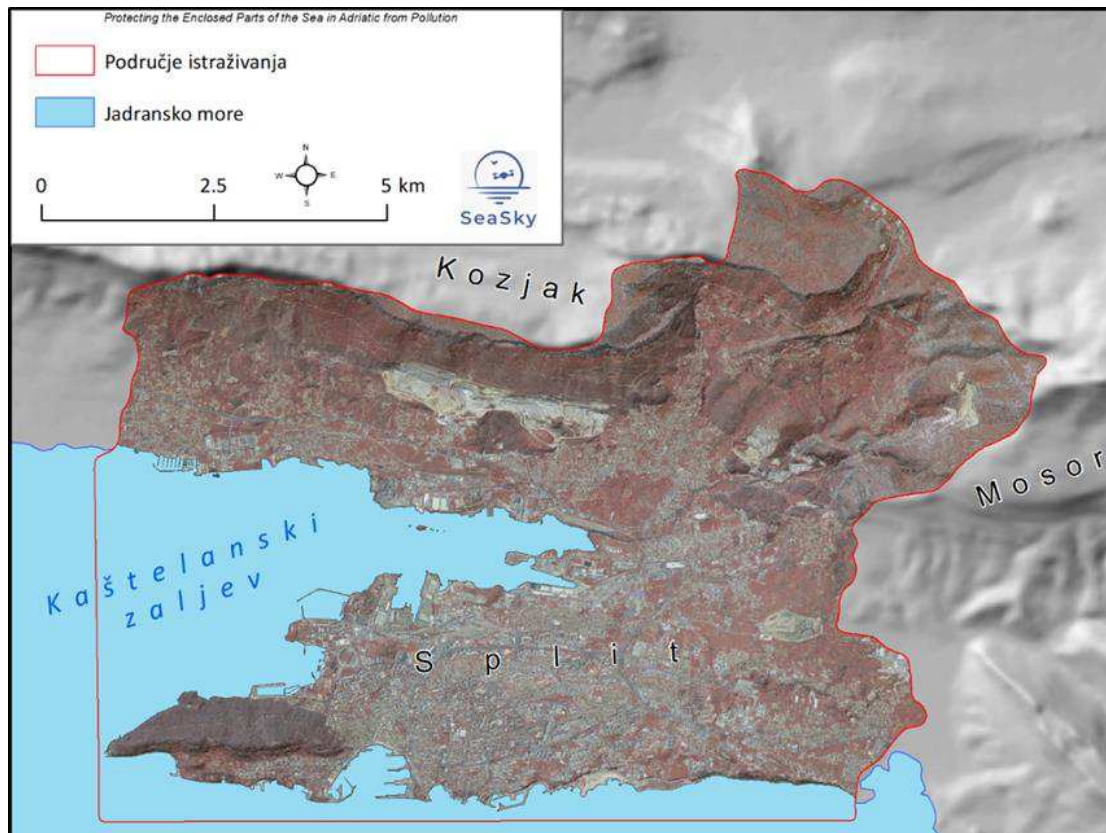
Slika III-4. Izrađeni RGB snimak šireg prostora



Slika III-5. Izrađeni RGB snimak šireg prostora



Slika III-6. Izrađeni RGB snimak šireg prostora



Slika III-7. Izrađeni RGB snimak šireg prostora

b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno orijentiranih analiza

Zagađenje je proizvod ljudskih aktivnosti i sada već dio globalnog ekosustava. Predstavlja slučajno ili namjerno oslobađanje neželjenih kemikalija, biološkog i fizičkog materijala i/ili energija u ekosustav. Ti proizvodi uključuju elemente koji narušavaju normalno funkcioniranje ekosustava (Kaly, 2004). Zagađenje mora (*marine pollution*) može se definirati kao *the introduction by man, directly or indirectly, of substances or energy to the marine environment resulting in such deleterious effect as harm to living resources; hazards to human health; hindrance of marine activities including fishing; impairment of the quality for use of seawater; and reduction of amenities* (Bat i dr., 2009; 1).

Globalna istraživanja procjenjuju da 80% zagađenja mora (*marine pollution*) potječe iz kopnenih izvora (*land based*) (Kaly, 2004, Hassan, 2006). Kopnene aktivnosti i izvori onečišćenja i dalje su glavne prijetnje morskom ekosustavu (VanderZwaag i Powers, 2008). Ovo nije iznenađujuće s obzirom na to da se većina antropogenih aktivnosti odvija na kopnu te mogućnost prijenosa onečišćenja hidrološkim ciklusom. Zagađenje inducirano kopnenim izvorom može na obalni okoliš utjecati na pet načina (GESAMP 2001): degradacija staništa i ekosustava, učinak na zdravlje ljudi, eutrofikacija, uništavanje resursa, promjene u protoku sedimenata. Kontaminanti iz kopnenih izvora za koje se smatra da imaju stvaran nepovoljan učinak na globalnoj razini se mogu svrstati u sedam glavnih kategorija (Windom, 1992).

- 1) Otpad
- 2) Otpadne vode/kanalizacija
- 3) Teški metali
- 4) Nafta/ulje
- 5) Antropogeni mobilizirani sediment
- 6) Sintetski organski spojevi
- 7) Nutrijenti

Polutanti s kopna mogu biti direktno ispušteni u more, putem atmosfere, te filtracijom ili otjecanjem s tla (Patin, 1999, Wilhelmsson, 2013). Nadalje, u moru se polutanti mogu zadržati u površinskim slojevima ili se taložiti na morsko dno. Određivanje udjela pojedinog načina dotjecanja polutanata u ukupnom zagađenju iznimno je kompleksan proces i zahtjeva prikupljanje širokog spektra podataka. Tome je važno i naglasiti kompleksnost samih prirodnih procesa, naročito kada se radi o kontekstu dodirnih točaka obale i mora te mora i atmosfere (Patin, 1999). Nekad je problematično razlikovati polutante koji su prirodnim procesima dospjeli u vodu u odnosu na one antropogenog podrijetla.

Najčešći pristup mjerenjima onečišćenja mora je uporaba konvencionalne metode uzimanja uzoraka vode in-situ pomoću brodova s različitim dubina. Klasični parametri koji se koriste su; temperatura, vodljivost, pH, slanost, otopljeni kisik, fluorescencija zbog klorofila, zamućenost i količina organskih tvari

otopljenih u boji (CDOM) (Hafez i dr., 2018). Međutim, sve više dolaze do izražaja i moderne tehnologije kao što su senzori daljinskih istraživanja koji se koriste za kartiranje i praćenje onečišćenja vode (pojavu nafte, krutog otpada, erozije tla, cvjetanje algi) te procjene utjecaja na okoliš ili predviđanje kretanja zagađenja. Primjerice, refleksija, apsorpcija i transmisija elektromagnetskog zračenja ovisni su o koncentracijama, vrstama i prisutnosti suspendiranih tvari u vodi. Čista voda ima nisku refleksiju u vidljivom dijelu spektra dok u blizini infracrvenog (NIR) područja nema refleksije zbog apsorpcije bistre voda.

Visoka refleksija u crvenom (600–700 nm) i NIR dijelu spektra (750–1400 nm) ukazuju na visoku koncentraciju tvari u vodi. Slično tome, visoke koncentracije klorofila (fotosintetskog pigmenta u fitoplanktonu i makroalgama) u vodi uzrokuju visoku refleksiju u zelenoj regiji (500–600 nm) i veliku apsorpciju u plavoj i crvenoj regiji zbog fotosintetske aktivnosti (Hafez i dr., 2018). Za procijene utjecaja na okoliš, predviđanje kretanja otpada učinkovitim su se pokazali geografski informacijski sustavi, što je predloženo i na Agenda 21 konferenciji.

Vrlo velik problem vezan za onečišćenje mora predstavlja direktno ispuštanje polutanata u more. Osnovni izvori ovakve vrste onečišćenja su kanalizacijski sustav, industrijske otpadne vode i komunalni otpad (Dahl, 1993, Kaly, 2004). Ovakve vrste izvora sadrže, osim organske tvari, teške metale koji su u velikoj mjeri štetni po okoliš. Gustoća stanovništva je direktno povezana s povećanjem ovakvog tipa onečišćenja (povećanje komunalnog otpada, veće opterećenje na kanalizacijski sustav). Posebni prioritet se daje mjerama za kontrolu kanalizacije, jer je istovremeno najrasprostranjeniji i najlošije proučen uzročnik priobalnog zagađenja. Povećanje ovakvog tipa otpada povezano je s eutrofikacijom te kontaminacijom morske hrane i pojavom epidemija u nekim obalnim državama (Dahl, 1993). S obzirom na to da su obalna područja turistički atraktivna, razlikuje se i period intenzivnog sezonskog pritiska. S povećanjem koncentracije stanovništva povećava se i količina krutog i tekućeg otpada. U ovaj tip onečišćenja spada odbacivanje plastike i drugih teško razgradivih materijala štetnih okolišu, što je posljedica direktnog ljudskog nemara.

Onečišćenju mora znatno pridonosi i otjecanje s različitih površina. Ovaj način onečišćenja odnosi se na sva površinska i podzemna otjecanja koja se za razliku od direktnog onečišćenja u prostoru ne može promatrati u obliku preciznih lokacija (točaka) već iz poligonskih slojeva baziranim na kategorizaciji zemljišta.

Polutanti iz različitih kategorija korištenja zemljišta (industrije, urbanih naselja, poljoprivrednih površina) pod utjecajem oborina dotječu u more. Meteorološki parametri kao što su oborine (tip, učestalost, trajanje), vlažnost zraka, temperatura i vjetar, preduvjet su za nastanak otjecanja (Cebe, Balas, 2018). Po pitanju smjera otjecanja od presudne je važnosti morfometrija terena (nagib), sastav tla i s tim u vezi

drenažna mreža, vodene strukture i vrste zemljišta unutar hidrološkog bazena (Cebe, Balas, 2018). Krški tereni predstavljaju poseban slučaj zbog podzemnog otjecanja. Voda brojnim kanalima i pukotinama otječe u more te je komplicirano odrediti točan smjer otjecanja. Zagađenje se vrlo lako širi.

Povećana poljoprivredna proizvodnja odraz je rasta stanovništva, a direktno utječe na dostupnost i kvalitetu vode (Maxted i dr., 2009, Ribeiro i dr., 2014). Potencijal onečišćenja voda iz poljoprivrednih aktivnosti izuzetno je visok (Lal, Stewart, 1994), posebno u konvencionalnom sustavu s prekomjernom primjenom gnojiva i pesticida na strmim padinama (Manosa i dr., 2001; Hart i dr., 2004), a taj je potencijal još veći tijekom jakih kišnih događaja (Takeda i dr., 2009). Vode koje otječu s poljoprivrednih zemljišta potencijalno su zasićene dušikom, fosforom i kalijem koji imaju široku primjenu u poljoprivredi. Ova tri biogena elementa osnovni su sastojci umjetnih gnojivima. Posljedica je porast nutrijenata u moru što može dovesti do eutrofikacije, a na koncu i anoksije (Zhang, Huang, 2011). Neki od indeksa koji se koriste pri procjeni pojavnosti dušika u vodenim površinama su indeks izvoznog potencijala dušika, indeks puta protoka do vodene površine, indeks intenziteta otjecanja, indeks klimatskog utjecaja (Zhang, Huang, 2011). Izračunavanje ovih indeksa zahtijeva informacije o topografiji, zemljištu, hidrologiji, tlu, klimi i ljudskim aktivnostima u drenažnom bazenu. Tipični ne-točkasti izvor nutritivnih sastojaka su poljoprivredna zemljišta, urbana područja i erodirana tla (Zhang, Huang, 2011).

Osim poljoprivrednih površina, urbane površine su također izvor nutrijenata, ali i drugih tvari koje uzrokuju onečišćenje (Kaly, 2004). Sve veća betonizacija i apartmanizacija kao posljedica turizma tipična su pojava obalnih prostora. Povećanjem nepropusnih površina povećava se količina polutanata koji se s kišnicom odlijevaju u more (slivne vode) (Hamedianfar, 2014). Otjecanje s krovova (*roof runoff*) utjecajan je faktor pri računanju indeksa kvalitete vode u urbanim područjima. Kontrolom površinskih materijala korištenih u izgradnji moguće je održati kvalitetu okoliša. (Hamedianfar, 2014)

S otjecanjem je direktno povezana i erozija tla. Gubitak biljnih hranjivih i organskih sastojaka putem erodiranog sedimenta smanjuje plodnost i produktivnost tla. Ovo dovodi do začaranog kruga u kojem poljoprivrednici koriste više gnojiva kako bi kompenzirali gubitak plodnosti. Jednom erodirana, zemlja ima tendenciju da bude osjetljivija na daljnju eroziju i na taj se način intenzivira ciklus. Gubitak hranjive tvari na ovaj način, predstavlja ogroman trošak za poljoprivrednu zajednicu s jedne strane, dok s druge utječe na zagađenje mora što je mnogo hitniji problem (Ning i dr. 2006).

Metodološki okvir izrade modela zemljišnog pokrova

Daljinska istraživanja pronalaze sve veću primjenu u raznim znanstvenim granama. Satelitske snimke prikazuju refleksiju raznih objekata u rasponu elektromagnetskog zračenja koji čovjeku nije vidljiv. Stoga je veoma teško izravno identificirati željeni element vizualnom interpretacijom. S ciljem boljeg razumijevanja elemenata potrebno je izvršiti proces **klasifikacije**. Klasifikacija je proces dodjeljivanja vrijednosti piksela na snimki, odabranim, prije određenim klasama (Rumora i dr., 2018).

Klasifikacija multispektralnih snimki je složen proces, koji uključuje rigoroznu provjeru testnog uzorka (*signature*) ovisnog o upotrebljenom klasifikacijskom algoritmu.

Klasifikacija multispektralnih snimaka provodi se radi lakšeg identificiranja i prepoznavanja objekata na snimkama. Postupak i izbor klasifikacije vrlo su važni prilikom izrade klasificirane snimke (Rumora i dr., 2018).

Pogrešan izbor metode klasifikacije ili pogrešno definiran uzorak (*signatura*) mogu dovesti do značajnih pogrešaka u izlaznom modelu. To povlači za sobom i daljnje pogreške u primjeni izvedenih informacija. Istraživanje krajolika na lokalnim i regionalnim razinama moguće je već na satelitskim multispektralnim snimaka prostorne rezolucije <0,5 m.

Najjednostavnija definicija klasifikacije bi bila grupiranje određenih dijelova snimke u spektralne, te potom informacijske klase (Janeš, 2019) na temelju sličnosti. Osnovni element multispektralne snimke i svakog rasterskog podatka je piksel. On se tretira kao zasebna jedinica koja u sebi sadrži vrijednosti (DN^{13}) od nekoliko spektralnih pojaseva. Broj DN-a se zapisuje ovisno o radiometrijskoj rezoluciji satelitskog snimka (6-bit, 18 bit...). Međusobnom usporedbom piksela moguće je odrediti klase (grupe) koje se potom povezuju s informacijskim kategorijama koje su od interesa korisnicima. Klase u pravilu predstavljaju zemljišni pokrov (*land cover*). Zemljišni pokrov mogu činiti prirodne ili umjetne strukture koje prekrivaju određeni dio Zemljine površine, kao što su: vegetacija, vodena površina, zgrade, put, itd. S obzirom na to da snimke sadrže informacije u više dijelova elektromagnetnog spektra (izvan čovjekove vizualne percepcije), za klasifikaciju se koriste spektralne informacije predstavljene vrijednostima piksela u različitim spektralnim opsezima.

¹³ Digital Number

Skupovi piksela čije su vrijednosti međusobno slične predstavljaju **spektralne klase**. Za korisnika klasifikacije od interesa su, međutim, **informacijske klase**. Informativne klase mogu biti, npr. različiti tipovi zemljišnog pokrova: vegetacija, rijeka, urbano zemljište, poljoprivreda, krš. Osnovni problem klasifikacije slika je uspostavljanje povezanosti između spektralnih i informativnih klasa.

Problem komplicira činjenica da unutar jedne informativne klase može postojati varijabilnost tako da njeni pikseli pripadaju različitim spektralnim klasama. S druge strane, moguće je i da pikseli koji posjeduju iste spektralne vrijednosti pripadaju različitim informativnim klasama.

Metode klasifikacije generalno se mogu grupirati u (Weih i Riggan 2010)

- **Nadzirane** (polu-automatske) klasifikacijske metode
- **Nenadzirane** (automatske) klasifikacijske metode
- **Objektno orijentirane** (*object-based*) klasifikacijske metode

Nadzirana metoda klasifikacije predstavlja klasifikaciju određene scene/snimka temeljem uzoraka (*signatura*) koje je definirao korisnik. Uzorci se koriste kako bi se definirale klase pokrova zemljišta, a određivanje klase se vrši na spektralnim karakteristikama svakog uzorka. Najpoznatiji algoritmi nadzirane klasifikacije su maksimalna sličnost (*maximum-likelihood*) i minimalna udaljenost (*minimum distance*) (Weih i Riggan 2010).

U nadziranoj klasifikaciji se uzimaju uzorci poznatog identiteta za klasifikaciju piksela nepoznatog identiteta (smještaj neklasificiranih piksela u jednu od informativnih klasa). Uzorci poznatog identiteta su oni pikseli koji se nalaze unutar označenih uzoraka (*signature*). Operator definira uzorke tako što identificira regije na snimci koje se mogu jasno parirati s područjima poznatog identiteta.

Takva područja bi trebala definirati spektralne karakteristike one kategorije (npr. šuma) koju reprezentiraju te ujedno biti homogene u odnosu na informativnu kategoriju koja se u tom trenutku klasificira.

Označeni uzorci, koji su sastavljeni od velike količine piksela, uzorkuju spektralne karakteristike informativnih kategorija. Ove informacije pružaju bazu za klasifikaciju preostalih piksela izvan uzorkovanog područja.

Kao generalna preporuka, operator bi trebao osigurati da označena područja sadrže najmanje 100 piksela za svaku kategoriju (Janeš, 2019).

Prednosti nadzirane klasifikacije su sljedeće. Operator ima kontrolu nad odabranim izbornikom informativnih kategorija predviđenih za određeni prostor.

Ovo je veoma bitno jer omogućuje izvođenje klasifikacije za specifičnu svrhu usporedbe s drugom klasifikacijom istog područja, ali različitog datuma. Zbog toga, nepredvidive kvalitete kategorija generirane nenadziranom klasifikacijom mogu biti nepogodne ili neodgovarajuće. Drugo, nadzirana klasifikacija je vezana uz specifična područja poznatih identiteta, određena kroz proces odabira područja za obuku.. Zadnja prednost uključuje sposobnost analitičara da pronađe probleme ili greške pri klasifikaciji proučavanjem podataka za obuku kako bi se utvrdilo jesu li točno klasificirani tijekom postupka (Janeš, 2019). Mane nadzirane klasifikacije su sljedeće. Prva mana je ta što operator sam definira klasifikacijsku strukturu podataka. Ove klase ne moraju se podudarati prirodnim klasama. Drugo, uzroci su često definirani primarno u odnosu na informacijske kategorije, a sekundarno u odnosu na spektralne karakteristike. Treće, uzorci koje je odabrao operator mogu biti neprecizna slika onih uvjeta koji se odvijaju unutar ostatka snimke. Sljedeća mana uključuje sam rad koji analitičar mora odraditi kako bi završio analizu.

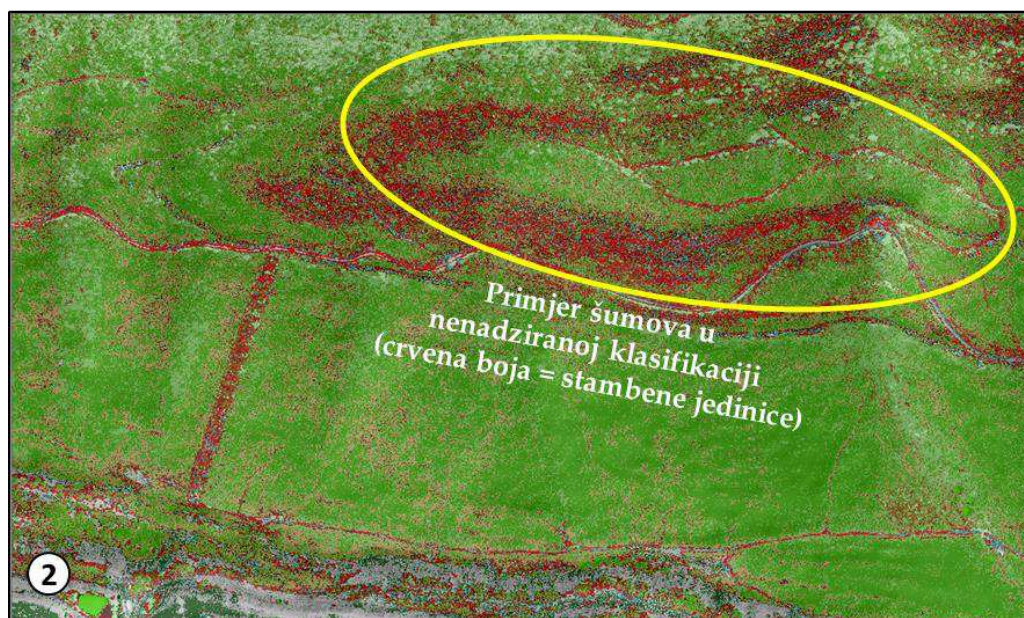
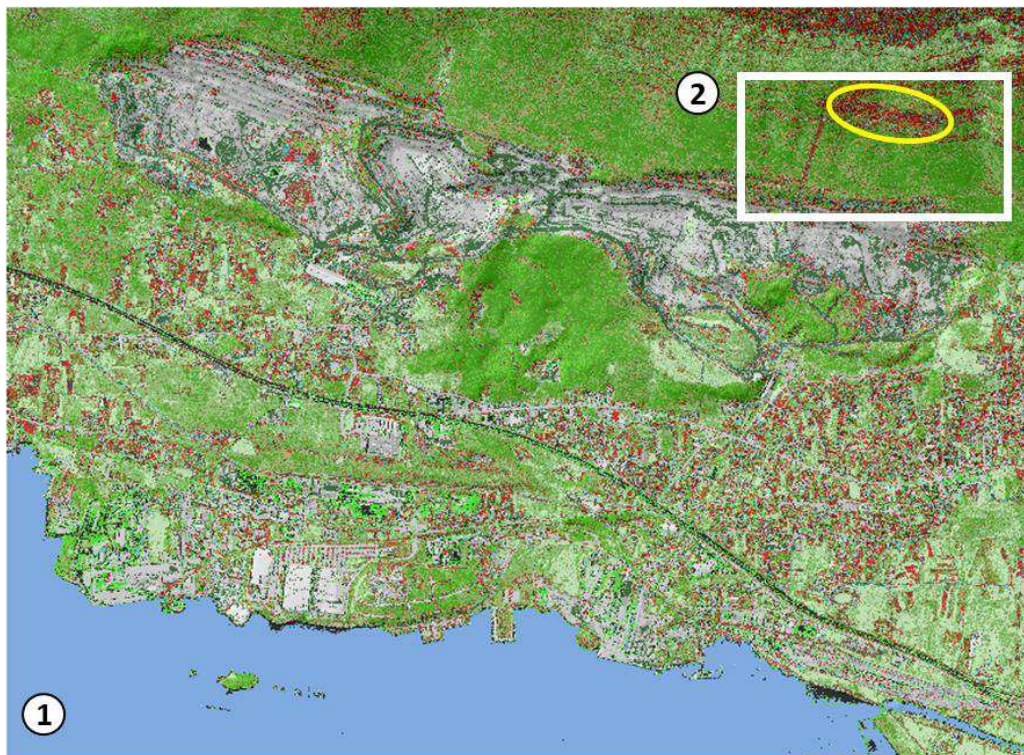
Sam odabir podataka za uzorke može oduzeti izuzetnu količinu vremena. Preostala značajna mana nadzirane klasifikacije opisuje ograničenost čovjeka kao klasifikatora. S obzirom na to da operator sam definira informacijske kategorije velika je mogućnost da se kategorija koja je trebala biti prisutna izostavi zato što samom operatora nije poznata (Janeš, 2019.)

Nenadzirana metoda klasifikacije automatski klasificira scenu na temelju statističkog grupiranja spektralnih značajki i obilježja (Rumora i dr., 2018).

Zasniva se na grupiranju piksela tako da njihove spektralne vrijednosti zadovoljavaju neki kriterij homogenosti. Kod nekih algoritama ovaj kriterij se može unaprijed zadati navođenjem dozvoljene varijabilnosti vrijednosti piksela, dok se kod nekih algoritama samo navodi željeni broj klastera.

Polazeći od zadanih parametara algoritam za klasterizaciju pronalazi prirodnu strukturu u skupu podataka. Rezultat klasterizacije je skup spektralnih klasa koje je, zatim, potrebno upariti s informacijskim klasama. Korisnik treba definirati samo broj klasa koje će se kreirati.

Razni algoritmi grupiranja se koriste kako bi se odredila prirodna, statistička skupina podataka. Pikseli se grupiraju zajedno ovisno o njihovoj spektralnoj sličnosti. Računalo zatim svaku skupinu analizira te posebno kategorizira u odgovarajuće klase. Ako analitičar odredi da se snimka klasificira u 10 različitih klasa, algoritam će prema spektralnoj sličnosti piksela kreirati predloženih 10 klasa. Najpoznatiji algoritmi su *K-means* i *ISODATA*.



Slika III-8. Primjer šumova koji se javljaju prilikom izvođenja nenadzirane klasifikacije na dijelu multispektralnog snimka šireg područja prostora istraživanja

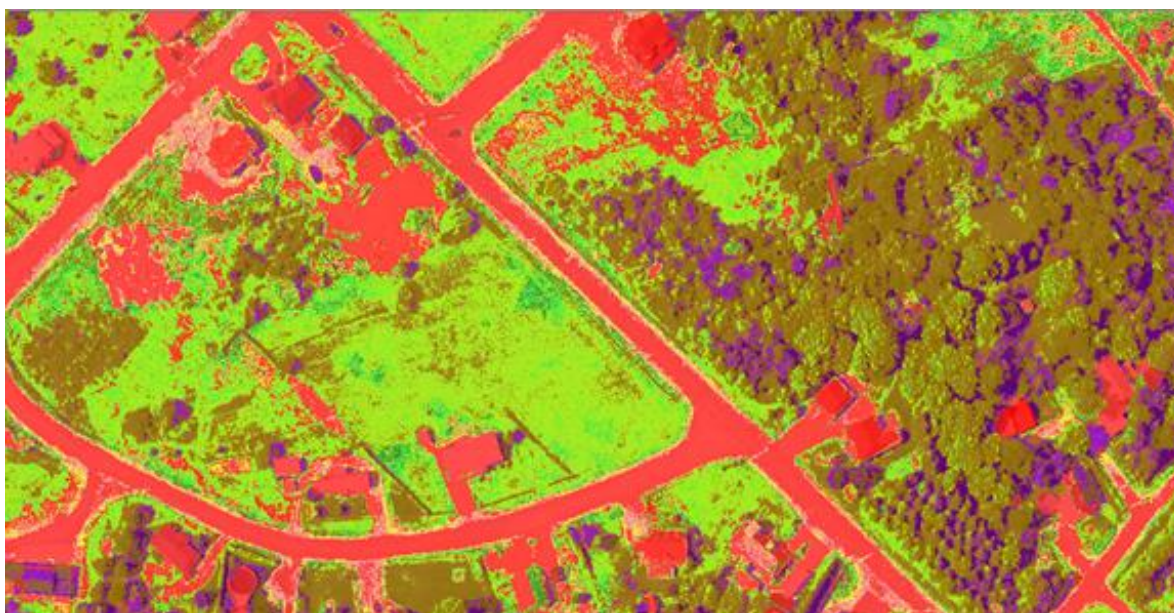
Nekolicina prednosti nenadzirane klasifikacije su automatizacija, olakšan rad analitičara, smanjen prostor za ljudsku grešku te nije potrebno temeljito poznavanje nimke koja se obrađuje. U nenadziranoj klasifikaciji većina procesa je automatizirana i utjecaj analitičara na sam proces klasifikacije je minimaliziran. Mane te ograničenja nenadzirane klasifikacije najviše proizlaze iz oslanjanja na „prirodno“ grupiranje te poteškoća kategoriziranja navedenih u informacijske kategorije koje su od interesa analitičaru.

Nadzirana i nenadzirana metoda klasifikacije je temeljena na analizi spektralnih svojstava svakog piksela unutar njegov područja interesa, zanemarujući prostorne i kontekstualne informacije okružujućih piksela. Istraživanja su pokazala da kad se ovakvi piksel-temeljeni pristupi koriste na visoko-rezolucijskim slikama može doći do pojave efekta "soli i papra" što doprinosi netočnosti klasifikacije (Slika III-8) (Campagnolo and Cerdeira, 2007; Van de Voorde et al., 2004).

S ciljem uklanjanja navedenih problema došlo je do razvoja **objektno-orijentiranih klasifikacijskih procedura** koji analiziraju spektralna i prostorno/kontekstualna svojstva piksela te koriste segmentacijske procese i iterativne algoritme učenja u postizanju točnijih klasifikacijskih rezultata primjenom u odnosu na pixel-temeljene metode (Hay and Castilla, 2006). Objektno orijentirana klasifikacijska metoda (OBIA) je metoda koja kreira objekte različitih oblika i veličina, dok metode temeljene na klasifikaciji piksela generiraju kvadrate (oblik piksela) (Weih i Riggan 2010).

Koncept izrade modela zemljišnog pokrova primjenom objektno-orijentiranih analiza (GEOBIA)

Tradicionalna klasifikacija slika na temelju piksela (*pixel based*) određuje klasu zemljišnog pokrova isključivo za pojedini piksel. Svi pikseli su iste veličine, istog oblika te u takvim analizama ne postoji spoznaja o okružujućim obrascima. Međutim, GEOBIA¹⁴ segmentira sliku grupirajući "slične" piksele u vektorske objekte (oblike). Pomoću ovih segmentiranih objekata te poznavajući njihove spektralne, geometrijske i prostorne karakteristike generira se model zemljišnog pokrova. Suprotno, ako se koriste tradicionalne klasifikacije tehnike, često se dobije efekt "soli i papra" (Slika III-9) u klasifikacijskom rezultatu.



Slika III-9. Efekt "soli i papra" koji se javlja u *pixel-based* procesu klasifikacije na visoko-rezolucijskim slikama

Sumirano dva su osnovna načela OBIA: **segmentacija** i **klasifikacija** (Slika III-10). Ipak, objektno-orijentirani postupak izvlačenja značajki uključuje proces rada koji pokriva tri glavna funkcionalna područja:

- 1) Segmentaciju slike
- 2) Generiranje analitičkih podataka o segmentiranim dijelovima
- 3) Klasifikaciju

¹⁴ GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis)

Izlazni podatak iz jednog koraka ili alata predstavlja ulazni podatak za sljedeći korak/alata. Može se reći da je OBIA sličan proces tradicionalnom pixel-based klasifikacijskom pristupu nadzirane i nenadzirane klasifikacije, samo što se umjesto klasificiranja pojedinačnog piksela klasificira segment ("super pixel"). Svaki segment ili super piksel je predstavljen skupom atributa prema kojima se u konačnici određuje kojoj klasi spada.

Prilikom **segmentacijom** slike, proces grupira piksele radi formiranja objekata. Segmentacijom se grupiraju pikseli sličnih spektralnih karakteristika koji se nalaze u neposrednoj blizini u jedan segment. Segmenti koji pokazuju određene spektralne, prostorne i slične karakteristike oblika mogu se dalje grupirati u objekte. Objekti se zatim mogu grupirati u klase koje predstavljaju značajke stvarnog svijeta na terenu.

Segmentacija slika u GIS-u se temelji na **Mean Shift** (srednji pomak) pristupu. Ova tehnika koristi pomičnu matricu kvadrata (prozor) prilikom izračuna prosječne vrijednosti piksela s ciljem utvrđivanja koji pikseli mogu biti uključeni u određeni segment. Kako se pomična mreža kvadrata pomiče preko multispektralne slike, iterativno se izračunavaju vrijednosti piksela kako bi se provjerila prikladnost svakog segmenta. Rezultat je grupiranje piksela slike u segmente koje karakterizira spektralna sličnost refleksije.

Izlazni rezultat *Mean Shift* alata je 3-kanalna, 8-bit rezolucijska segmentirana slika. Obilježja segmenata slike ovise o četiri parametra:

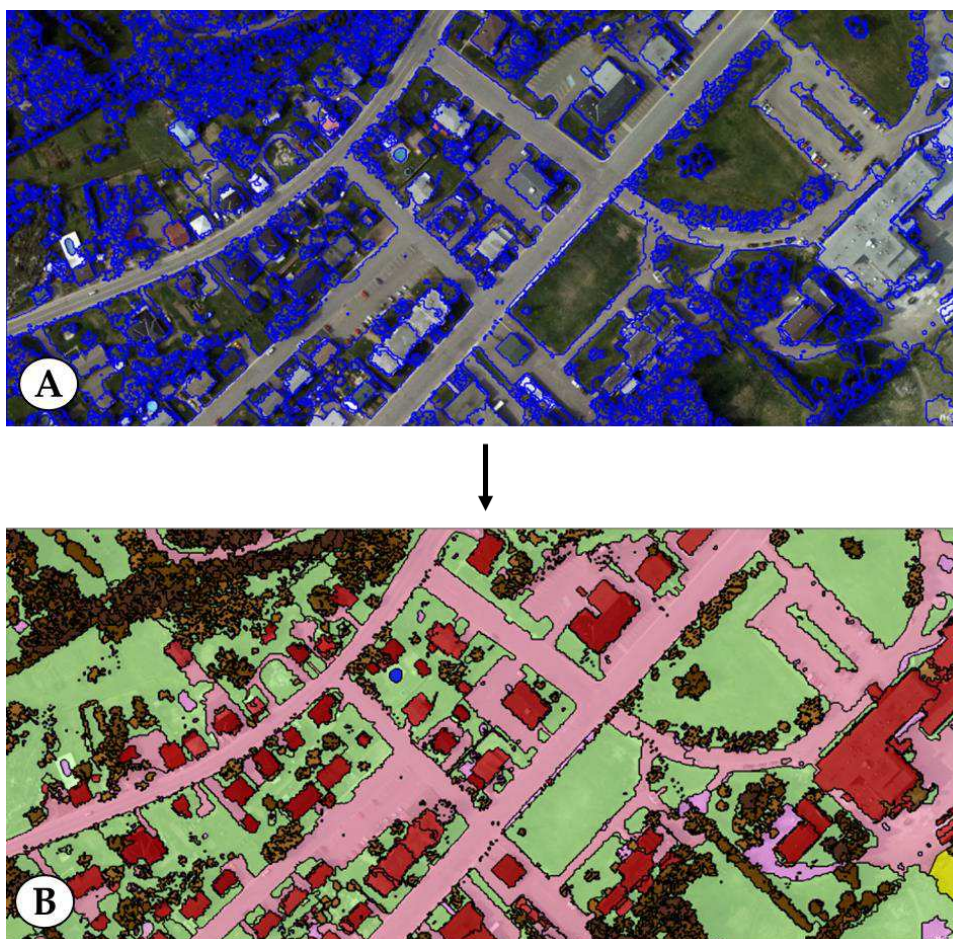
a) spektralnoj detaljnosti (*spectral detail*) - parametar kojim se postavlja razina važnost koja se daje spektralnim razlikama u vašoj multispektralnoj slici. U GIS-u varira od 1 do 20. Veće vrijednosti znače da se u procesu segmentacije daje veća važnost spektralnim razlikama između piksela. Drugim riječima, veće vrijednosti se koriste kad neke značajke na multispektralnom modelu imaju slične spektralne karakteristike, ali Vi ih želite klasificirati u odvojene klase. Manje vrijednosti kreiraju spektralno glatke izlazne rezultate. Primjerice, veće vrijednosti omogućuju diferencijaciju između različitih vrsta drveća, dok niže vrijednosti promatraju sve kao jednu klasu.

b) prostornoj detaljnosti (*spatial detail*) - parametar kojim se kojim se utvrđuje važnost blizine između značajki u multispektralnom modelu. Važeće vrijednosti u GIS-u su od 1 do 20. Viša vrijednost prikladna je za scenu u kojoj se žele izdvojiti male zbijene značajke, dok manje vrijednosti stvaraju prostorno gladak rezultat. Primjerice, ako se u sceni urbanog krajobraza postavje visoke vrijednosti zgrade i ceste se mogu klasificirati kao posebne klase (veća prostorna detaljnost). S druge strane, ako se u istoj sceni odaberu manje vrijednosti urbana scena će biti klasificirana kao jedinstvena klasa (manja prostorna detaljnost).

c) **minimalnoj jedinici segmenta** (*min_segment_size*) - parametar koji se izražava u pikselima. Spoja segmente manje od ove veličine sa svojim najprikladnijim susjednim segmentom.

d) **band_indexes** - parametar koji se odnosi na odabir jednog ili više kanala koji će se koristiti u segmentiranju multispektralnog snimka. Odabiru se oni kanali u kojima su razlike između značajki najuočljivije.

Veličina objekata koji nastaju segmentacijom slike ovisi o detaljnosti željenog modela zemljišnog pokrova te ulaznom podatku. Nakon segmentacije, dolazi do **klasifikacije** izdvojenih objekata. Oni se klasificiraju na temelju statističkih parametara koji su specifični za svaki objekt. Primjerice, objekti se mogu klasificirati na temelju **geometrije, boje (refleksije), površine, oblika, teksture, susjednosti (blizine oblika)** itd.



Slika III-10. A) Primjer procesa segmentacija i B) OBIA klasifikacije

Potrebno je istaknuti da ne postoji najbolji način klasificiranja značajki zemljišnog pokrova koristeći OBIA. Ipak, analitičari često koriste ove statistike za klasificiranje zemljišnog pokrova primjenom OBIA:

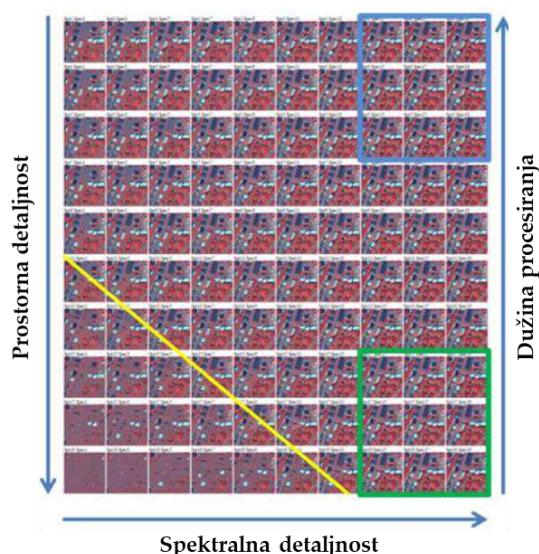
- **Vodne površine:** ravne plohe (niske vrijednosti DSM), akumulira se u depresijama (visok TWI ili nizak TPI), niska temperatura (termalne karakteristike) i visoka apsorpcija near-infrared zračenja (NDVI-a je negativan)
- **Staba:** neravne plohe (velika varijabilnosti u visinama, visoka SD u DSM-u), velika vrijednost refleksije infra-crvenog zračenja kod zdrave vegetacije (visok NDVI).
- **Građevine:** često pravokutnog oblika, visoka vrijednost DSM-a u odnosu na okolne oblike, veliki nagibi.
- **Trava:** uglavnom ravne površine, visoke vrijednosti u DSM-u (niska SD-a), umjerena refleksija infracrvenog zračenja (umjeren NDVI)
- **Ceste:** velika refleksija svjetlosti (visok RGB), uglavnom ravne plohe, nizak ili negativan NDVI.

Proces izrade modela zemljišnog pokrova primjenom GEOBIA u GIS-u se generalno može podijeliti na 5 koraka. Ovaj metodološki okvir bit će primijenjen u sljedećoj fazi projekta PEPSEA Split za potrebe generiranja modela zemljišnog pokrova uvale i naselja.

1. Izvođenje i segmentacija multispektralnog snimka

- Ulazni podatak može biti multispektralna i/ili crno-bijela slika.
- Odabir odgovarajućih vrijednosti parametara prilikom segmentacije slike.
- Odabir kanala u kojima su razlike u značajkama najuočljivije.
- Mora se postaviti kompromis između parametara prostorne i spektralne detaljnosti. U pravilu je dominantna spektralna detaljnost.
- Minimalna jedinica segmenta ovisi o minimalnoj jedinici kartirana (MMU¹⁵).
- Brzina procesiranja ovisi o razinama prostorne i spektralne detaljnosti. Veća detaljnost - duže vrijeme procesiranja.

¹⁵ Minimal Mapping Unit



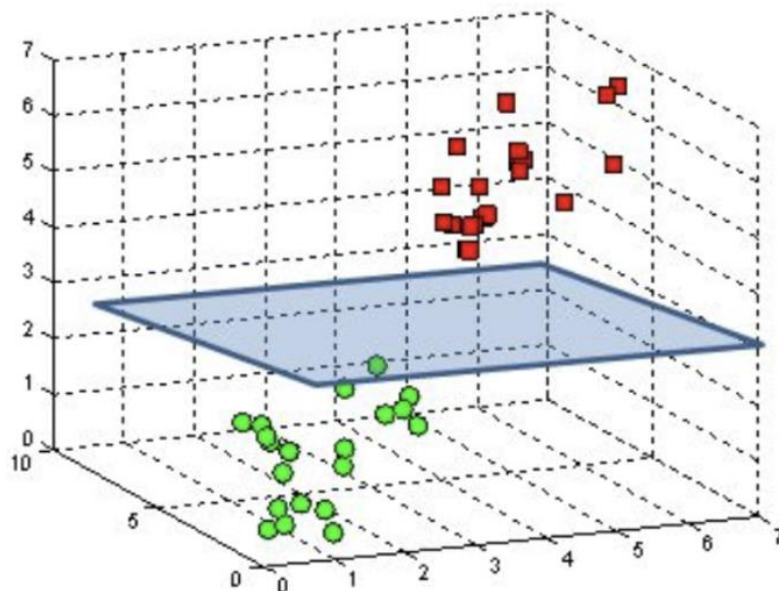
Slika III-11. Odnos spektralne i prostorne detaljnosti te vremena procesiranja

2. Označavanje i dodavanje uzoraka - *data augmentation*

- Definiranje klasifikacijske sheme.
- Prikupljanje poligonskih testnih uzoraka
- Provjera testnih uzoraka primjenom metode cross-validacije.
- *Data augmentation* ili povećanje podataka, koje se naziva i transformacija ili distorzija podataka, koristi se za umjetno povećanje broja uzoraka u testnom setu kroz primjenu specifičnih deformacija inputa (ulaznog podataka). Te deformacije uključuju: rotaciju, translaciju, rezanje te promjenu svjetline piksela.

3. Odabir klasifikatora (*train the classifier*)

- Odabir klasifikacije metode (*Support Vector Machine - SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster, Deep Learning*).
- Input uključuje: segmentiranu sliku, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata (boja, mean, sd., kvadratičnost, broj itd.).
- Izlazni rezultat je datoteka definicije klasifikator (*classifier definition .ecd*).



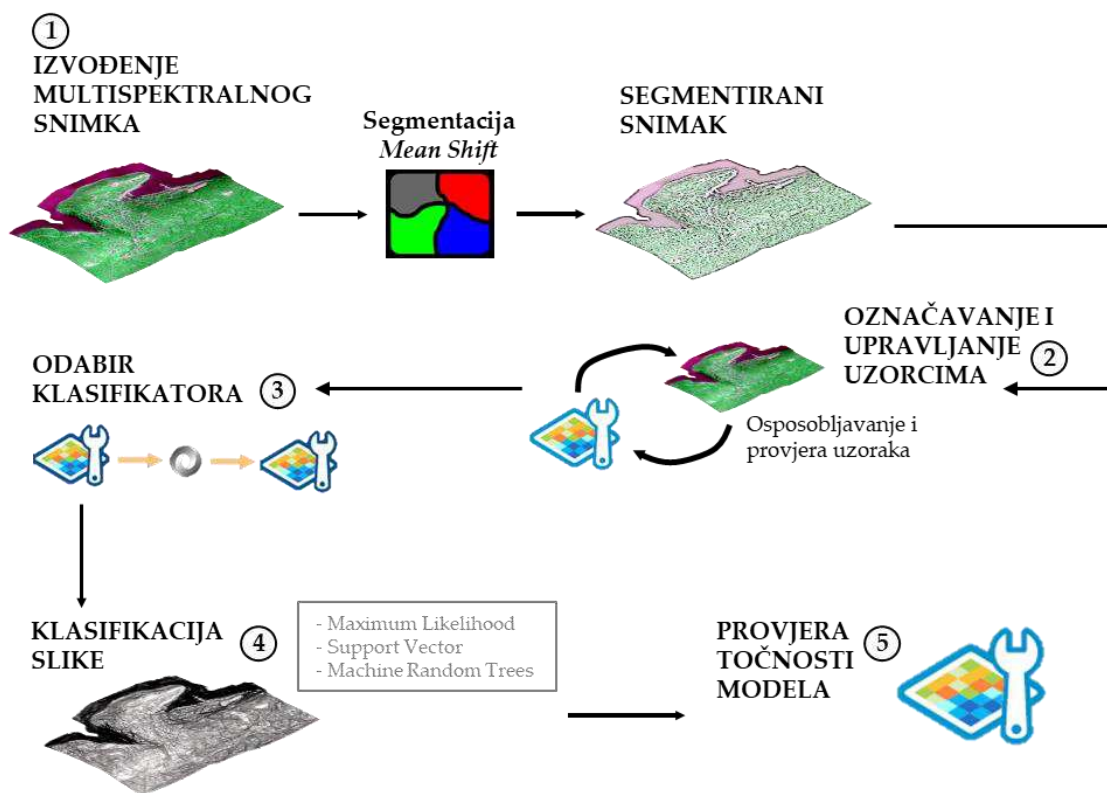
Slika III-12. Shematski prikaz rada SVM klasifikacije

4. Klasifikacija slike

- Izvođenje klasifikacije (SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster (unsupervised)).
- Input uključuje: segmentirani rasterski fajl, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata (boja, mean, sd., kvadratičnost, broj).

5. Procjena točnosti modela zemljišnog pokrova

- Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova
- Usporedba izvedenih klasa s referentnim terenskim podacima (*GRD*).
- Primjena različitih tehnika uzorkovanja (*random, stratified, equalized stratified random*).
- Izvođenje matrice konfuzije.

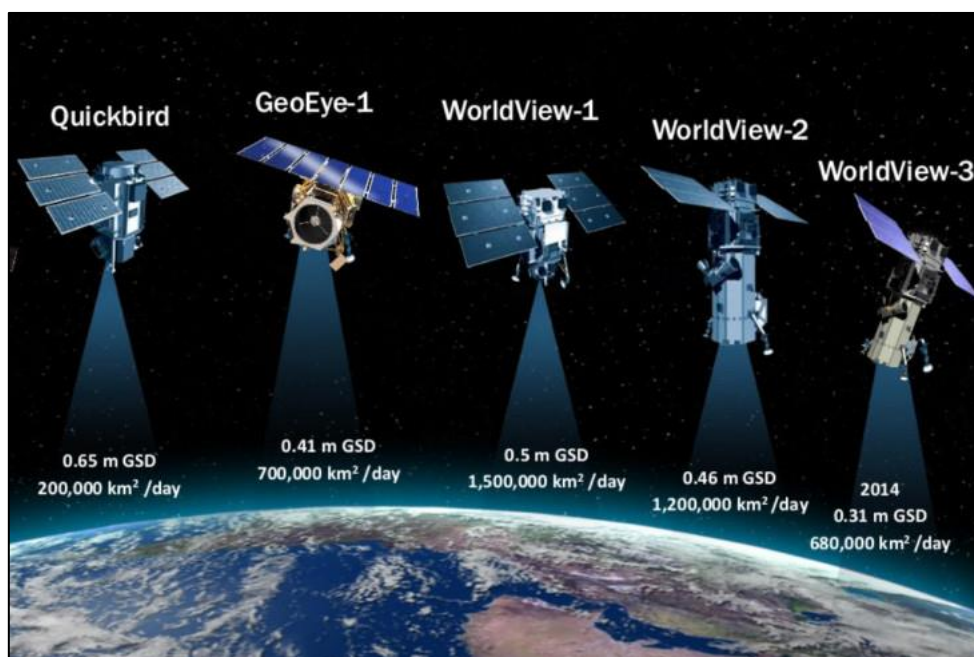


Slika III-13. Metodološki okvir izvođenja zemljišnog pokrova za obalni prostor Kaštelskog zaljeva

U konačnici, uzimajući u obzir prostorne i spektralne karakteristike multispektralnog snimka čije je izvođenje detaljno opisano u ovom izvješću, odlučeno je da će zemljišni pokrov za obalni prostor Kaštelskog zaljeva kartirati u mjerilu 1:1000.

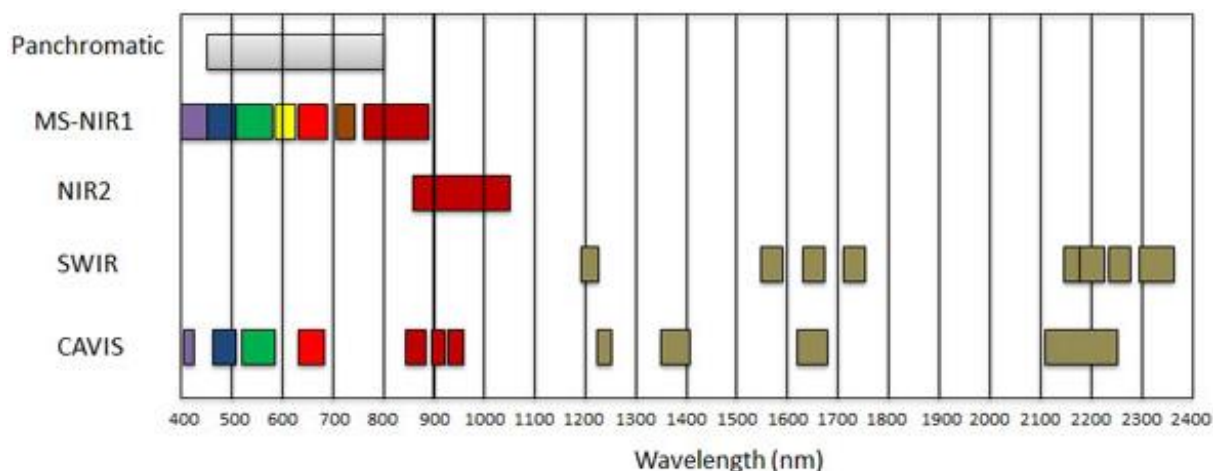
Worldview-3 multispektralni satelitski snimci

WorldView-3 (u nastavku WV-3) satelitske snimke prikuplja komercijalni multispektralni Worldview-3 satelit lansiran 13. kolovoza 2014. godine. Trenutačno WV-3 satelit predstavlja najmoderniji komercijalni satelit iz DigitalGlobe konstelacije (Slika III-14) s najvećim rasponom multispektralnih kanala. Osim pankromatskog kanala prostorne rezolucije 0.31 m, WV-3 satelit prikuplja 8 multispektralnih kanala iz vidljivog i bliskog infracrvenog dijela spektra, prostorne rezolucije 1.24 m, 8 kanala prostorne rezolucije 3.70 m iz kratkovalnog infracrvenog (engl. *shortwave-infrared* (SWIR)) dijela spektra, te 12 CAVIS (engl. *Clouds, Aerosols, Water Vapor, Ice and Snow*) kanala prostorne rezolucije 30 m (Slika III-15).



Slika III-14. Suvremeni komercijalni sateliti iz DigitalGlobe konstelacije

WV-3 satelit prikuplja snimke u kružnoj orbiti, sinkroniziranoj sa Suncem, unutar koje kruži oko Zemlje na visini od otprilike 617 km s ophodnim vremenom od 97 minute. (Maxar, 2020c). Vremenska rezolucija iznosi 1 dan, dok vidno polje WV-3 satelita obuhvaća 112 km x 65.5 km kod mono snimaka te 112 km x 26.2 km kod stereo snimaka.



Slika III-15. Raspored multispektralnih kanala WV-3 satelita unutar spektra elektromagnetskog zračenja

Obilježja **MULTISPEKTRALNOG** snimka (World View 3) šireg prostora Kaštelanskog zaljeva.

- prostorna rezolucija **30 CM**
- radiometrijska rezolucija **16 bit**
- spektralna rezolucija **8 kanala** (red, red edge, coastal, blue, green, yellow, near-IR1 and near-IR2) **400 nm - 1040 nm**
- visina: 617 km
- Panchromatic: **450-800 nm**
- Panchromatic Nadir: **0.31 m** GSD at Nadir 0.34 m at 20° Off-Nadir
- Multispectral Nadir: **1.24 m** at Nadir, 1.38 m at 20° Off-Nadir
- Geolocation Accuracy(CE90) Predicted Performance: <3.5 m CE90 without ground control

Minimalna minimalna širina kartiranja će iznositi 1 m. Kao ulazni podatci koristiti će se multispektralni snimak (prostorna rezolucija 30 cm), a za metodu kartiranja klasa koristiti će se geografske objekno-orijentirane analize čiji su koraci objašnjeni u prethodnom poglavlju. Zemljišni pokrov obuhvaćat će 15-25 klasa (ovisno o detaljnosti podjele) koje će biti određene na temelju primjera dobre prakse ali i lokalnih specifičnosti (prirodna i antropogena obilježja) snimanog prostora. Svaka klasa će se vrednovati i standardizirati s obzirom na moguću razinu rizika onečišćenja prema obalnom području i moru.

U nastavku je dan inicijalni prijedlog klasa zemljišnog pokrova:

1. MORE

2. SLATKOVODNE VODENE POVRŠINE - vodene akumulacije

3. URBANI PROSTOR

(3.1 Prometnice, betonske površine)

(3.2 Stambene jedinice/objekti)

4. POLJOPRIVREDNO ZEMLJIŠTE

(4.1 Smeđe tlo)

(4.2 Vinograd)

(4.3 Sezonska kultura)

5. ZELENE POVRŠINE (igrališta, ukrasni vrtovi, parkovi)

6. NEODRŽAVANE ZELENE POVRŠINE

(6.1 Šuma)

(6.2 Makija)

(6.3 Opožarene površine)

(6.4 Niska vegetacija - zdrava i suha)

7. ANTROPOGENI OBLICI U KRŠU

(7.1 Suhozidi)

(7.2 Bunari)

(7.2 Kamenolomi)

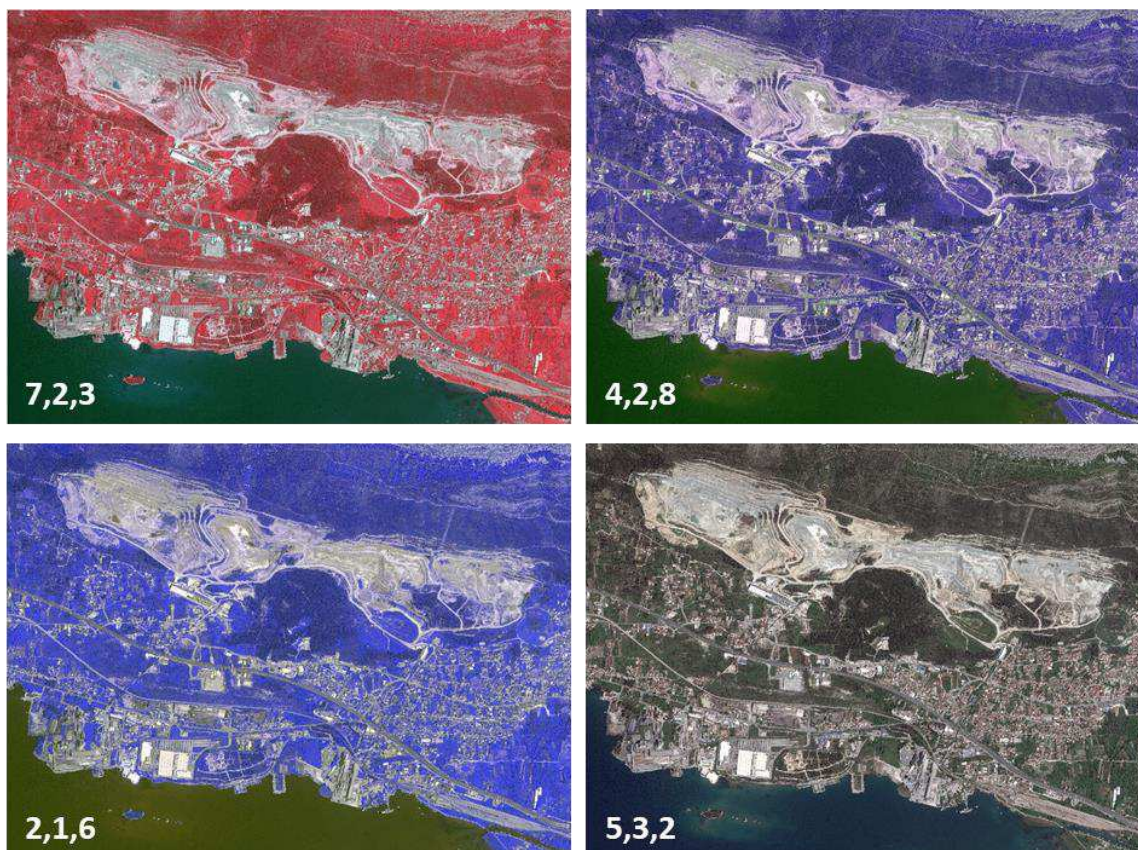
8. OGOLJENI KRŠ

9. MAKADAM

c) Obrada, analiza i vizualizacija prikupljenih podataka

Izvođenje multispektralnog snimka

U prvom koraku izvođenja modela zemljišnog pokrova kreiran je multispektralni snimak. Multispektralni snimak je prostorno unaprijeđen koristeći *Modified IHS Resolution Merge* pan sharpen tehniku. Prostorna rezolucija multispektralnog snimka je nakon izvođenja ove metode iznosila 30 cm, u odnosu na inicijalni ulazni podataka od 1.24 m. Snimka je unaprijeđena koristeći pankromatski kanal. Pankromatski kanal je visokorazlučiv kanal koji, na temelju raznih metoda (npr. Brovey-eva transformacija, Gram-Schmidt-ova, Intenzitet-nijansa-zasićenost (engl. IHS), omogućuje poboljšanje razlučivosti multispektralnih kanala. Razvojem novih metoda izoštravanja snimaka teži se dobivanju kvalitetnijih snimaka, vizualno sličnih originalu, ali statistički najviše različitih te ubranju postupka izoštravanja.



Slika III-16. Izvedeni multispektralni snimak

Segmentacija multispektralnog snimka

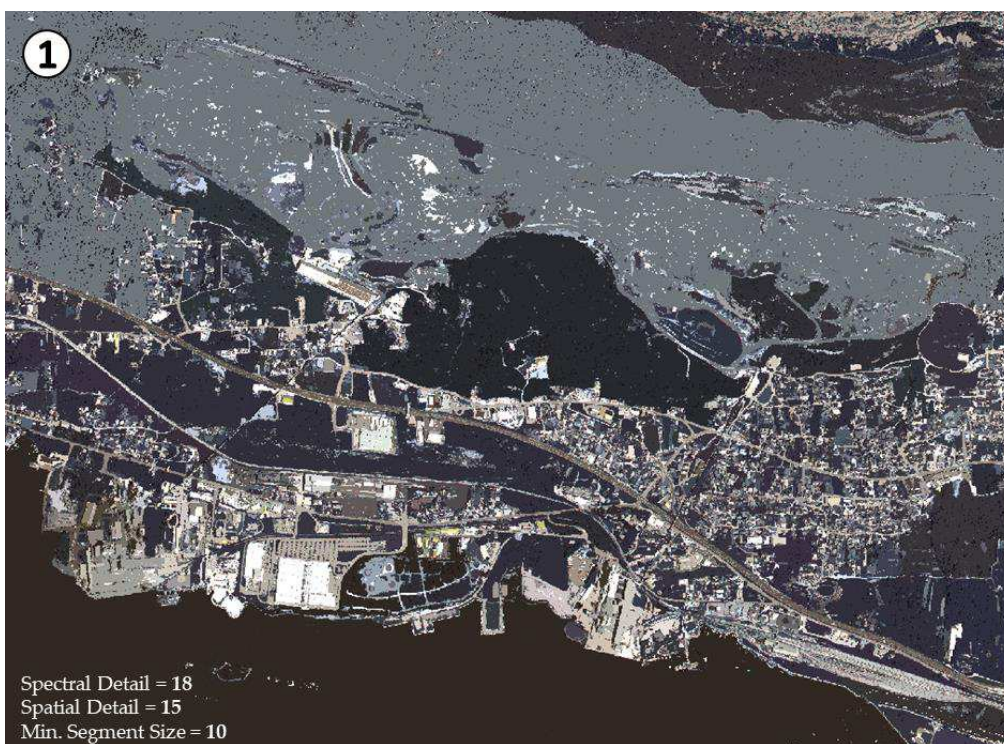
Unaprjeđenjem tehnologije satelitskih senzora prostorna rezolucija satelitskih snimaka se značajno povećala. U snimcima visoke prostorne rezolucije često se događa da različite klase (npr. betonske površine i krš) imaju slične spektralne značajke (refleksiju) ili da vrijednosti istih klasa imaju različite spektralne značajke (npr. cesta ili cesta u sjeni, cesta od makadama - snažna spektralna varijabilnost između klasa). Dakle, pixel-based pristup u takvim situacijama ne dovodi samo do pogrešne klasifikacije već i do rezultata koje karakteriziraju "razlomljeni" uzorci (površine).

Međutim, pravi izazov u OBIA metodi predstavlja definiranje odgovarajućih parametara segmentacije.

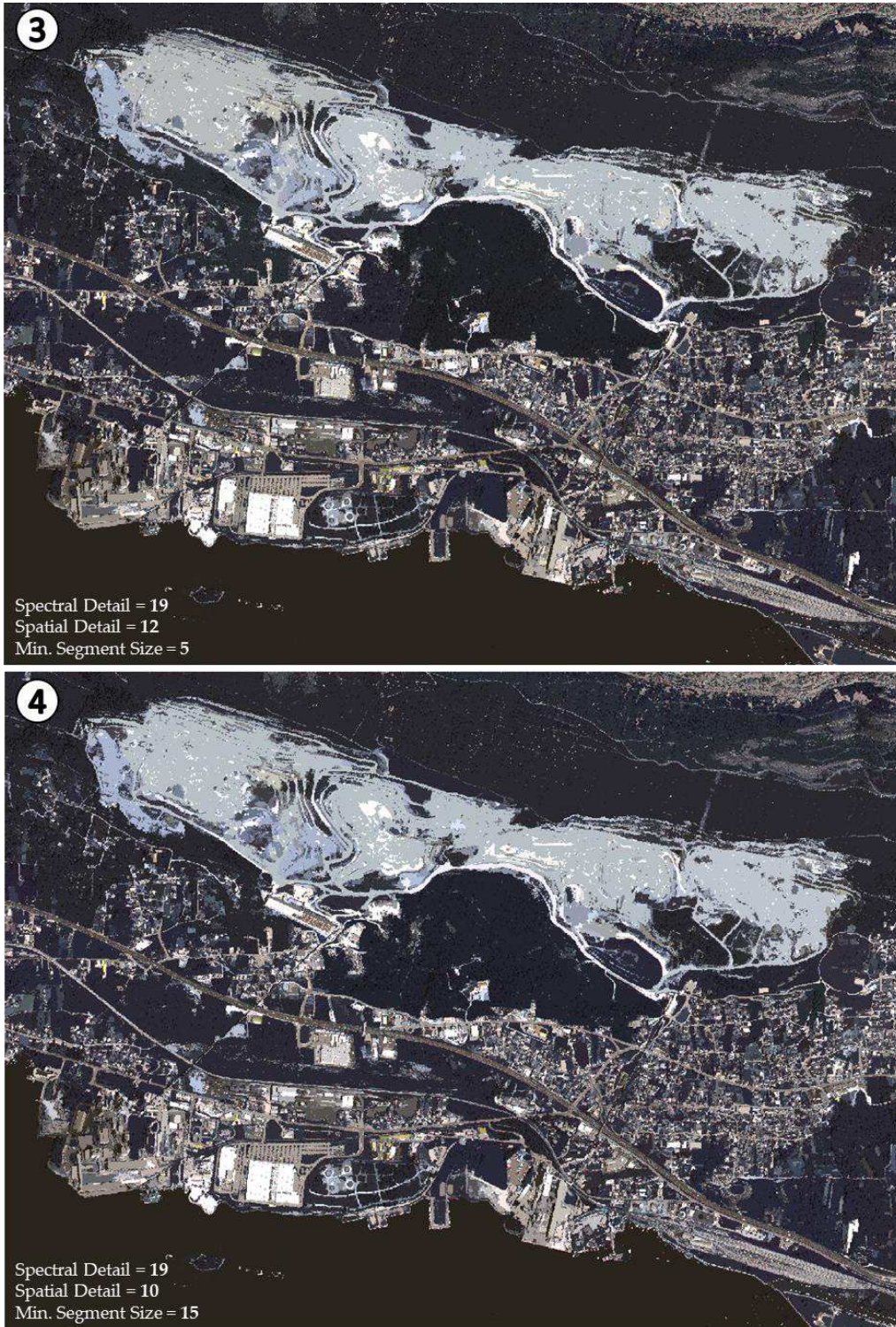
Segmentacija multispektralnog snimka (*Segment Mean Shift*) je lokalna tehnika homogenizacije koja je vrlo korisna za prigušivanje sjenčanja ili razlike tona u lokaliziranim objektima. Njome se zamjenjuje svaki piksel s prosjekom piksela u rasponu (r) susjedstva i čija se vrijednost nalazi unutar udaljenosti (d). Na izlazne rezultate multispektralnog snimka najviše utječu prostorna i spektralna domena slike (parametri *spectral* and *spatial detail*). Naime, multispektralni snimak je kombinacija između prostorne i spektralne domene, gdje prostorna domena znači prostor koordinata slikovnih piksela, dok spektralna domena znači vrijednosti piksela digitalnog broja (DN).

U procesu segmentacije izvedena su četiri testna segmentirana modela (Slika III-17 i III-18) ulaznog multispektralnog snimka s različitim parametrima. Cilj je bio provjeriti kako korisničko-definirani parametri utječu na izlazne rezultate.

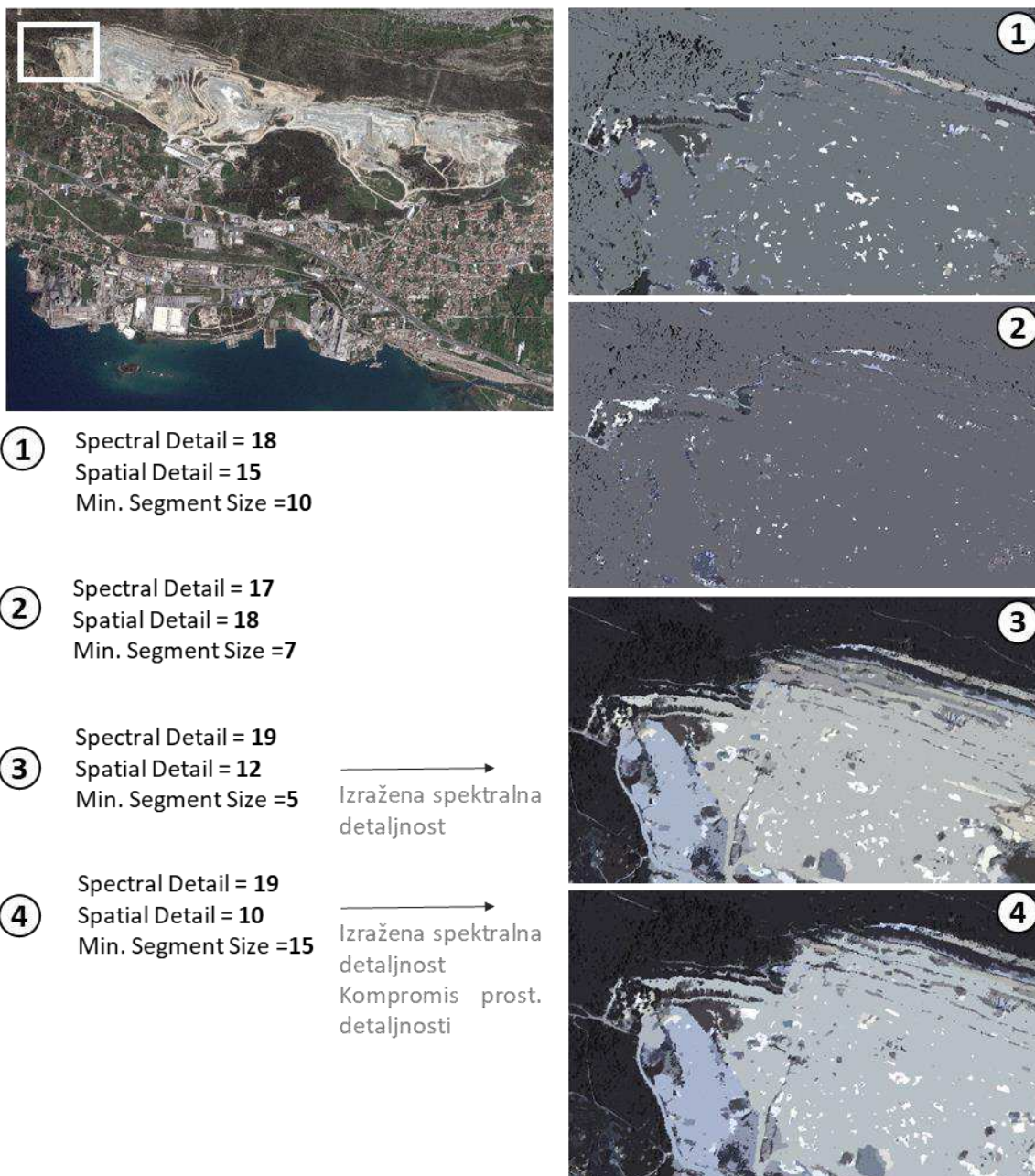
- 1) Spectral Detail = **18**, Spatial Detail = **15**, Min. Segment Size = **10**
- 2) Spectral Detail = **17**, Spatial Detail = **18**, Min. Segment Size = **7**
- 3) Spectral Detail = **19**, Spatial Detail = **12**, Min. Segment Size = **5**
- 4) Spectral Detail = **19**, Spatial Detail = **10**, Min. Segment Size = **15**



Slika III-17. Primjeri segmentiranih snimaka 1 i 2



Slika III-18. Primjeri segmentiranih snimaka 3 i 4



Slika III-19. *Primjeri utjecaja korisničko-definiranih parametara na segmentaciju kamenoloma i šume*



① Spectral Detail = 18
Spatial Detail = 15
Min. Segment Size = 10

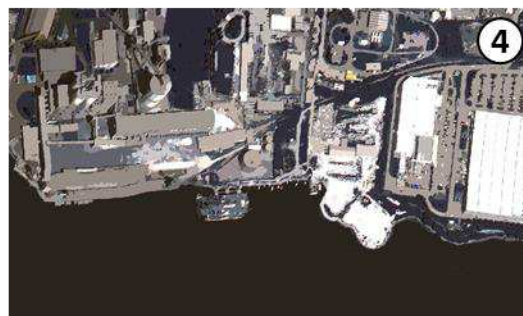
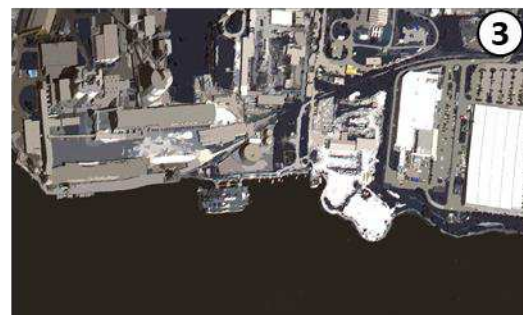
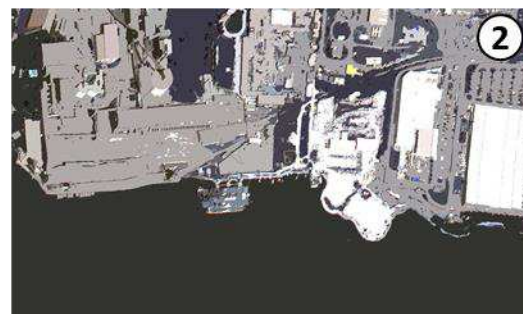
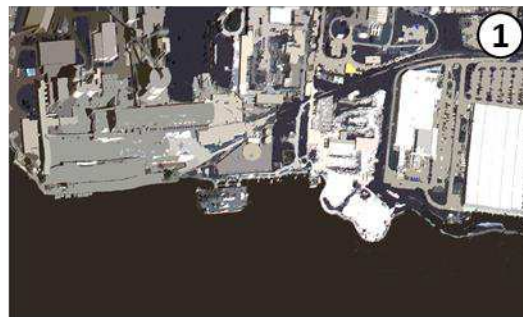
② Spectral Detail = 17
Spatial Detail = 18
Min. Segment Size = 7

③ Spectral Detail = 19
Spatial Detail = 12
Min. Segment Size = 5

④ Spectral Detail = 19
Spatial Detail = 10
Min. Segment Size = 15



Izražena spektralna
detaljnost
Kompromis prost.
detaljnosti



Slika III-20. *Primjeri utjecaja korisničko-definiranih parametara na segmentaciju izrađenog dijela prostora istraživanja*

Vizualnom usporedbom segmentiranih snimaka može se zaključiti da parametar spektralne detaljnosti najviše utječe na izlazne rezultate, osobito u području kamenolom/šuma/krš (Slika III-19-20).

Vrijednosti manje od 18 u ovom slučaju u potpunosti spektralno generaliziraju taj prostor (Slika III-19-20). Dakle, odlučeno je da se označavanje i prikupljanje testnih uzoraka napravi na četvrtom segmentiranom snimku koji predstavlja kompromis između izražene spektralne detaljnosti te prostorne detaljnosti, što je jedna od preporuka prilikom izvođenja OBIA analiza.

Označavanje i upravljanje uzorcima

Na odabranom segmentiranom snimku označeni su testni uzorci. Na slici III-21. prikazani su primjeri statističkih parametara koji su korišteni kao atributi segmentata. Korišten je klasifikator *Train Support Vector Machine* (SVM).

SVM klasifikator predstavlja snažnu, popularnu klasifikacijsku metodu koja može analizirati segmentirani rasterski unos ili standardnu sliku. Ovo je relativno nova metoda klasifikacije koja se široko koristi među istraživačima. Klasifikator SVM ima nekoliko prednosti, za razliku od tradicionalnih metoda klasifikacije. SVM klasifikator može obraditi vrlo velike segmentirane slike, čija tablica atributa može postati prilično velika, što je posebno korisno kod slika visoke razlučivosti. Manje je podložan buci, koreliranim pojasevima i neuravnoteženom broju. Bilo koji raster koji podržava Esri prihvaćen je kao ulaz, uključujući rasterske proizvode, segmentirani raster, mozaike, usluge slike ili generičke skupove rasterskih podataka. Segmentirani rasteri moraju biti 8-bitni rasteri s 3-opsegom.

01_More				02_Kamenolom			
<u>Statistics</u>				<u>Statistics</u>			
	sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3		sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3
Minimum	7,00	8,00	7,00	Minimum	22,00	28,00	27,00
Maximum	7,00	8,00	7,00	Maximum	28,00	39,00	40,00
Mean	7,00	8,00	7,00	Mean	27,19	38,19	38,39
Std.dev	0,00	0,00	0,00	Std.dev	0,40	0,40	0,80
<u>Covariance</u>				<u>Covariance</u>			
sms_cetvrc1	0,00	0,00	0,00	sms_cetvrc1	0,16	0,16	0,32
sms_cetvrc2	0,00	0,00	0,00	sms_cetvrc2	0,16	0,16	0,32
sms_cetvrc3	0,00	0,00	0,00	sms_cetvrc3	0,32	0,32	0,63
03_Niska_ve...				04_Zemlja			
<u>Statistics</u>				<u>Statistics</u>			
	sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3		sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3
Minimum	5,00	6,00	10,00	Minimum	22,00	30,00	37,00
Maximum	8,00	11,00	13,00	Maximum	27,00	38,00	42,00
Mean	7,40	9,61	12,24	Mean	25,11	36,11	40,11
Std.dev	0,49	0,85	0,43	Std.dev	0,46	0,47	0,46
<u>Covariance</u>				<u>Covariance</u>			
sms_cetvrc1	0,24	0,36	0,14	sms_cetvrc1	0,21	0,22	0,21
sms_cetvrc2	0,36	0,72	0,33	sms_cetvrc2	0,22	0,22	0,22
sms_cetvrc3	0,14	0,33	0,18	sms_cetvrc3	0,21	0,22	0,21
07_Kamen_b...				09_Beton			
<u>Statistics</u>				<u>Statistics</u>			
	sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3		sms_cetvrc1	sms_cetvrc2	sms_cetvrc3
Minimum	1,00	1,00	3,00	Minimum	9,00	11,00	9,00
Maximum	49,00	65,00	63,00	Maximum	27,00	33,00	30,00
Mean	17,77	22,51	21,94	Mean	17,42	21,47	19,38
Std.dev	6,27	7,37	6,33	Std.dev	6,42	8,15	8,01
<u>Covariance</u>				<u>Covariance</u>			
sms_cetvrc1	39,37	40,51	35,79	sms_cetvrc1	41,24	52,26	51,27
sms_cetvrc2	40,51	54,37	46,27	sms_cetvrc2	52,26	66,46	65,25
sms_cetvrc3	35,79	46,27	40,02	sms_cetvrc3	51,27	65,25	64,14

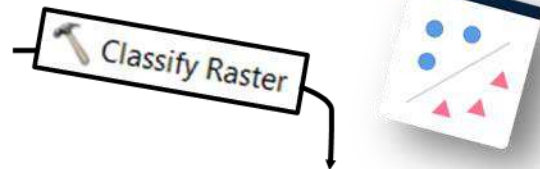
Slika III-21. Primjeri statističkih parametara koji su korišteni kao atributi segmenata prilikom kreiranja datoteke klasifikatora

Klasifikacija slike

Klasifikacija slike je napravljena prema definiranoj datoteci klasifikatora (.ecd). Input je bio segmentirani snimak te definirana datoteka klasifikatora (.ecd). Izlazni rezultat je tematski klasificiran skup podataka s definiranim klasama simboliziranim prilikom procesa označavanja uzoraka (Slika III-22).



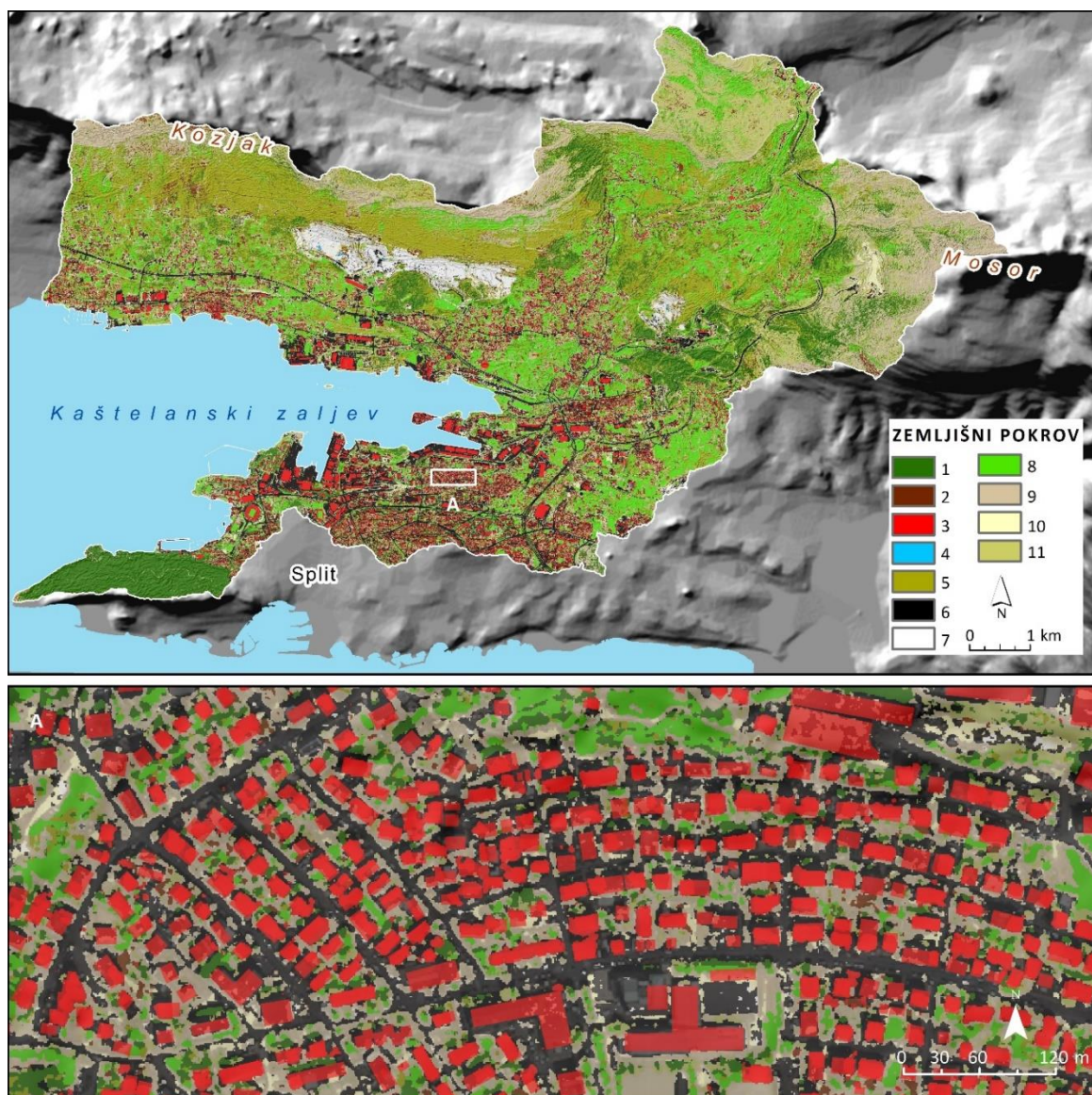
Support Vector Machines



Slika III-22. *Primjer tematski klasificiranog skupa podataka s definiranim klasama*

Izrada modela zemljišnog pokrova

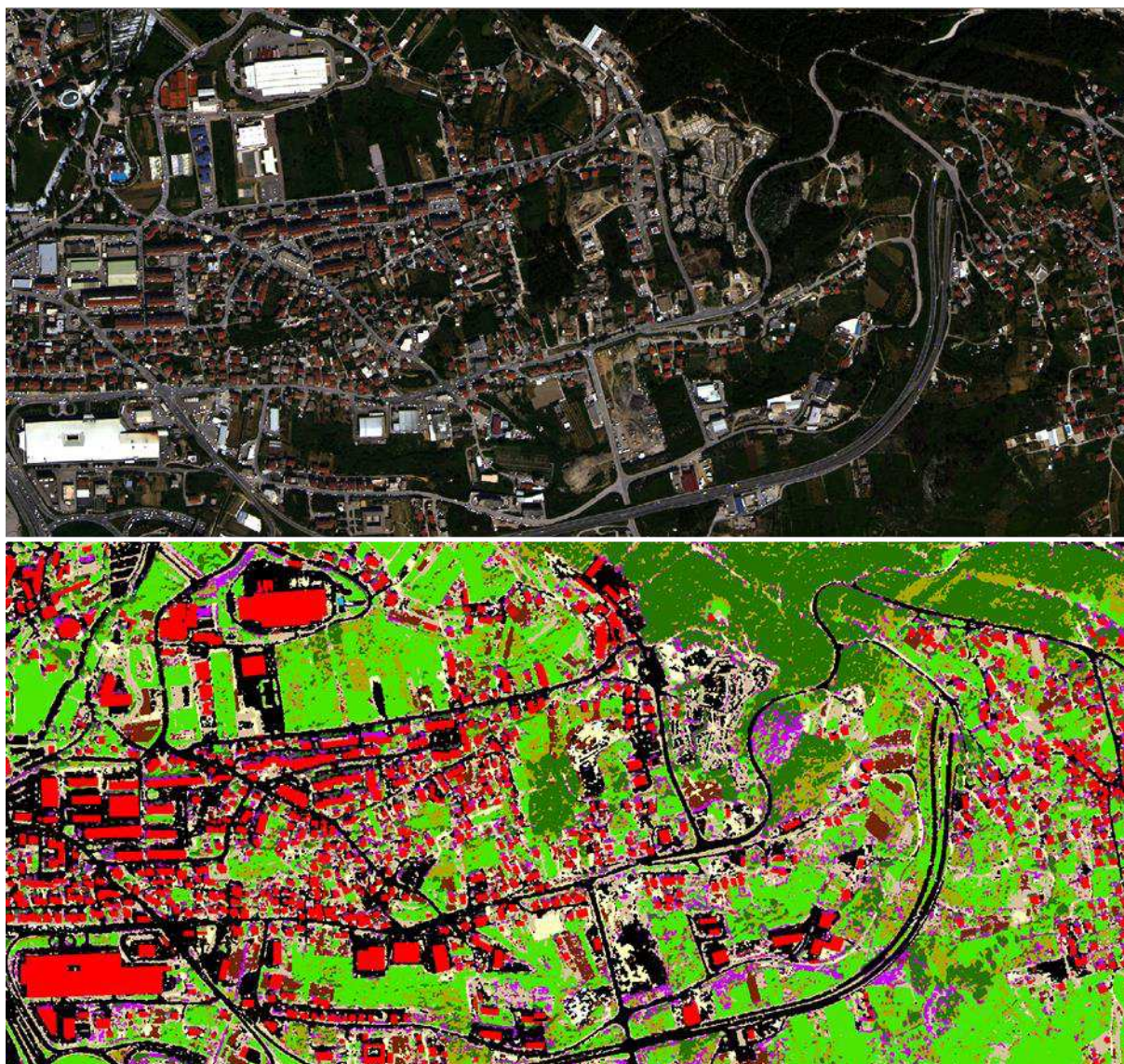
Iz multispektralnog drenažnog bazena Kaštelanskog zaljeva generiran je model zemljišnog pokrova koji sadrži ukupno 11 klasa ako se isključi klasa *More* (Slika III-23).



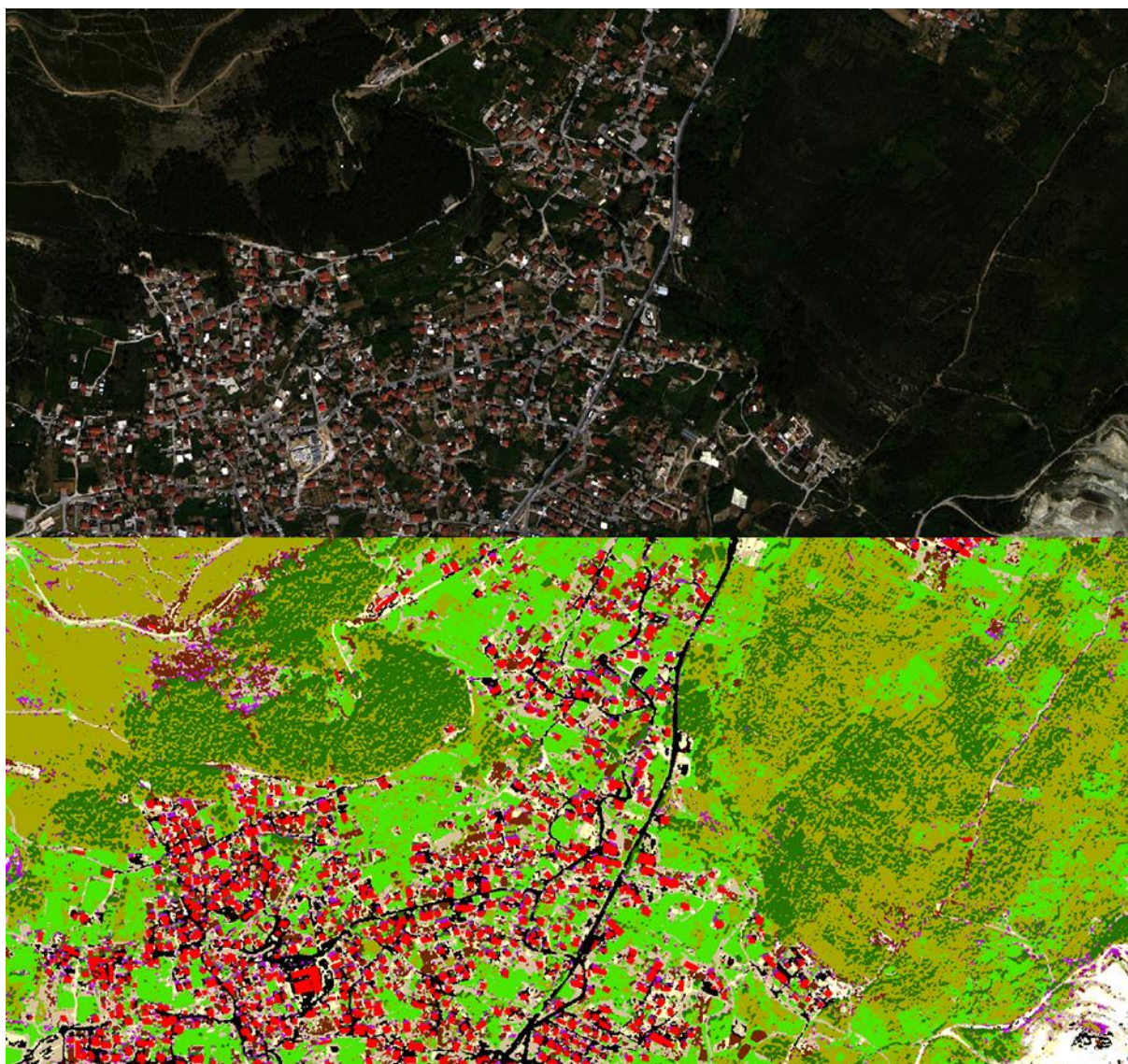
Slika III-23. Model zemljišnog pokrova za drenažni bazen Kaštelanskog zaljeva

1 - Borova šuma, 2 - Smeđe tlo, 3 - Urbano (objekti), 4 - Vodene površine, 5 - Grmolika vegetacija, 6 - Urbano (betonske površine, ceste) - podklasa 6.1 Industrijska postrojenja, 7 - Kamenolom, 8 - Gusta niska zdrava vegetacija, 9 - Krš sa oskudnom vegetacijom, 10 - Makadam (šljunak, zemlja), 11 - Oskudna niska suha vegetacija

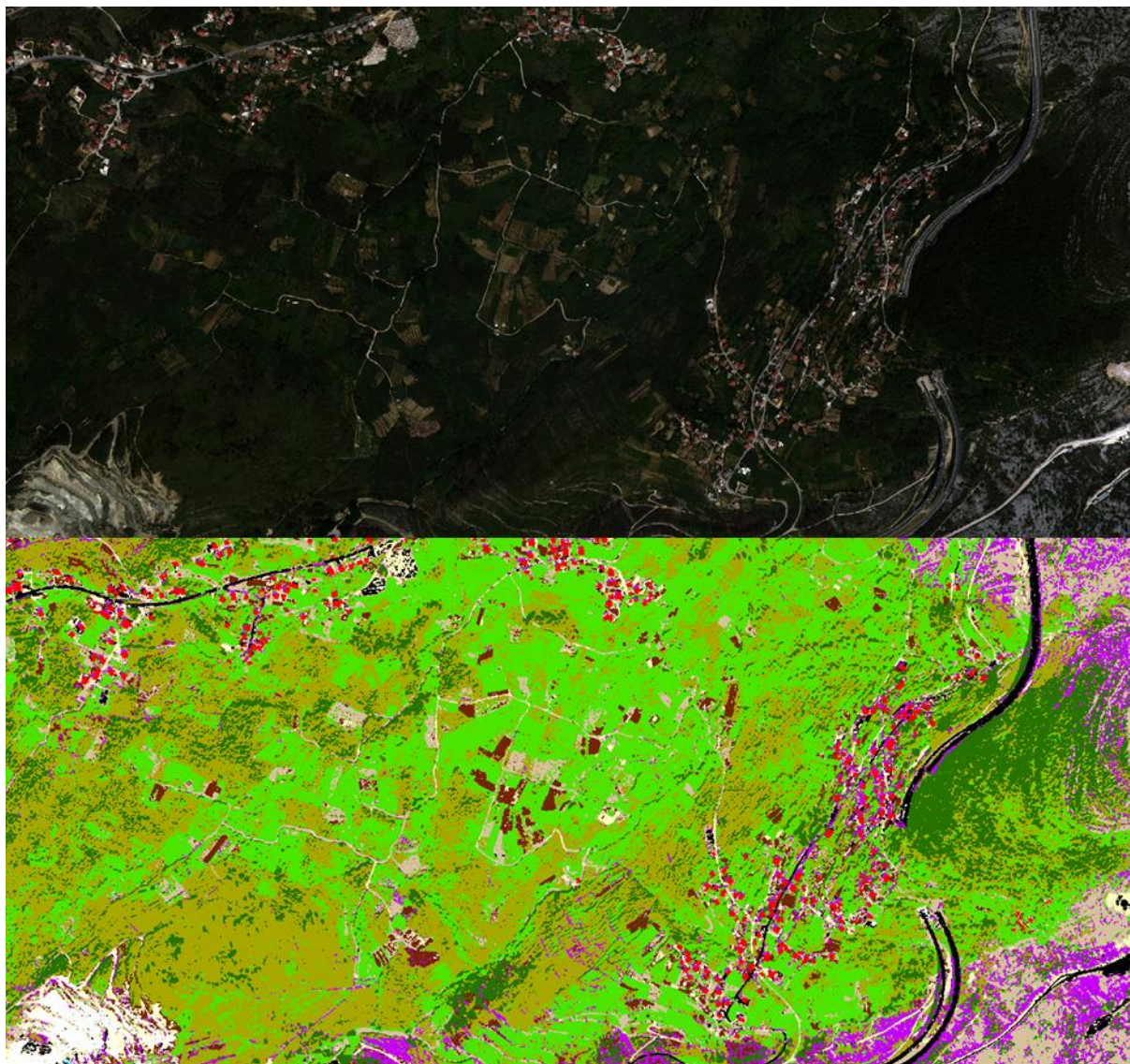
Na slikama III-24-25-26 prikazani su primjeri izgleda istog područja na multispektralnim snimkama i modelu zemljišnog pokrova.



Slika III-24. Primjer izgleda istog područja na multispektralnim snimkama i modelu zemljišnog pokrova (1)

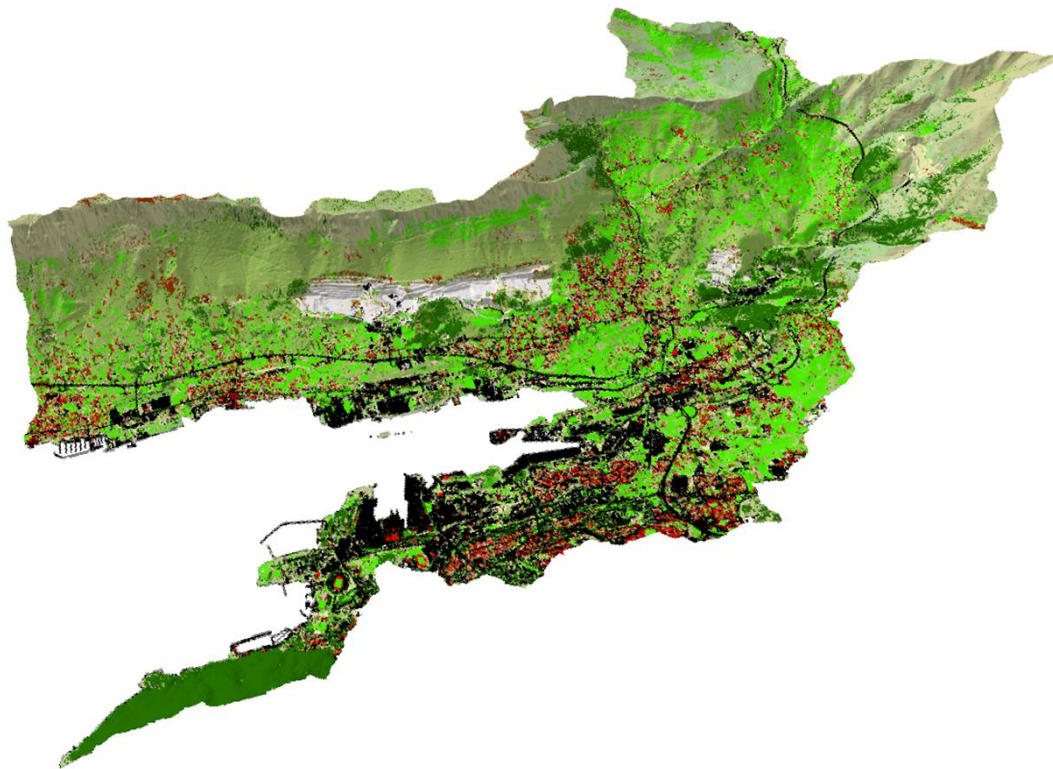


Slika III-25. Primjer izgleda istog područja na multispektralnim snimkama i modelu zemljišnog pokrova (2)



Slika III-26. *Primjer izgleda istog područja na multispektralnim snimkama i modelu zemljišnog pokrova*
(3)

Na slici III-27. prikazan je 3D model zemljišnog pokrova drenažnog bazena Kaštelanskog zaljeva.



Slika III-27. 3D model zemljišnog pokrova šireg područja Kaštelanskog bazena

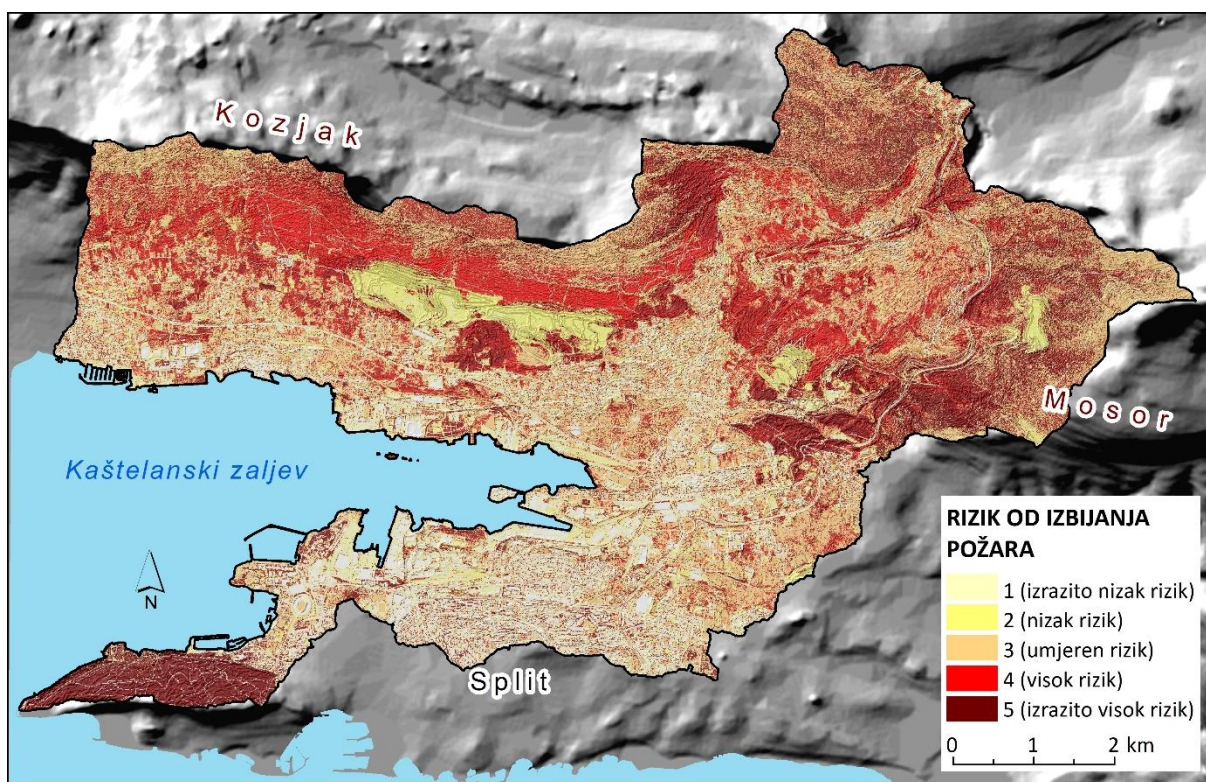
Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora (drenažni bazen). Rasterski model zemljišnog pokrova pretvoren je poligon. Potom su poligonski elementi okupljeni na temelju sličnosti atributa klase i identifikacijskog broja. Nakon okupljanja izračunata je površina svake klase te njezin udjel u ukupnoj površini drenažnog bazena.

Tablica III-2. Deskriptivna statistika modela zemljišnog pokrova

ID	KLASE	Površina (ha)	%
1	Borova šuma	742,3847	12,87
2	Smeđe tlo	202,8794	3,52
3	Urbano (stambeni i drugi objekti)	106,8574	1,85
4	Vodene površine	1,8334	0,03
5	Grmolika vegetacija	1003,088	17,39
6	Urbano (ceste, betonske površine)	749,0981	12,99
6.1	Industrijska postrojenja	24,49	0,43%
7	Kamenolom	152,0766	2,64
8	Gusta niska zdrava vegetacija	902,1121	15,64
9	Krš (oskudna vegetacija)	991,7048	17,19
10	Makadam (zemlja, šljunak)	220,423	3,82
11	Oskudna niska suha vegetacija	696,082	12,07
		5768,54	100,00

Modela zemljišnog pokrova je poslužila kao jedan od kriterija u analizama rizika od izbijanja požara raslinja. Naime, generirane klase zemljišnog pokrova su reklasificirane prema i rizika od izbijanja požara u 5 klasa (Slika III-28).

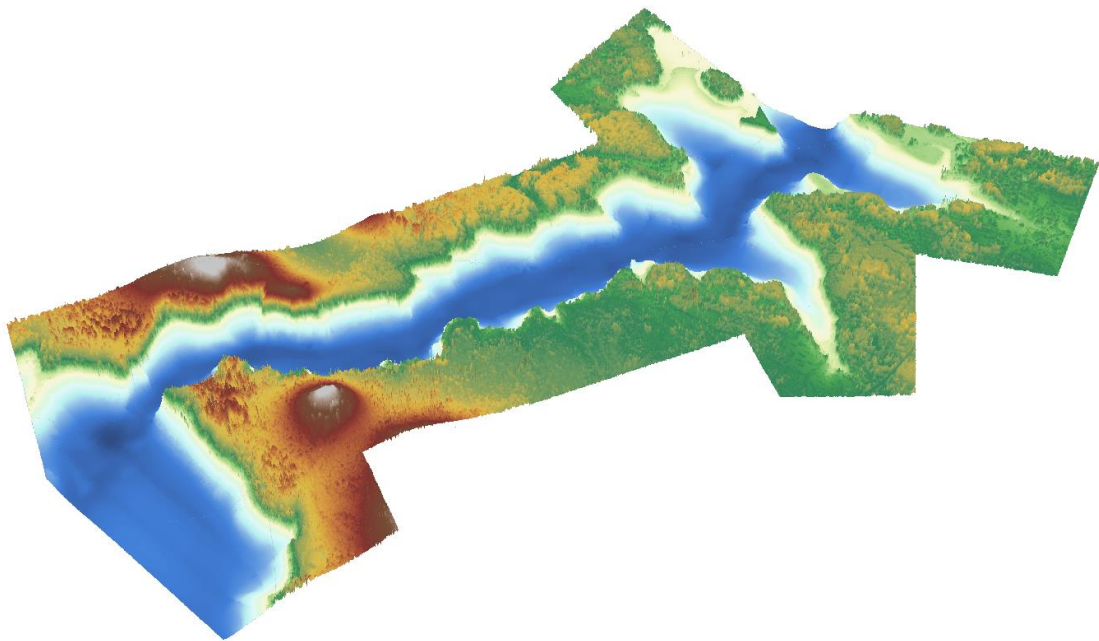
- 1 = *izrazito slab rizik*
- 2 = *slab rizik*
- 3 = *umjeren rizik*
- 4 = *visok rizik*
- 5 = *izrazito visok rizik*



Slika III-28. Klase zemljišnog pokrova reklasificirane po riziku izbijanja požara

C. PROJECT PARTNER 4 – ŠIBENIK-KNIN COUNTY

I. BATIMETRIJSKA I GEODETSKA IZMJERA KANALA SV. ANTE INTEGRALNIM MJERNIM SUSTAVOM



BATHYMETRIC AND GEODETIC SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL BY AN INTEGRATED MEASURING SYSTEM

Abstract

The report describes in detail the bathymetric and geodetic survey of the St. Anthony's Channel using the integrated multibeam system WASSP S3. Furthermore, UAV photogrammetric imaging of a wider area of the Channel was performed in order to obtain data on the length of the coastline and to develop a high-resolution model for the better visualization of the research area. The carried-out activities resulted in the development of a detailed bathymetric map (high resolution model), a model of bottom hardness and documentation of the current state of the Channel.

Sažetak

U izvješću je detaljno opisana batimetrijska i geodetska izmjera kanala Sv. Ante primjenom integralnog višesnopnog (*multibeam*) sustava WASSP S3. Nadalje, izvedeno je UAV fotogrametrijsko snimanje širega područja kanala s ciljem dobivanja podatka o duljini obalne linije i izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja. Provedene aktivnosti su rezultirale izradom detaljne batimetrijske karte (modela visoke rezolucije), modelom tvrdoće dna te dokumentacijom trenutnog stanja kanala.

1.Uvod

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju prirodnih procesa na Zemljinoj površini (Blaszczynski, 1997; Bishop i dr., 2012). U početcima terenskih istraživanja, modeliranje Zemljine površine vršilo se na licu mjesta (Blaszczynski, 1997; Shroder i Bishop, 2003), no razvojem geoprostornih tehnologija (geografski informacijski sustav (GIS), globalni položajni sustav (GPS) i daljinska istraživanja (RS – *remote sensing*)) za prikupljanje i obradu podataka (Bodzin i Cirucci, 2009; Mareddy i dr., 2017; Šiljeg i dr., 2018), u posljednjih dvadesetak godina (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018), došlo je do revolucije u geomorfometriji (Pike, 2000; Gessler i dr. 2009; Guth, 2013). Proces izrade digitalnog modela reljefa i izvođenja analiza na temelju njega naziva se digitalno modeliranje reljefa (Šiljeg i dr., 2018). Model je objekt ili koncept koji se koristi za predstavljanje nečega drugog, odnosno pojednostavljena stvarnost pretvorena u oblik koji možemo razumjeti (Meyer, 1995; Wu i Marceau, 2002). Prema tome, modeliranje je proces kojim se uspostavlja veza između oblika i procesa na Zemljinoj površini i modela. Ovisno o svrsi istraživanja, geoprostorne tehnologije u modeliranju kompleksnih procesa i oblika omogućuju različite razine detaljnosti (Šiljeg, 2019). U svrhu poboljšanja kvalitete modela, s ciljem analize, vizualizacije i interpretacije, izrađuju se integralni modeli. To su modeli izrađeni od podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (Fabris i dr., 2010; Abdalla, 2016). Ovisno o objektu, cilju i svrsi istraživanja primjenjuju se različite vrste geoprostornih tehnologija. Batimetrija, kao znanost o mjerenju i kartiranju dubina, izuzetno je bitna pri izradi modela koji uključuju vodene površine (Kearns i Breman, 2010), dok primjerice aerofotogrametrija i laserska (LiDAR) tehnologija imaju veoma važnu ulogu pri stvaranju kvalitetnih digitalnih modela kopnenih područja (Fabris i dr. 2010).

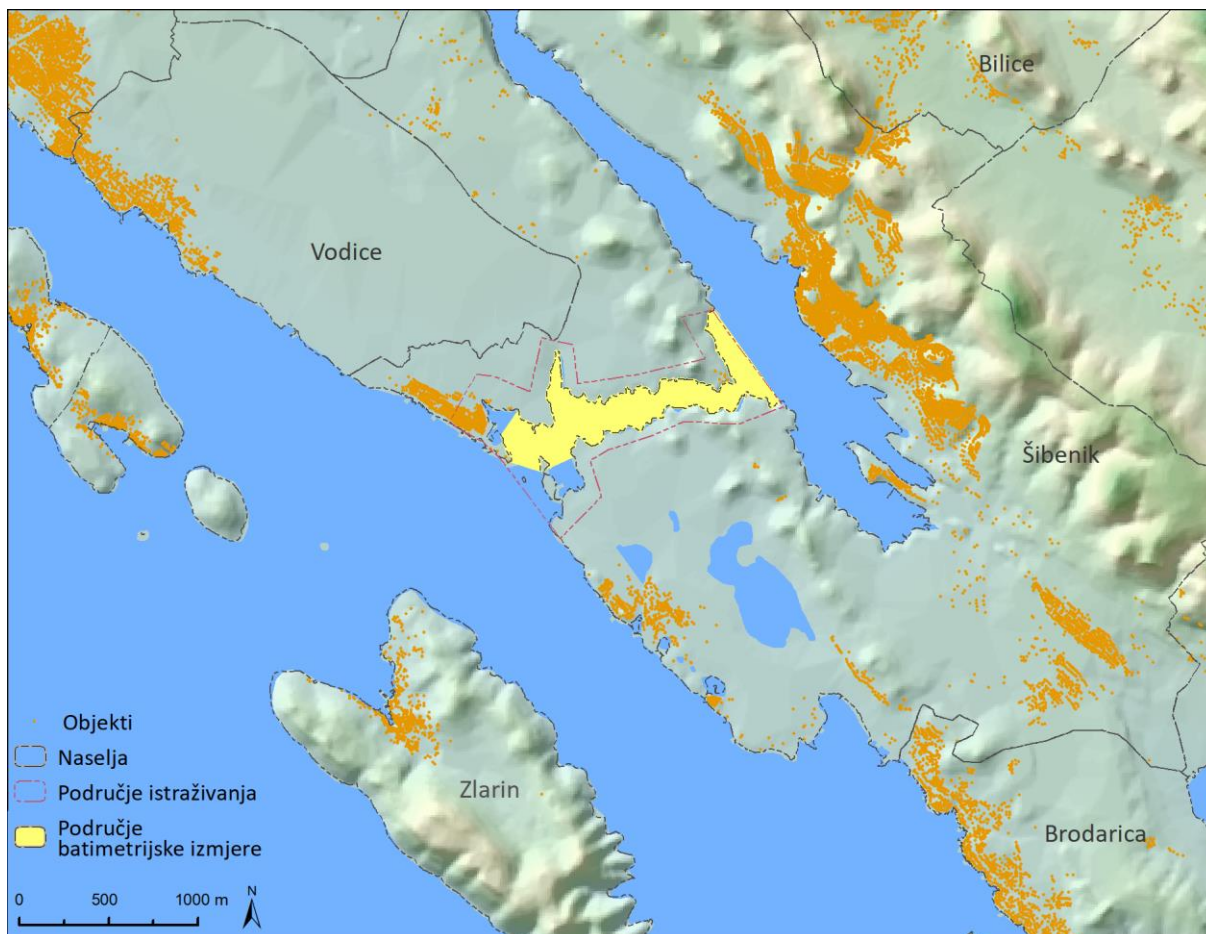
Hidrografska izmjera obuhvaća proces mjerenja i proučavanja konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vode na Zemlji (NOAA, 1976). Glavni cilj većine hidrografskih istraživanja je dobiti egzaktne podatke za izradu pomorskih karata s posebnim naglaskom na mogućnosti koje mogu utjecati na sigurnost plovidbe. Ostali ciljevi uključuju dobivanje informacija vezanih za upravljanje i zaštitu obalnim područjem, eksploataciju resursa, znanost, nacionalnu prostornu infrastrukturu podataka, turizam itd. (IHO, 2005). Suvremena batimetrija je, kao grana hidrografije, znanost o određivanju dubina, odnosno generalnom utvrđivanju fizičkih značajki dna na temelju analize podataka iz snimljenih profila. Svi podatci o dubinama moraju biti svedeni na razinu referentnog datuma i imati x i y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i z koordinate (predstavljaju dubinu). Postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje ovise o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja). One se mogu klasificirati na 3 razine: 1) komercijalni projekti – standard točnosti je najveći, 2) projekt stanja – standard točnosti je srednji i 3) projekt generalnog poznavanja – standard točnosti je najniži (IHO, 2005, Sciortino, 2010).

Mjerenje dubina može se obaviti pomoću: 1) dubinomjerne motke, 2) dubinomjernog viska, 3) jednostavnog inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i 4) naprednog inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno ili indirektno (IHO, 2005, Šiljeg i dr., 2015).

U ovom istraživanju koristit će se višesnopni dubinomjer. Oni se brzo razvijaju i imaju veliki potencijal, međutim zahtijevaju poznavanje i korištenje odgovarajućih postupaka u procesu izmjere koji su nužni za pravilno detektiranje (detaljno poznavanje tehnologije, dugogodišnju praksu, način tumačenja i vrednovanja dobivenih podataka itd.) (MSA, 2004). Prednosti višesnopnih dubinomjera su: mjerenje više vrijednosti dubina u isto vrijeme pokrivajući tako veću površinu, izrada točnog morfološkog modela podvodnog dna. Nedostatci su visoka cijena opreme, zahtjevnija obrada podataka itd. Sve veći broj nacionalnih hidrografskih organizacija prihvatio je ovu tehnologiju kao standardnu metodu prikupljanja batimetrijskih podataka, s ciljem proizvodnje najkvalitetnijih navigacijskih karata koje jamče sigurnost plovidbe (IHO, 2005, Ernsten i dr., 2006). Višesnopni dubinomjeri koriste se u različitim disciplinama poput podvodne gradnje (Pickrill i Tod, 2003; Caress i dr., 2008.), praćenja ribljih jata (Graham i dr., 2004; Kang, 2011), u podvodnoj arheologiji (Lawrence i dr., 2004), sanaciji divljih odlagališta u moru (Wienberg i dr., 2004) i dr. Istraživanja kvalitete dubinomjera najčešće provodi Međunarodna hidrografska organizacija. Horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera korištenjem RTK-GPS-a iznosi između ± 20 i ± 25 centimetara, a vertikalna između ± 2 i ± 8 centimetara (Ernsten i dr., 2006; Kaufman i Nemet, 2011.). One ovise prvenstveno o frekvenciji dubinomjera, širini snopa i obliku snopa.

1.1. Objekt i cilj batimetrijske i geodetske izmjere

Objekt izmjere i istraživanja je modeliranje širega područja kanala Sv. Ante (Slika I-1) primjenom geoprostornih tehnologija. Aerofotogrametrija je korištena za snimanje vodnog lica i širega područja kanala s ciljem dobivanja podatka o duljini obalne linije kao i zbog izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja. Batimetrijsko istraživanje, kao primarni cilj prve projektne aktivnosti je izvršeno pomoću višesnopnog dubinomjera kako bi se dobili podaci o dubini, tvrdoći dna. Također cilj istraživanja je utvrditi vertikalnu i horizontalnu preciznost integralnoga mjernog sustava kombinacija RTK GPS i višesnopnog dubinomjera s obzirom na to da je isti prvi put korišten u Republici Hrvatskoj te dobiti informacije o osnovnim karakteristikama šireg područja kanala Sv. Ante.



Slika I-1. Područje istraživanja i batimetrijske izmjere

1.2. Svrha izmjere

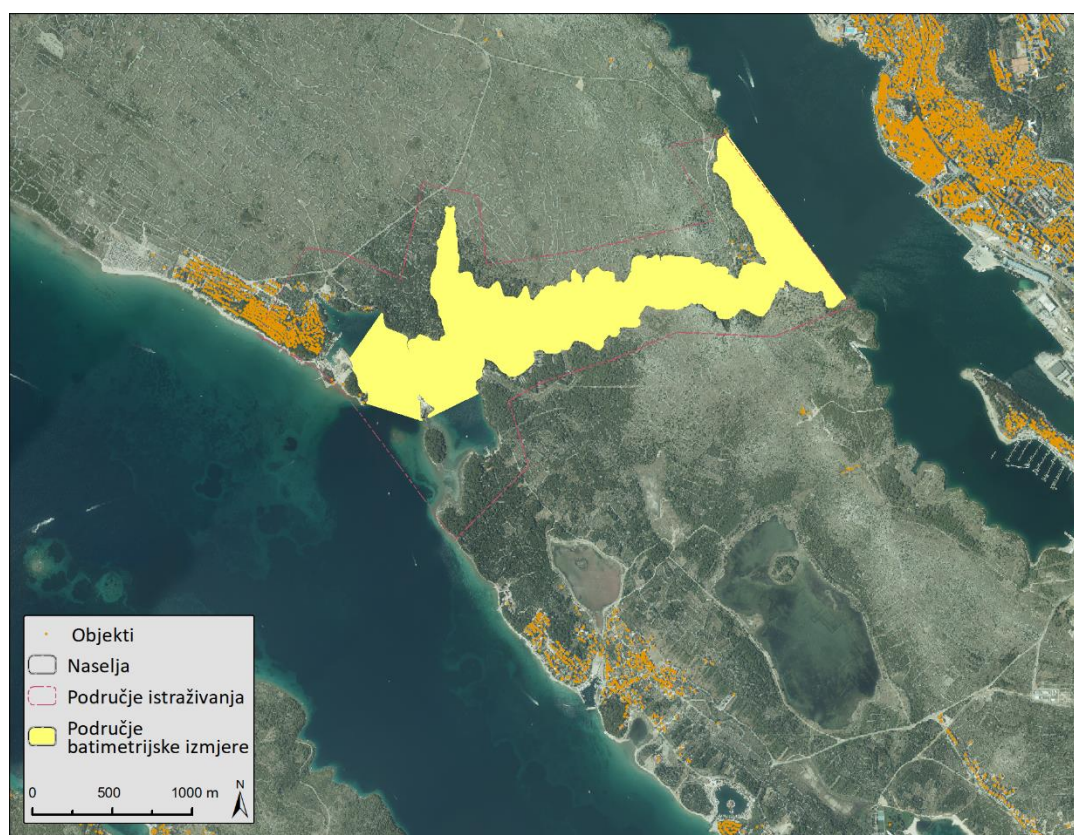
Izmjera i istraživanje šireg područja kanala Sv. Ante provedeno je iz više razloga: izrade batimetrijske karte (modela visoke rezolucije), kartiranja tvrdoće dna, dokumentacije trenutnog stanja kanala i vizualizacije. Primarna svrha istraživanja je izrada detaljne batimetrijske karte upotrebom WASSP S3 višesnopnog dubinomjera.

2. Područje izmjere

Batimetrijskom izmjerom bilo je obuhvaćeno šire područje kanala Sv. Ante (Slika I-2), dok je aerofotogrametrijskim snimanjem, s ciljem izrade integralnog modela, bilo obuhvaćeno područje u tampon zoni od 200 metara od obalne linije kanala Sv. Ante.

Područje kanala je morfološki i hidrološki specifično područje koje karakterizira velika vertikalna raščlanjenost na malom području (preko 40 metra), velike razlike u protoku, salinitetu i temperaturi. Naime, površinski salinitet zbog velikog utjecaja rijeke Krke je oko 20 promila, dok su vrijednosti temperature ovisna o dubini kanala.

Navedene specifičnosti te definirane projektne aktivnosti utjecale su na izbor metoda batimetrijske izmjere te izbor misija u aerofotogrametrijskom snimanju. Za batimetrijsku izmjeru korištena je najmodernija tehnika – integralni mjerni sustav, kombinacija višesnopnoga ultrazvučnog dubinomjera i RTK-GPS-a.



Slika I-2. Područje batimetrijske izmjere (žuta boja)

3. Teorijska osnova

3.1. Geoprostorne tehnologije

Modeliranje ima važnu ulogu u razumijevanju svih procesa na Zemljinoj površini (Bishop i dr., 2012). Pojavom geoprostornih tehnologija, odnosno GIS-a, GPS-a i RS-a, ostvaren je brz napredak u kvaliteti modeliranja (Bodzin i Cirucci, 2009; Jackson i dr., 2009; Bishop i dr., 2012; Šiljeg i dr., 2018). Geoprostorni podaci dostupni su na internetu te im je moguće pristupiti sa svih platformi koje imaju mogućnost povezivanja na internetsku mrežu. Geoprostorne tehnologije omogućuju vizualizaciju, kartiranje i analizu više slojeva georeferenciranih podataka te su se dokazale kao vrijedan alat u procesu razumijevanja okoliša i donošenja odluka. Sposobnost korištenja, analize te tumačenja slika i karata postaje sve važnije u mnogim znanstvenim i ekonomskim područjima. Prostorno razmišljanje obuhvaća znanje i vještine korištenja prostornih koncepata, karata i grafova te procesa zaključivanja u svrhu organiziranja i rješavanja problema (Bodzin i Cirucci, 2009).

3.1.1. Aerofotogrametrija

Fotogrametrija je znanstvena disciplina i tehnologija dobivanja pouzdanih kvantitativnih informacija o objektima na Zemlji, procesom snimanja, označavanja, mjerenja, analiziranja i interpretacije fotografskih snimaka i prikaza elektromagnetskog zračenja dobivenih senzorskim sustavima (Matthews, 2008; Ahmad i Samad, 2010; Barilar i dr., 2015). Najširu primjenu ima aerofotogrametrija, metoda u kojoj su kamere pričvršćene na posebna žiroskopski stabilizirana postolja iznad otvora na podu zrakoplova (Wawro, 2013). Obilježava je velika gustoća prikupljanja podataka koja se prilagođava konkretnom projektu i morfološkim osobinama terena. Zahtijeva manje terenskog rada, pokriva velika područja, pogodna je za mjerenja u opasnim i nepristupačnim područjima i primjenjuje se u različitim oblastima. Najveći problem kod ove metode predstavlja vegetacija i optička vidljivost terena sa snimališta. Kao jedno od glavnih i trenutno najpopularnijih tehnoloških dostignuća fotogrametrije uključuje razvoj bespilotnih zrakoplovnih sustava (UAV) i njima pripadajućih algoritama za obradu fotogrametrijskih podataka. Oni imaju mogućnost snimanja opasnih i nepristupačnih terena bez ugroze ljudskih života, ali i snimanje iz mnogo veće blizine nego što je to moguće nekom drugom vrstom letjelice (Eisenbeiß, 2009). Bespilotne letjelice imaju mogućnost manualnog, poluautonomnog i autonomnog upravljanja, što omogućuje planiranje misija leta u svrhu pravilne i potpune pokrivenosti terena zračnim snimkama. Kamere mogu biti mjerne (poznati elementi unutarnje orijentacije) i nemjerne (nema točno određene elemente unutarnje orijentacije). Pri izvođenju aerofotogrametrijskih i bliskopredmetnih mjerenja (ako se upotrebljava nemjerna kamera) nužno je precizno odrediti parametre unutarnje kalibracije (žarišna

daljina i koordinata glavne točke snimke po osima X i Y, zakošenost piksela, radijalna i tangencijalna distorzija), tj. kameru je potrebno kalibrirati (Remondino i Fraser, 2006). Važni su i vanjski parametri orijentacije (*Jaw, Pitch i Roll*) koji se odnose na položaj kamere u prostoru u odnosu na objekt snimanja. Također, potrebno je kalibrirati i bespilotnu letjelicu te u softveru izraditi prikladan plan snimanja. Ovisno o planu snimanja te specifikacijama i kalibracijskim parametrima kamere i bespilotne letjelice varirat će i kvaliteta izlaznih rezultata.

3.1.2. Batimetrijska izmjera

Kartiranje dna oceana, mora, rijeka i jezera jedna je od najstarijih aktivnosti čiji je cilj izrada karata i kartama srodnih prikaza. Pomorci već tisućama godina mjere dubine kako bi omogućili sigurnu plovidbu (Kearns i Breman, 2010). U današnje vrijeme, nacionalne vlade, vojska, telekomunikacijske kompanije, naftne korporacije i akademske institucije kartiraju dno s ciljem dobivanja egzaktnih podataka koji imaju višestruku primjenu u brojnim granama gospodarstva (IHO, 2005; Kearns i Breman, 2010) poput turizma (Ferreira i dr., 2009), eksploatacije prirodnih resursa (Medved i dr., 2010), proširenja lučkih terminala (Šiljeg i dr., 2019), gradnje mostova (Kuspilić i dr., 2010), podzemnih tunela (Aykut i Akpınar, 2013) ili pak komunalne infrastrukture (Snellen i dr., 2011; Nonnis i dr., 2016) te zaštite prirodnih dobara (Wilson i dr., 2007; Medak i dr., 2008; Letessier i dr., 2016).

Hidrografija je grana fizičke oceanografije koja se bavi mjerenjima i definiranjem konfiguracije dna oceana, mora, jezera, rijeka i drugih oblika vodenih površina na Zemlji (NOAA, 1976; IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Batimetrija je grana hidrografije koja se odnosi na mjerenje i kartiranje dubina za određivanje topografskih obilježja dna vodenih površina. Svi podaci o dubinama trebaju imati koordinate u nekom od koordinatnih sustava, u pravokutnom koordinatnom sustavu to su X i Y koordinate (predstavljaju položaj mjerenja ili horizontalnu poziciju) i Z koordinate (predstavljaju dubinu ili vertikalnu poziciju) koji vrijede za ravninu u odgovarajućoj kartografskoj projekciji, a u geografskom koordinatnom sustavu to su geografska širina (ϕ), geografska dužina (λ) i dubina (h). Batimetrija se može vršiti pomoću raznih sredstava poput satelita, zrakoplova, brodova, podmornica i podmorskih platformi korištenjem raznih metoda i tehnika (Kearns i Breman, 2010).

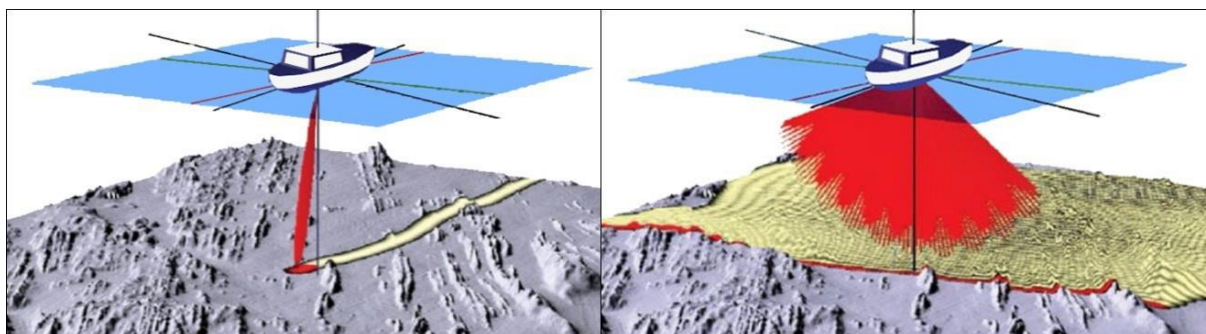
3.1.2.1. Metode i tehnike batimetrijske izmjere

Ovisno o kompleksnosti projektnog zadatka (krajnja upotreba i veličina istraživanog područja), postoje različite metode i tehnike batimetrijske izmjere koje se razlikuju prema standardu točnosti. Najveći standard točnosti je na komercijalnim projektima. Srednji standard točnosti je na projektima stanja, dok je najniži na projektima generalnog poznavanja (IHO, 2005; Sciortino, 2010).

Batimetrija se može obaviti pomoću dubinomjernog viska, dubinomjerne motke, jednostavnoga inženjerskog dubinomjera (zapis dubina na papiru) i naprednoga inženjerskog dubinomjera (u potpunosti automatizirano). Ovisno o korištenju instrumenata, mjerenje se definira kao direktno i indirektno (IHO, 2005; Šiljeg, 2013). Posljednjih nekoliko desetljeća batimetrijsko istraživanje je napredovalo pojavom jednosnopnih (*singlebeam*) i višesnopnih dubinomjera (*multibeam*) te zračnih laserskih sustava (*airborne laser sounding*) koji imaju mogućnost prikupljanja podataka velike gustoće i omogućuju realističan prikaz dna (Šiljeg i dr., 2018). Jednosnopni i višesnopni ultrazvučni dubinomjeri funkcioniraju na principu mjerenja vremenskog zaostatka zvučnog signala odaslanog iz sonde, dok zračni laserski sustavi funkcioniraju na principu mjerenja vremena potrebnog laserskim zrakama (infracrvenim i zelenim) da se vrate u laserski altimetar (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpınar, 2013; Šiljeg, 2013). Ultrazvučni dubinomjeri su najčešće korištene metode batimetrijske izmjere jer imaju najbolji omjer cijene i kvalitete prikupljenih podataka (Šiljeg, 2013).

3.1.2.1.1. Jednosnopni dubinomjeri

Ultrazvučna tehnologija je široko primijenjena metoda prikupljanja podataka o dnu vodenih površina koja na temelju vremenskog zaostatka i intenziteta zvuka daje korisne podatke o izgledu i sastavu dna (Amiri-Simkooei i dr., 2011; Ferretti i dr., 2015). Jednosnopni dubinomjer je ultrazvučni dubinomjer koji na temelju vremenskog zaostatka zvučnih impulsa odaslanih sa sonde uronjene u vodu računa dubinu. (Whiteway, 2009; Kearns i Breman, 2010; Aykut i Akpınar, 2013; Šiljeg, 2013). Vremenski zaostatak se računa na temelju brzine zvuka u vodi koja ovisi o salinitetu, temperaturi i tlaku (dubini) (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013). Osim za trup broda (Kearns i Breman, 2010), sonda (*transducer*) može biti montirana i na šipku ili može biti vučena za brodom (Letessier i dr., 2016). Jednosnopni dubinomjeri prikladni su za generiranje profila dna i najčešće su korišteni za mjerenje dubina neposredno ispod plovila, odnosno za snimanje manjih dijelova uskih ponora s ciljem utvrđivanja njihove dubine (Kearns i Breman, 2010). S obzirom na to da kut snimanja iznosi manje od 3°, potrebno je jako puno vremena kako bi se snimilo dno određene vodene površine pa se preporučuje snimanje po unaprijed isplaniranim i jednako udaljenim profilima kako bi prostor koji nije obuhvaćen snimanjem mogao biti interpoliran prikladnom metodom interpolacije (Medak i dr., 2008; Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Kvaliteta podataka prikupljenih jednosnopnim dubinomjerom ovisi o karakteristikama senzora, dubini vode i definiranom planu snimanja (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Šiljeg i dr. 2019). Važno je istaknuti kako se kod jednosnopnih dubinomjera upotrebom metoda interpolacije, pri određivanju vrijednosti između dva profila, vertikalna i horizontalna greška povećavaju (Šiljeg, 2013). Snimanje je moguće u rasponu frekvencija između 12 i 710 kHz (Šiljeg i dr., 2018), ovisno o tome što se točno želi detektirati: morfologija dna, olupine brodova, riba itd. (Biffard, 2011).

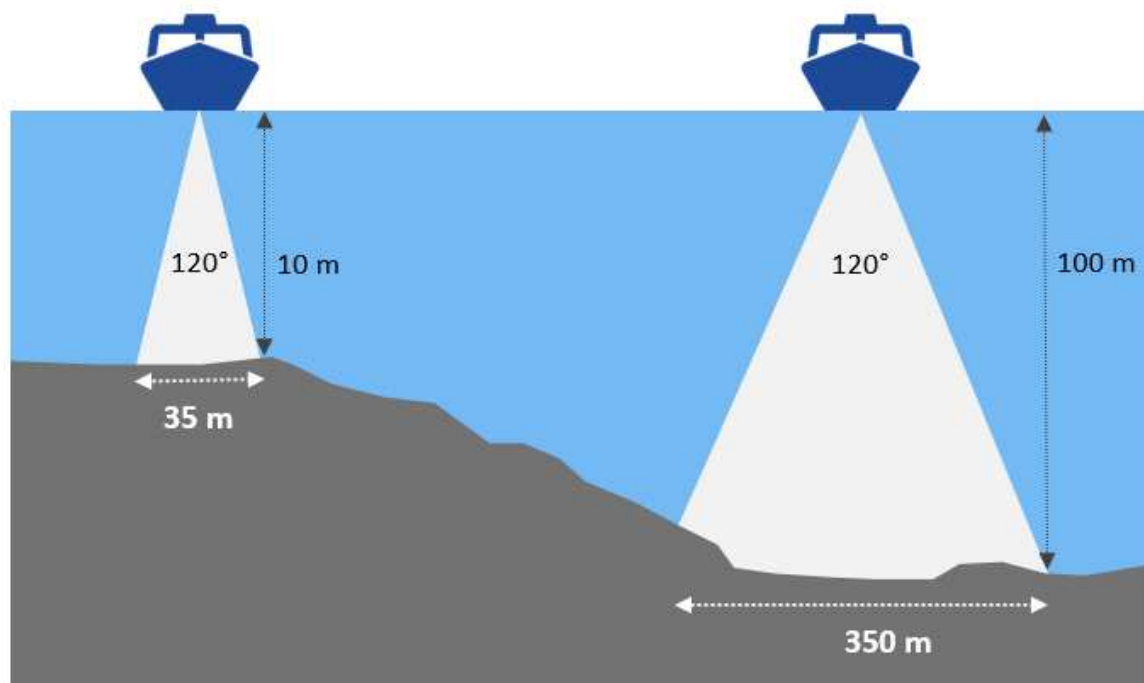


Slika I-3. Princip rada jednosnopnog i višesnopnog dubinomjera (Šiljeg, 2103)

3.1.2.1.2. Višesnopni dubinomjeri

Mjerenja dubina vode, posebice u dubokim oceanima, bila su gotovo nemoguća prije razvoja tehnologije ultrazvučnih dubinomjera. To se posebno odnosi na višesnopni dubinomjer koji je omogućio snimanje velikih vodenih površina u relativno kratkom vremenskom roku (Whiteway, 2009). U usporedbi s jednosnopnim, prednost višesnopnog dubinomjera je mjerenje veće površine dna u isto vrijeme koja omogućava veliku pokrivenost dna (Slika I-3). No postoje i nedostaci poput veće cijene opreme te više vremena potrebnog za obradu prikupljenih podataka (Biffard, 2011; Šiljeg i dr., 2019). Tehnologija višesnopnih dubinomjera ima višestruku primjenu poput batimetrije, nadzora i održavanja okoliša, ribarstva, istraživanja ugljikovodika, upravljanja obalnim područjima ili podvodne arheologije (Lurton, 2016). Da bi rezultati mjerenja bili reprezentativni, potrebno je prikupiti podatke potrebne za kalibraciju dubinomjera (salinitet, temperatura) na referentnom području (Kearns i Breman, 2010; Šiljeg, 2013; Eleftherakis i dr., 2018).

Korištenjem RTK-GPS-a horizontalna točnost jednosnopnih i višesnopnih dubinomjera iznosi ± 20 i ± 30 centimetara, dok vertikalna iznosi između ± 2 i ± 8 centimetara. Točnost ponajviše ovisi o radnoj frekvenciji dubinomjera, kao i o širini i obliku snopa (Šiljeg, 2013). Veliku ulogu u točnosti podataka ima i dubina jer s njom raste i *footprint* (okvir snimka), a prostorna rezolucija snimljenog područja opada (Slika I-4). Sustavi poput zračnog laserskog skenera ili višesnopnog dubinomjera upotrebljavaju čimbenik preklapanja kako bi osigurali potpunu i kontinuiranu pokrivenost dna. (Kearns i Breman, 2010). Osim prema broju snopova, dubinomjeri se dijele i prema broju frekvencija (jednofrekventni i višefrekventni) (Lurton, 2016; Eleftherakis i dr., 2018; Janowski i dr., 2018), zatim prema obliku snopa (uskosnopni i širokosnopni) te prema broju kanala (jednokanalni i višekanalni) (Lurton, 2016; Clarke, 2006).



Slika I-4. Veza dubine i footprint-a snimka (Kearns i Breman, 2010)

4. Metodologija istraživanja

4.1. Batimetrijska izmjera kanala Sv. Ante

Batimetrijskom izmjerom obuhvaćeno je šire područje kanala Sv. Ante. Za batimetrijsku izmjeru korišten je gumenjak *Luna* duljine oko 2,5 m, koji se zbog manjih dimenzija i gaza te lake mogućnosti ugrađivanja komponenti mjernog sustava pokazao kao optimalno rješenje (Slika I-5).



Slika I-5. Gumenjak Luna na kojem je instaliran integralni mjerni sustav

4.1.1. Plan batimetrijske izmjere

Tijekom batimetrijske izmjere iznimno je važno detaljno planiranje koje omogućava praćenje razvoja i organizaciju izmjere od početka do kraja (IHO, 2005). Plan izmjere obuhvaćao je širok spektar aktivnosti koje su se sastojale od nekoliko faza:

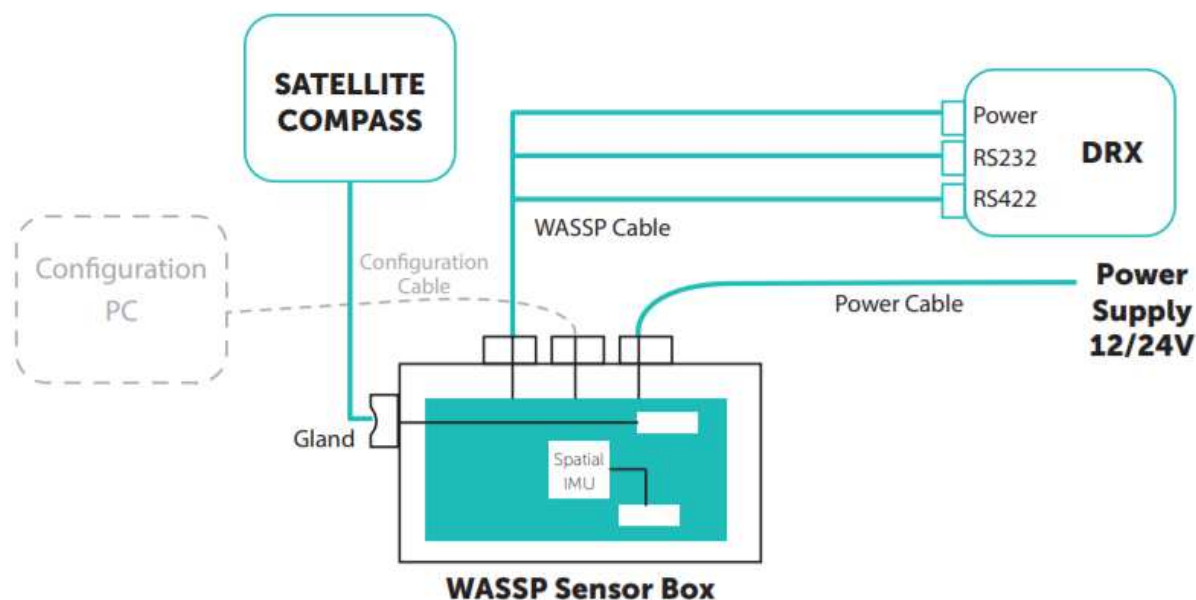
- 1) određivanje točnog područja izmjere;
- 2) utvrđivanje svrhe batimetrijske izmjere;
- 3) primjena metode izmjere (tehnika, točnost, horizontalni i vertikalni referentni geodetski sustav, oprema itd.);
- 4) vremenski rok (duži ili kraći);
- 5) prikupljanje sekundarnih podataka (aero snimke, salinitet, temperatura itd.);
- 6) uzimanje u obzir ograničavajućih čimbenika (proračun, logistika itd.).

4.1.2. Integralni mjerni sustav kombinacija RTK GPS i višesnopnog dubinomjera

Batimetrijska mjerenja izvršena su integriranim mjernim sustavom (Slika I-6) koji je uključivao šest glavnih sastavnica:

- WASSP S3 Multibeam Wideband Sounder c/w DRX (Slika I-7);
- WASSP Sensor Box s integriranim Spatial IMU (Slika I-15);
- Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna (mFreq, mGNSS, RTK, SBAS) (Slika I-16);
- akumulator i kabel za napajanje;
- konfiguracijsko računalo i kabel;
- softveri za konfiguraciju (*PocketMax*, *NtripClient*, *DRX Setup Webpages*);
- softveri za navođenje (*CDX*) i eksportiranje podataka (*Data Manager*).

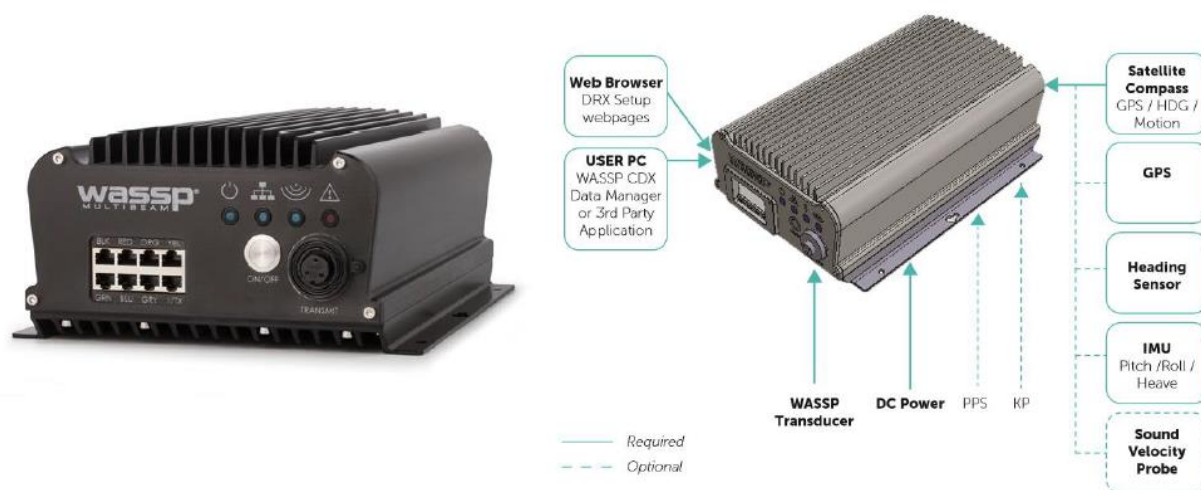
Sve komponente su povezane i konfigurirane prema uputama proizvođača i međunarodnih standarda s obzirom na obilježja korištenog broda s ciljem minimaliziranja korisničko definiranih parametara koji mogu utjecati na izlazne rezultate. Uz navedenu konfiguraciju sustava prilikom izmjere bitno je kalibrirati sondu, pri čemu na izlazne rezultate mjerenja dubine i tvrdoće dna treba izračunati optimalnu brzinu zvuka u vodi (ENL Group, 2016).



Slika I-6. Komponente integralnog mjernog sustava (ENL Group, 2016)

4.1.2.1. Višesnopni dubinomjer WASSP S3 Multibeam

WASSP (*Wide Angle Sonar Seafloor Profiler*) je višenamjenski ultrazvučni dubinomjer koji omogućava istraživanje, generiranje modela visoke rezolucije i detaljno kartiranje dna mora, jezera, rijeka itd. Verzija S3 (*Survey*) treća je i najnovija generacija višesnopnih dubinomjera koja koristi širokopojasnu tehnologiju. Ocijenjen je certifikatom IP53 koji je potvrda da je kućište novog DRX-32 primopredajnika (Slika I-7) djelomično zaštićeno od prašine i otporno na prskanje vode (URL5). To ga uz njegovu kompaktnost i ekonomičnost nameće kao prvi izbor pri izvođenju batimetrije na teže dostupnim mjestima pomoću manjih plovila gdje oprema ne može biti u potpunosti zaštićena od vanjskih utjecaja. Maksimalna vertikalna rezolucija mu iznosi 2 centimetra što ga čini idealnim rješenjem za istraživanje podvodnih područja s izrazitom vertikalnom raščlanjenosti terena do 400 m dubine. WASSP S3 karakterizira frekvencija od 160 kHz i 224 snopa, a mogući raspon snopova je od 4 do 120 stupnjeva (Tablica I-1) (URL6).



Slika I-7. Višesnopni dubinomjer WASSP S3 (prema: URL3 i URL6)

Tablica I-1. Osnovna specifikacija višesnog dubinomjera WASSP S3

MODEL	S3
Frequency	160 kHz (WideBand Variable)
Transceiver type	DRX-32
Transducers supported	WMB - 160
IMU supported	External
Depth - swath	200 m
Depth - max	400 m
Effective beamwidth (athwartships x fore-aft)	120° x 4°
Beam width PS (deg)	4.4
Beam width FA (deg)	3.2
Beam spacing (nominal)	0.54° over 120° (224 beams)
Max vertical resolution (cm)	2
Sensor connectivity	DRX
PSU	9-32VDC (30W)
Bottom detections	Amplitude & Phase
Interface	RS232/422/NMEA0183
Tide correction	Fully Geo Referenced
Bathymetry 2D / 3D	Yes
Sonar polar view	Yes
Sounder (quint beam)	No

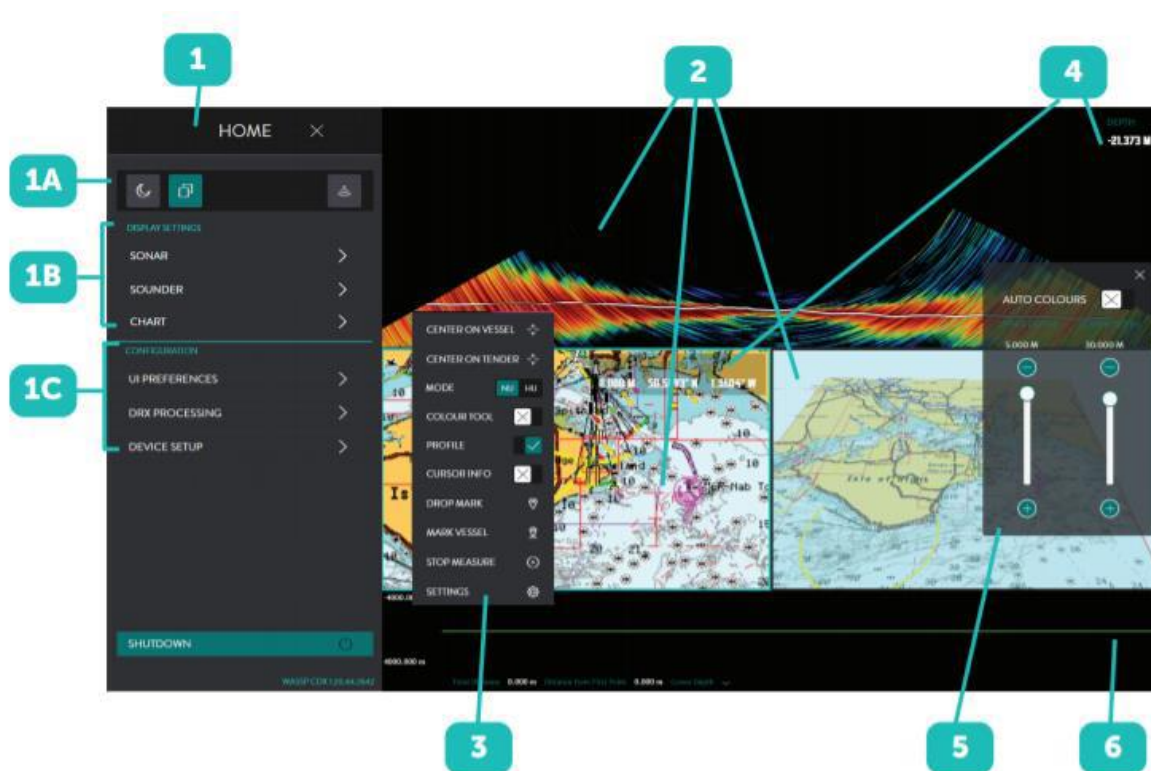
Izvor: URL6

4.1.2.1.1. Softveri CDX i Data Manager

CDX je WASSP-ov operativni sustav koji služi za kontrolu, vizualizaciju i upravljanje prikupljenim podacima. On omogućava kartiranje dna u visokoj rezoluciji te prikaz snimanog područja u realnom vremenu na pojednostavljenom korisničkom sučelju. Pametni algoritam uzima najbolje podatke sa starih i novih snimaka generirajući tako visoko kvalitetne batimetrijske karte bez grubih granica između snimljenih profila. Baza podataka je višerezolucijska i organizirana tako da se s približavanjem prema karti prostorna rezolucija povećava (URL6). Aplikacija CDX sastoji se od 6 sastavnica (Slika I-8):

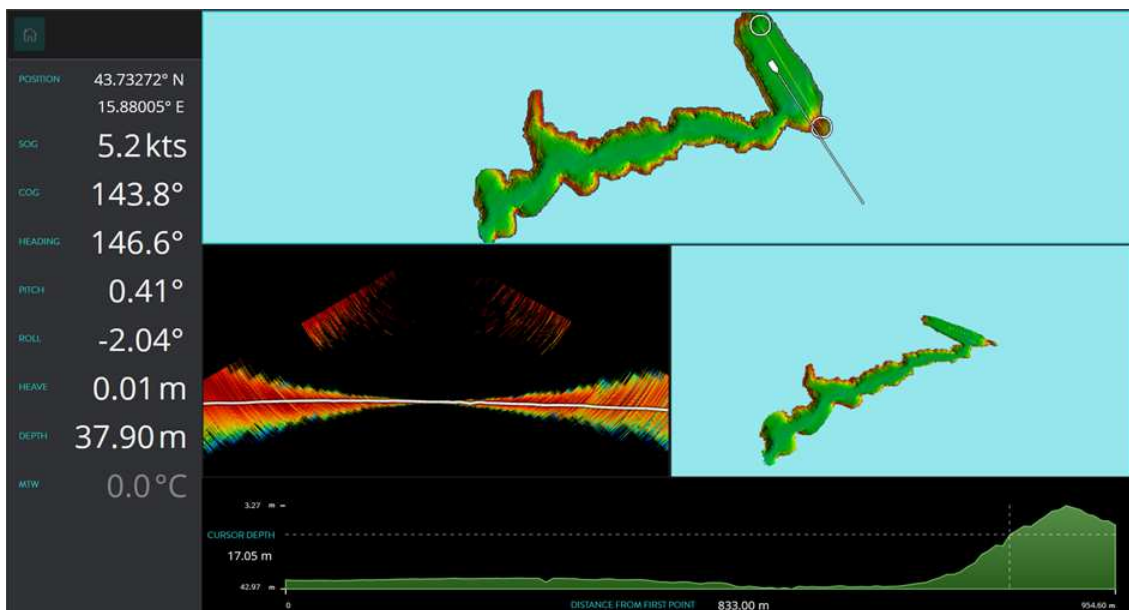
- 1) Home pristup – pruža mogućnosti konfiguracije zaslona, ploče, izgleda, alata, postavljanje sustava i korisničkih postavki;
- 2) Okviri zaslona – zasloni su povezani su s određenim tipovima podataka za vizualizacija i kontrola;

- 3) CS (*context sensitive*) meni – omogućuje postavljanje i konfiguraciju specifičnih ploča za prikaz kojima se pristupa desnim klikom na bilo kojoj ploči;
- 4) Zaslonske informacije – mogućnost preklapanja informacija na ploči zaslona s CS izbornikom;
- 5) Alati za kontrolu – omogućuju kontrolu preklapanja upravljačke ploče na zaslonu;
- 6) Opcijski alati – služe za prikaz općih podataka.



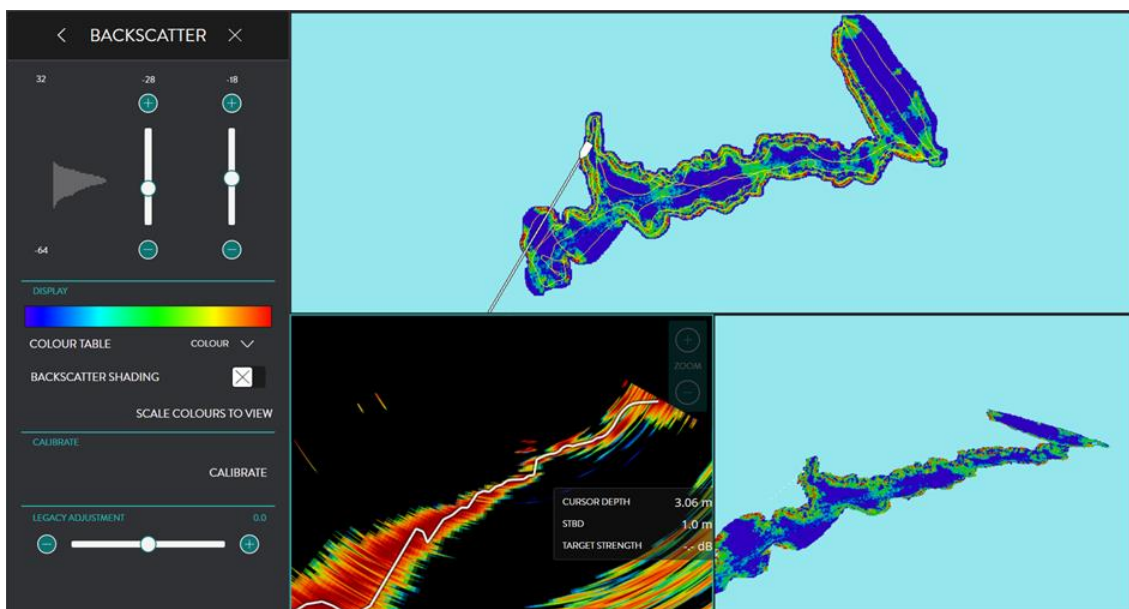
Slika I-8. Sastavnice aplikacije CDX

Sučelje aplikacije CDX sadrži osnovne podatke o značajkama specifičnog položaja broda i okvire za prikaz. Sustav je opremljen naprednim sastavnicama koje omogućuju uvid u realnom vremenu u vizualnu kvalitetu modela kroz čak 4 prikaza kanala: a) dvodimenzionalni, b) perspektivni (3D), c) sonarno polje i d) profil (Slika I-9).

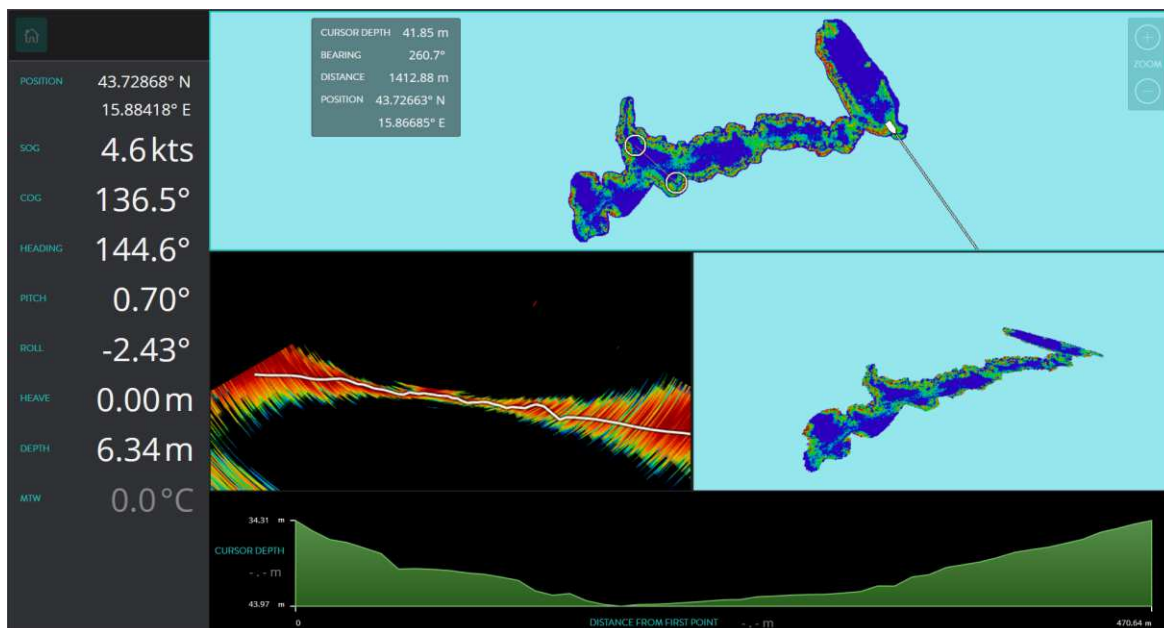


Slika I-9. Prikazi šireg područja kanala: a) dvodimenzionalni; b) perspektivni (3D); c) sonarno polje; d) profilni

Na slici 10. je primjer snimljenog dna (dubina) područja kanala Sv. Ante (3D, profil) s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3, dok je na slici I-11. prikazano kako uređaj kartira tvrdoću dna.



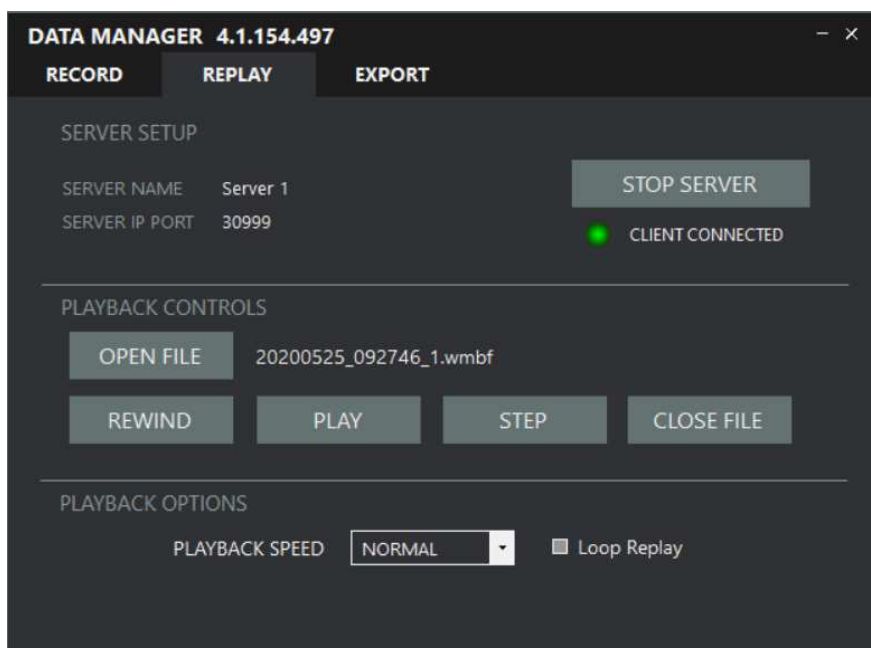
Slika I-10. Primjer snimljenog dna (dubina) dijela kanala Sv. Ante s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3



Slika I-11. *Primjer snimljenog dna (tvrdoća) kanala s višesnopnim dubinomjerom WASSP S3*

Data Manager je programski paket za upravljanje podacima. On se generalno sastoji od tri komponente (Slika I-12):

- 1) Snimanje podataka;
- 2) Ponovni prikaz;
- 3) Izvoz podataka



Slika I-12. Sučelje softvera Data Manager

4.1.2.1.2. Sonda

Sonda ili *transducer* je uređaj koji pretvara energiju iz jednog oblika u drugi (Song i Lee, 2008). U slučaju batimetrije to se odnosi na pretvaranje elektronskog signala u ultrazvučni i obrnuto. Na temelju vremenske razlike između odaslanog i primljenog zvučnog signala bilježi se vertikalna udaljenost od dna do sonde.

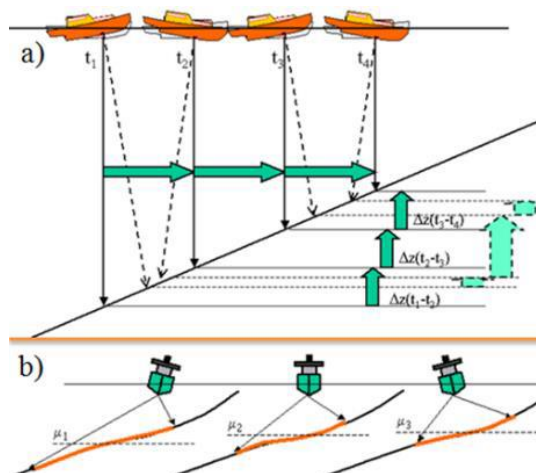
Pri batimetriji kanala Sv. Ante korištena je sonda *WMB-160* čija je operativna frekvencija 160 kHz (Slika I-13). Ona je čvrsto pričvršćena za čeličnu motku kako se prilikom izmjere ne bi pomicala i samim time utjecala na izlazne rezultate. Uronjena je na dubinu od 60 cm te je razlika udaljenosti između nje i vodene površine uračunata u izmjeru. Orijentirana je pod kutem od 90° kako bi zvučni signal putovao najkraćim mogućim putem i bio pravilno georeferenciran. Također je veoma važna i pozicija sonde s obzirom na turbulencije uzrokovane radom propelera koje mogu utjecati na kvalitetu prikupljenih podataka. Stoga je cijeli sustav pozicioniran što je dalje bilo moguće od pente. Kako bi prikupljeni podaci bili na točnoj X,Y koordinati, odnosno kako bi horizontalna točnost bila kvalitetna, antena je montirana točno iznad sonde (Slika I-13).



Slika I-13. Sonda WMB-160 (URL7) i njezina pozicija u integralnom mjernom sustavu

4.1.2.1.3. Inercijalni mjerni sustav

Kvaliteta prikupljenih podataka oscilira s obzirom na to da je pri batimetrijskoj izmjeri prisutan utjecaj prednjih i bočnih valova zbog kretanja plovila po vodenoj površini (Slika I-14) (Šiljeg, 2013). Stoga veliku važnost pri prikupljanju podataka, korištenjem integralnog mjernog sustava - kombinacije RTK GPS-a i višesnopnog dubinomjera, ima integrirani inercijalni mjerni sustav (IMU) koji omogućuje registraciju podataka po X, Y i Z osi.



Slika I-14. Utjecaj a) prednjih i b) bočnih valova na registraciju podataka (Šiljeg, 2013)

Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-INU smješten u senzornoj kutiji (Slika I-15) je minijaturni navigacijski sustav s inernim navigacijskim sustavom GPS-a i AHRS (*attitude and heading reference system*). On osigurava točnu poziciju, brzinu, ubrzanje i orijentaciju u najzahtjevnijim uvjetima te je zbog svoje visoke preciznosti u kombinaciji s *Hemisphere V320 GNSS* pametnom antenom (Slika I-16) idealan za sustave na malim plovilima koji su pod velikim utjecajem prednjih i bočnih valova (URL8). Kombinira temperaturno kalibrirane, akcelerometre, žiroskope, magnetometre i senzor tlaka s naprednim GNSS prijemnikom. Oni su spojeni u sofisticiranom fuzijskom algoritmu kako bi pružili točnu i pouzdanu navigaciju i orijentaciju (Pao, 2018).



Slika I-15. WASSP Sensor Box s integriranim Advanced Navigation Spatial IMU WSP002-INU (prema: ENL Group, 2016; URL8)

4.1.2.2. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna

Hemisphere V320 (Slika I-16) prva je višenamjenska GNSS pametna antena, koja omogućava RTK precizno usmjeravanje.

Tablica I-2. Specifikacija GNSS senzora

MODEL	V320
Receiver type	Vector GNSS L1 Compass
Signals received	GPS and GLONASS
Channels	540
GPS sensitivity	-142 dBm
SBAS tracking	2-channel, parallel tracking
Update rate	20 Hz standard
Position accuracy: RMS	Horizontal Vertical
Position accuracy: Single point	1.2 m 2.5 m
Position accuracy: SBAS (WAAS)	0.3 m 0.6 m
Position accuracy: Code differential GPS	0.3 m 0.6 m
Heading accuracy	0.30°
Pitch/Roll accuracy	1°
Heave accuracy	30 cm 3

Timing (1 PPS) accuracy	20 ns
Rate of turn	90°/s maximum
Compass safe distance	75 cm (with enclosure)
Cold start	60 s (no almanac or RTC)
Warm start	20 s typical (almanac and RTC)
Hot start	1 s typical (almanac, RTC and
Heading fix	10 s typical (valid position)
Maximum speed	1,850 mph (999 kts)
Maximum altitude	18,288 m (60,000 ft)
Differential options	SBAS Beacon, External RTCM

Izvor: URL9

Dizajnirana je tako da i u različitim vremenskim uvjetima omogućava kvalitetno dinamičko pozicioniranje pri profesionalnom istraživanju dubina (Tablica I-2). S postavljenim odvajanjem, V320 pruža konzistentnu i pouzdanu točnost položaja i smjera. Vector 320 može koristiti Atlas L-opseg i SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, itd.) za korekciju GNSS signala (URL9).



Slika I-16. Hemisphere V320 GNSS Smart Antenna (URL9)

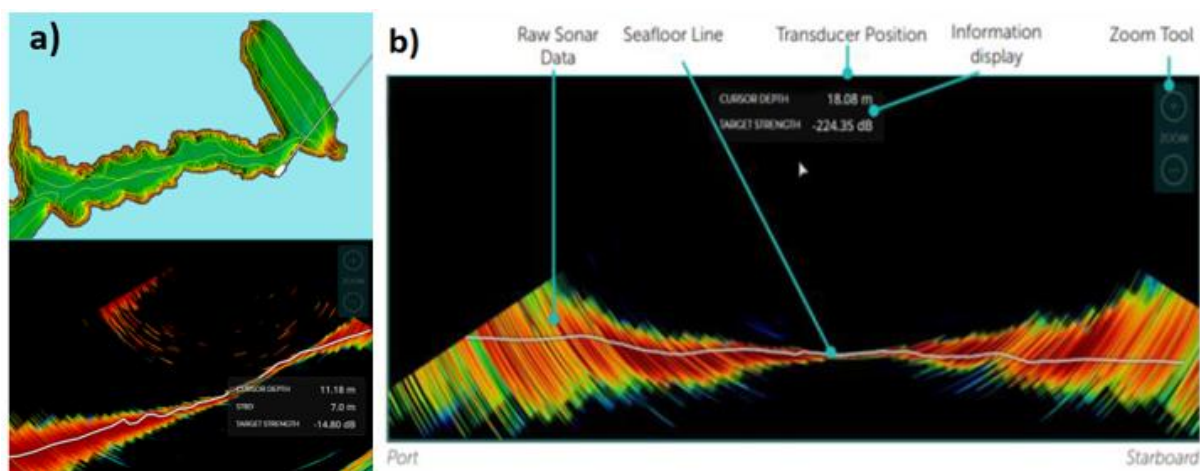
4.1.3. Sekundarni podaci i kalibracija sustava za prikupljanje podataka

Dobivanje sekundarnih podataka predstavljalo je proces koji je uključivao prikupljanje svih podataka koji su neophodni za optimalno planiranje batimetrijske izmjere. DOF i HOK korišteni su kao podloge za iscrtavanje granice obale i profila. Podatci o temperaturi su bitni zbog izračuna brzine zvuka u vodi. Dobivena vrijednost brzine zvuka važan je parametar prilikom kalibracije dubinomjera. Unos brzine zvuka potreban je za kompenzaciju netočnosti raspona uzrokovanih zvukom varijacije u brzini. Te se promjene mogu dogoditi, sezonski i s geografskim područjima, posebno u obalnim područjima gdje će na brzinu zvuka utjecati temperatura vode i zraka te razlike u slanosti vode. Na brzinu zvuka u vodi dakle utječu i temperatura i slanost. Ovu vrijednost treba redovito prilagoditi ovisno o radnom okruženju, jer će imati izravan utjecaj na točnost kartiranja. Što je brzina zvuka preciznija definirana, to je preciznije kartiranje dna. Vizualni učinak neispravne brzine zvuka očituje se tako da će se prikaz ravnog morskog dna konkvavno ili konveksno zakriviti (Dong i dr., 2007; Dong i dr., 2011) (Slika I-17).

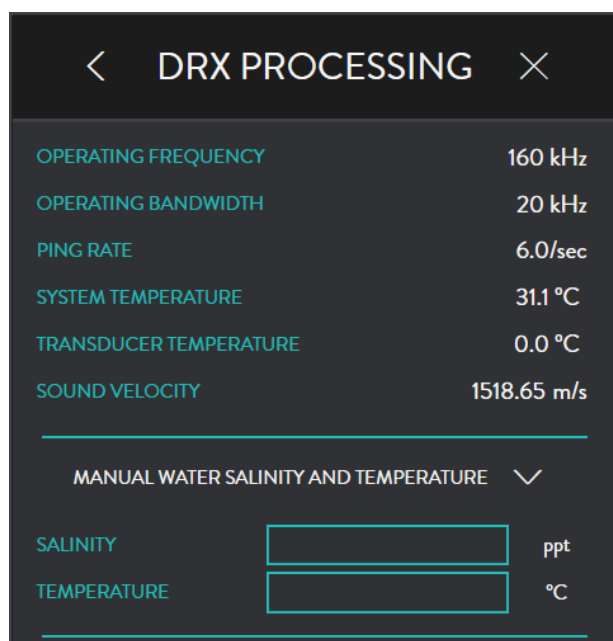


Slika I-17. Netočnosti prikaza morskog dna zbog pogrešne brzine zvuka

Stoga je uređaj kalibriran na zaravnjenom dijelu s ciljem minimaliziranja grešaka prilikom izmjere (Slika I-10). S obzirom na karakteristike temperature i saliniteta na dan izmjere brzina zvuka iznosila je 1518,65 m/s (Slika I-19).



Slika I-18. Prikaz Sonarne ploče koja prikazuje vodeni stup i profil morskog dna ispod sonde a) primjer kanala Sv. Ante; b) generalan primjer sa sastavnicama

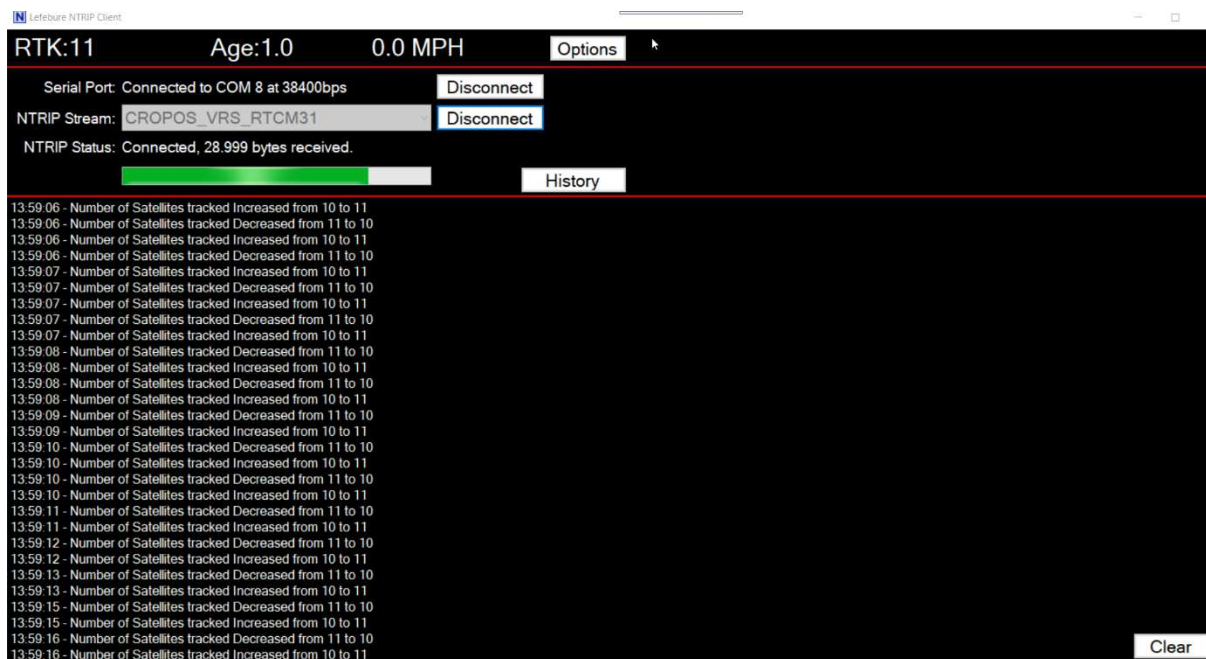


Slika I-19. Brzina zvuka u vodi na dan snimanja 1518,65 m/s

Uz podešavanje brzine zvuka u vodi, bitna faza procesa kalibracije sustava odnosi se na konfiguraciju GPS antene, za što je korišten softver PocketMax3. Antena je na CROPOS_VRS_RTCM31 sustav spojena preko NTRIP Client softvera čime je omogućena registracija podataka u realnom vremenu vrlo visoke preciznosti.



Slika I-20. Sučelje softvea PocketMax3

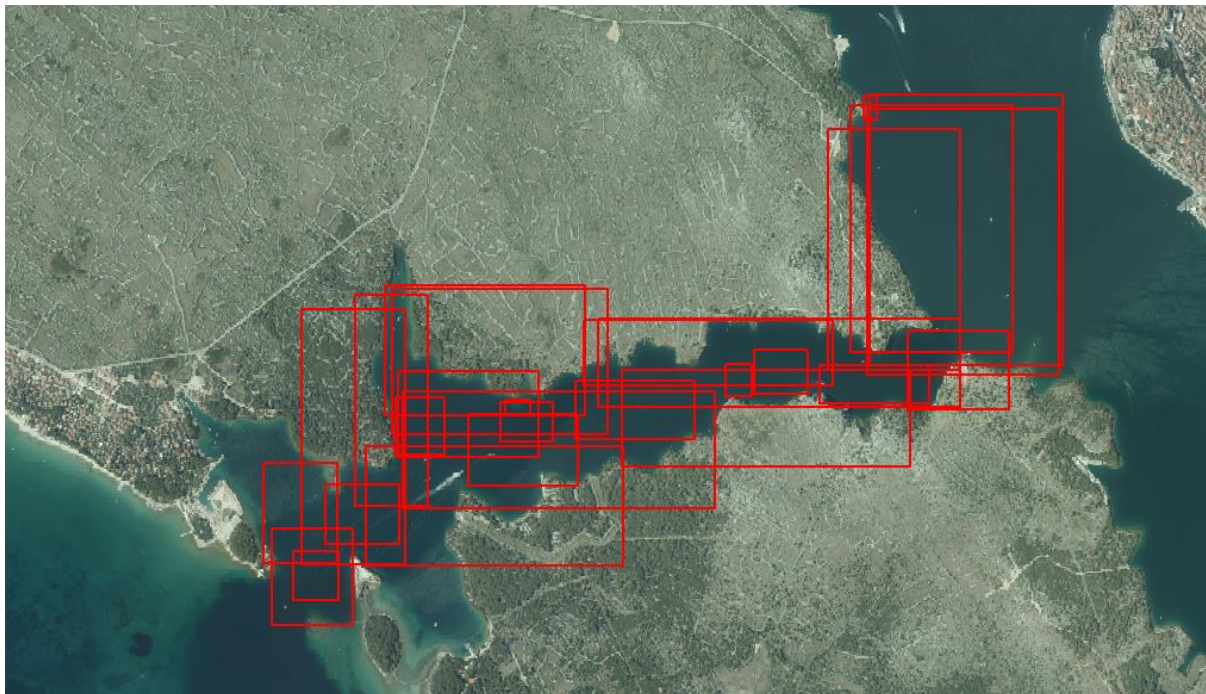


Slika I-21. Sučelje softvera NTRIP Client

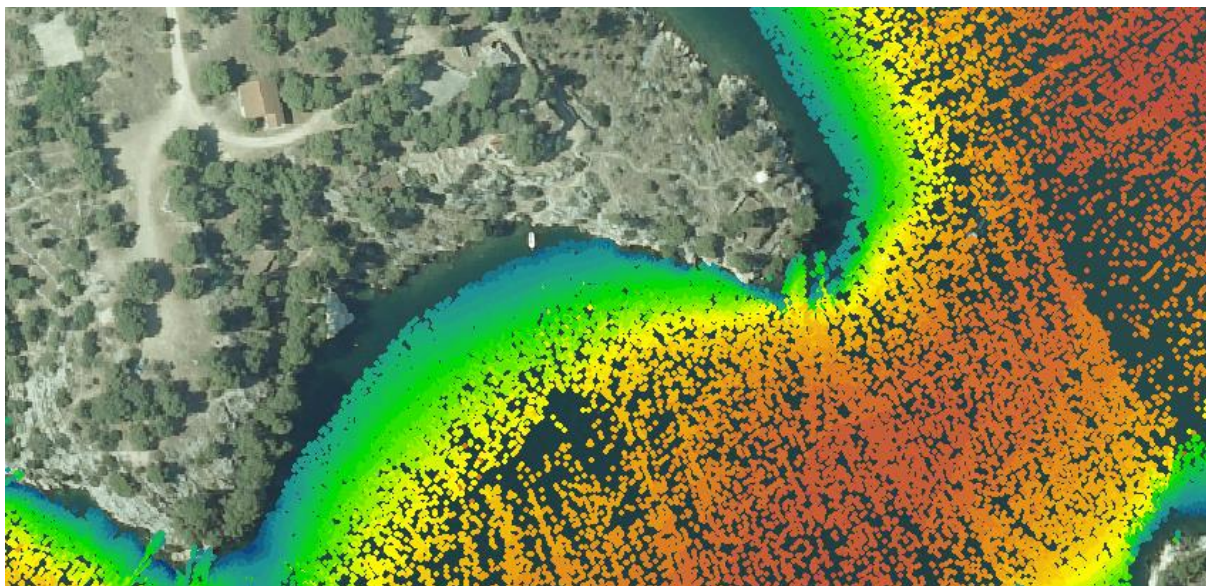
4.1.4. Prikupljanje i obrada batimetrijskih podataka

Prilikom prikupljanja podataka postotak preklapanja snimaka iznosio je oko 40% s ciljem dobivanja kvalitetnijih modela i provjere preciznosti integralnog mjernog sustava. Operativna frekvencija iznosila je 160 kHz, dok je operativna širina snopa bila 20°. Stopa pinga varirala je od 10 do 14/sek. Također, uređaj je u realnom vremenu prikupljao i prikazivao podatke o položaju broda, brzini, azimutu, odstupanju od ravnine i dubini na temelju unaprijed definiranih korisničko definiranih postavki sustava. Prilikom prikupljanja podataka GPS antena je preko GSM mreže spojena na CROPOS sustav. To je omogućilo vrlo visoku preciznost prikupljenih podataka. Sustav je prikupljao podatke u WGS84_UTM_N33 projekciji. U procesu obrade s ciljem standardizacije svi podatci transformirani su u HTRS96 projekciju.

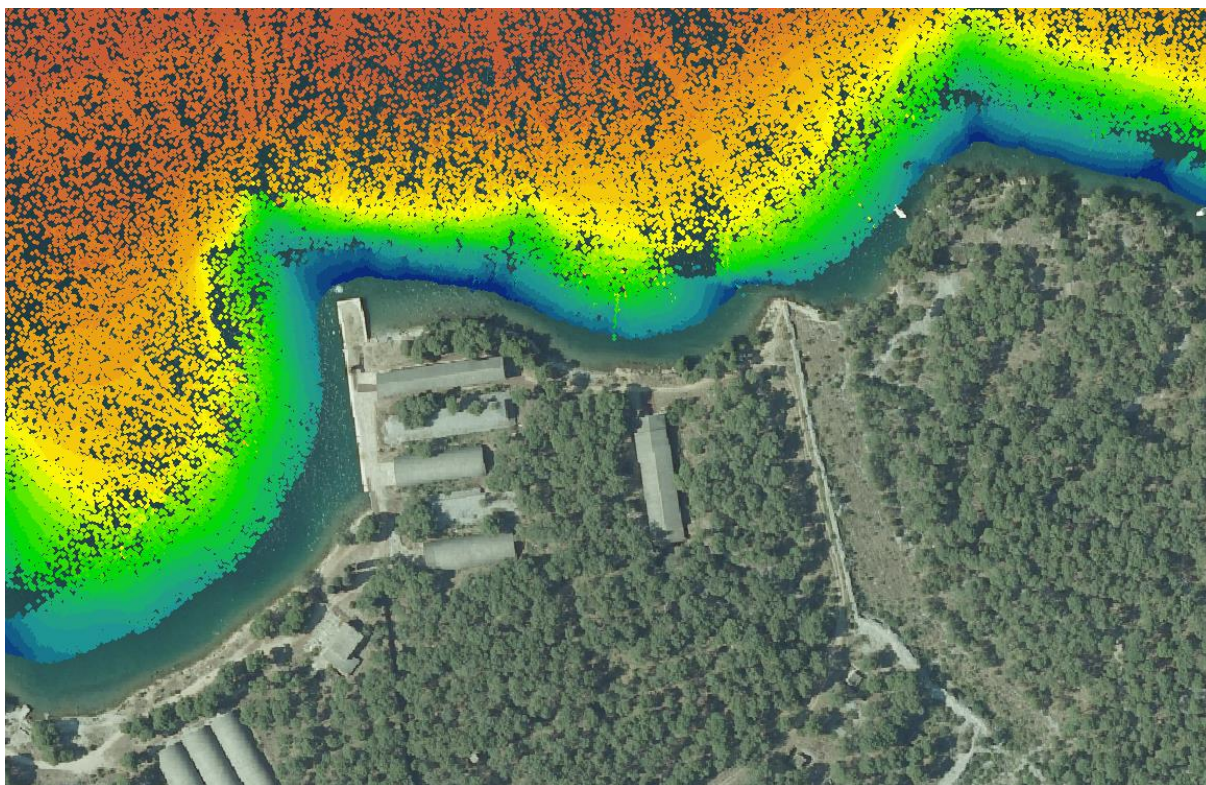
Mjerenje šireg područja kanala Sv. Ante izvršeno je dana 9. listopada 2020. godine (Slika I-22). Ukupno je prikupljeno 15478587 točaka koje su pospremljene u direktorij Batimetrija Šibenik (28 .wbm dokumenta). Minimalna prikupljena vrijednost dubine iznosila je u -1,07 m, a maksimalna dubina - 83,26 m. Maksimalne vrijednosti se odnose na artefakte ili greške koje su uvjetovane mjernim sustavom. Raspon vodostaja na dan snimanja praćen je s uređajem *Stonex S10*. Kao srednja vrijednost uzet je srednji vodostaj koji je praćen na rivi ispred Zavoda za istraživanje mora i okoliša IRB, postaja Martinska.



Slika I-22. Snimljeno područje po listovima



Slika I-23. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka



Slika I-24. Gusti oblak neobrađenih prikupljenih točaka

Izmjereni podatci su preko programskih paketa (aplikacija) za navođenje *CDX* i upravljanje podacima *Data Manager* (Slika I-12) prebačeni na stolno računalo na daljnju obradu i interpretaciju. Korišteni programski paketi tijekom mjerenja kreiraju zasebnu datoteku s informacijama o položaju točke, vremenu u kojem je točka registrirana, dubini i atributima o tvrdoći u svakoj točki. Programski paketi imaju samo mogućnost eksportiranja točaka u *.xyz* formatu. S obzirom na raspored, gustoću i brojnost uzoraka navedeni format nije prikladan za daljnju obradu, analizu, vizualizaciju i interpretaciju podataka. Stoga su sve točke pomoću alata, unutar softverskog paketa *ArcMap*, konvertirane u *.las* format (preporuka američkog društva za fotogrametriju i daljinska istraživanja).

4.1.5. Ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava

Za ispitivanje vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava bilo je potrebno usporediti vertikalne i horizontalne vrijednosti minimalno dva nefiltrirana gusta oblaka točaka koji pokrivaju isto područje. U alatu *C2C (Cloud to Cloud)* unutar programa *CloudCompare* uspoređeni su gusti oblaci točaka.

U opciji *Distance computation* unutar alata *C2C* podešeni su parametri za izradu modela apsolutnih udaljenosti uspoređenih oblaka. Za izračun udaljenosti u opciji *General parameters* razina ekstrahiranja (*Octree level*) je postavljena na automatsko, dok je maksimalna udaljenost postavljena na 1 m jer se preko 90% točaka nalazi unutar udaljenosti od 1 m, a maksimalna greška, provjerena u opciji *Approximate distances* iznosi 0,579 m.

Alat *M3C2* unutar *CloudCompare*-a omogućava generiranje pozitivnih i negativnih vrijednosti udaljenosti na temelju čega se izračunava standardna devijacija (SD), koja je korištena kao glavna statistička metoda za provjeru vertikalne i horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava. To je zapravo najčešća mjera odstupanja vrijednosti od aritmetičke sredine, a izračunava se po formuli:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - M)^2}{N - 1}}$$

U formuli x_i predstavlja sve vrijednosti točaka, M je aritmetička sredina, a N ukupan broj točaka (Streiner, 1996).

Najvažniji parametar unutar *M3C2* je *subsample cloud #1* u kojem je određeno da minimalna udaljenost između točaka bude 0,1 m. Upravo ovaj parametar utječe na konačan broj uzoraka na temelju kojih će se ispitati vertikalna preciznost. *Max depth* je postavljen na 1 m iz istih razloga kao i u opciji *General parameters* unutar alata *C2C*. Vertikalna i horizontalna preciznost su u konačnici ispitane na temelju 823 722 uzorka.

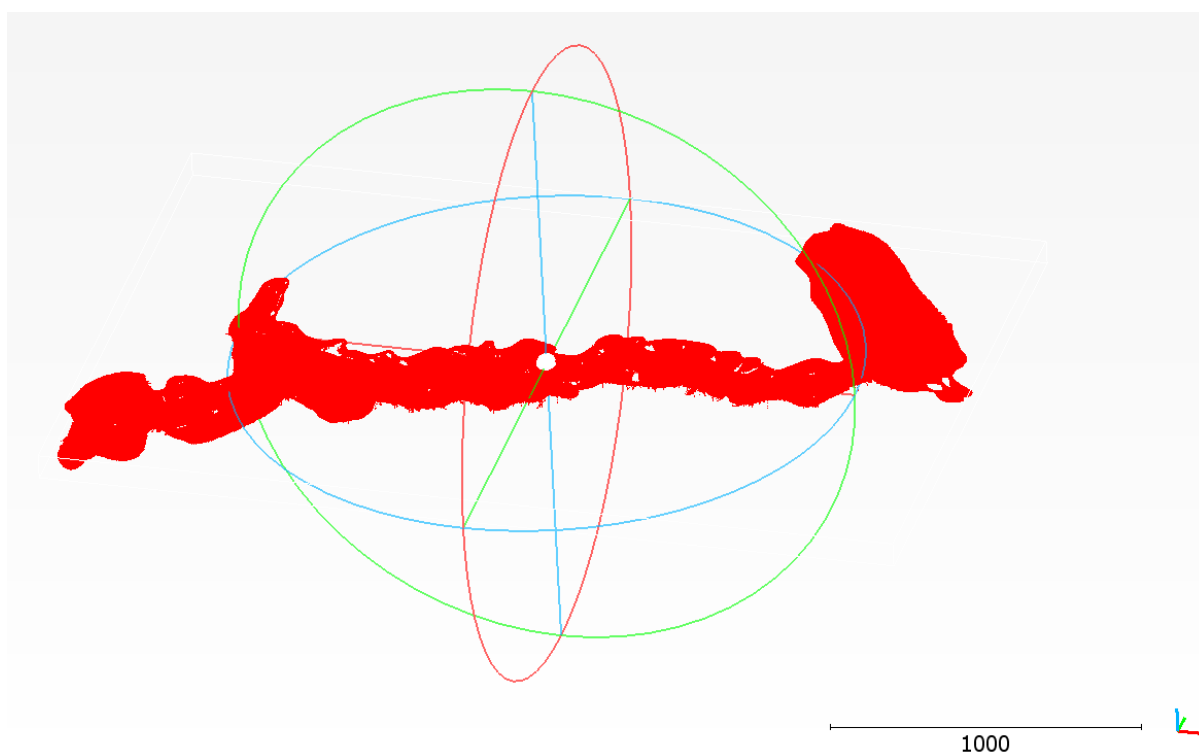
Standardna devijacija za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava je računata i na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s cikličnim snimcima (OP_0, OP_2 i OP_3). Sva tri uspoređena uzorka su postavljena u uloge referentnog i uspoređenog oblaka. U alatu *M3C2* ponovno su postavljeni isti parametri kao i prvi put, osim što je *Max depth* postavljen na 0,2 m. SD je izračunata za svih šest mogućih kombinacija, a konačna vrijednost SD je srednja vrijednost svih SD-a.

Standardna devijacija za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava također je ispitana na odabranom testnom području i to na temelju odnosa snimaka OP_2 i OP_3, odnosno OP_3 i OP_2, koji je najreprezentativniji. Konačna vrijednost SD je srednjak dobivene dvije vrijednosti.

4.1.6. Uređivanje podataka

S ciljem izrade kvalitetnog modela, prema standardima Međunarodne hidrografske organizacije, jedan od najzahtjevnijih zadataka u procesu modeliranja je filtracija podataka. Naime, sustav prikupi mnoštvo visinskih podataka koji ne reprezentiraju morfologiju dna, već mogu biti različiti šumovi i greške koje je potrebno pročitati.

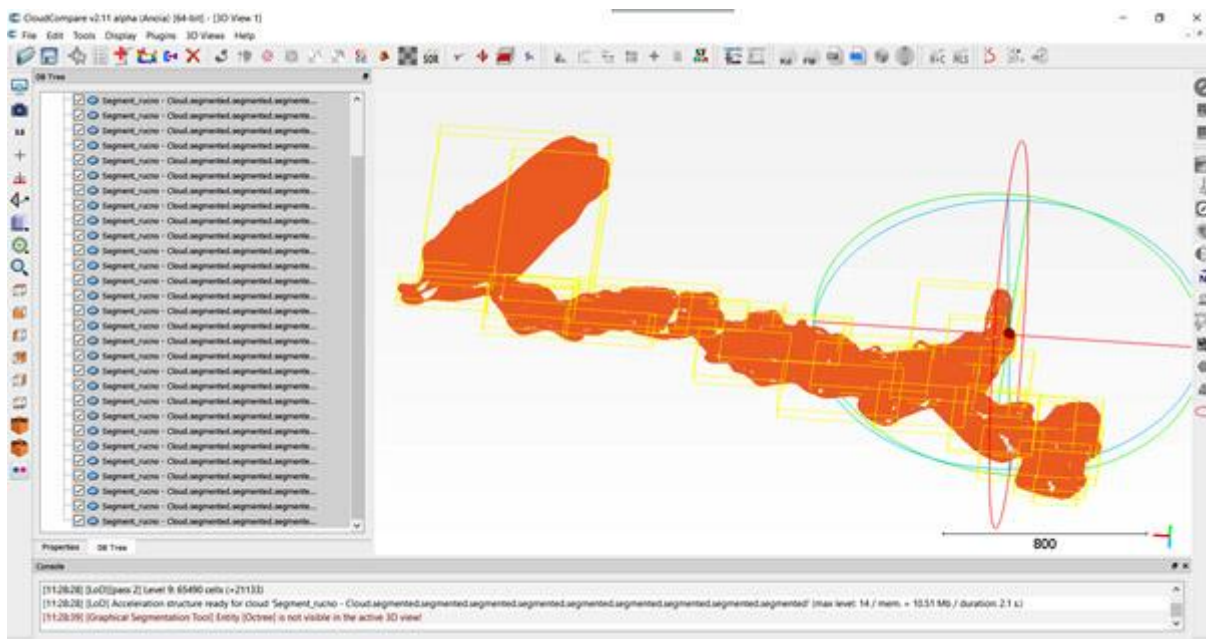
S obzirom na specifičnosti kanala teško je iz gustog oblaka točaka uočiti i zaključiti jesu li značajnija odstupanja od prosječnih vrijednosti za pojedina područja greške.



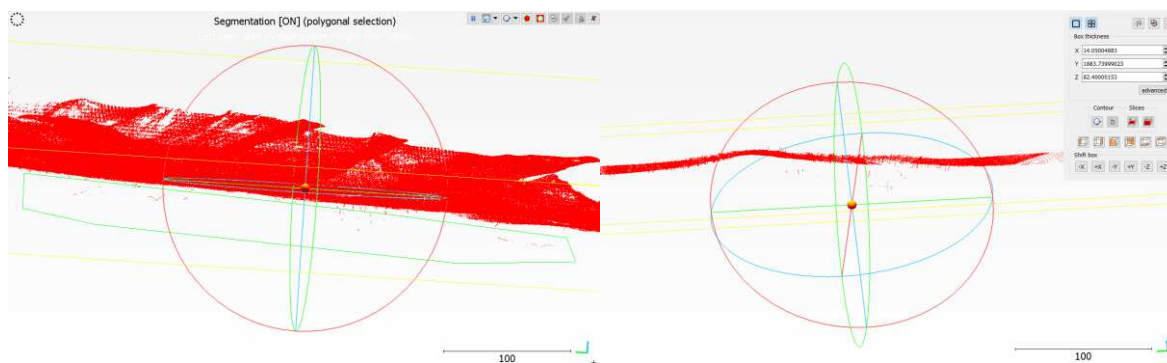
Slika I-25. Gusti oblak točaka u softveru *CloudCompare*

U procesu filtracije podataka korišteno je nekoliko metoda u softveru *CloudCompare*: ručna metoda (iz 3D prikaza i profila) (Slika I-27), SOR, Noise Filter, metoda segmentacije (Slika I-28 i I-29) i CSF filter (Slika I-31). Ručna metoda uklanjanja grešaka je izrazito dugotrajan i zahtjevan proces u kojem istraživač na temelju iskustva iz 3D prikaza i uzdužnih i poprečnih profila uklanja greške, prateći pritom konfiguraciju

dominantnog terena. Ručno su iz svakog ručno segmentiranog oblaka točka (Slika I-26.) uklonjene grube greške.

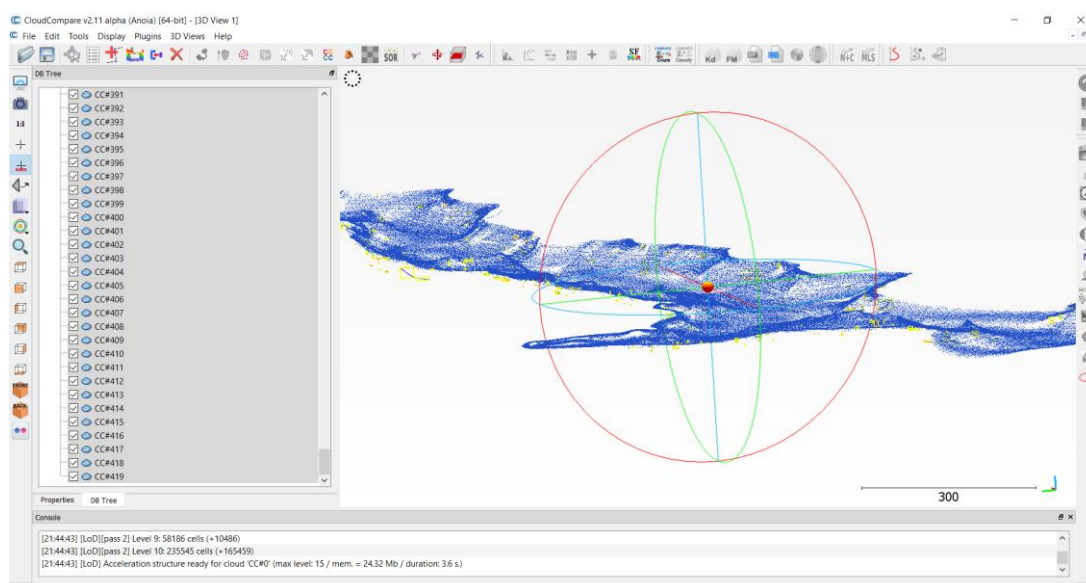


Slika I-26. Primjer ručno segmentiranih oblaka točka s obzirom na morfologiju terena

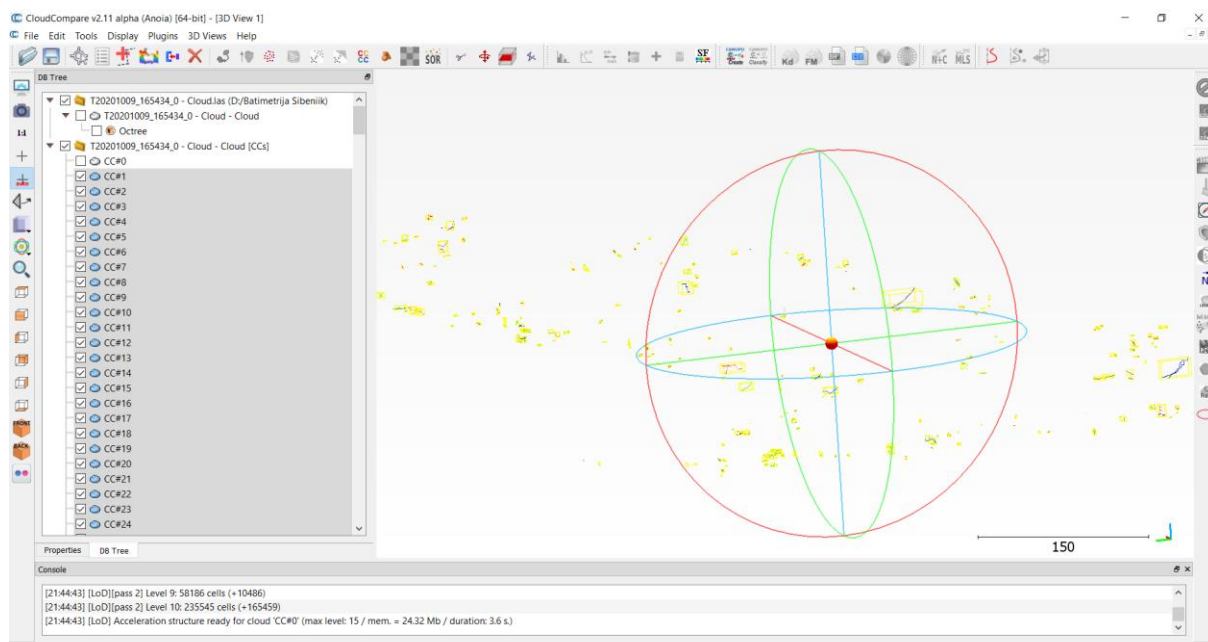


Slika I-27. Primjer ručnog uklanjanja grešaka u softveru CloudCompare

Automatsko uklanjanje grešaka obavljeno je pomoću alata *LabelConnected Components* u *CloudCompare*-u koji koristi 3D rešetku za ekstrahiranje povezanih komponenti. Ovaj alat segmentira odabrane oblake u manje dijelove odvojene minimalnom udaljenošću, pri čemu je svaki dio povezana komponenta (tj. skup 'spojenih' točaka). Alat zahtjeva poznavanje nekoliko važnih parametara. Prvi je razina ekstrahiranja (*Octree level*) kojim se definira minimalni razmak između dvije komponente. Što je razina viša to je razmak između komponenti manji što rezultira gušćom ćelijom, odnosno dobiva se više oblaka točaka koji su podskupine izvornog oblaka. Razina ovisi o ukupnom broju i gustoći prikupljenih točaka te je s obzirom na to postavljena razina 11. Sljedeći parametar je Minimalan broj točaka po komponenti (*Minimum points per component*). On je također uvjetovan brojem i gustoćom prikupljenih točaka te je definirano da se sve komponente koje imaju manje od 8 točaka zanemare. Na posljertku je označena i opcija Slučajne boje (*Random colors*) kojom je svakoj komponenti dodijeljena slučajna boja kako bi se lakše uočile razlike među komponentama. Po završetku *CloudCompare* je stvorio više oblaka kao komponenti (1850) koji su zapravo odgovarajuća podskupina izvornog oblaka s istim značajkama (skalarna polja, normale). Označeni su oblaci koji predstavljaju šumove i greške nastale u procesu prikupljanja podataka te opcijom Izbriši (*Delete*) uklonjeni iz skupa točaka koji ide u daljnji proces obrade.



Slika I-28. Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru *CloudCompare*



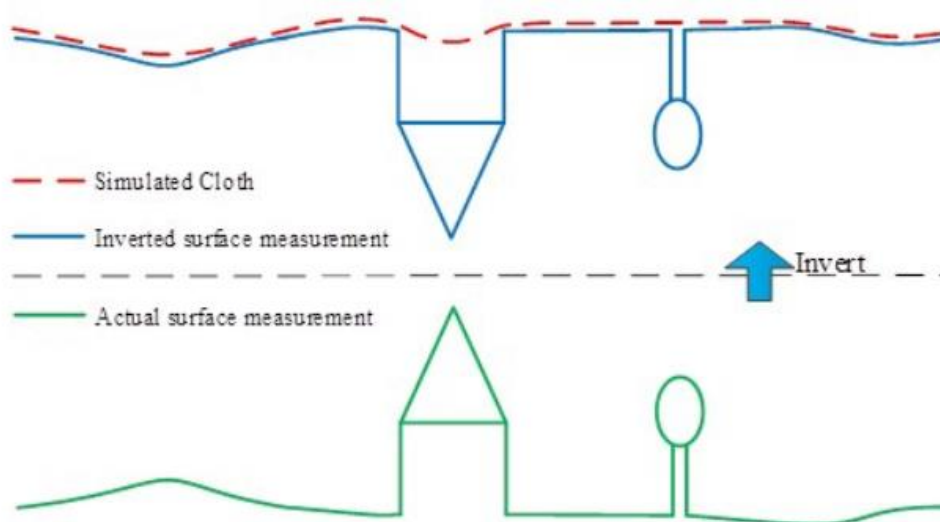
Slika I-29. Primjer automatskog filtriranja gustog oblaka točaka procesom segmentacije u softveru *CloudCompare*

4.1.7. Filtracija podataka primjenom *SOR filter-a*

Radi lakšeg procesiranja podataka i njihove obrade, ručno segmentirani oblaci točaka s obzirom na morfologiju terena, su filtrirani pomoću alata *SOR* i *CSF*. Za uspješnije filtriranje točaka korišten je napredni *SOR filter* (*Statistical Outlier Removal*) unutar *CloudCompare-a*. On filtraciju podataka vrši na sljedeći način. Za početak izračunava prosječnu udaljenost svake točke do svojih susjeda. Potom odbacuje, odnosno briše sve točke čija je udaljenost od susjednih točaka izvan intervala definiranog prosječnom udaljenosti i standardnim odstupanjem. *SOR filter* ima dva parametra. U prvom (*Number of points to use for mean distance*) se definira broj susjednih točaka koji će se koristiti za izračun 'udaljenosti do susjeda' za svaku točku. Prema zadanim postavkama određeno je da je to broj 6. Drugi parametar (*Standard deviation multiplier threshold (nSigma)*) odnosi se na množitelja standardnog odstupanja koji može biti bilo koji realni broj između 0 i 10 uključujući i njih. *SOR filter* je veoma osjetljiv te se za ovaj parametar predlaže odabir veće vrijednosti od broja točaka unutar klastera (Shen i dr., 2011). Stoga je određeno da sve točke čije je standardno odstupanje veće od onog pomnoženog s brojem 8 bude označeno te na poslijetku filtrirano.

4.1.8. Filtracija podataka primjenom Cloth Simulation Filter (CSF)

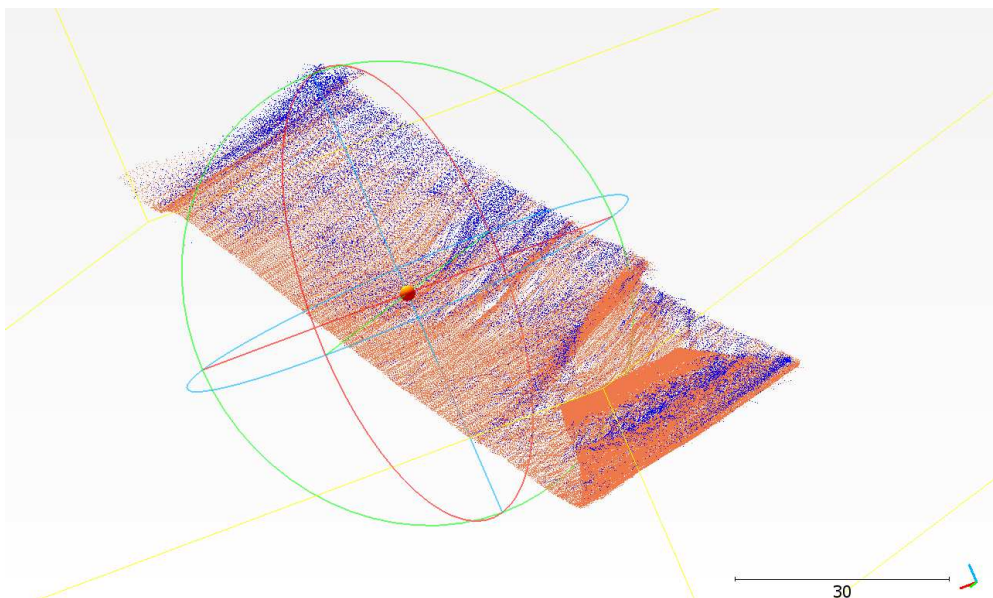
Cloth Simulation Filter (CSF) je alat za izdvajanje temeljnih točaka u diskretnim povratnim točkama prikupljenim različitim tehnologijama, a posebice LiDAR. Razdvajanje oblaka točaka u zemaljska i nezemaljska mjerenja važan je korak za generiranje digitalnih modela terena (DTM) iz različitih podataka. Razvijeni su mnogi algoritmi filtriranja. Međutim, čak i najmoderniji algoritmi za filtriranje trebaju pažljivo postaviti brojne složene parametre kako bi se postigla visoka točnost.



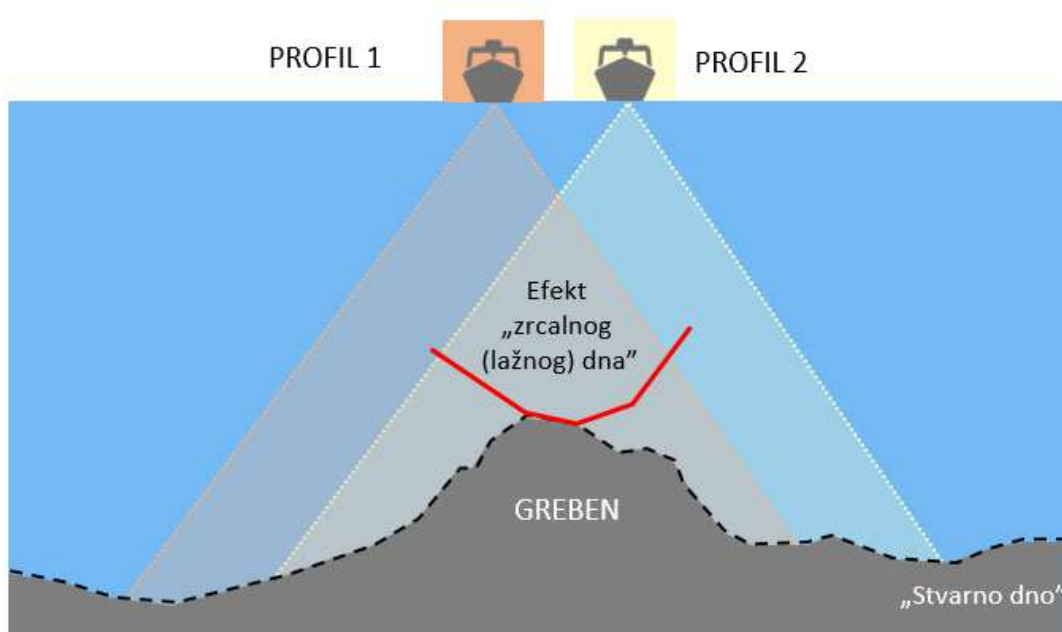
Slika I-30. Princip rada CSF metode

U svrhu smanjenja parametara koje korisnici postavljaju i promoviranja algoritama filtriranja, CSF je nova metoda filtriranja za koju je potrebno nekoliko jednostavno postavljenih cjelobrojnih i logičnih parametara. Ova metoda temelji se na simulaciji platna, algoritam 3D računalne grafike i koristi se za simulaciju platna unutar računalnog programa. U ovom predloženom pristupu obrnut je gusti točka, a zatim se krutom tkaninom prekriva obrnuta površina. Analizom interakcija između platnenih čvorova i odgovarajućih točaka mogu se odrediti lokacije platnenih čvorova kako bi se stvorila aproksimacija površine zemlje. Konačno, točke tla mogu se izdvojiti iz oblaka točaka usporedbom izvornih točaka i generirane površine.

Glavni razlog primjene metode su brojni artefakti uvjetovani karakteristikama opreme i morfologije dna. Na slici 31. prikazan je primjer pojave „zrcalnog (lažnog) dna“.



Slika I-31. Primjer uklanjanja oblaka točkica korištenjem CSF algoritma (plave točke) na zaravnjenom dijelu ispred postaje Martinska



Slika I-32. Primjer pojave efekta „zrcalnog (lažnog) dna“

4.1.9. Interpolacija podataka prikupljenih batimetrijskom izmjerom

Da bi se dobile kontinuirane površine (visoko rezolucijski modeli) koje su neophodne za proučavanje, a time i poznavanje dna bilo je potrebno procijeniti vrijednosti na neuzorkovanim područjima koristeći pritom optimalnu interpolacijsku metodu i prostornu rezoluciju. Interpolacija je proces računanja vrijednosti za određenu točku uz pomoć dviju ili više susjednih točaka s poznatim vrijednostima. Nova vrijednost u točki nikad ne prelazi interval određen susjednim točkama, a procijenjena vrijednost se svrstava u područje mogućega (Šiljeg i dr, 2018). Slijedeći primjere dobre prakse unutar digitalnog modeliranja reljefa odabrana je metoda interpolacije prirodni susjed (*natural neighbor*).

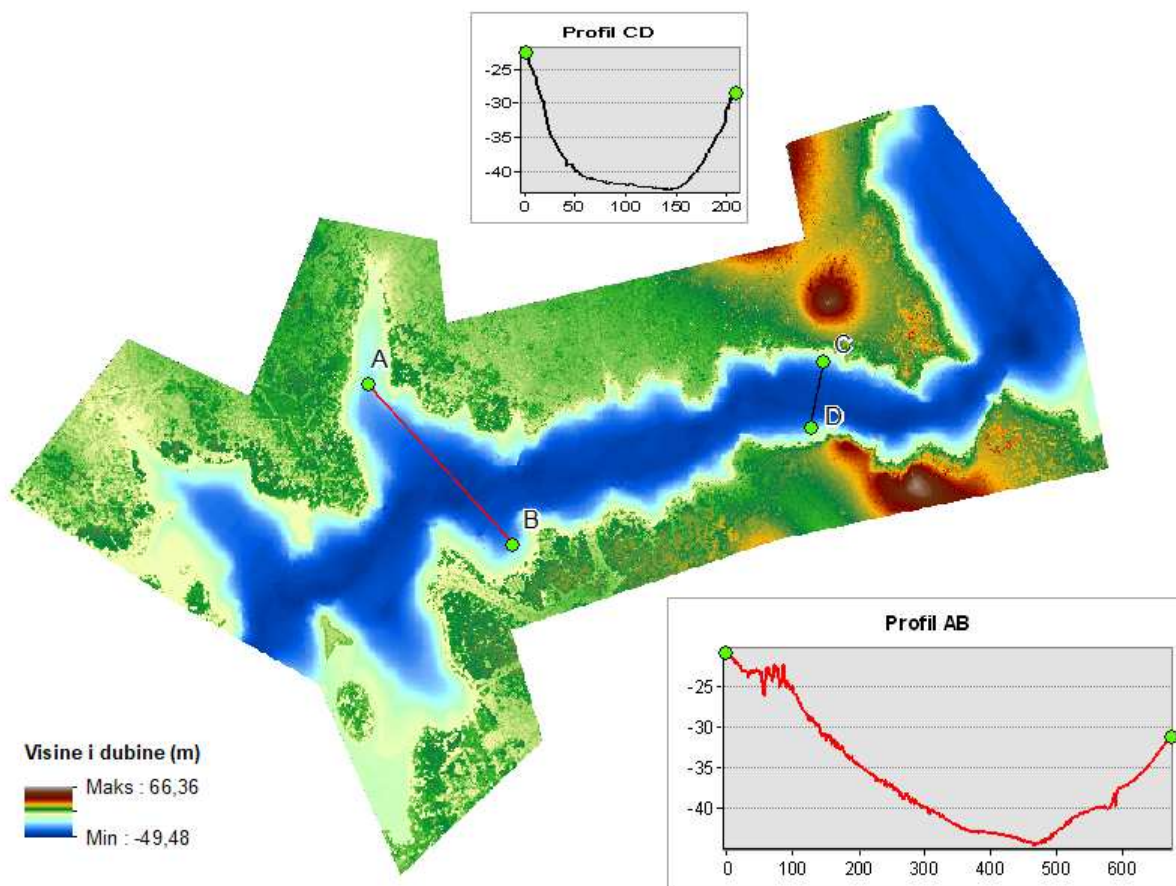
„Prirodni susjed je jedna od najpopularnijih metoda interpolacija, sa širokom primjenom u geografskom i geofizičkom modeliranju, mehanici itd. Ona kombinira najbolje značajke metoda najbližih susjeda i triangulacijske nepravilne mreže. To je metoda ponderiranog prosjeka koja procjenjuje vrijednost pomoću lokalnih koordinata prirodnog susjeda na temelju Voronoijeve teselacije (proces stvaranja dvodimenzionalne ravnine ponavljanjem geometrijskih oblika bez preklapanja i praznina)” (Šiljeg i dr., 2018:45).

4.1.10. Prostorna rezolucija

Nakon procesa usporedbe metoda interpolacije, sljedeći korak je proces odabira pravilne prostorne mreže ili *grid-a*. Najveći problem za većinu znanstvenika, pri izradi digitalnih modela, predstavlja odabir prostorne rezolucije ili veličine piksela. Ona je izračunata pomoću *Grid calculator-a* i metode analize uzoraka točaka (Hengl, 2006). Prilikom izrade integralnog modela (digitalni model dubina + digitalni model površina) odabrana je optimalna prostorna rezolucija od 50 cm (*point pattern analysis*). Ona predstavlja kompromis između gustoće uzorkovanja visinskih i dubinskih točaka te površine područja snimanja. Za potrebe vizualizacije rezolucija modela je smanjena na vrijednost od 100 cm.

4.2. Izračun volumena i duljine obalne linije kanala Sv. Ante

Iz generiranih 2.5D i 3D modela kanala oko moguće je izvoditi različite primarne i sekundarne parametre (morfometrijske, hidrološke itd). Tako je primjerice na slici 33 prikazana izmjera specifičnih profila unutar kanala Sv. Ante kroz odabrane poprečne presjeke. Naime, da bi se što bolje razumjela prostorno-vremenska evolucija pojedinih dijelova dna kanala potrebno je provesti detaljnu morfometrijsku i tipološku klasifikaciju određenih promatranih profila i to kroz kvantitativno opisivanje recentnih promjena u širini i dubini promatranih poprečnih presjeka kanala.



Slika I-33. Poprečni AB i uzdužni CD profili u kanala Sv. Ante

U završnoj fazi batimetrijskog istraživanja izračunati su površina i volumen. „Volumen se može definirati kao količina vode koja zauzima određeni prostor između površine i dna mora izražen u kubičnim jedinicama” (Šiljeg i dr., 2016:248).

Na izlazne rezultate mogu utjecati brojni čimbenici. To su ponajprije raščlanjenost dna, zatim odabrana metoda prikupljanja podataka, gustoća i raspored prikupljenih točaka te prostorna rezolucija (veličini piksela). No izlazni rezultati ovise i o korištenom softveru i algoritmima te metodama interpolacije koji omogućuju prikaz rezultata te njihovu usporedbu (Šiljeg i dr., 2016).

Volumen kanala izračunat je iz pravilne mreže dobivene interpolacijom. Korištene su tri *Newton-Cotesove* formule integrirane unutar softvera *Surfer* koje služe za izračun površine i volumena različitih oblika: produljeno trapezoidno pravilo, produljeno Simpsonovo 1/3 pravilo te produljeno Simpsonovo 3/8 pravilo (Šiljeg i dr., 2016).

Ukupna duljina obalne linije izračunate su u softveru iz DEM-a usklađenog s DOF-om dobivenim obradom aerofotogrametrijskih snimaka. Osnova za izdvajanje obalne linije je izohipsa 0,05 m (vrijednosti izmjerene geodetskim GPS-om *Stonex S10*).

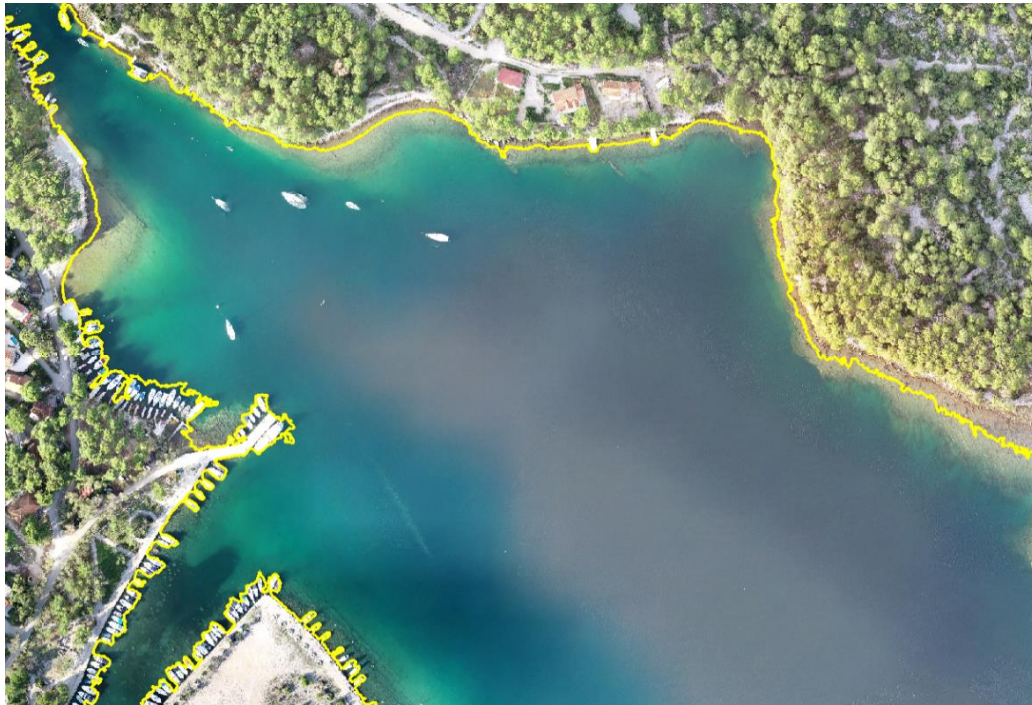
5. Rezultati

5.3. 2.5D i 3D modeli kanala Sv. Ante

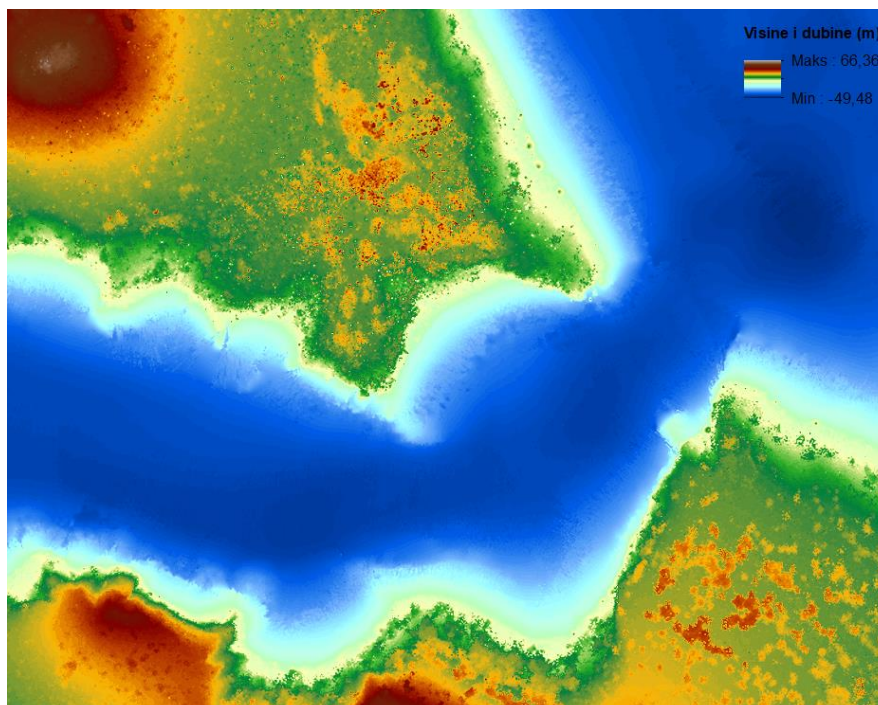
Iz aerofotogrametrijskog snimanja izvedeni su sljedeći modeli:

- 1) Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto snimak (DOF) (Slika I-34)
- 2) Visoko-rezolucijski digitalni model površina (DSM) (Slika I-35)
- 3) 3D model kanala (Slika 40-42) iz filtriranog gustog oblaka točaka (Slika I-43).

Nova visoko-rezolucijska digitalna ortofoto (DOF) karta kanala je izvedena u prostornoj rezoluciji oko 3 cm (Slika I-34). Ortofoto karta je planimetrijski ispravna snimka iz zraka, koja po metričkim svojstvima, u potpunosti odgovara karti istog mjerila (URL4). Izrada ortofoto karte temelji se na orijentiranom digitalnom fotogrametrijskom snimku i digitalnom modelu reljefa. Iz gustog oblaka točaka generiran je 2) digitalni model površina (DSM) kanala. Prostorna rezolucija modela posljedica je postavki parametra *Quality* koja je postavljena na *High*. U konačnici je generiran model prostorne rezolucije oko 4 cm (Slika I-35).



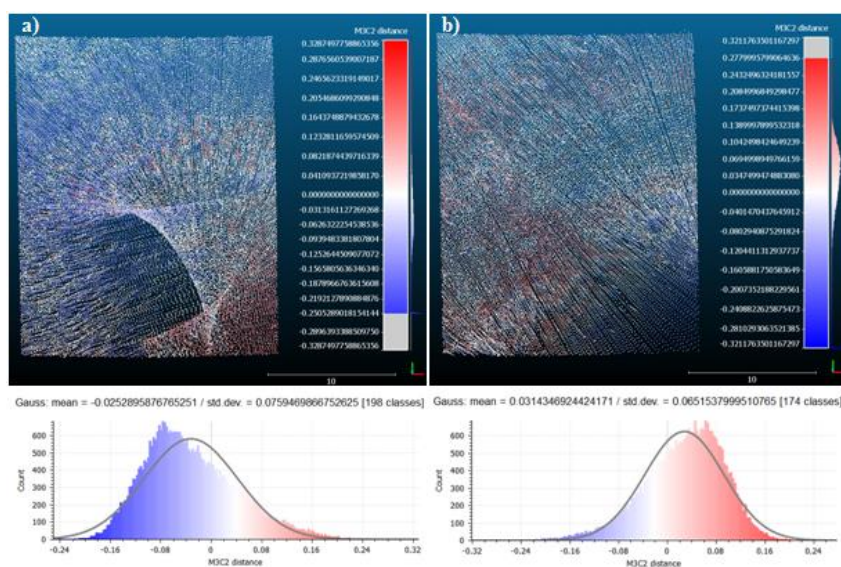
Slika 1-34. Visoko-rezolucijski DOF snimak uvale u kanalu Sv. Ante



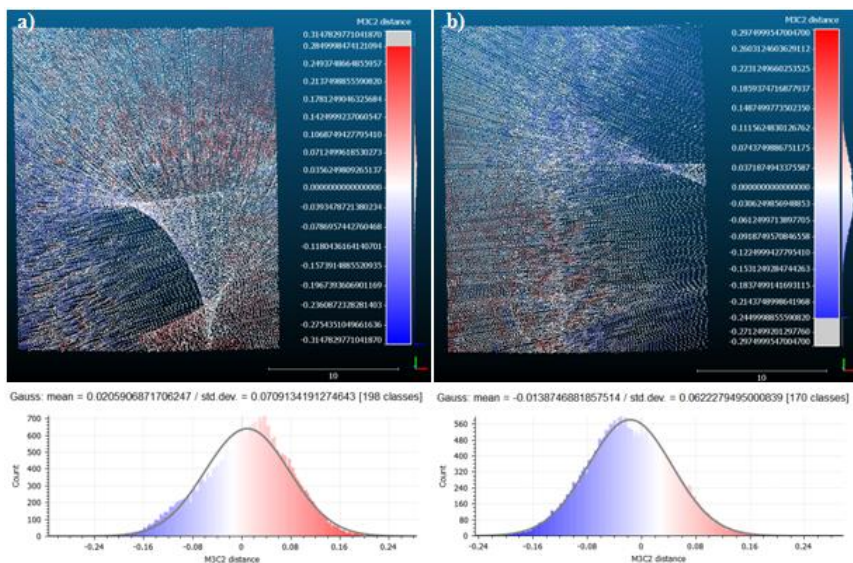
Slika 35. I-Digitalni model površina (DSM) i digitalni model dubina (DMD)

5.4. Vertikalna i horizontalna preciznost integralnog mjernog sustava

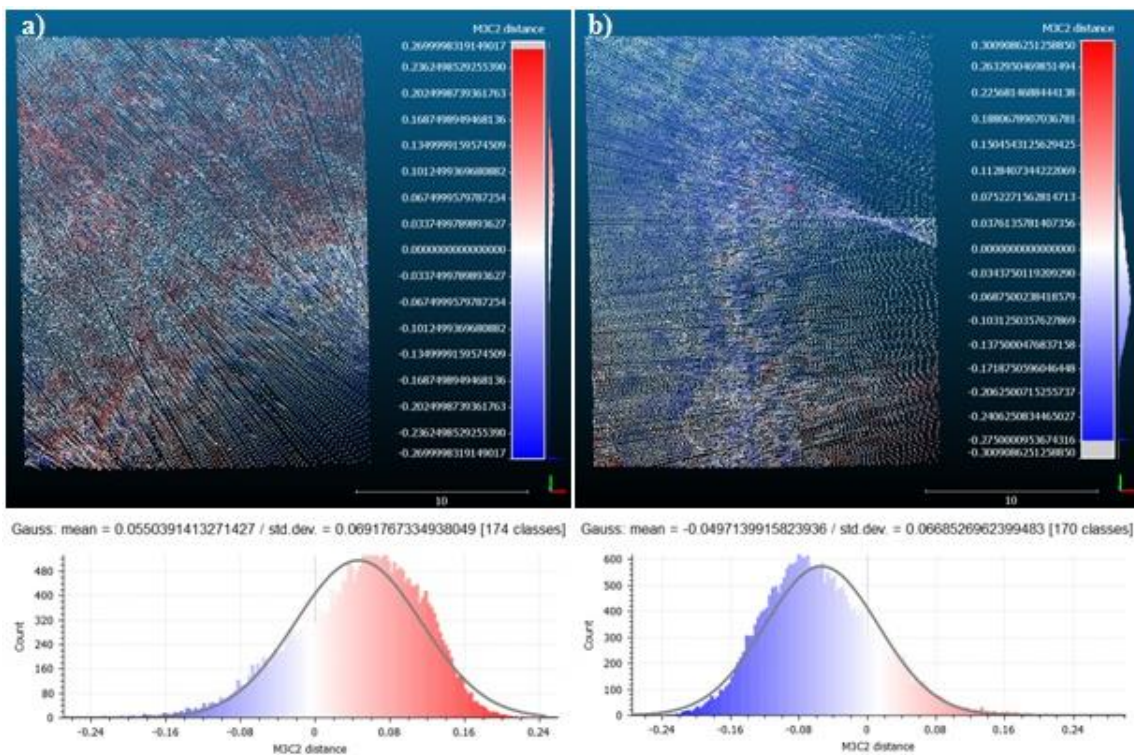
Standardna devijacija je računata, ali ovaj put na manjem testnom području koje je obuhvaćeno s tri ciklična snimanja na kojima je približno jednaka gustoća uzorkovanja (OP_0, OP_2 i OP_3). SD je računata za svih mogućih šest kombinacija pri kojima uzorak svakog cikličnog snimka bio u ulozi referentnog i uspoređenog oblaka točaka (Slika I-36-I-38).



Slika I-36. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_0 - OP_2 i b) OP_2 - OP_0



Slika I-37. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_0 - OP_3 i b) OP_3 - OP_0



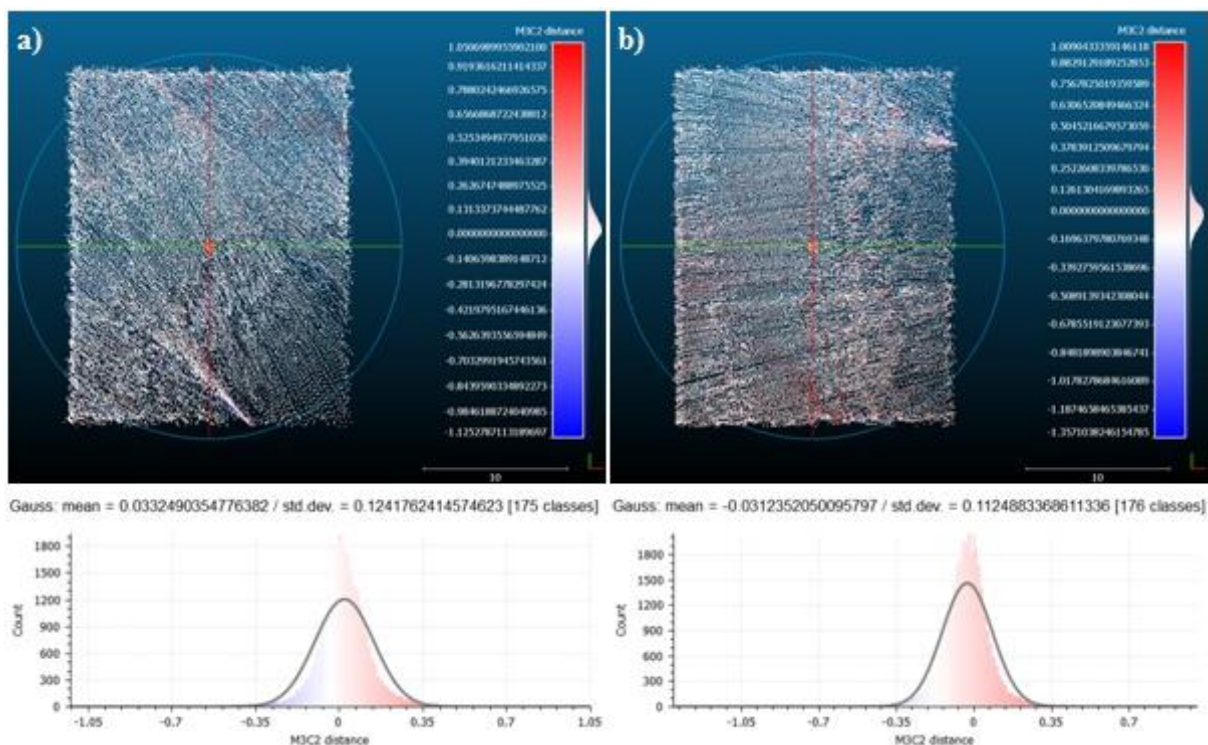
Slika I-38. Vertikalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_2 - OP_3 i b) OP_3 - OP_2

Dobivene su vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava. SD za vertikalnu preciznost izračunata je kao srednja vrijednost svih šest kombinacija. Ona iznosi 6,8 cm (Tablica I-3).

Tablica I-3. *Vrijednosti standardne devijacije za vertikalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka*

Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_0 - OP_2	7,6
OP_2 - OP_0	6,5
OP_0 - OP_3	7,1
OP_3 - OP_0	6,2
OP_2 - OP_3	6,9
OP_3 - OP_2	6,7
Ukupno	6,8

Ispitivanje horizontalne preciznosti integralnog mjernog sustava provedeno je na temelju usporedbe testnog područja trećeg (OP_2) i četvrtog (OP_3) cikličnog snimka (Slika I-39).



Slika I-39. Horizontalna preciznost - odnos snimaka: a) OP_2 - OP_3 i b) OP_3 - OP_2

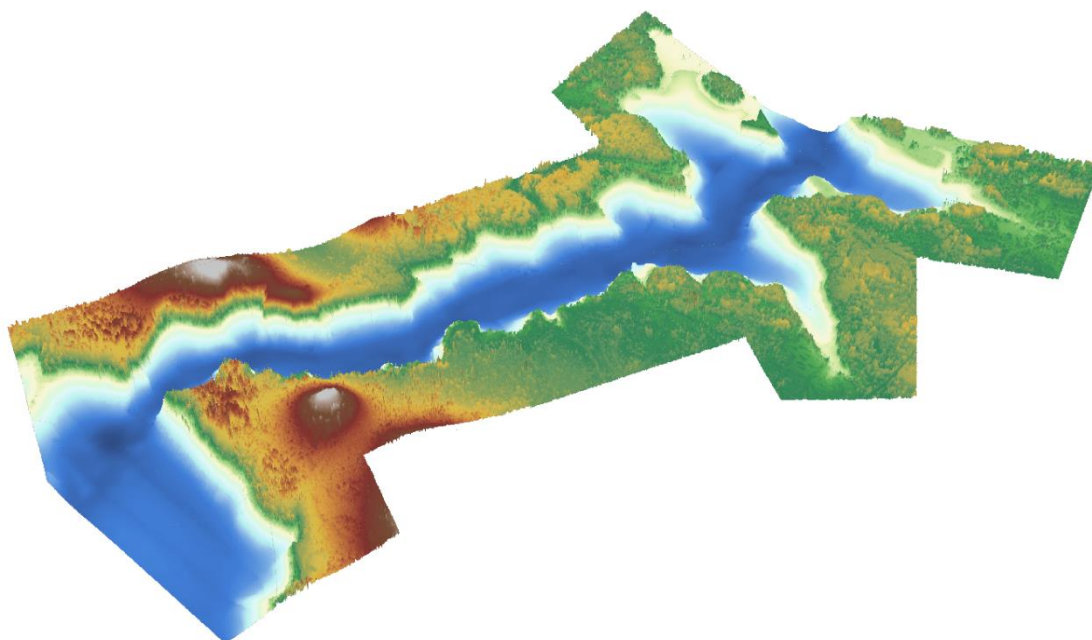
Srednja vrijednost standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava iznosi 11,8 cm (Tablica I-4).

Tablica I-4. Vrijednosti standardne devijacije za horizontalnu preciznost integralnog mjernog sustava za uspoređene testne uzorke cikličnih snimaka

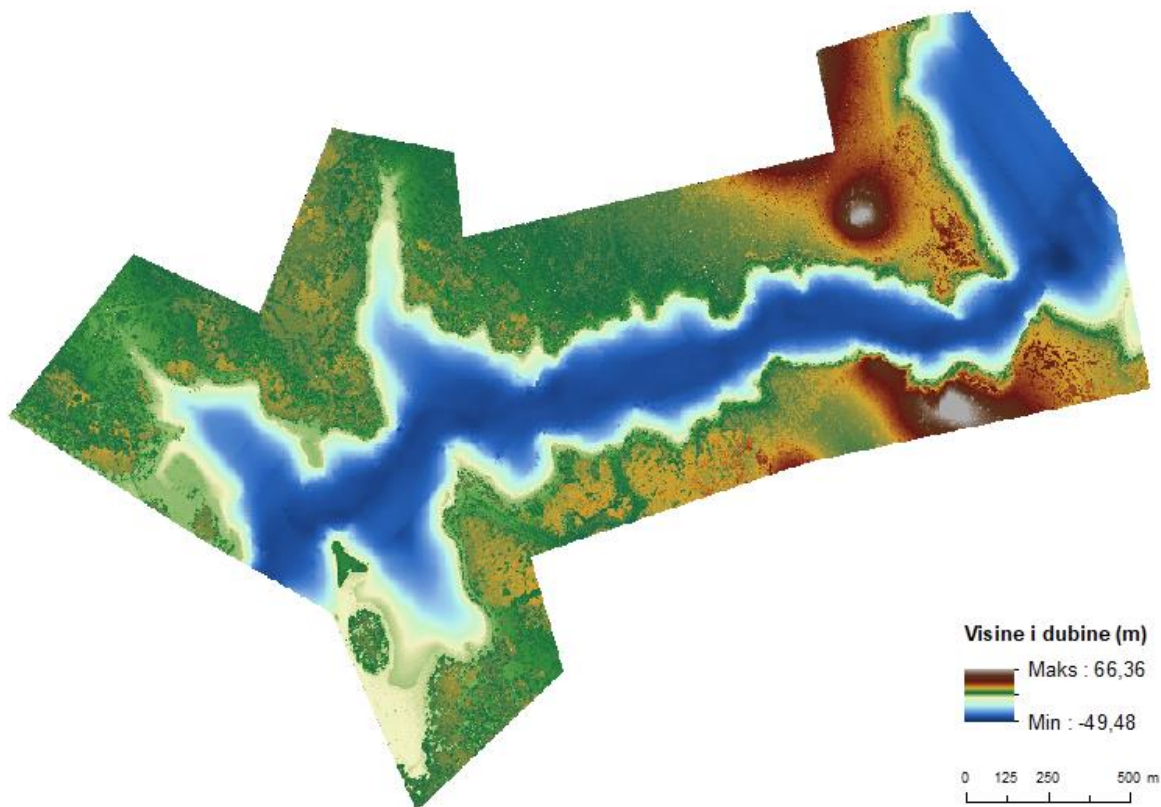
Usporedba	Standardna devijacija (cm)
OP_2 - OP_3	12,4
OP_3 - OP_2	11,2
Ukupno	11,8

5.6. Integralni model kanala Sv. Ante

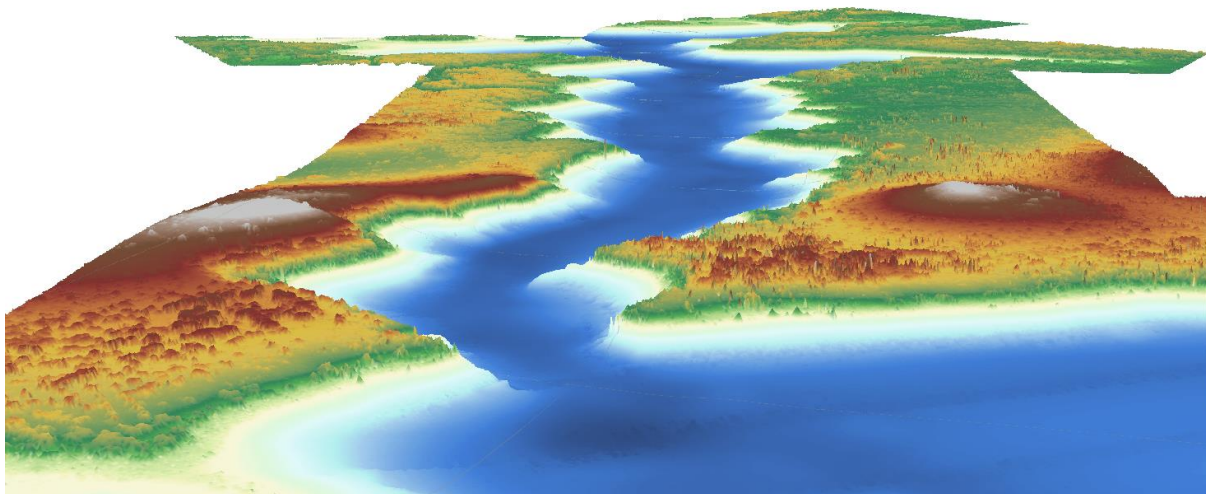
Generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -49,48 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom kojem maksimalna visina unutar topografskog bazena iznosi 66,36 m. Perspektivni blokovski prikazi (Slika I-40 i I-42) klasificirani su *Stretch* metodom klasifikacije koja je idealna za prikaz kontinuiranih vrijednosti piksela koji imaju veliki raspon vrijednosti.



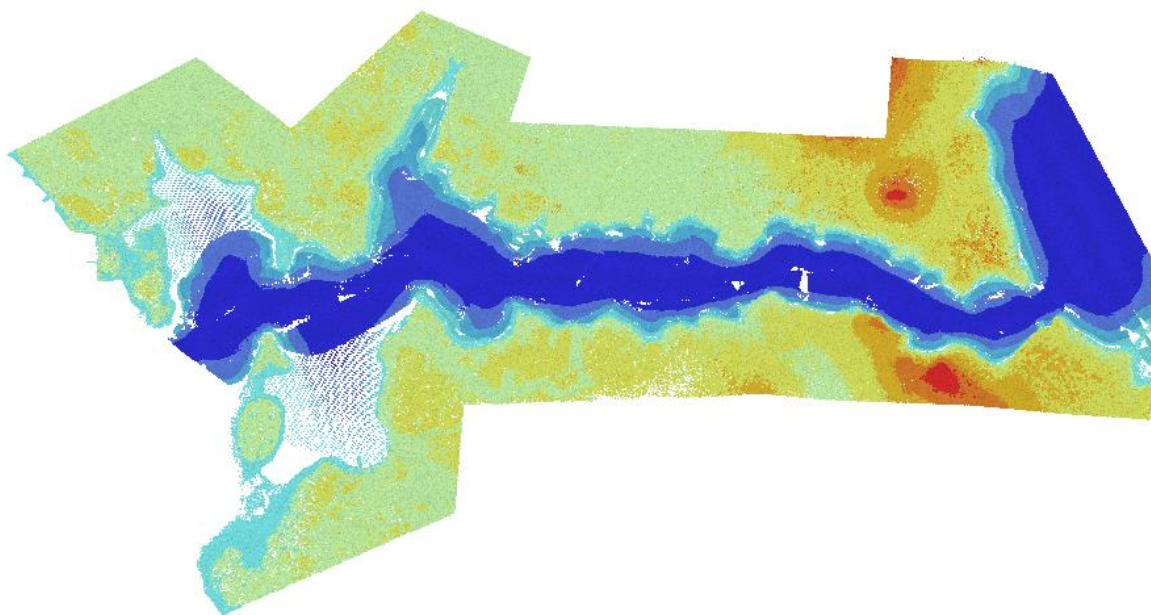
Slika I-40. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela kanala Sv. Ante



Slika I-41. Integralni model kanala Sv. Ante



Slika I-42. Perspektivni blokovski prikaz integralnog kanala Sv. Ante



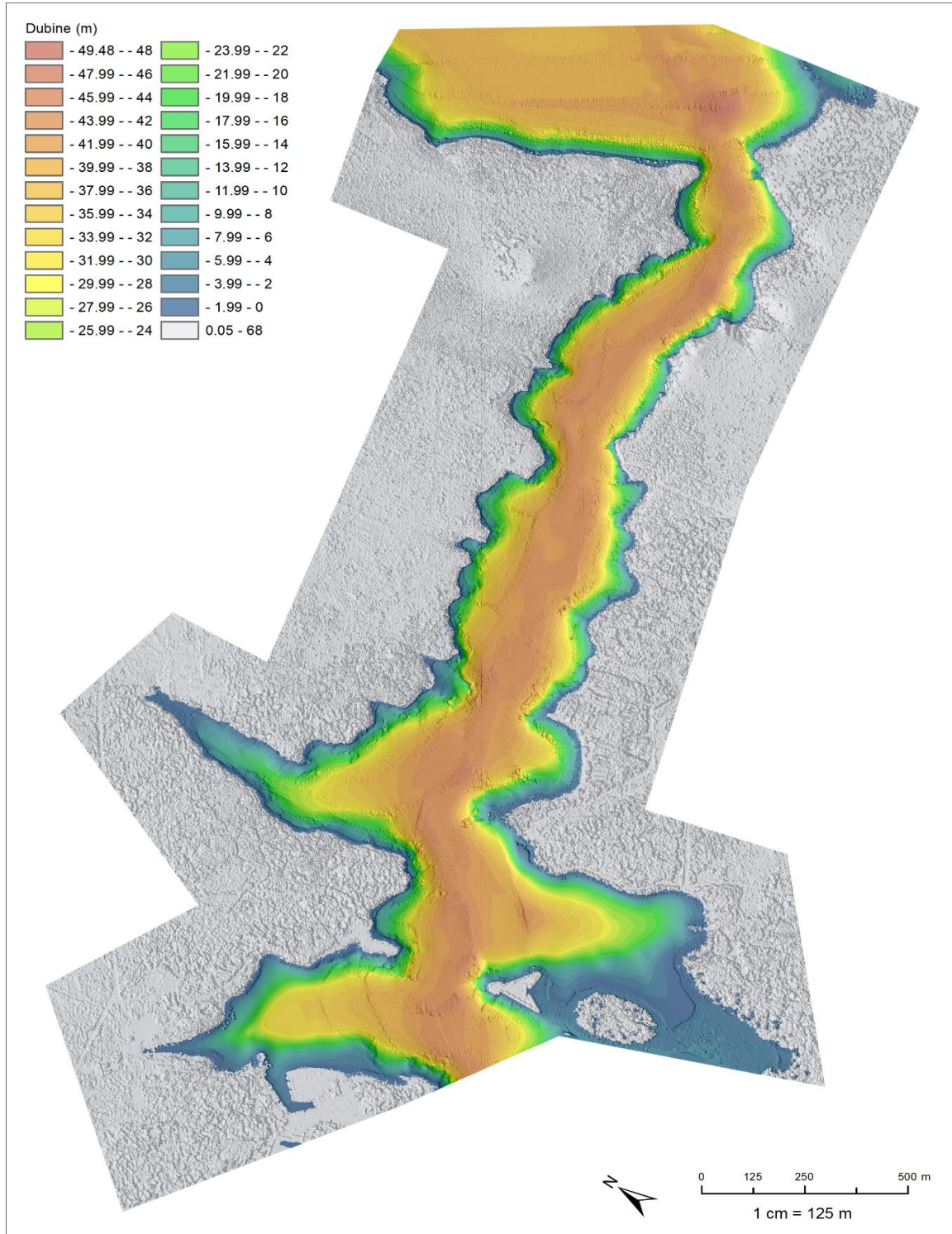
Slika I-43. Filtrirani gusti oblak točaka

5.7. Volumen, površina i duljina obalne linije kanala Sv. Ante

Iz generiranog digitalnog modela dubina izveden je podatak o volumenu kanala na dan snimanja od 42609970,34 m³, dok je volumen kopnenog dijela 26712444,99 m³.

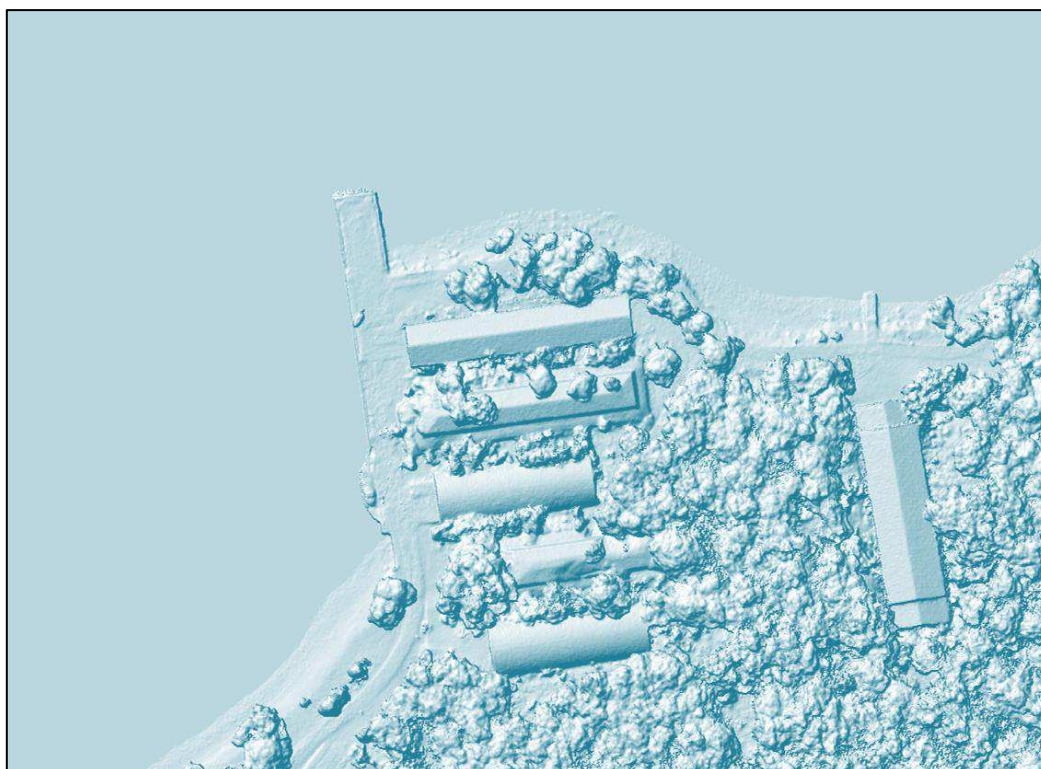
Volumen kanala u odnosu na vodostaj na dan snimanja (0,05 m)

Iz DEM-a usklađenog s DOF-om izvedeni su podaci o površini i duljini obalne linije na dan snimanja.



Slika I-44. Batimetrijska karta kanala Sv. Ante

II.AEROFOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE KANALA SV. ANTE



Aerofotogrametrijsko snimanje kanala Sv. Ante

- a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm
- b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm
- c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u kanalu Sv. Ante
- d) Izrada digitalnog modela reljefa
- e) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

AEROPHOTOGRAMMETRIC SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL

Abstract

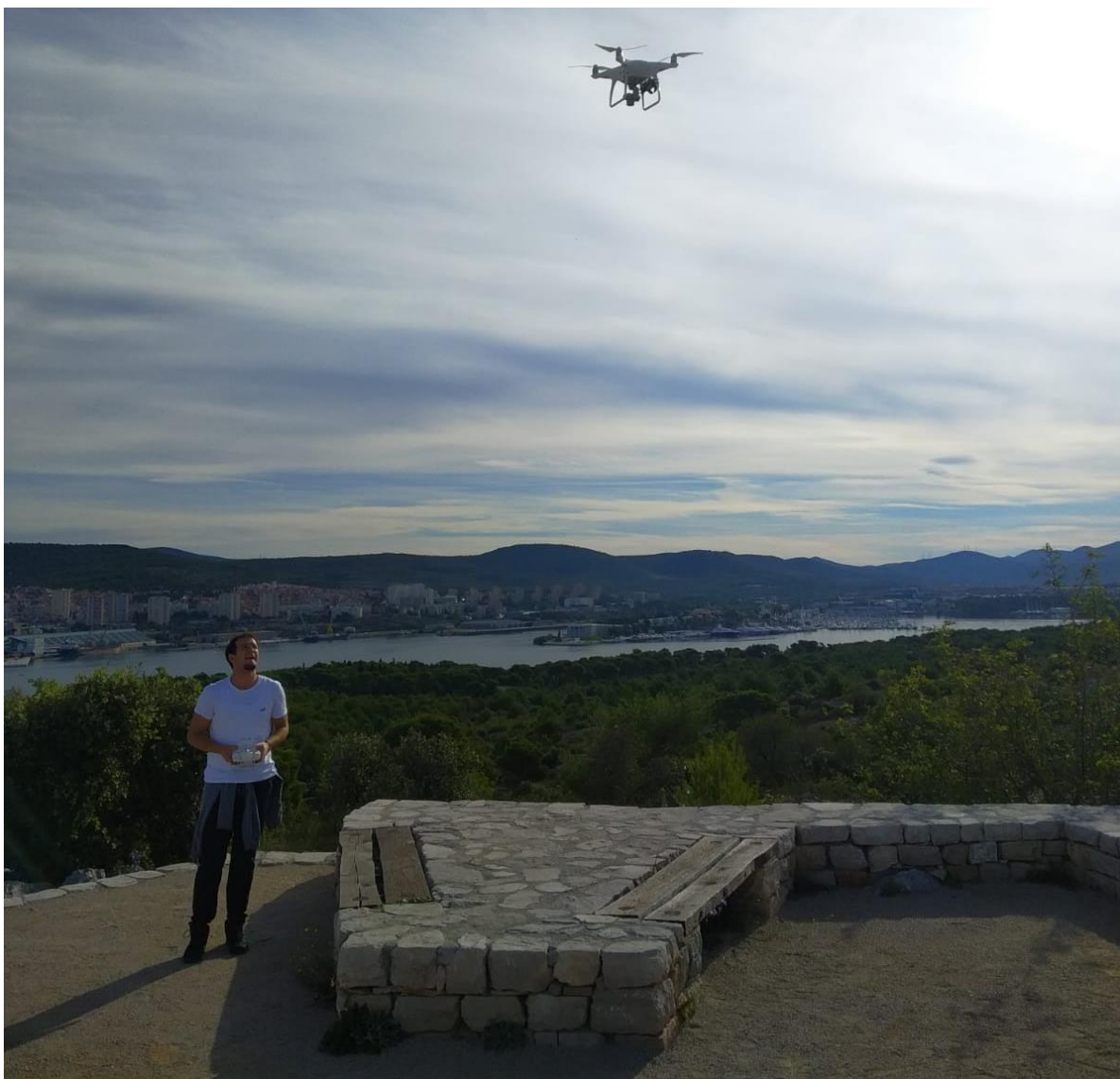
The report describes in detail the performance of high-resolution models (DMR, DMP, CSR) of the wider area of the St. Anthony's Channel based on data collected by UAV photogrammetry. Modern drones were used, and several thousand photographs were collected. The implemented activities resulted in the development of DOF spatial resolution up to 5 cm digital surface model (DSM) spatial resolution up to 5 cm.

Sažetak

U izvješću je detaljno opisano izvođenje visokorezolucijskih modela (DMR, DMP, DOP) šireg područja kanala Sv. Ante na temelju podataka prikupljenih UAV fotogramrijom. Korištene su suvremene bespilotne letjelice te je prikupljeno nekoliko tisuća fotografija. Provedene aktivnosti su rezultirale izradom DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm digitalnog modela površina (DSM) prostorne rezolucije do 5 cm.

Izrada modela šireg prostora kanala Sv. Ante

Širi prostor kanala Sv. Ante obuhvaća sva slivna područja povezana s glavnim drenažnim bazenima. Izrada digitalnog modela reljefa (DMR) i digitalnog ortofoto snimka (DOF) vrlo visoke rezolucije kanala Sv. Ante omogućava proučavanje hidroloških procesa i potencijalnih kopnenih izvora onečišćenja unutar čitavog površinskog hidrološkog sustava. Modeli šireg prostora kanala izrađeni su na temelju podataka prikupljenih u aerofotogrametrijskom snimanju u listopadu, 2020. godine. (Slika II-1-4).



Slika II-1. Izvođenje aerofotogrametrijskog snimanja (1)



Slika II-2. Izvođenje aerofotogrametrijskog snimanja (2) – priprema Phantom 4 Pro



Slika II-3. Izvođenje aerofotogrametrijskog snimanja (3) – slijetanje Phantom 4 Pro



Slika II-4. Izvođenje aerofotogrametrijskog snimanja (4) – priprema Matrice 210 RTK

a) Izrada DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm

Visoko-rezolucijski digitalni ortofoto (DOF) prostorne rezolucije 5 cm izveden je na temelju zračnih snimaka koji su prikupljeni bespilotnom letjelicom Matrice 210 RTK i Phantomom 4 Pro.

U nastavku tekstu je popisan proces planiranja i izvođenja leta, te obrade zračnih snimaka. Ukupno je prikupljeno 6003 visoko-kvalitetnih fotografija, odnosno preko 100 GB podataka. Snimanje je izvršeno primjenjujući tip misija *Double Grid Mission* s prednjim i bočnim preklapom > 80%. Misije su isplanirane u ArcMapu uvažavajući morfologiju terena, a izvođenje letenja je izvršeno u DJI GS Pro i Pix4D capture aplikacijama (Slika II-5), ovisno o korištenoj bespilotnoj letjelici. Svaka misija je u prosjeku trajala 20-tak minuta. Ukupno je izvršeno 24 snimanja.



Slika II-5. Primjer misije isplanirane u Pix4Dcapture misiji

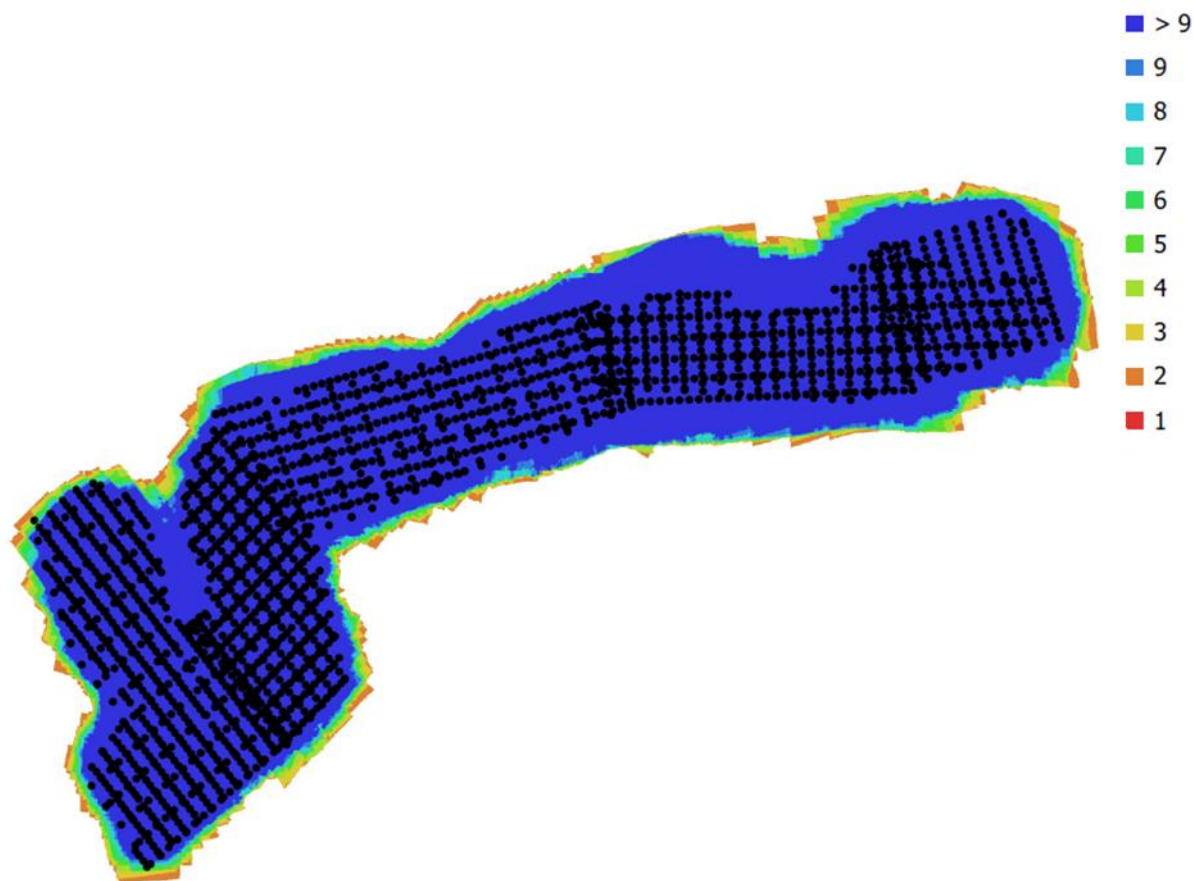
Obrada aerofotogrametrijskih snimaka napravljena je u *Agisoft Metashape 1.5.1.* softveru, trenutno jednom od najnaprednijih softvera za obradu fotogrametrijskih snimaka. Zahvaljujući implementiranim structure-from-motion (SfM) i multi-view algoritmima Agisoft omogućava 3D modeliranje, zasnovano na rekonstrukciju 3D struktura iz preklapljenih 2D snimaka (Mancini i dr., 2013; Agisoft, 2020.).

Pri tome izrada oblaka točaka i DMP-a u Agisoft Metashape softveru predstavlja polu-automatizirani proces, koji uključuje sljedećih pet faza: orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1), dodavanje kontrolnih točaka (2), izrada gustog oblaka točaka (3), izrada digitalnog modela površina (4) te izrada digitalnog ortofoto snimka (5).

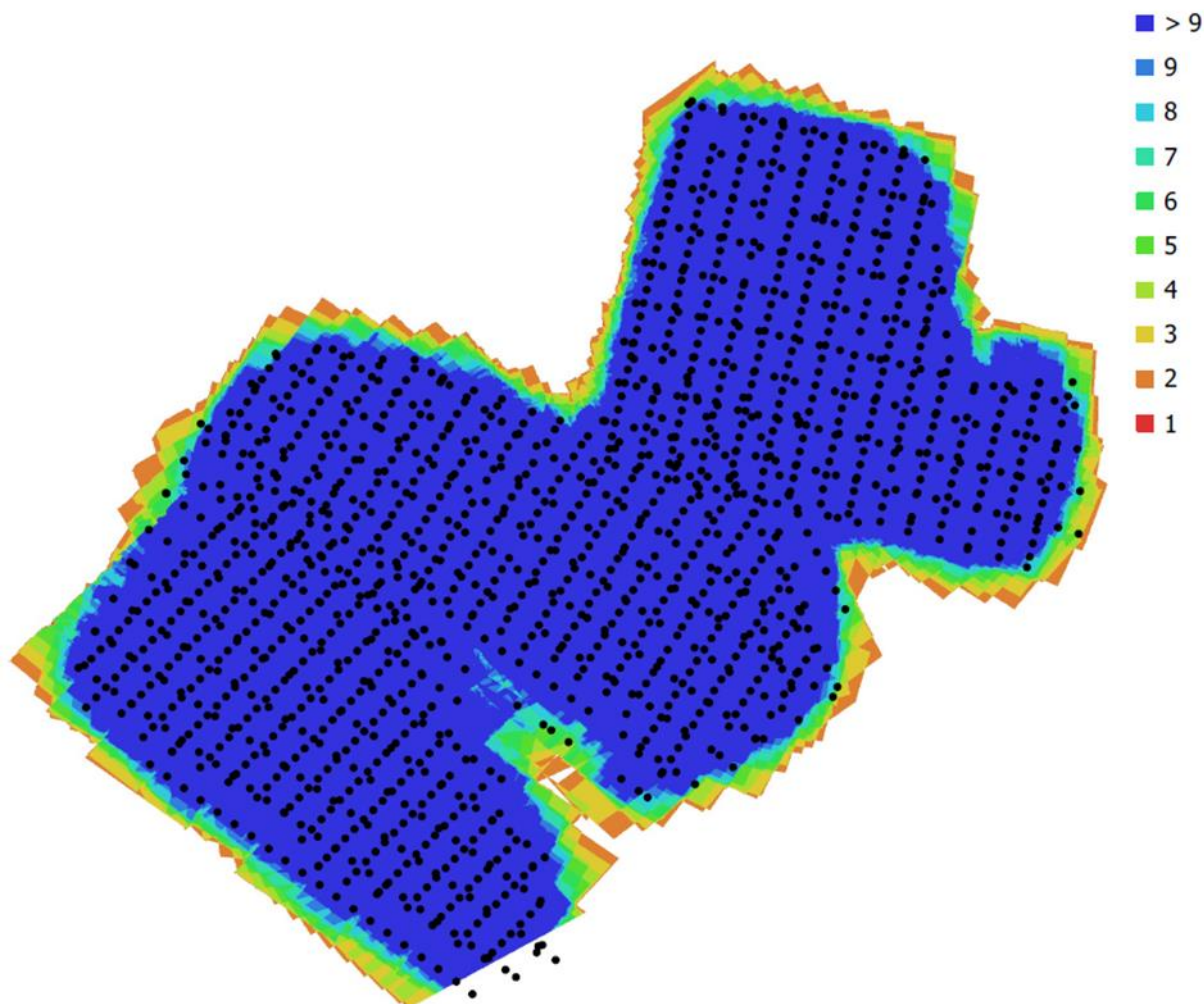
Orijentacija aerofotogrametrijskih snimaka (1) – prva faza procesa izrade modela iz prikupljenih aerofotogrametrijskih snimaka obuhvaća orijentaciju i povezivanje prikupljenih snimaka (engl. *Align Photos*).

Agisoft Metashape automatski za svaki prikupljeni snimak prepoznaje vezne piksele, uz pomoć kojih međusobno povezuje i orijentira zadane snimke i izrađuje rijetki oblak točaka (engl. *sparse point cloud*) (Agisoft, 2020.). Pri tome korisnik definira varijablu *accuracy*, koja se odnosi na ukupan broj piksela slike koje će softver koristiti za orijentaciju i povezivanje zadanih snimaka. S obzirom da o ovoj fazi ovise sljedeći koraci procesa izrade modela, ali i vrijeme potrebno za obradu snimaka, poželjno je sukladno mogućnostima postaviti što višu razinu varijable *accuracy*. Radi postizanja što točnije orijentacije snimaka prilikom izrade svih modela u Agisoft Metashapeu korištena je *highest* vrijednost varijable *accuracy*, dok je za vrijednost parametara *key point limit* i *tie point limit* zadana vrijednost od 40 000 i 10 000.

S obzirom na to da je unutar snimanog područja prikupljeno 6003 visoko kvalitetnih fotografije obrada zračnih snimaka je zbog ograničenja radne stanica morala biti izvršena u odvojenim chunkovima. Primjerice, na slici II-6-7 je vidljivo preklapanje unutar snimanog prostora za drugi i treći *chunk*. U svakom *chunku* prostor snimanja je vidljiv na minimalno devet fotografija.

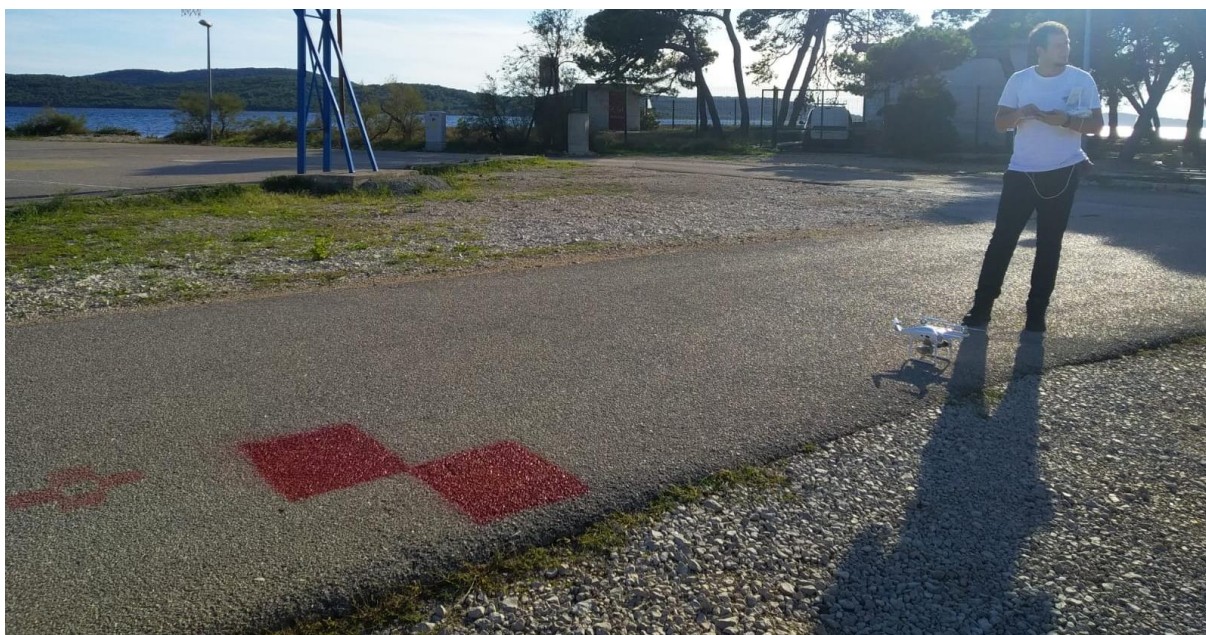


Slika II-6. Broj preklapanja snimaka unutar snimljenog područja (chunk 1)



Slika II-7. Broj preklapanja snimaka unutar snimljenog područja (chunk 2)

Dodavanje orijentacijskih točaka (2) – da bi se postigla apsolutna orijentacija rekonstruiranog modela potrebno je georeferencirati izrađeni oblak točaka prema orijentacijskih točaka (OT), čije su precizne xyz koordinate prikupljene na terenu, korištenjem geodetskog RTK-GPS uređaja (James i dr., 2017.). Prije terenskog prikupljanja odabrane su optimalne lokacije za OT, koje pretežito čine različite specifične lokacije. Terensko prikupljanje OT izvršeno je u sklopu terenskih istraživanja u listipadu 2020. godine prije izvođenja zračnog snimanja (Slika II-8). Iste orijentacijske točke koristile su se i za potrebe orijentiranja multispektralnog modela.

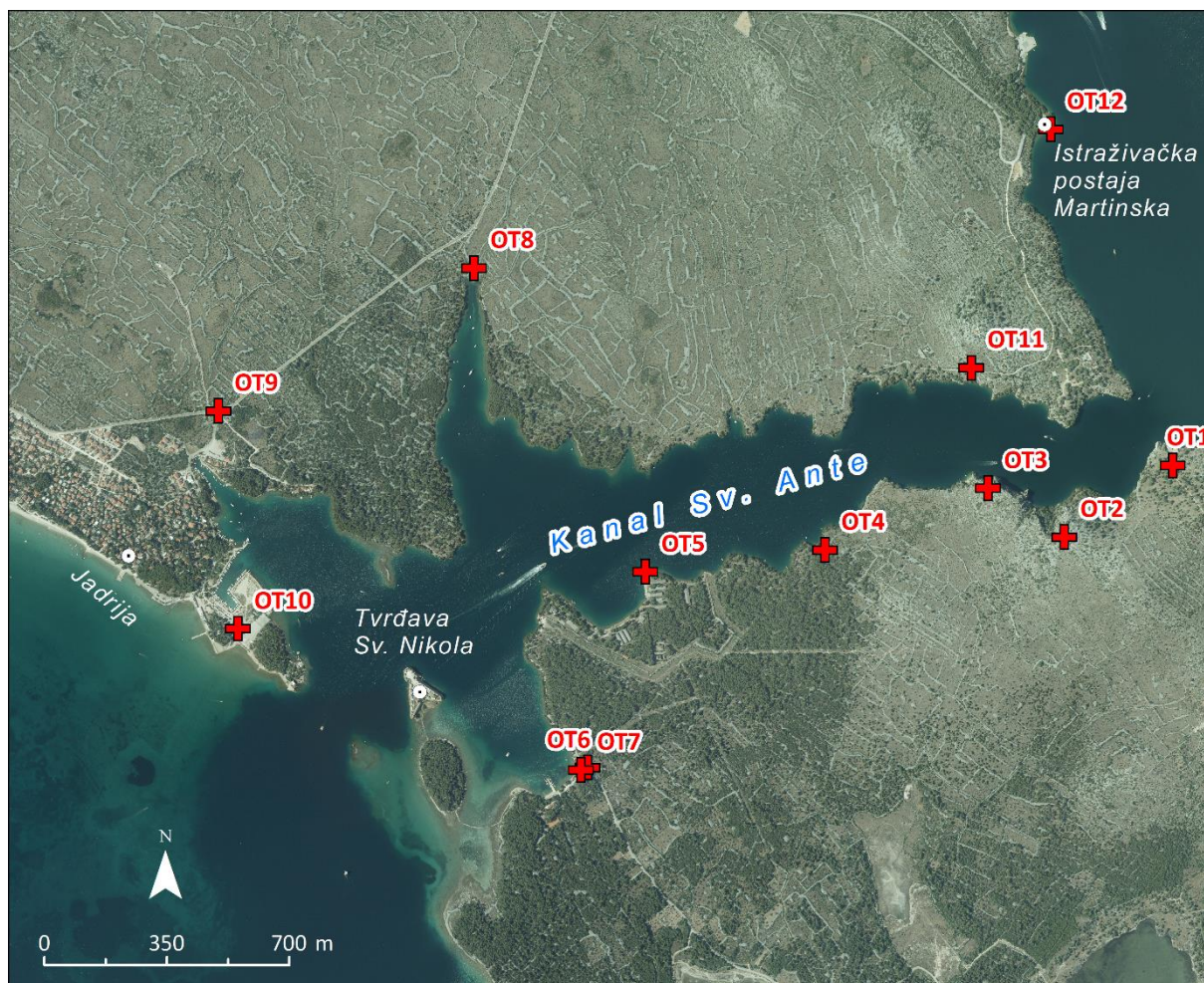


Slika II-8. Orijentacijska točka označena na terenu



Slika II-9. Prikupljanje orijentacijske točke na terenu pomoću Stonex S10 GNSS

Koordinate OT su prikupljene sa Stonex S10 RTK GPS-om, pri čemu su ukupno prikupljene precizne XYZ koordinate na 12 različitim lokacija, raspodijeljenih unutar šireg područja kanala Sv. Ante (Slika II-10).



Slika IV-10. Distribucija prikupljenih orijentacijskih točaka

Na slikama II-11-12 pokazane su lokacije i pogreške orijentacijskih točaka unutar radnih paketa *chunka 2* i *chunka 3*.



Slika II-11. Lokacije i pogreške orijentacijskih točaka unutar *chunka 1*.



Slika II-12. Lokacije i pogreške orijentacijskih točaka unutar chunka 2

Pogreška u OT korištenim za apsolutnu orijentaciju izrađenih modela šireg područja dana je u tablici II-1. Generalno ove pogreške imaju jako malenu vrijednost jer OT služe isključivo za orijentaciju, a ne provjeru modela. Ukupna pogreška u jedanaest OT iznosi tek 0,823 mm. Ako se u obzir uzme prostorna rezolucija aerofotogrametrijskih snimaka te svrha modela, takva točnost izrađenih modela zadovoljava potrebe analiza za koje će se izrađeni modeli koristiti. Reprojekcijska pogreška iznosi 0,084 pix.

Tablica II-1. Pogreška u orijentacijskim točkama korištenim za izradu modela šireg područja

	X error	Y error	Z error	Total error	Image (pix)
OT1	-0.230	0.892	-0.147	0.933	0.083
OT2	-0.856	-1.681	0.287	1.908	0.125
OT3	1.051	0.762	-0.154	1.307	0.092
OT4	0.058	-0.090	-0.007	0.108	0.045
OT5	-0.134	0.065	-0.031	0.153	0.014
OT6	0.091	0.022	-0.012	0.094	0.108
OT8	-0.187	0.075	-0.051	0.208	0.106
OT9	-0.042	0.169	0.037	0.178	0.098
OT10	0.220	-0.211	0.002	0.305	0.082
OT11	-0.202	-0.045	0.483	0.526	0.060
OT12	-0.434	0.158	0.731	0.865	0.032
RMSE	0.451	0.627	0.286	0.823	0.084

U tablici II-2 dan je pregled svih korisničko-definiranih parametara izvedenih u unutar procesa obrade zračnih snimaka.

Tablica II-2. Korisničko-definirani parametri izvedeni unutar procesa obrade zračnih snimaka

#	Korak	Korisničko-definirani parametar	Odabrana opcija
1	Orijentacija snimaka	Accuracy	High
		Pair selection	Reference
		Key point limit	40000
		Tie point limit	10000
2	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	Reprojection Error	Uklanjanje 10 % točaka
		Reconstruction Uncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projection accuracy	Uklanjanje 10 % točaka
3	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
4	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	High
		Depth filtering	Agressive
5	Generiranje 3D mreže poligona	Surface type	Height field
		Face count	High
		Interpolation	Enabled
6	Dodavanje OT	Orijentacijske točke dodane (OT)	
7	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
8	Filtriranje rijetkog oblaka točaka	Reprojection Error	Uklanjanje 10 % točaka
		Reconstruction Uncertainty	Uklanjanje 10 % točaka
		Projection accuracy	Uklanjanje 10 % točaka
9	Optimizacija oblaka točaka	Optimization parameters	Svi parametri
10	Izrada gustog oblaka točaka	Quality	High
		Depth filtering	Agressive
11	Generiranje 3D mreže poligona	Surface type	Height field
		Face count	10000000
		Interpolation	Enabled
12	Izrada tekture modela	Mapping mode	Generic
		Blending mode	Mosaic
		Texture size	8096
		Color correction	Enabled
13	Izrada DMP-a	Coordinate system	HTRS96
		Source data	Dense cloud
		Interpolation	Enabled
		Point classes	All
14	Izrada ortofoto snimka	Surface mode	DEM
		Blending mode	Mosaic

Izrada gustog oblaka točkaka (3) – nakon dodavanja OT i optimizacije modela slijedi izrada gustog oblaka točkaka (*build dense cloud*). Unutar ove faze program automatski iz ranije orijentiranih snimaka izračunava dubinske informacije za svaki orijentirani snimak te izrađuje jedinstveni oblak točkaka, čija gustoća ovisi o korisničko definiranoj varijabli *quality* i zadanom načinu dubinskog filtriranja (engl. *depth filtering*) (Agisoft, 2020.).

Varijabla *quality* određuje udio piksela orijentiranih snimaka koji će biti korišten za izradu gustog oblaka točkaka, pri čemu opcija *ultra high* za svaki piksel orijentiranih snimaka izrađuje jednu točku, dok kod ostalih opcija broj piksela za koje se izrađuju točke postupno opada. Kao i kod *orijentacije snimaka*, radi izrade modela maksimalne točnosti poželjno je odabrati što veću razinu varijable *quality*, što opet ovisi o raspoloživom vremenu procesiranja te tehničkim specifikacijama radne stanice na kojoj se vrši procesiranje podataka.

Prilikom izrade modela u Agisoft Metashape softveru korištena je *high* opcija varijable *quality* te *agressive* način dubinskog filtriranja. Velika količina fotografija te ograničenja radne stanice uvjetovala su obradu, odnosno izvođenje gustog oblaka točkaka u izdvojenim posebnim chunkovima. Izdvojeno je nekoliko chunkova te je unutar svakog izveden gusti oblak točkaka pod parametrom *high*. U svakom chunku je ukupno generirano oko 500 000 milijuna točkaka. Dakle, ukupno je širi prostor kanala Sv. Ante reprezentiran s preko 1 mlrd. točkaka. Na slici II-13 prikazani su isječci gustog oblaka točkaka.



Slika II-13. Isječci gustog oblaka točaka unutar kanala Sv. Ante

*Izrada digitalnog ortofoto snimka (5) – posljednja faza procesa izrade DMP-a iz aerofotogrametrijskih snimaka u Agisoft Metashape softveru obuhvaća izradu digitalnog ortofoto snimka (engl. *build orthomosaic*) (Agisoft, 2020.).*

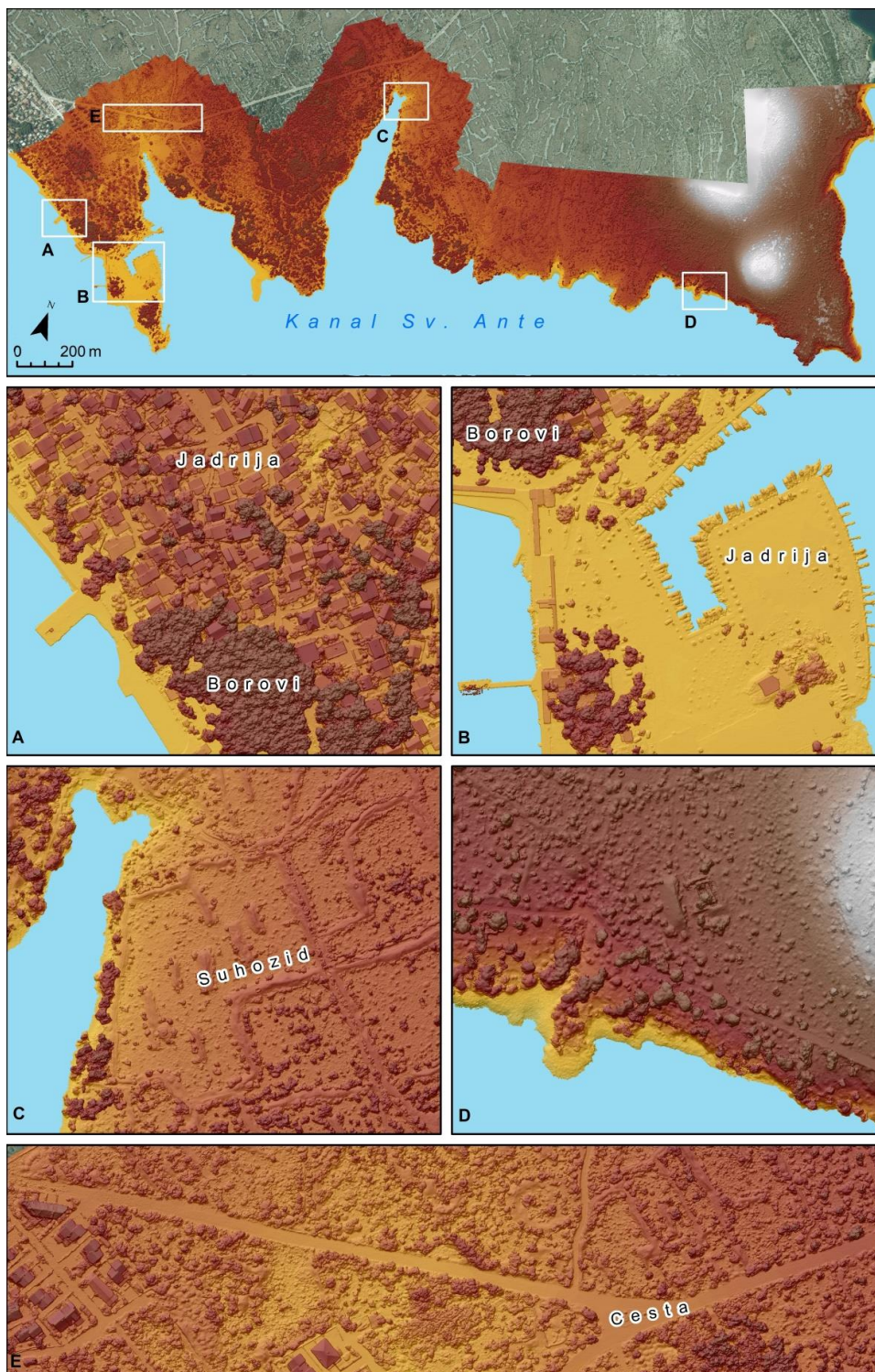
U ovom koraku softver na temelju ranijeg generiranog digitalnog modela površina iz orijentiranih aerofotogrametrijskih snimaka generira ortofoto snimak. Na temelju izrađenog DMP-a i oblaka točaka napravljen je digitalni ortofoto snimak prostorne rezolucije 5 cm, koji sadrži tri vidljiva kanala (RGB) (Slika II-14). Odabrana je HTRS96 projekcija.



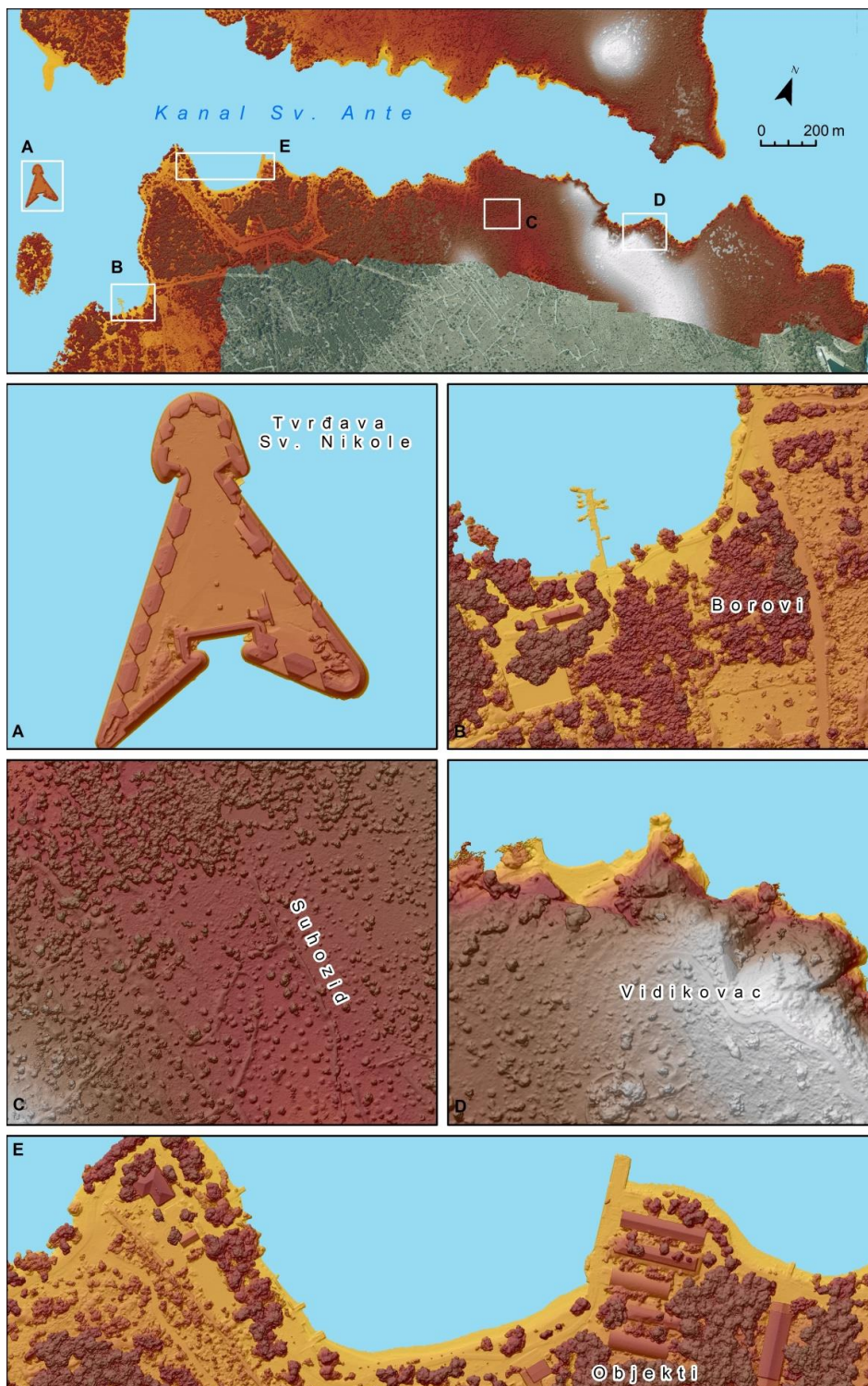
Slika II-14. DOF šireg područja kanala Sv. Ante s primjerima u krupnijem mjerilu

b) Izrada digitalnog modela površina (DSM) do 5 cm

Izrada digitalnog modela površina (4) – nakon izrade gustog oblaka točaka, slijedila je izrada digitalnog modela površina (DMS). U ovoj fazi *Agisoft Metashape* softver na temelju interpolacije 1,5 mlrd. točaka unutar gustog oblaka točaka generira DMP prostorne rezolucije 5 cm. Gustoća prikupljanja podataka je iznosila 270 točaka/m². Prilikom izrade DMP-a definirana je projekcija izrađenog modela, za koju je sukladno području istraživanja odabrana HTRS96 projekcija.



Slika II-15. (DSM) šireg područja kanala Sv. Ante (5 cm) - desna obala



Slika II-16. DSM šireg područja kanala Sv. Ante (5 cm) - isječak lijeve obale

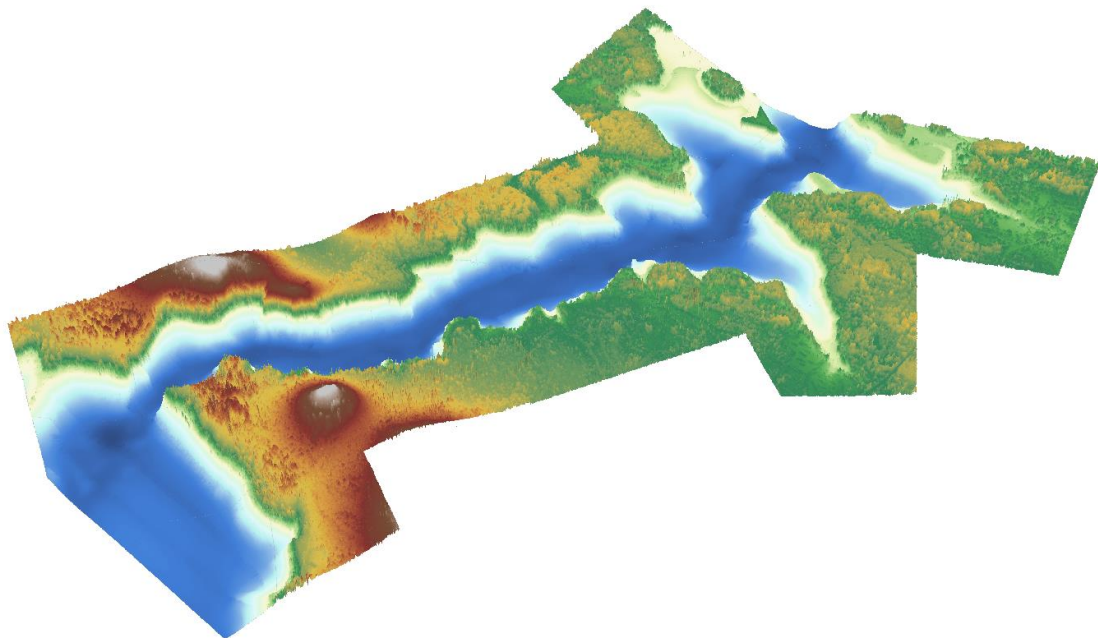
c) Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela) s ciljem generiranja predikcijskih modela kolebanja vodostaja u kanalu Sv. Ante

Uvod

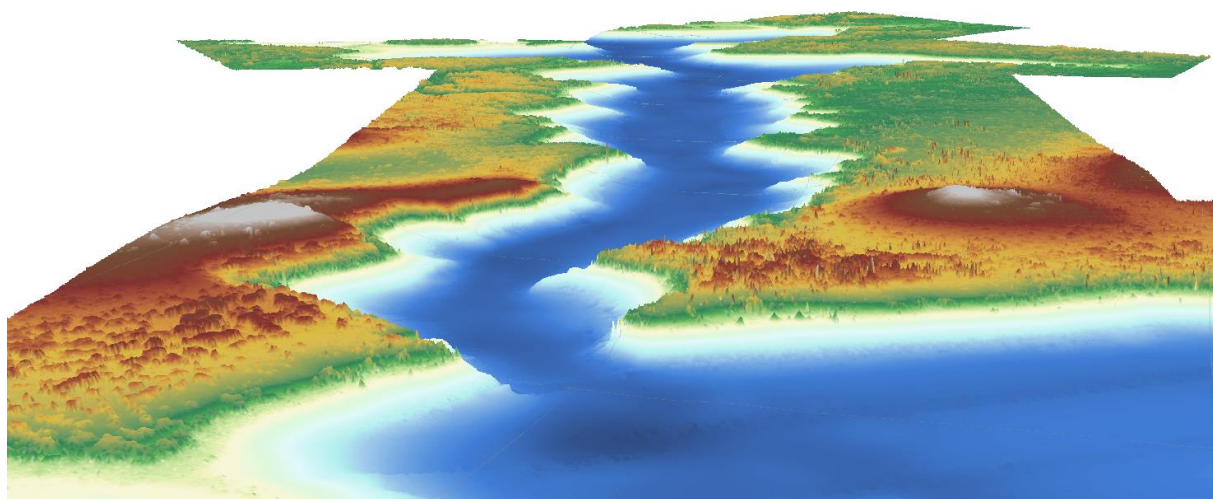
U svrhu poboljšanja kvalitete modela, s ciljem analize, vizualizacije i interpretacije, izrađuju se integralni modeli. To su modeli izrađeni od podataka prikupljenih različitim metodama i tehnikama (Fabris i dr., 2010; Abdalla, 2016). Detaljan opis korištenih metoda, tehnika i procedura je detaljno pojašnjen u poglavlju I. Batimetrijska i geodetska izmjera uvala integralnim mjernim sustavom (multibeam), i u poglavlju II. Aerofotogrametrijsko snimanje kanala Sv. Ante.

Izrada integralnog modela (digitalni model dubina plus digitalni model površina priobalnog dijela)

Generiran je model dna kojem maksimalna dubina iznosi -49,49 m. Spajanje modela dna s aerofotogrametrijskim snimkama rezultiralo je prvim integralnim modelom. Glavni cilj je generiranje predikcijskih modela kolebanja vodostaja (morske razine) u uvalama i izračuna potencijalnih negativnih utjecaja na okoliš. Perspektivni blokovski prikazi klasificirani su *Stretch* metodom klasifikacije koja je idealna za prikaz kontinuiranih vrijednosti piksela koji imaju veliki raspon vrijednosti.



Slika II-17. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela kanala Sv. Ante



Slika II-18. Perspektivni blokovski prikaz integralnog modela kanala Sv. Ante

d) Izrada digitalnog modela reljefa

Za razliku od digitalnog modela reljefa (DMR), koji reprezentira visinu površine reljefa, izrađeni DMP reprezentira visinu svih prirodnih (npr. vegetacija) i antropogenih (npr. stambeni objekti, prometnice, industrijska postrojenja, itd.) površina, koje se nalaze na površini reljefa (Šiljeg, 2013). Za različite hidrološke i morfometrijske analize, koje će se provoditi u sklopu modeliranja erozije tla i poplavnog potencijala unutar šireg prostora, bitne su isključivo značajke površine reljefa. Zbog toga zadnji korak izrade konačnog modela šireg prostora obuhvaća generiranje digitalnog modela reljefa (DMR) šireg prostora, kroz korekciju i filtraciju izrađenog DMP-a.

Proces filtriranja DMP-a i izrade DMR-a može se podijeliti na *automatsku korekciju DMP-a u DMR* (1), *korekciju pogrešaka na vodenim površinama* (2) i *ručno filtriranje preostalih pogrešaka* (3). Automatska i ručna filtracija DMP-a i izrada DMR-a izvršeni su uz pomoć Geomatica 2018 softvera, dok je korekcija pogrešaka na vodenim površinama izvršena u ArcGIS 10.1 softveru.

Automatska konverzija DMP-a u DMR (1)

Prvi korak izrade DMR-a je automatska korekcija DMP-a u DMR, kojom se iz zadanog DMP-a automatski uklanja većina površina koje ne reprezentiraju površinu reljefa. Automatska korekcija DMP-a u DMR je unutar Geomatica 2018 softvera izvršena uz pomoć *DSM2DTM* algoritma, koji omogućava automatsku filtraciju DMP-a prema zadanim korisničko-definiranim parametrima. *DSM2DTM* algoritam automatski konvertira DMP u DMR primjenom niza filtracijskih koraka koji postupno uklanjaju antropogene i prirodne elemente te uglašavaju konačni model uklanjanjem preostalih nepravilnosti, poput udubljenja i ispupčenja, koje ne reprezentiraju površinu reljefa. Korisnik može kontrolirati proces konvertiranja DMP-a u DMR kroz definiranje različitih korisničko-definiranih parametara za svaki filter (npr. size – veličina, gradient – nagib, itd.). S obzirom da korisničko-definirani parametri *DSM2DTM* algoritma uvjetuju uspješnost automatske filtracije, potrebno ih je prilagoditi lokalnim značajkama reljefa odabranog područja. Detaljan prikaz odabranih korisničko-definiranih parametara dan je u tablici 6., dok je svaki pojedini parametar detaljnije pojašnjen u nastavku.

Tablica II-3. Parametri automatske filtracije DMP-a uz pomoć DSM2DTM algoritma

Parametar	Zadana vrijednost	Opis
Elevation failure value	0	Definira piksele u DMP-u koji će se zanemariti tijekom obrade i biti interpolirani.
Background elevation value	0	Definira vrijednost piksela bez podataka (No Data), koji će biti izuzeti tijekom obrade i kopirani u završni DMR.
Object removal dimension units	Geocoded	Definira mjernu jedinicu za parametar object size (m ili pix).
Object size	25	Veličina filtera koji se koristi za uklanjanje površina.
Gradient treshold	55	Značajke s nagibima manjim od ovog praga smatrat će se prirodnim značajkama i neće se uklanjati tijekom obrade.
Terrain type	Hilly	Određuje prevladavajući tip reljefa reprezentiranog na zadanom modelu.
Bump filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje filtere za uklanjanje izbočina preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih velikih značajki.
Pits filter: <i>size, gradient</i>	8, 6; 6, 4	Određuje filtere za uklanjanje udubljenja preostalih nakon uklanjanja zgrada i drugih velikih značajki.
Median filter: <i>size (pixels)</i>	3	Definira intenzitet uglačavanja konačnog modela.
Clamp filter: <i>size, gradient</i>	5, 3	Fino uglačavanje - korigira sve piksele unutar zadanog područja do vrijednosti manje od prostorne rezolucije modela.

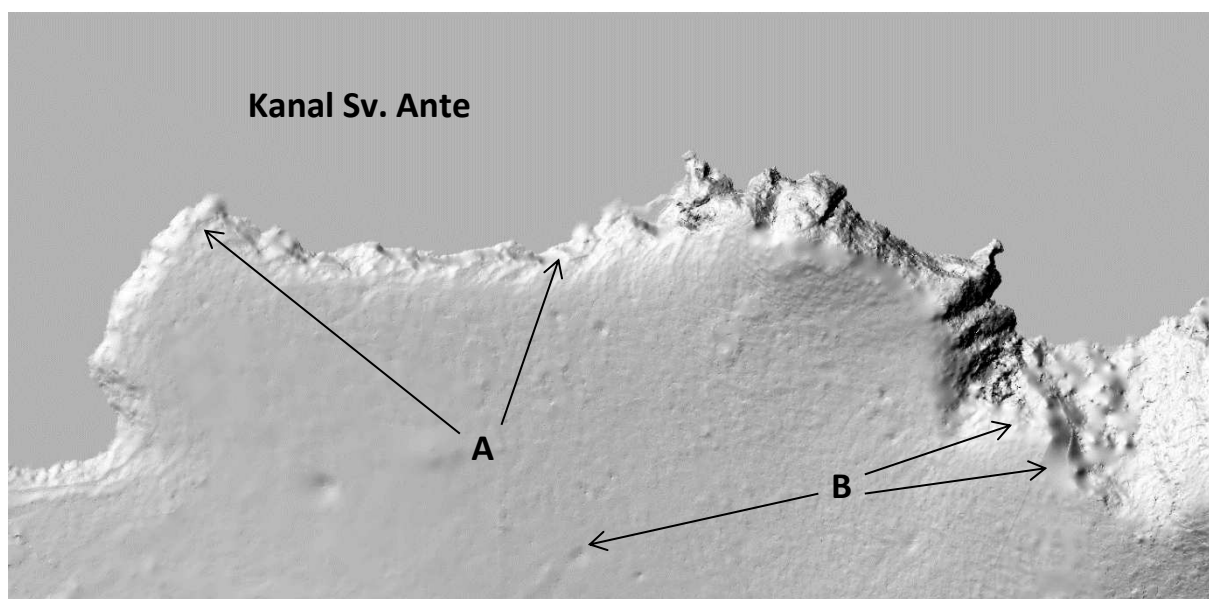
Iako širi prostor pretežito karakteriziraju blage uzvisine i padine, pojedine dijelove, karakterizira znatno veća vertikalna raščlanjenost terena.

Zbog toga je bilo potrebno korisničko-definirane parametre korekcije DMP-a u DMR podesiti na način da uklone sve neželjene površine, a da pri tome ne devalviraju kvalitetu modela na vertikalno raščlanjenijim dijelovima reljefa.

Dva najvažnija korisničko-definirana parametra DSM2DTM algoritma su *veličina objekta (object size)* i *prag nagiba (gradient treshold)*. Veličina objekta definira dimenzije površina koje će biti uklonjene iz zadanog DMP-a, gdje se preporučuje da zadana vrijednost odgovara dimenzijama najvećih objekata (npr. zgrade, industrijska postrojenja), koje se želi ukloniti. Međutim, tako definirani parametar veličine objekta može utjecati na previše intenzivno filtriranje stvarne površine reljefa. U takvim slučajevima treba smanjiti vrijednost ovog parametra i prilagoditi ju prevladavajućoj veličini objekata koje se želi ukloniti. S obzirom da je konfiguracija reljefa unutar šireg prostora kanala Svetog Ante vrlo heterogena, nije bilo moguće podesiti parametar veličine objekta na jedinstvenu vrijednost koja bi automatski uklonila sve objekte. Također, ukoliko se podesi velika vrijednost parametra veličine objekta, DSM2DTM algoritam će ukloniti sve antropogene objekte, ali će i znatno devalvirati kvalitetu reljefnih formi u modelu. Posebice je takav slučaj primijećen na prostoru raščlanjenijih viših dijelova reljefa. Drugi

parametar je prag nagiba, koji definira vrijednost nagiba ispod koje se sve padine smatraju prirodnima, te se kao takve izostavljaju iz procesa korekcije i filtracije. Kako bi se uklonili antropogeni objekti sa strmim, vertikalnim bočnim stranama, poput stambenih i industrijskih objekata, a sačuvala većina prirodnih padina, zadan je odgovarajući prag nagiba ($n = 55$).

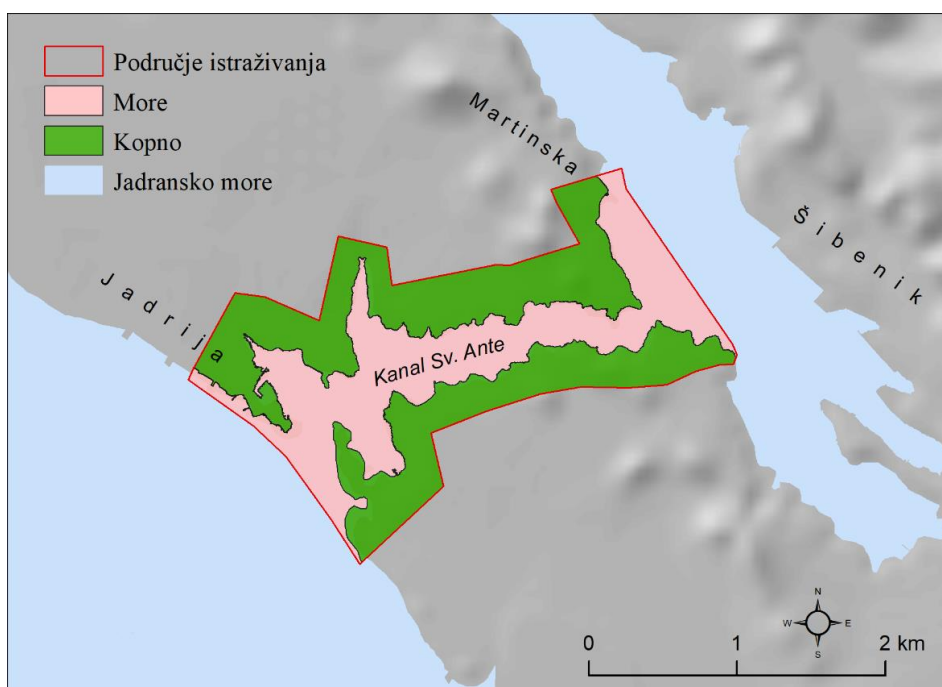
Na širem prostoru kanala Svetog Ante zastupljeni su različiti tipovi reljefa, od zaravnjenih priobalnih dijelova uz ulaz u kanal, sve do strmih, gotovo vertikalnih litica vezanih za padine vrha Glavica i vrha Oštra glava. Zbog toga je zadan *hilly* prevladavajući tip reljefa, koji predstavlja prijelaz između zaravnjenog u planinski tip reljefa i koji najviše odgovara značajkama reljefa istraživanog područja. Filterima za uklanjanje preostalih nepravilnosti (*bump filter* i *pits filter*) i filteri za završno ugačavanje modela (*median filter* i *clamp filter*) zadane su odgovarajuće vrijednosti za iterativno uklanjanje nepravilnosti, od većih prema manjima. U konačnici je izrađen digitalni model reljefa, kojega je bilo potrebno dodatno popraviti kroz ručnu filtraciju (Slika II-19.). Najviše pogrešaka prisutno je na vodenim površinama, odnosno prostoru mora, te na mjestima uklonjenih većih objekata. Navedene pogreške uklonjene su u sljedeća dva koraka.



Slika II-19. DMR izrađen DSM2DTM algoritmom (A - pogreške u priobalnom dijelu; B - pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije)

Filtracija pogrešaka na vodenim površinama (2)

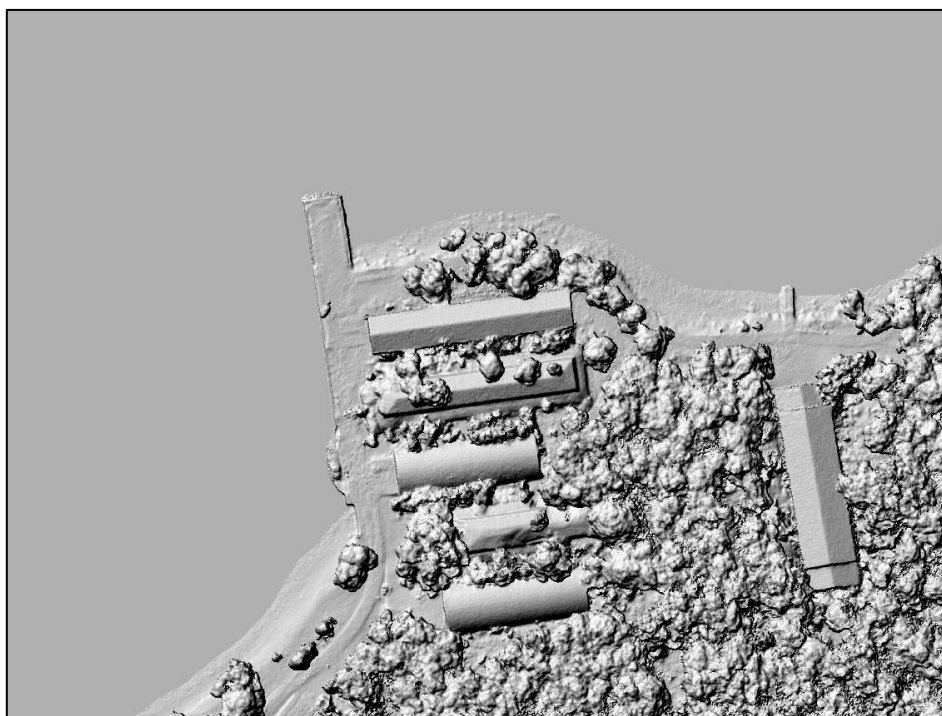
Nakon automatske konverzije DMP-a u DMR bilo je potrebno ručnom filtracijom ukloniti sve preostale pogreške, koje su proizašle iz procesa automatske filtracije. Pogreške u izrađenom modelu prvenstveno su se javljale na prostorima prekrivenim vodenim površinama (npr. more), gdje zbog jednoličnosti površine softver nije mogao provesti korelaciju i povezivanje piksela aerofotogrametrijskih snimaka. Pojava artefakata i pogrešaka nad vodenim površinama karakteristična je za izradu DMP-a i DMR-a iz aerofotogrametrijskih snimaka, zbog čega je filtriranje vodenih površina dio standardnog procesa post-obrade modela (Poli & Caravaggi, 2012.). Da bi se napravilo uklanjanje pogrešaka u modelu nad prostorima prekrivenim vodenim površinama (Slika II-21.), bilo je potrebno napraviti Boolean rasterski prikaz svih vodenih površina unutar područja istraživanja (Slika II-20.). S obzirom da detaljnost dostupnih podataka o vodenim površinama (npr. OpenStreetMap, DGU, itd.) nije bila dovoljna za filtriranje izrađenog DMP-a visoke rezolucije, sve vodene površine su izdvojene iz izrađenog MS WV-3 satelitskog snimka korištenjem nenadzirane klasifikacije. Kroz nenadziranu klasifikaciju izdvojene su sve klase koje predstavljaju vodene površine, kojima je zatim kroz reklasifikaciju dodijeljena vrijednost 0 (Slika II-20.). Svim ostalim klasama, koje predstavljaju kopneni dio područja istraživanja dodijeljena je vrijednost 1. Spajanjem izrađenog Boolean prikaza vodenih površina s generiranim DMR-om napravljen je model s uklonjenim artefaktima i pogreškama na područjima prekrivenim vodenim površinama (Slika II-22.).



Slika II-20. Izrađeni boolean prikaz mora i kopna (1 = kopno; 0 = more)



Slika II-21. Artefakti u izrađenom modelu na vodenim površinama



Slika II-22. Ispravljene pogreške u izrađenom modelu na vodenim površinama

Ručna filtracija preostalih pogrešaka (3)

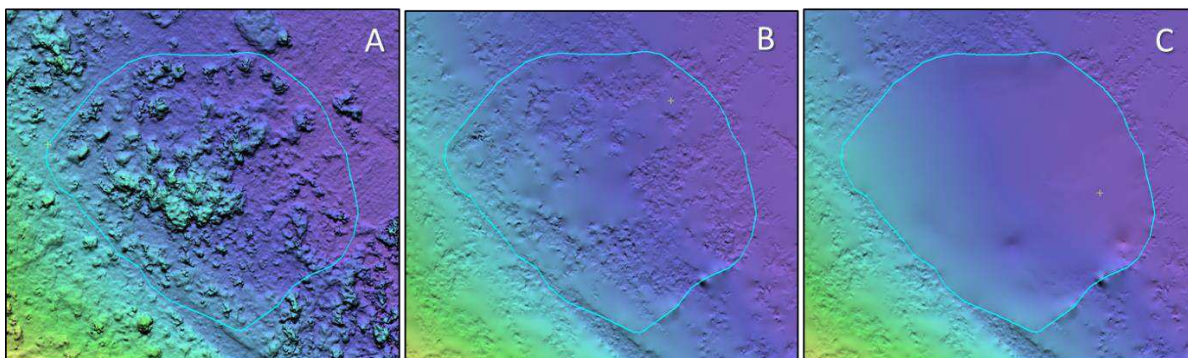
Usljedilo je ručno uklanjanje pogrešaka preostalih nakon automatske korekcije DMP-a u DMR. Za razliku od artefakata na vodenim površinama, koji obuhvaćaju kontinuirane dijelove modela, pogreške preostale nakon uklanjanja vegetacije i antropogenih objekata predstavljaju pojedinačne, prostorno heterogene pogreške, koje nije moguće automatski ukloniti. Zbog toga je primijenjeno ručno uklanjanje pogrešaka uz pomoć filtera za korekciju DMR-a iz *DEM Editing* ekstenzije Geomatica 2018 softvera (Tablica II-4.).

Tablica II-4. Filteri korišteni za ručnu korekciju izrađenog DMR-a

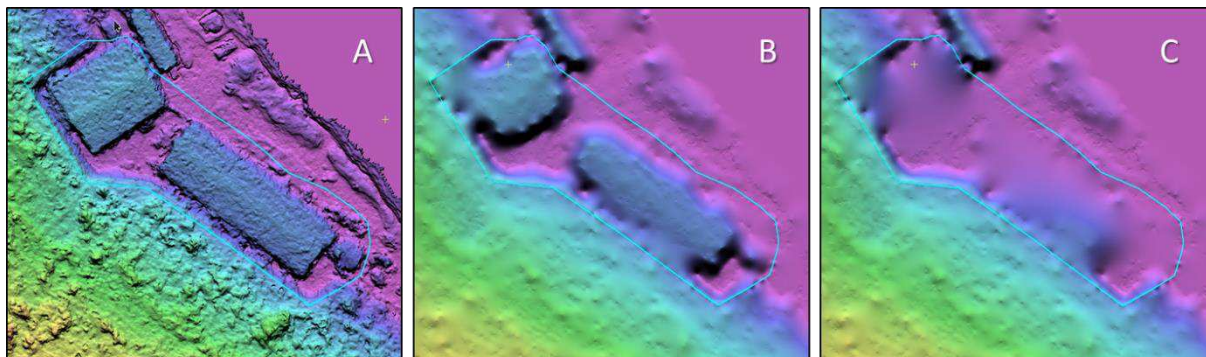
#	Filter	Primjena filtera
1	<i>Remove bumps</i>	Uklanjanje izbočina preostalih nakon korekcije DMP-a
2	<i>Remove bumps (keep linear)</i>	Uklanjanje nelinearnih izbočina
3	<i>Remove pits</i>	Uklanjanje udubljenja (rupa)
4	<i>Terrain (flat)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na zaravnjenim područjima
5	<i>Terrain (hilly)</i>	Filter za uklanjanje vegetacije i antropogenih objekata na brežuljkastim područjima
6	<i>Average filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema prosječnoj vrijednosti unutar zadanog poligona
7	<i>Median filter</i>	Zaravnjavanje reljefa prema srednjoj vrijednosti unutar zadanog poligona
8	<i>Fill from edges</i>	Zapunjavanje reljefa prema rubovima definiranog poligona
9	<i>Average elevation</i>	Poravnjanje reljefa na prosječnu visinu
10	<i>Constant elevation</i>	Poravnjanje reljefa na zadanu visinu
11	<i>Clamp filter</i>	Zaglađivanje manjih neravnina

Pogreške u izrađenom DMR-u uglavnom su činili različiti artefakti preostali nakon uklanjanja gušće vegetacije (Slika II-23.), ili pak većih antropogenih objekata (Slika II-24.).

Primjenom različitih navedenih filtera uspješno su uklonjeni svi preostali artefakti, pri čemu je izrađen konačni DMR šireg prostora.



Slika II-23. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja vegetacije iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)



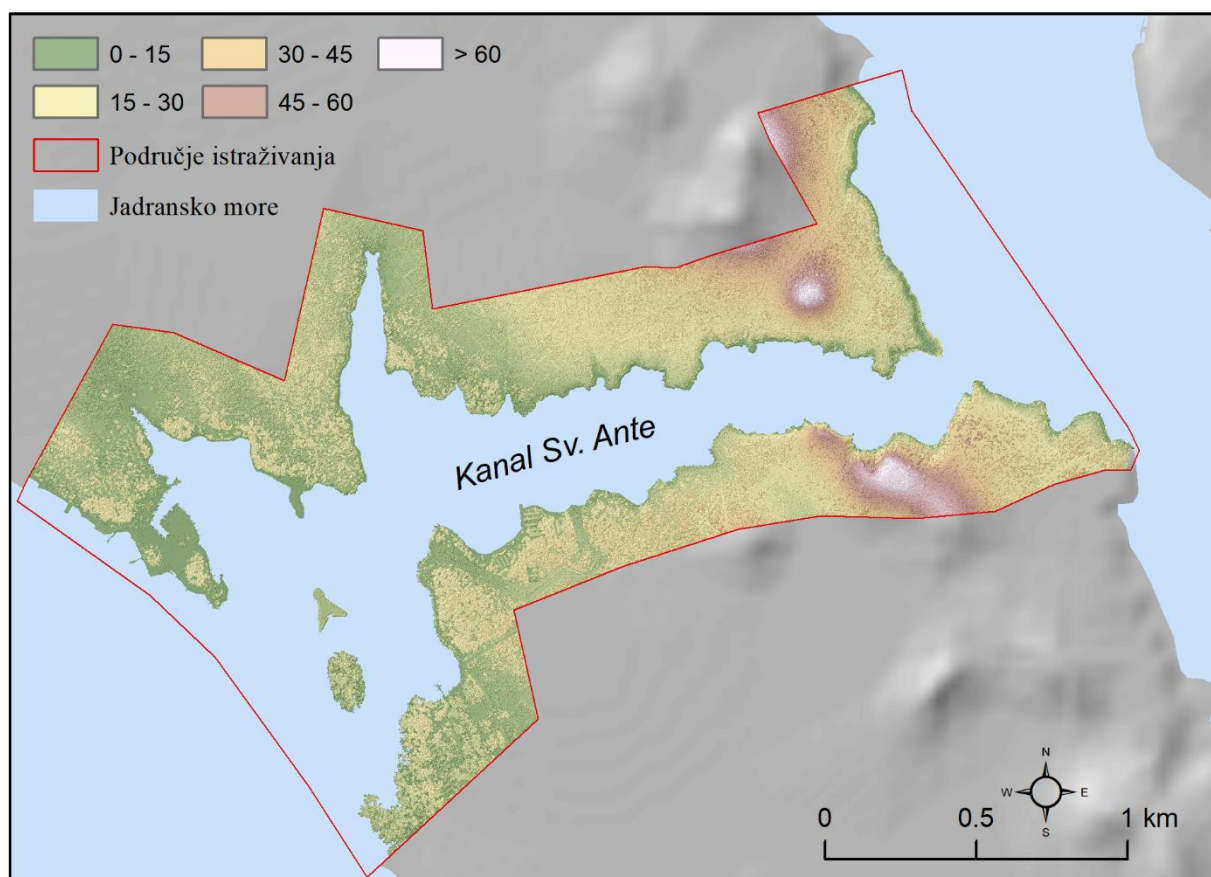
Slika II-24. Ručna filtracija pogrešaka preostalih nakon uklanjanja antropogenih objekata iz generiranog DMR-a (A – izvorni DMP; B – automatska korekcija; C – ručna filtracija)

Konačni modeli šireg prostora kanala Svetog Ante

U konačnici su modeliranjem kupljenih WV-3 multispektralnih stereo (OR2A) satelitskih snimaka izrađeni sljedeći modeli šireg prostora:

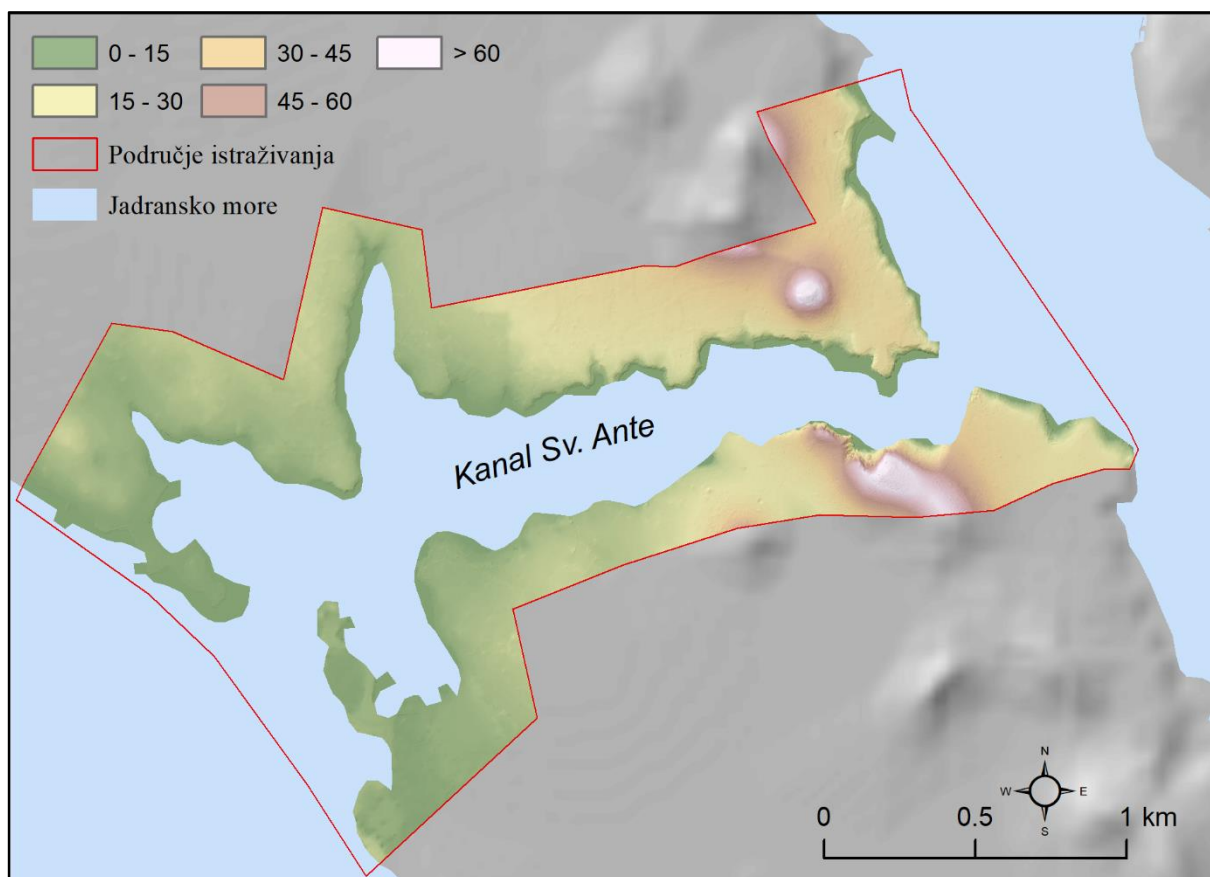
- I. Digitalni model površina (DMP)
- II. Digitalni model reljefa (DMR)
- III. Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

Digitalni model površina (DMP) šireg prostora reprezentira reljef i sve prirodne i antropogene površine koje se nalaze na njemu (Slika II-25.). S obzirom da izrađeni DMP osim reljefa reprezentira i vegetaciju i antropogene objekte, zbog čega se ovaj model može primijeniti za proučavanje morfometrijskih značajki reprezentirane vegetacije i antropogenih objekata.



Slika II-25. Izrađeni digitalni model površina šireg prostora kanala Svetog Ante

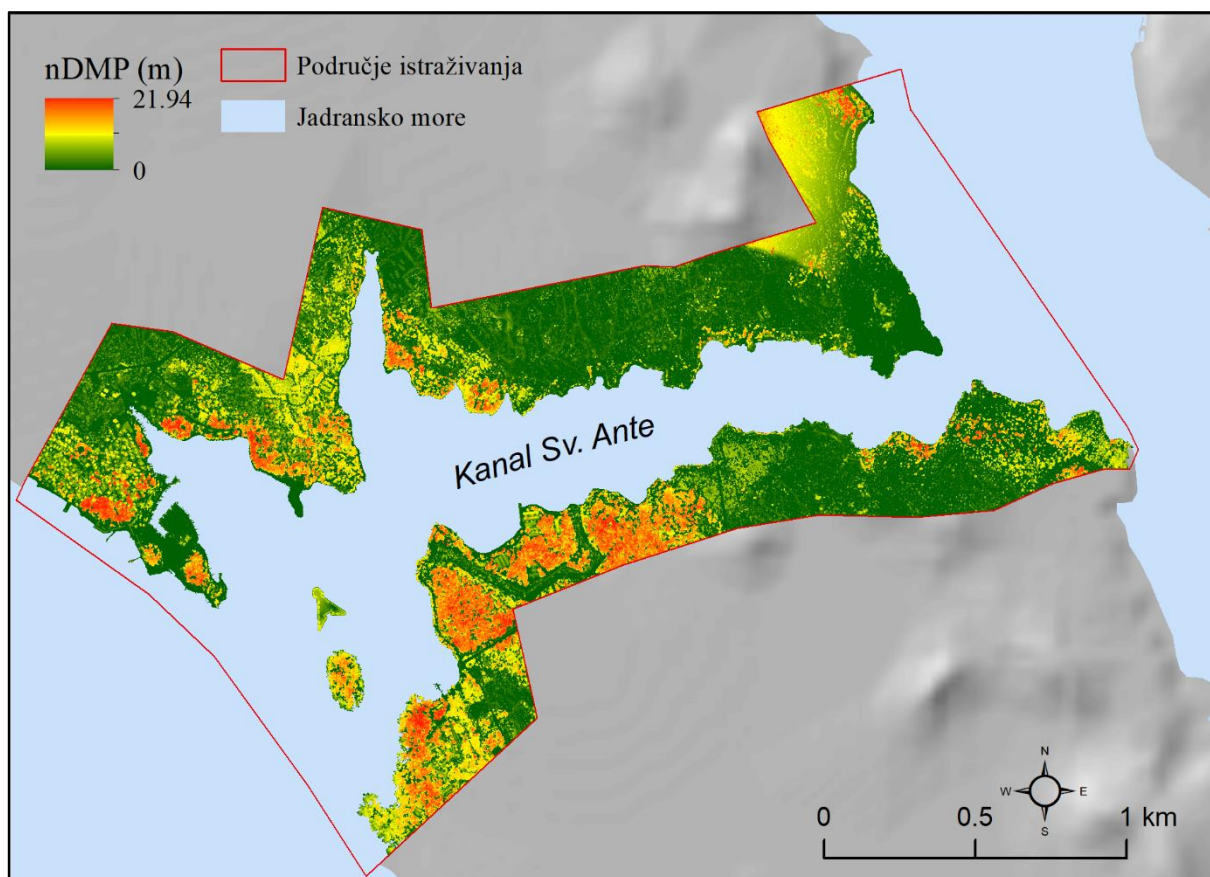
Digitalni model reljefa (DMR) šireg prostora reprezentira golu površinu reljefa bez antropogenih i prirodnih elemenata (Slika II-26.). Zahvaljujući tome ovaj model omogućava neometano proučavanje različitih značajki reljefa. Kao takav koristiti će se za morfometrijske ((npr. nagib, zakrivljenost i orijentacija padina, vertikalana raščlanjenost, itd.) i hidrološke analize (npr. model otjecanja, model akumulacije, kartiranje povremenih tokova, itd.) na temelju kojih će se izvršiti višekriterijsko GIS modeliranje podložnosti eroziji tla, ali i modeliranje poplavnog potencijala.



Slika II-26. Digitalni model reljefa šireg prostora kanala Svetog Ante

Normalizirani digitalni model površina (nDMP)

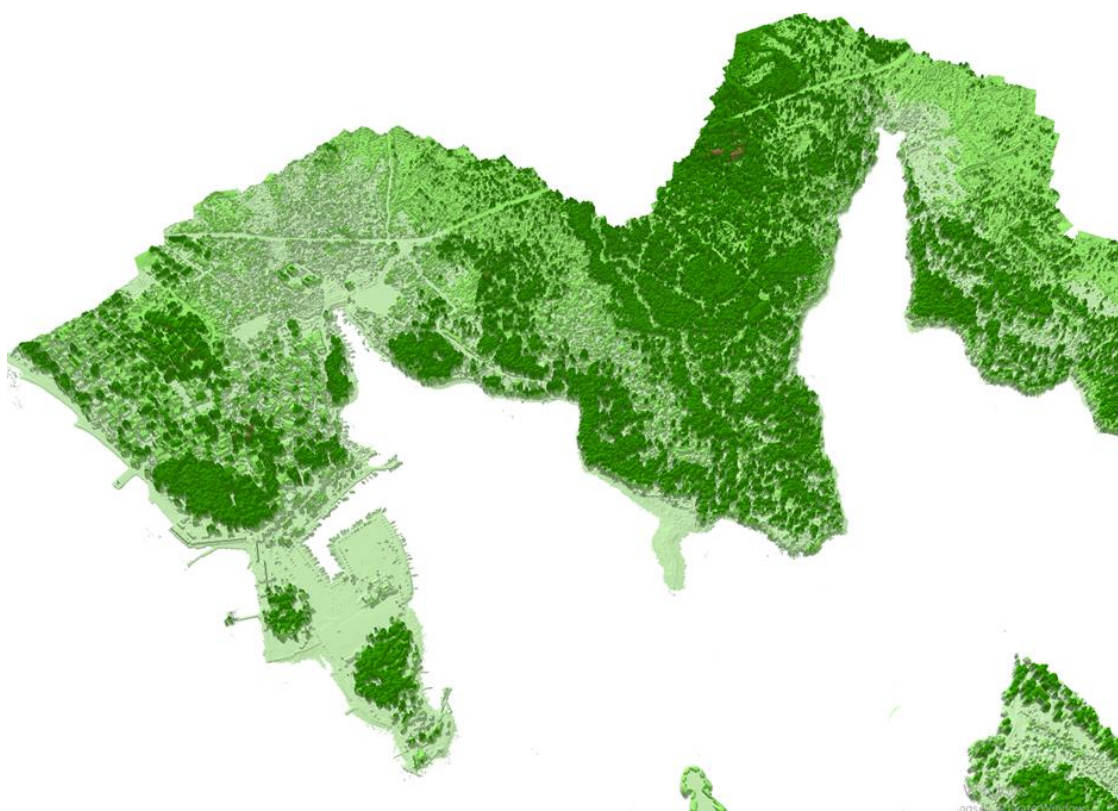
Normalizirani digitalni model površina predstavlja rasterski prikaz visina svih nadzemnih antropogenih i prirodnih objekata u prostoru. Ovaj model nastaje oduzimanjem gole površine reljefa (DMR) od površine svih nadzemnih objekata (DMP). Kao takav ovaj model se može koristiti za klasifikaciju vegetacije ili antropogenih objekata prema njihovoj visini, što dodatno unaprjeđuje klasifikacijske mogućnosti. Primjerice ovaj model omogućava detekciju stambenih objekata koji nadilaze zakonski propisanu visinu.



Slika II-27. Normalizirani digitalni model površina šireg prostora kanala Svetog Ante

e) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

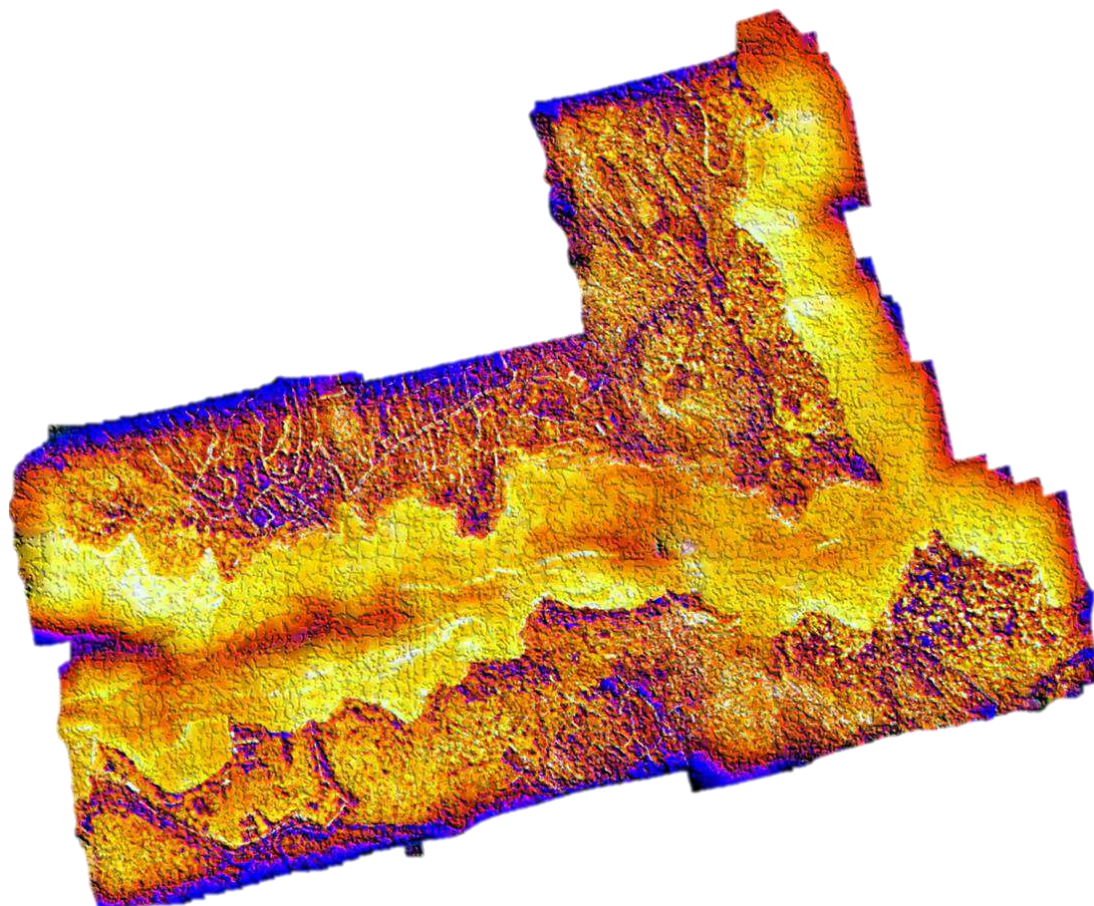
Izvedeni visokorezolucijski modeli (digitalni model površina - DMP, digitalni model reljefa - DMR te digitalnog ortofota - DOF) mogu poslužiti kao osnovni predložak u generiranju primarnih i sekundarnih kriterija koji mogu biti korišteni u analizama rizika (požar, erozija, podizanje razine mora).



Slika II-28. Isječak 3D modela šireg područja kanala Sv. Ante

Naime, na digitalnom modelu površina – DMP i 3D modelu (Slika II-28) mogu se izvršiti simulacije izdizanja razine mora, dok visokorezolucijski digitalni ortofoto - DOP može poslužiti kao predložak za detaljno kartiranje stambenih i drugih objekata te prometnica unutar šireg područja kanala Sv. Ante.

III.AERO SNIMANJE TERMALNOM KAMEROM



Aero snimanje termalnom kamerom

- a) Izrada termalnog modela prostorne rezolucije do 50 cm
- b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena
- c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

THERMAL IMAGING SURVEY OF THE ST. ANTHONY'S CHANNEL

Abstract

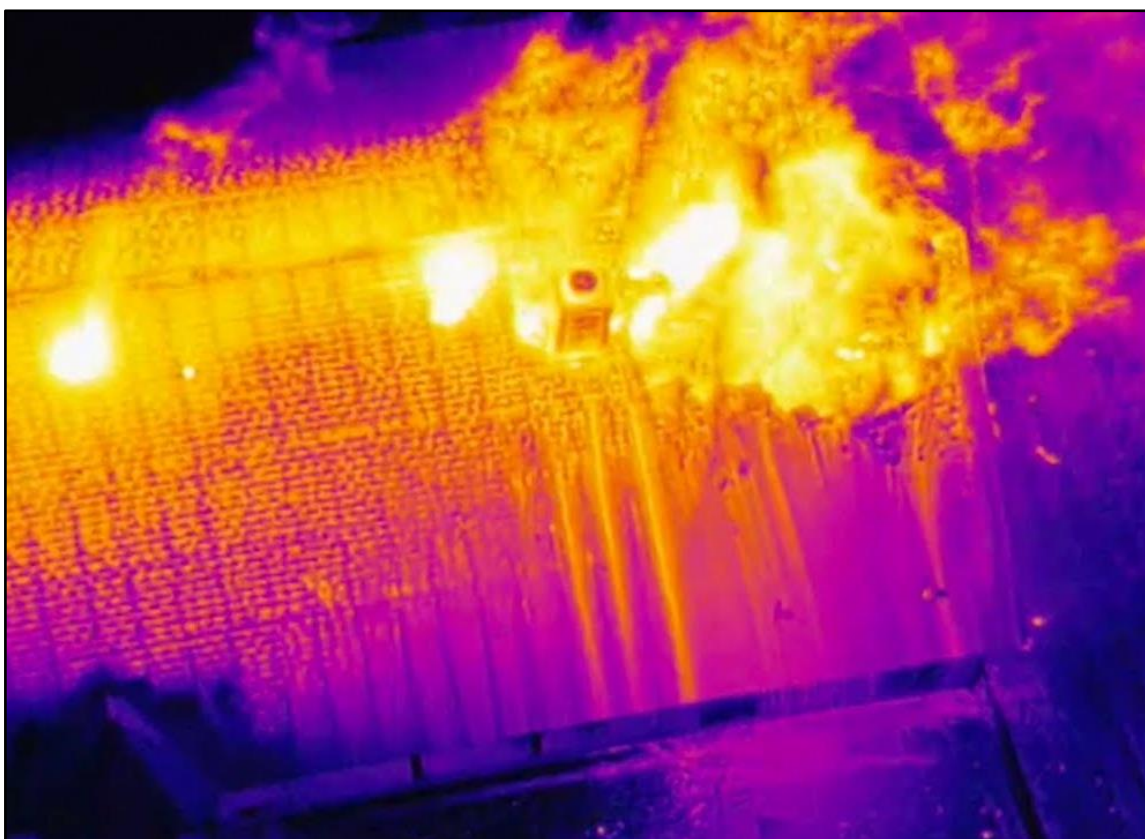
The report describes in detail the performance of interval aerial imaging with a thermal camera. The wider area of the St. Anthony's Channel was filmed with a DJI Zenmuse XT2 thermal imaging camera integrated into a DJI Matrix 210 RTK drone. The performed activities resulted in interval thermal models with a spatial resolution of up to 50 cm.

Sažetak

U izvješću je detaljno opisano izvođenje intervalnih zračnih snimanja termalnom kamerom. Širi prostor kanala Sv. Ante snimljen je termovizijskom kamerom DJI Zenmuse XT2 koja je integrirana na DJI Matrice 210 RTK bespilotnu letjelicu. Provedene aktivnosti su rezultirale intervalnim termalnim modelima prostorne rezolucije do 50 cm.

a) Izrada termalnog modela prostorne rezolucije do 50 cm

Termovizijsko snimanje predstavlja vrstu snimanja kod kojega se određeni prostor ili objekt snima termovizijskom kamerom, koja omogućava bilježenje snimaka s vrijednostima elektromagnetskog zračenja iz infracrvenog pojasa elektromagnetskog spektra (~700 – 1050 nm). Unazad nekoliko godina termovizijske kamere su uspješno integriraju s različitim bespilotnim letjelicama (Slika III-1), čime nastaju prvi bespilotni termovizijski sustavi. Razvojem bespilotnih termovizijskih sustava započinje njihova postupna šira primjena u različitim djelatnostima. Tako se danas termovizijska snimanja provode uz pomoć takvih sustava za: detekciju požara, nadzor granica i ljudi, potragu i spašavanje unesrećenih osoba, itd.



Slika III-1. Zračni termovizijski snimak požara

Osim praktične primjene, termovizijska snimanja imaju veliku primjenu i u znanstvenim istraživanjima, gdje zahvaljujući činjenici da bilježe infracrvena elektromagnetska zračenja omogućavaju znanstvenicima da detektiraju pojave i procese koji bi inače bili nevidljivi ljudskom oku.

Tako se termovizijska zračna snimanja koriste za: monitoring biljnih i životinjskih vrsta, praćenje vulkanske aktivnosti, praćenje širenja onečišćenja, proučavanje požara (Slika III-1), određivanje solarnog potencijala, itd. U sklopu ovog projekta termovizijska snimanja bitna su radi potencijalne detekcije izvora onečišćenja te analize moguće primjene u detekciji požara.

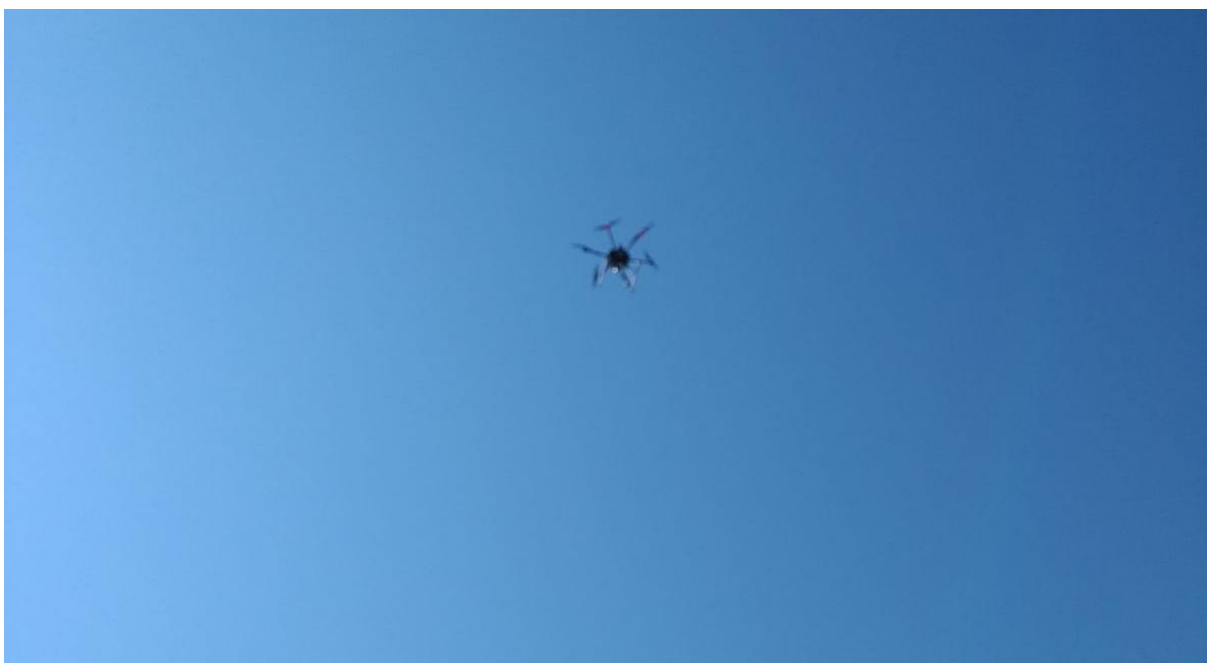
Onečišćivači poput ilegalnih kanalizacijskih ispusta, ilegalnih industrijskih ispusta te ostale slične „anomalije“ mogu biti precizno detektirane iz snimaka površinskog dijela mora, prema različitim termalnim infracrvenim potpisima morske vode i potencijalnih onečišćivača. Ukoliko postoje različiti izvori zagađenja, koji postupno prodiru u more, toplinski potpis takvih tvari se bitno razlikuje od njihove okoline i na temelju toga se može izdvojiti iz prikupljenih snimaka. Naime, zbog razlike u temperaturama dviju tekućina u termalnom infracrvenom spektru moguće je odrediti točnu lokaciju ispusta onečišćivača te odrediti površinu mora zahvaćenu onečišćenjem. Zbog toga je širi prostor kanala Sv. Ante snimljen termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* koja je integrirana na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu (Slika III-2). Izvršeno je intervalno snimanje. Prvo snimanje je obavljeno u listopadu, 2020. godine (Slika III-3a, b, c), dok je drugo u siječnju 2021. godine (Slika III-4-5-6).



Slika III-2. *DJI Matrice M210 RTK bespilotna letjelica*



Slika III-3. DJI Zenmuse XT2 na točki stajališta - misija 1 (a)

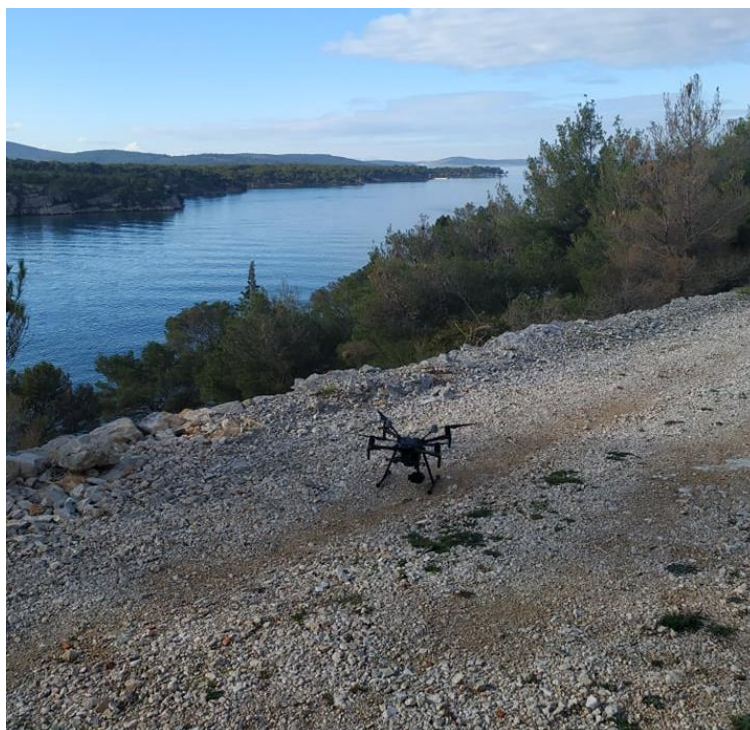


Slika III-3. DJI Zenmuse XT2 u misiji (b)



Slika III-3. *DJI Zenmuse XT2 let prema misiji 3 (b)*

Dakle, s ciljem izvođenja intervalnih modela drugo intervalno snimanje termovizijskom kamerom *DJI Zenmuse XT2* koja je integrirana na *DJI Matrice 210 RTK* bespilotnu letjelicu izvršeno je u siječnju, 2021. godine.



Slika III-4. *DJI Zenmuse XT2 na predviđenoj lokaciji snimanja*



Slika III-5. Pripreme za izvođenje drugog termalnog snimanja



Slika III-6. Pogled prema kanalu Sv. Ante sa stajališta snimanja

DJI Matrice 210 RTK je jedna od trenutačno najmodernijih bespilotnih letjelica, koja zahvaljujući laganoj, ali čvrstoj konstrukciji izrađenoj od karbona i pogonu koji čine snažna četiri motora omogućava provođenje zračnih snimanja s trajanjem i do 30 minuta. S obzirom na svoju konstrukciju ova bespilotna letjelica može biti opremljena s širokim spektrom senzora za prikupljanje različitih podataka (RGB kamera, termovizijska kamera, multispektralna kamera, aeroLiDAR, itd.). Zahvaljujući RTK GPS nadogradnji svim prikupljenim zračnim snimkama pridružuju se precizne x, y i z koordinate, što znatno olakšava daljnju obradu i izradu modela.

Ova bespilotna letjelica opremljena je za potrebe zračnih termovizijskih snimanja s *DJI Zenmuse XT2* kamerom, koja je trenutačno jedna od najmodernijih termovizijskih kamera. Ova kamera omogućava simultano prikupljanje termovizijskih snimaka i RGB snimaka, što znatno olakšava kasniju interpretaciju prikupljenih podataka. Detaljne specifikacije termovizijske kamere *DJI Zenmuse XT2* dane su u tablici III-1.

Tablica III-1. Tehničke specifikacije DJI Zenmuse XT2 digitalne kamere

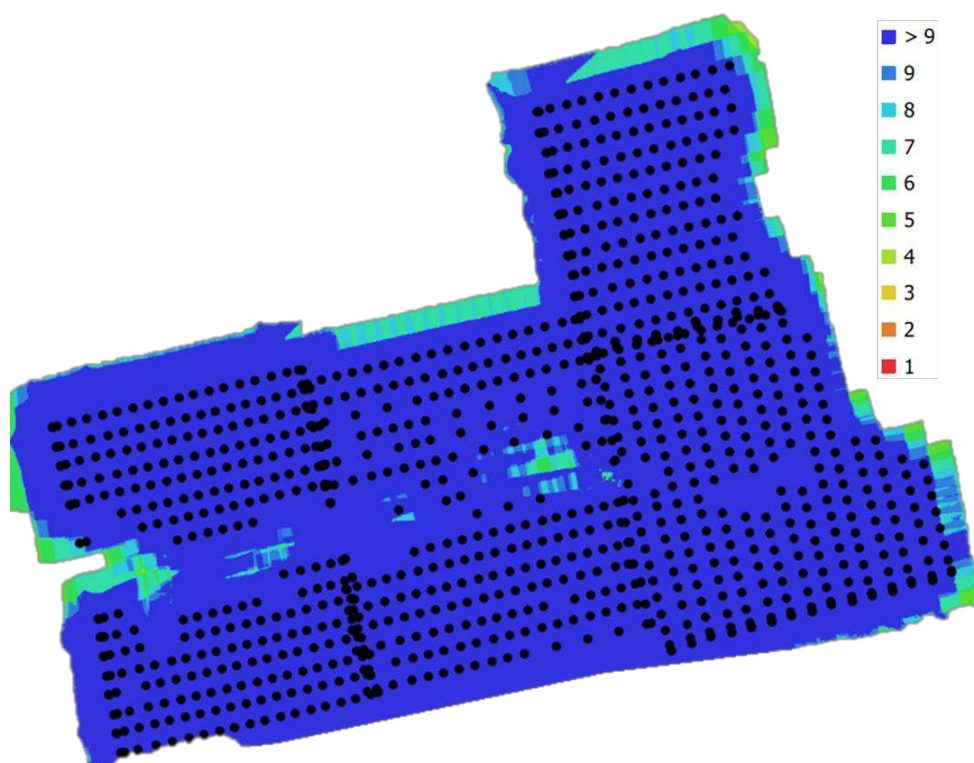
Infracrveni kanal	
Veličina pojedinog snimka (pix)	640 x 512
Veličina pojedinog snimka (mm)	10.88 x 8.704
Veličina piksela	17 μ m
Žarišna duljina	13 mm
Otvor leće	f /1.25
Elektromagnetsko zračenje	7.5 – 13.5 μ m
Vidljivi (RGB) kanali	
Spektralni kanali	crveni (R), zeleni (G), plavi (B)
Veličina pojedinog snimka (pix)	4810 x 3140
Generalne značajke kamere	
Žarišna duljina	8
Težina	588 g
Dimenzije kamere (mm)	18.02×111.6×125.5

U nastavku izvješća su navedeni detaljni parametri koji su izvedeni prilikom obrade termalnih zračnih snimaka šireg područja kanala Sv. Ante prikupljenih u listopadu 2020. godine i siječnju, 2021. godine.

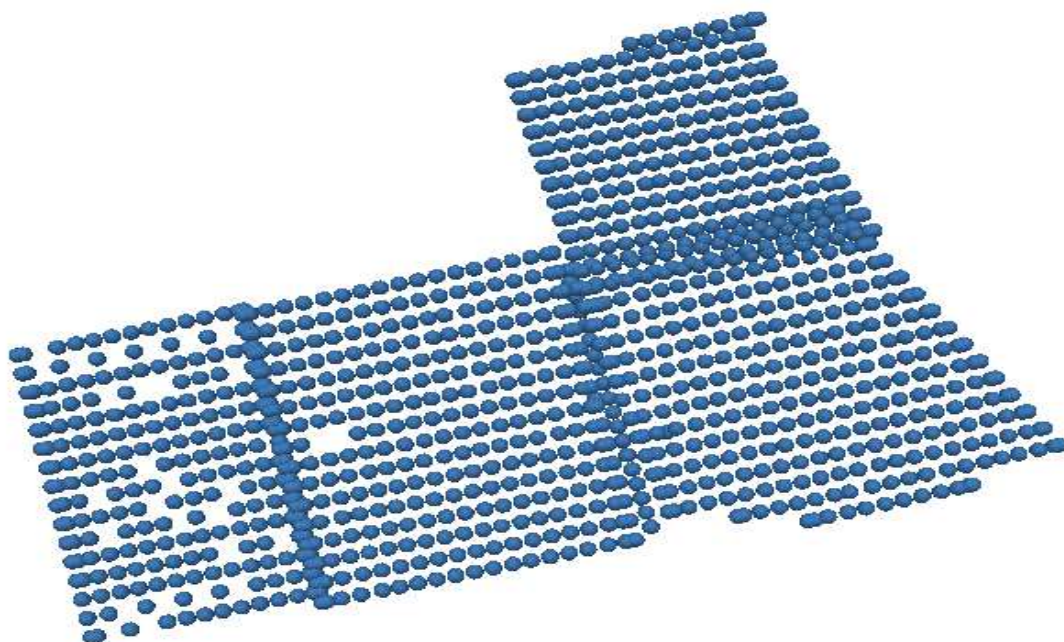
Obrada fotografija je izvršena u programu *Agisoft Metashape*. Proces se sastojao od nekoliko koraka:

- 1) Spajanje snimaka (*align photos*)
- 2) Gradualna selekcija (brisanje veznih točaka)
- 3) Optimizacija rijetkog oblaka točaka
- 4) Izgradnja gustog oblaka točaka
- 5) Izgradnja poligonskog mesha
- 6) Izgradnja gustog oblaka točaka
- 7) Generiranje digitalnog modela površina
- 8) Generiranje digitalnog orto-fota

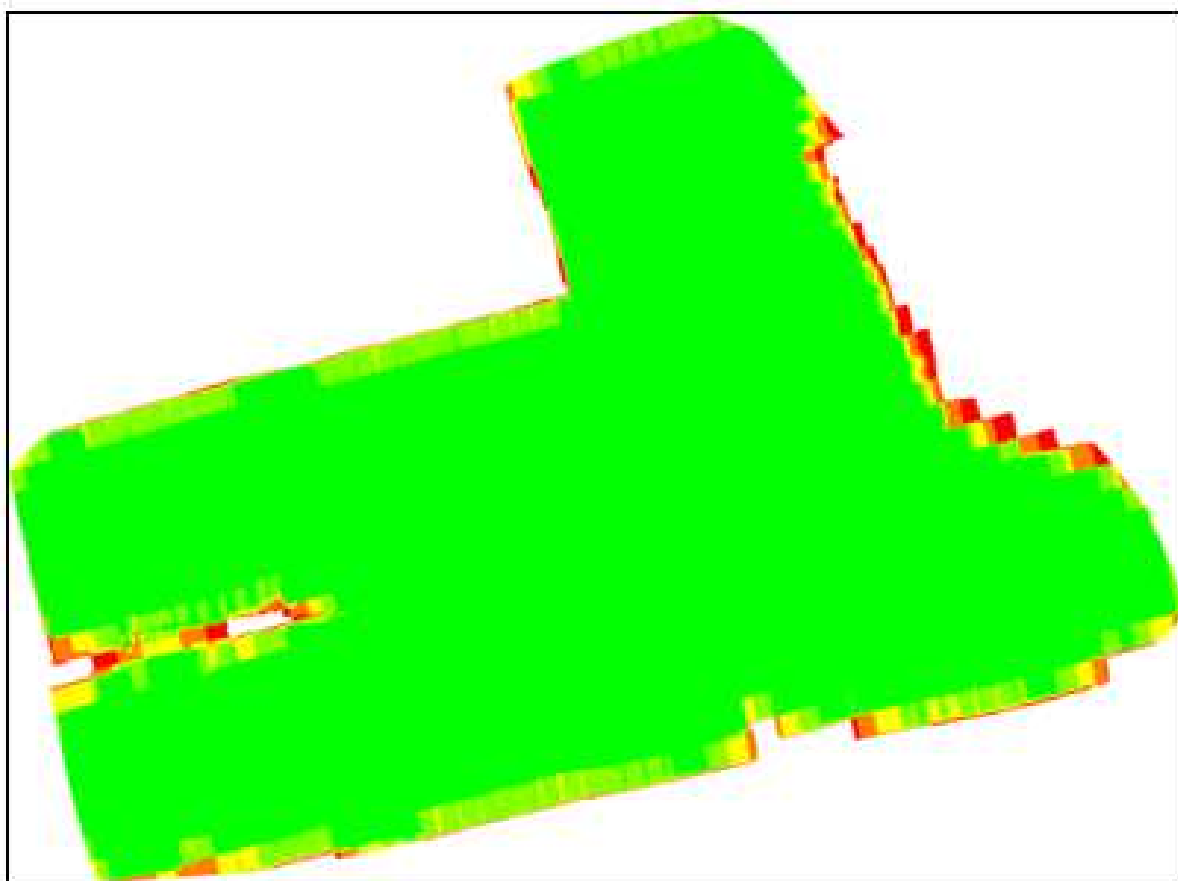
Na slikama-7 i 8 prikazane su lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar područja snimanja. Korišten tip misije *Single Mission* s prednjim i bočnim preklapanjem postavljenim na 80%. Ukupno je snimljeno 8 misija. Sve lokacije unutar područja snimanja vidljive su na minimalno 9 fotografija (plava boja), jedino sami rub misija bilježi nešto manje preklapanje. Snimanje je obavljeno u četiri misije. Svaka misija je trajala 20-tak minuta. Sve misije su snimljene s istog stajališta koje je osiguralo neometanu liniju pogleda kroz cijeli proces snimanja.



Slika III-7. Lokacije fotoaparata i broj preklapanja unutar područja snimanja (1)



Slika III-8. Lokacije fotoaparata unutar područja snimanja (2)



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Slika III-9. Preklapanja fotografija u drugom termalnom snimanju

U tablici III-2 su navedene osnovne specifikacije provedenog zračnog termalnog snimanja kanala Sv. Ante za prvo snimanje. S obzirom na to da su intervalna snimanja kanala Sv. Ante izvršena koristeći predložak istih misija te su snimana uvažavajući iste korisničko-definirane parametre (prednje i bočno preklapanje, visina leta, vrsta kamere, kut kamere, itd.) jasno je da nije bilo značajnijih razlika između specifikacija u prvom i drugom termalnom snimanju.

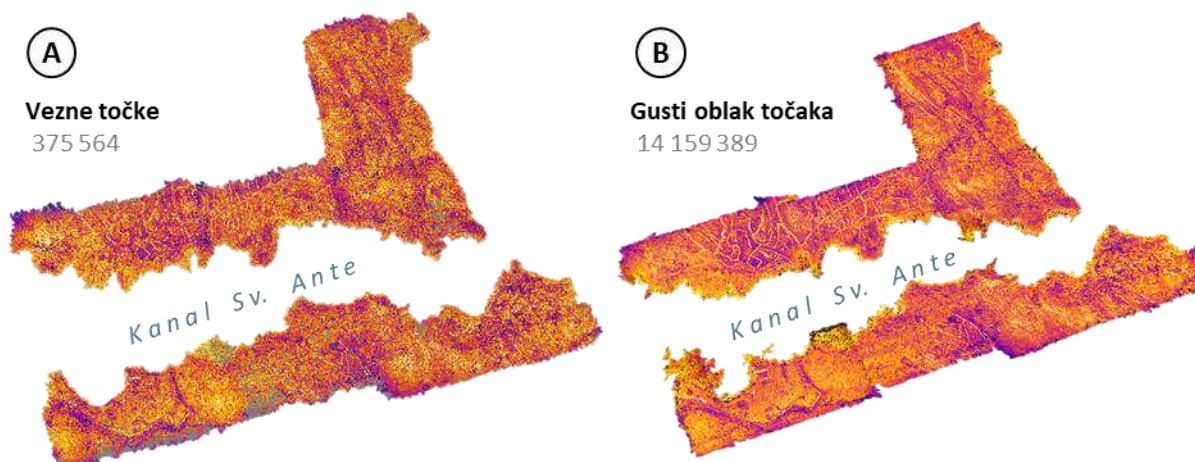
b) Ciklično snimanje nultog i završnog stanja (vremenska rezolucija oko 3 mjeseca) s ciljem utvrđivanja temperaturnih promjena

U svakom snimanju prikupljeno je oko 1200 fotografija, odnosno ukupno oko 2400 fotografija. U prvom koraku SfM fotogrametrije oba snimanja uspješno je povezano (*align*) oko 80% snimaka. Ostatak nepovezanih fotografija odnosi se na prostor mora. Prosječna visina leta je iznosila oko 220-230 metara, ovisno o samoj misiji (razlike < 5 m). Nakon izvođenja gradualne selekcije u svakom snimanju je ostalo ukupno oko 350 000 veznih točaka s ukupnom reprojekcijskom pogreškom manjom od 0,5 pix.

Tablica III-2. Osnovne specifikacije izvedenog termalnog snimanja (1. snimanje)

Broj fotografija	1248	Lokacije kamera	998
Prosječna visina leta	220-230 m	Vezne točke	375 564
Prostorna rezolucija modela (GSD)	32,6 cm/pix	Projekcije	1 142 042
Snimljena površina	oko 2,4 km²	Reprojekcijska pogreška	0,427 pix.

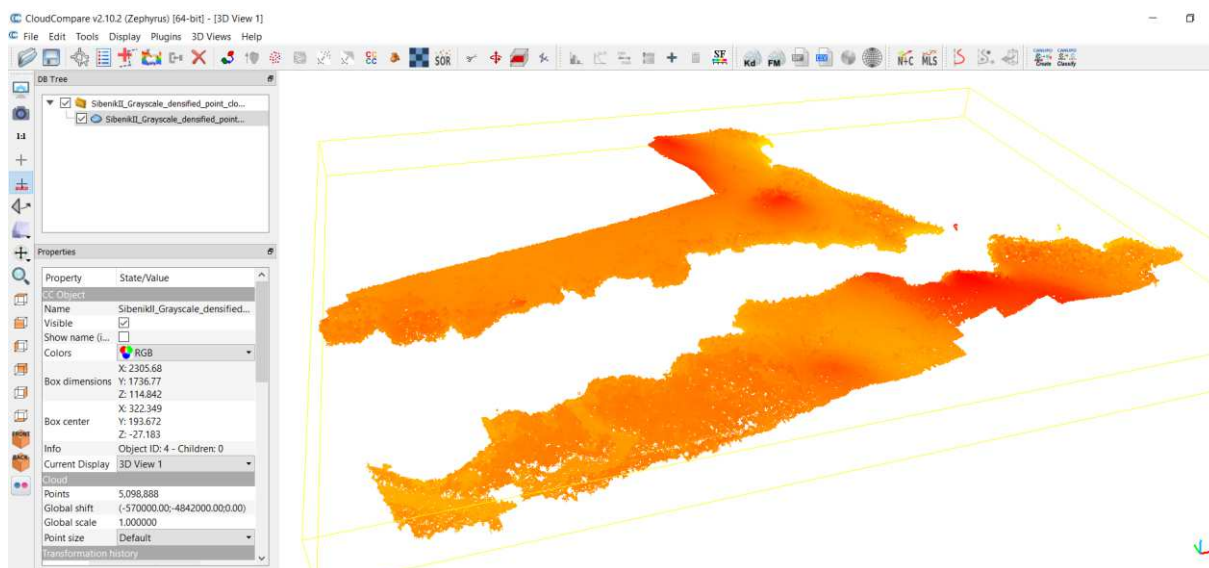
Iz spojenih snimaka te izvedenih rijetkih oblaka točaka (Slika III-10a) u oba snimanja su izvedeni gusti oblaci točaka (oko 14 milijuna točaka) (Slika III-10b) (Slika III-11 i 12). Ukupno snimljeno područje iznosilo je oko 2,4 km².



Slika III-10. Izvedeni (A) rijetki i (B) gusti oblak točaka u prvom termalnom snimanju

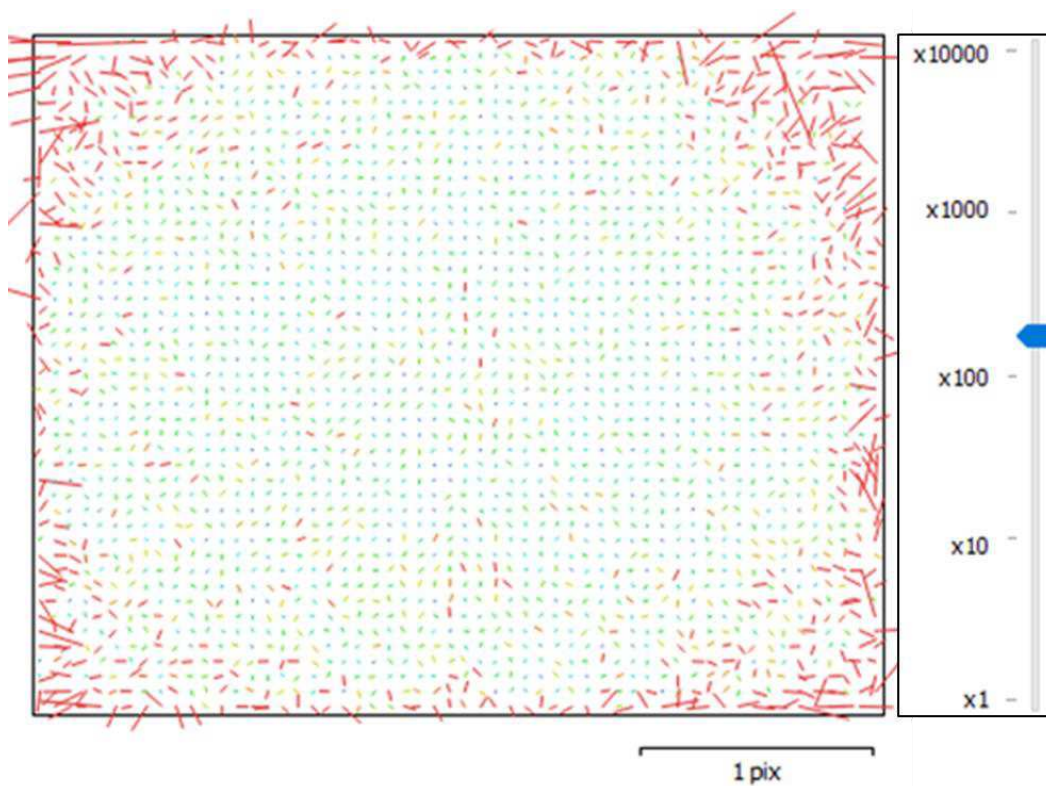


Slika III-11. Izvedeni gusti oblak točaka u drugom snimanju (primjer desne obala)

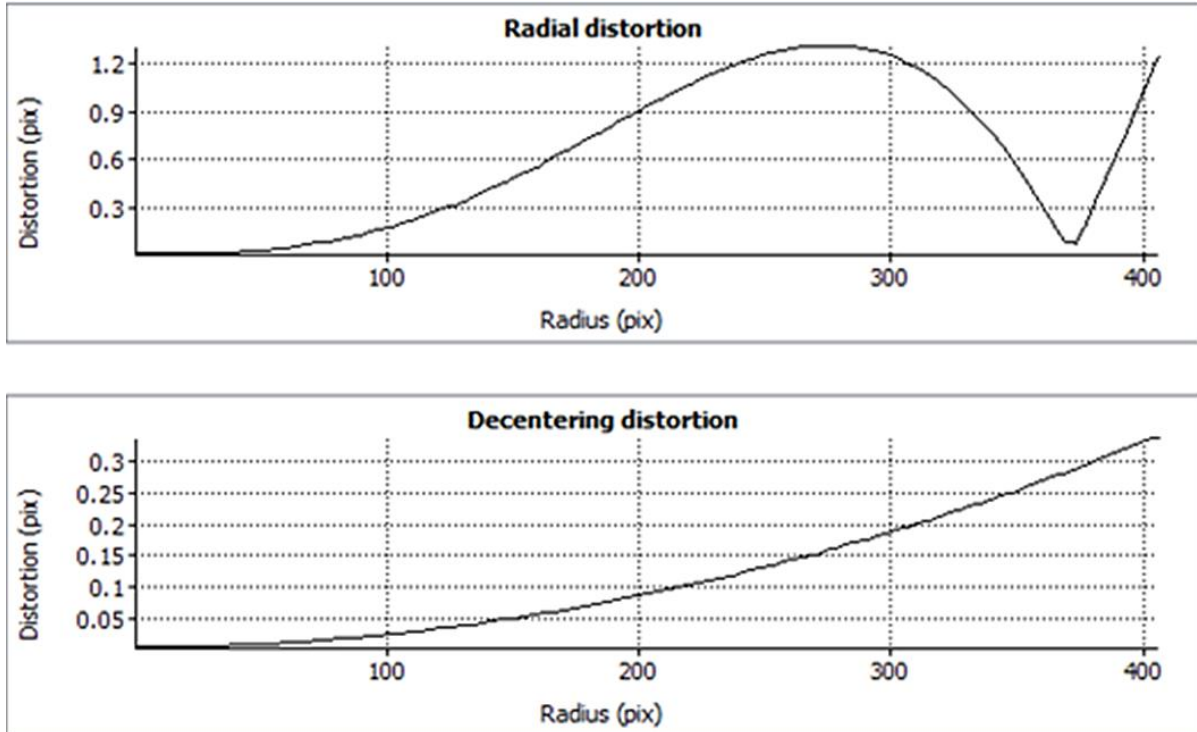


Slika III-12. Izvedeni gusti oblak točaka u drugom snimanju (primjer obe obale - CloudCompare softver)

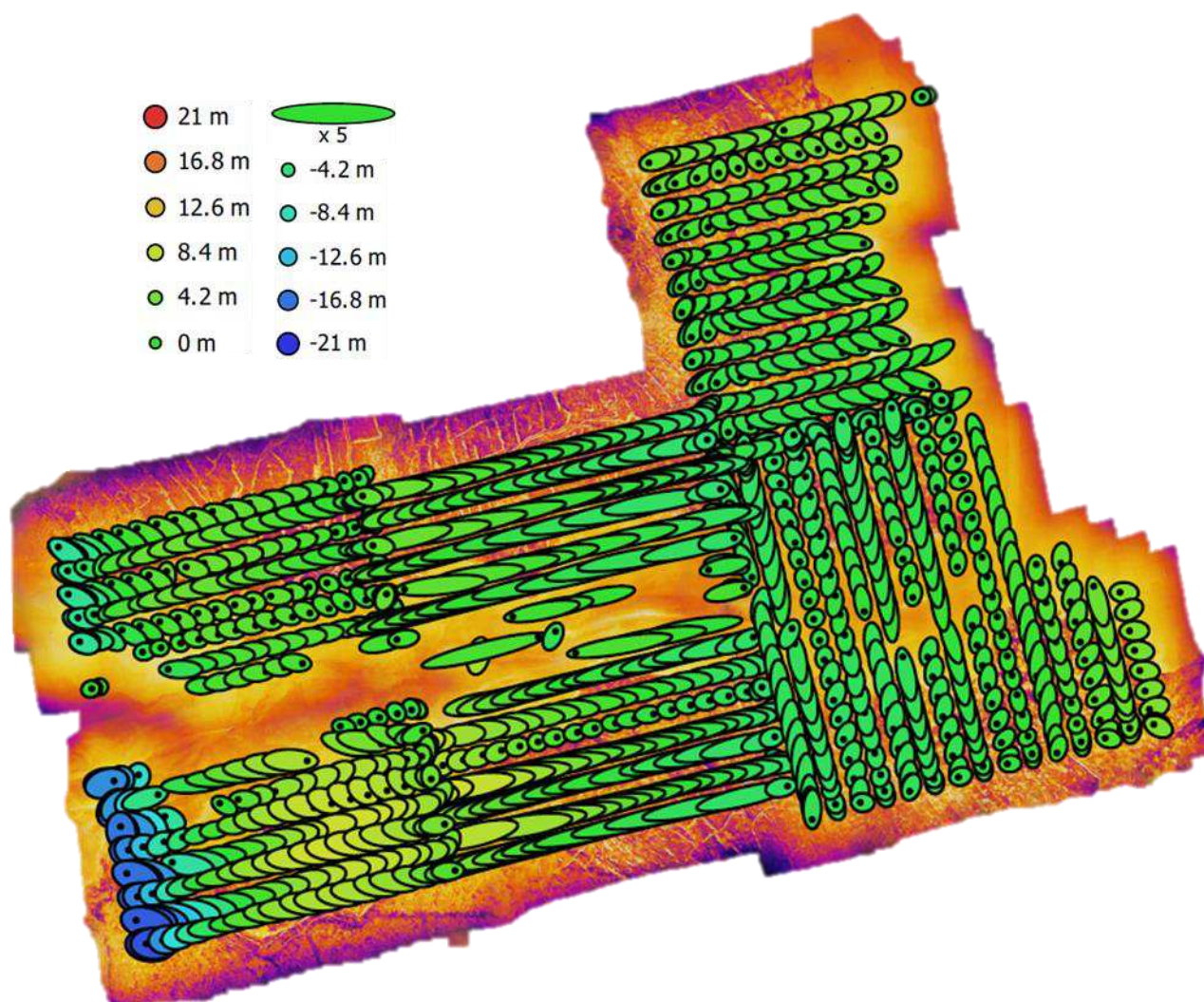
Kalibracija kamere je obavljena u sklopu rekonstrukcije objekta (samokalibracija). Metoda samokalibracije omogućava određivanje elemenata unutarnje orijentacije (osnovnih i dodatnih) u sklopu 3D rekonstrukcije objekta. Pritom nikakvi referentni podaci nisu potrebni ako je geometrija konfiguracije snimanja kvalitetna, te ako nije nužno da rekonstruirani objekt bude u mjerilu. Samokalibracija je analitička metoda kalibracije, te je implementirana u gotovo svim fotogrametrijskim programskim paketima. To je čini fleksibilnom i široko primjenljivom, ali i podložnom korelacijama parametara. Najčešće koreliraju parametri vanjske orijentacije (u smjeru osi snimanja) i žarišna duljina leće, te koordinate PPA i parametara tangencijalne distorzije. Na slikama III-13-14-15-16-17, prikazani su rezultati samokalibracije kamere u *Agisoftu* za termalno snimanje.



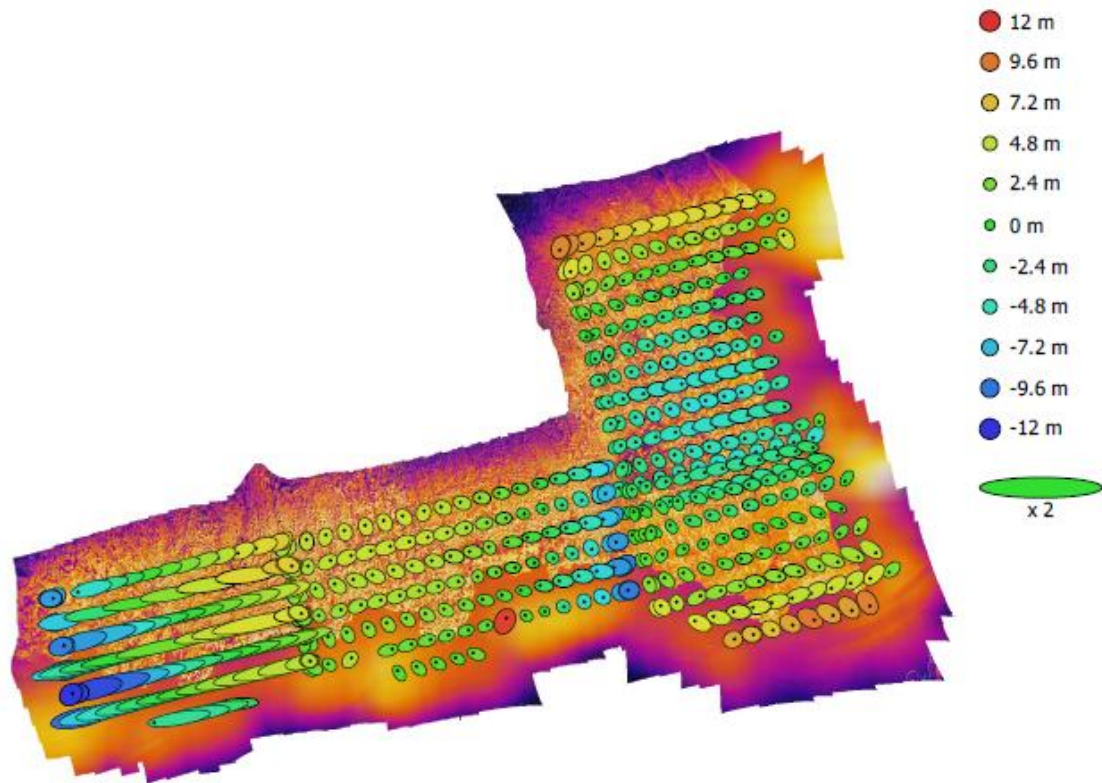
Slika III-13. Residuali slike za Zenumse XT2 u izvedenom termalnom snimanju



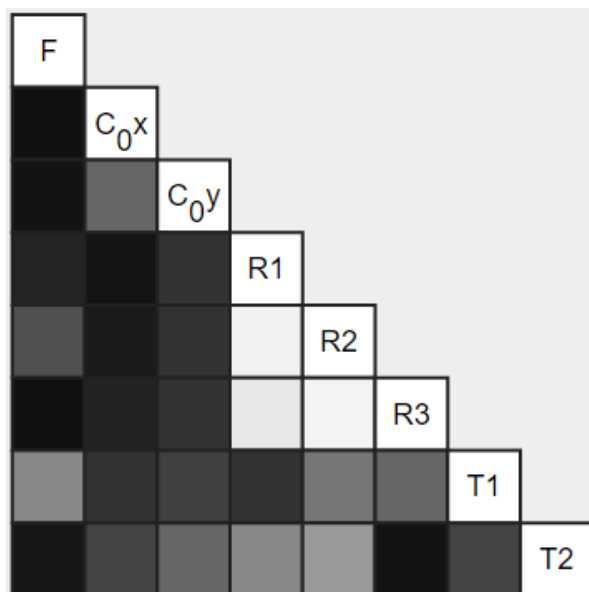
Slika III-14. Graf kretanja distorzije



Slika III-15. Lokacije fotografija i procjene pogreške u prvom termalnom snimanju
 (Z pogreška je predstavljena bojom elipse. Pogreške X, Y predstavljene su oblikom elipse)

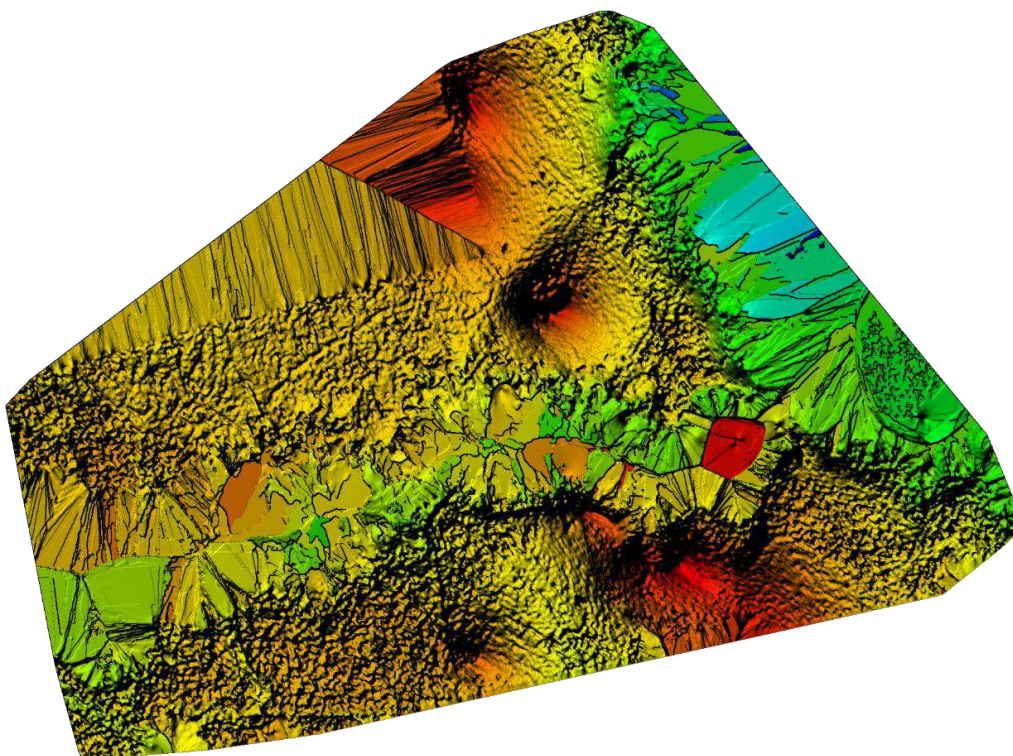


Slika III-16. Lokacije fotografija i procjene pogreške u drugom termalnom snimanju (primjer desne obale)

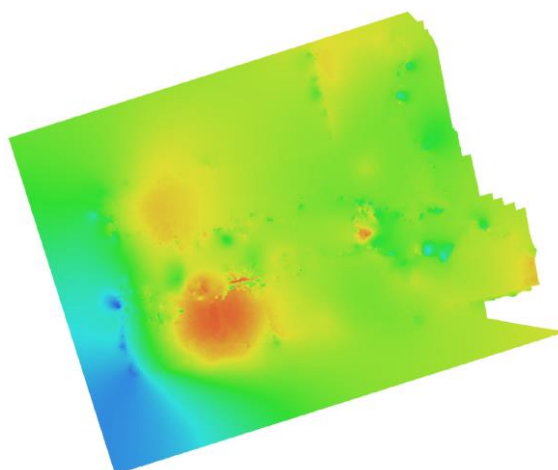


Slika III-17. Korelacija između unutarnjih parametara kamere određena prilagodbom snop

Najveće procjenjene pogreške lokacije kamera su u oba snimanja bile na lokacijama najveće udaljenosti bespilotne letjelice od točke stajališta (Slika III-16). Iz gustih oblaka točaka u oba termalna snimanja izveden je digitalni model površina (DMP) kanala Sv. Ante prostorne rezolucije oko 32,6 cm.



Slika III-17. Prikaz DSM-a prije progušćivanja točaka (drugo termalno snimanje)



Slika III-18. DSM u drugom termalnom snimanju

U oba snimanja ukupno je prikupljeno oko 9,39 uzoraka (visinskih točaka) po m². Međutim, ovaj DMP nije dovoljno horizontalno i vertikalno točan (izostanak orijentacijskih točki) za primjenu u izvođenju različitih morfometrijskih i hidroloških analiza. Za tu primjenu je korišten DMP generiran aerofotogrametrijskim snimanjem običnom RGB kamerom *Zenmuse X7*.

U nastavku teksta detaljno su navedeni svi korisničko definirani parametri koji su odabrani te bili rezultat procesa orijentacije termalnih snimaka u prvom i drugom termalnom snimanju. Parametri su podijeljeni u 13 osnovnih koraka. S obzirom na to da je snimanje u oba slučaja izvršeno koristeći iste misije te postavke snimanja istaknuti su korisničko definirani parametri za prvo snimanje.

1) General

Cameras = 1248

Aligned cameras = 998

Coordinate system = HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)

2) Point Cloud

Points = **375 564 of 474 215**

RMS reprojection error = **0.190 (0.427 pix)**

Max reprojection error = **0.686 (7.761 pix)**

Mean key point size = **2.263 pix**

Average tie point multiplicity = **3.396**

3) Alignment parameters

Accuracy = **High**

Generic preselection = **Yes**

Reference preselection = **Yes**

Key point limit = **0**

Tie point limit = **0**

4) Optimization parameters

Parameters = **f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4**

5) Depth Maps

Count = **936**

6) Reconstruction parameters

Quality = **Ultra High**

Filtering mode = **Aggressive**

7) Dense Point Cloud

Points = **14 254 265**

8) Reconstruction parameters

Quality = **Ultra High**

Depth filtering = **Aggressive**

9) DEM

Size = **9 246 x 7 794**

Coordinate system **HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)**

10) Reconstruction parameters

Source data = **Dense cloud**

11) Orthomosaic

Size = **8 978 x 7 440**

Coordinate system = **HTRS96 / Croatia TM (EPSG::3765)**

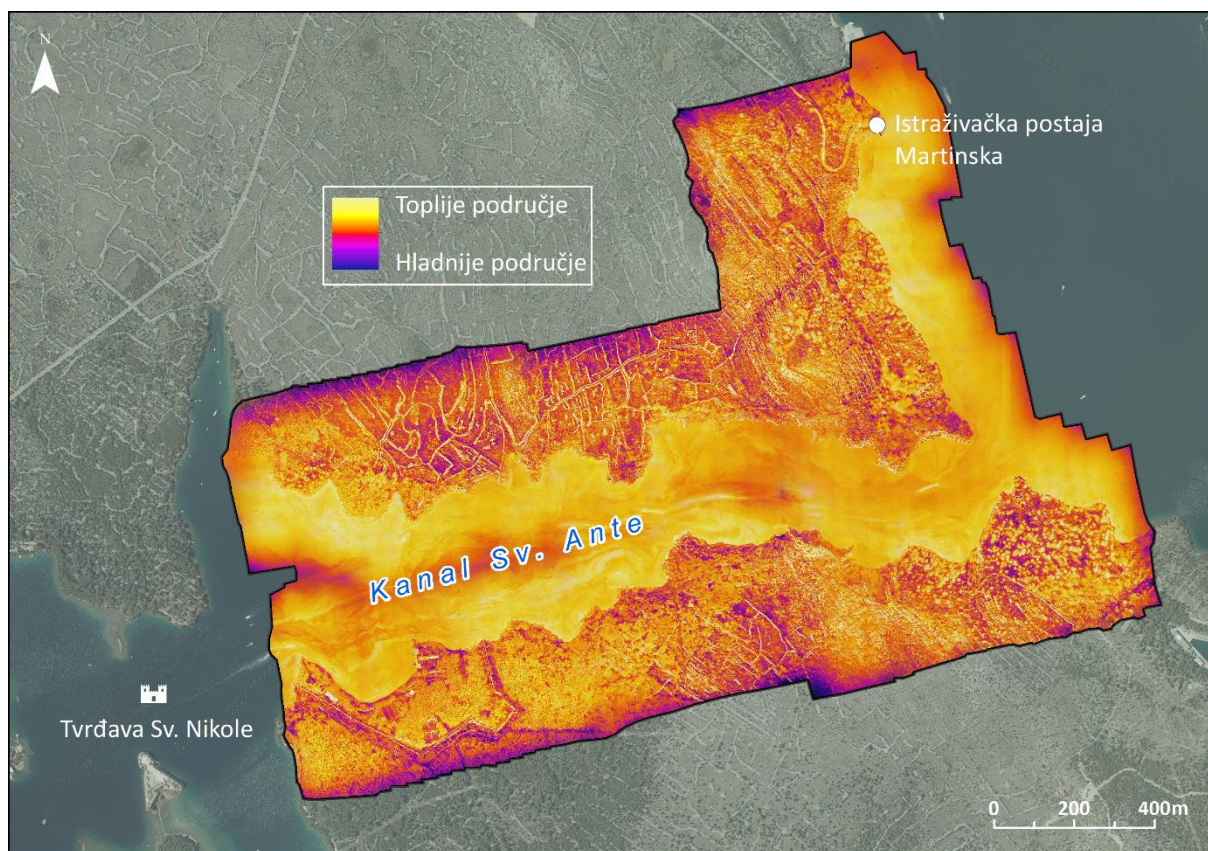
12) General

Colors **3 bands, uint8**

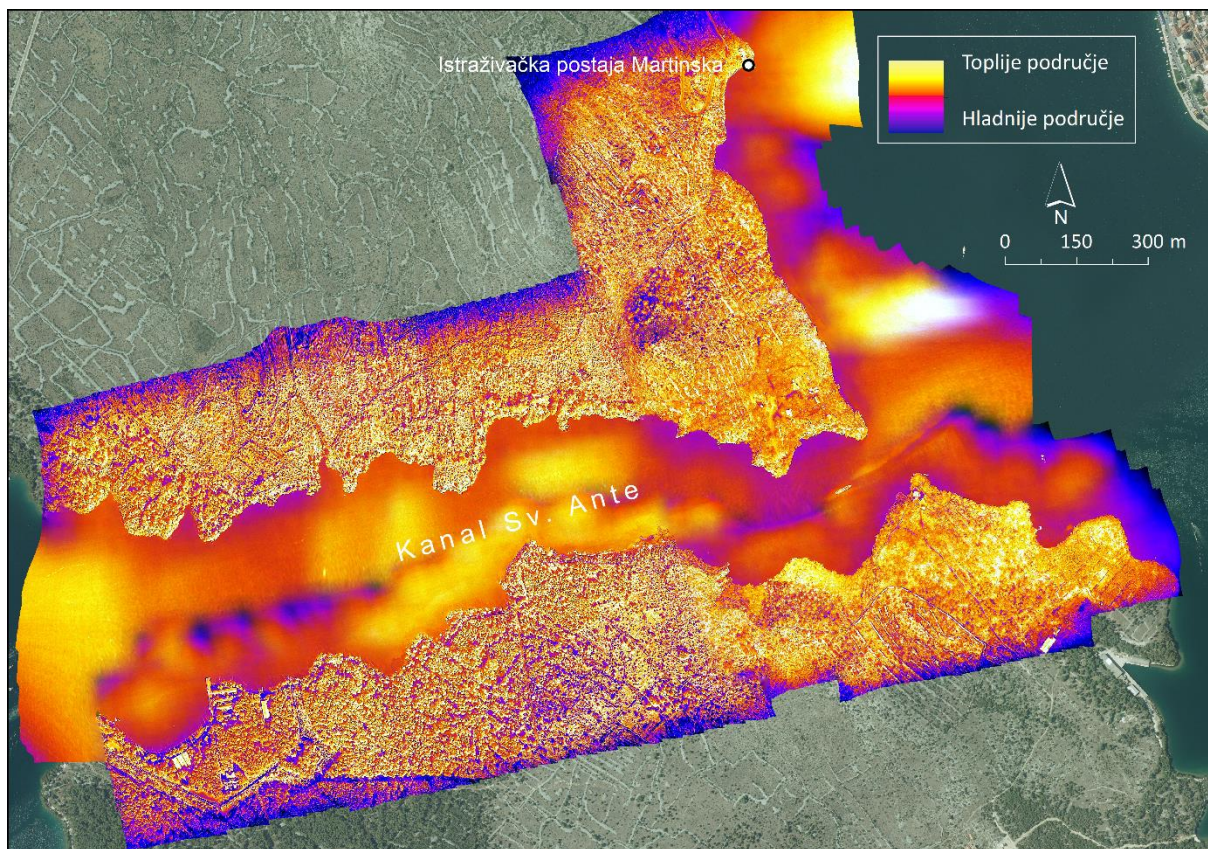
13) Reconstruction parameters

Blending mode = **Mosaic**

Posljednji korak aerofotogrametrijskog procesa uključivao je izgradnju termalnih digitalnih ortofoto modela kanala Sv. Ante. Prostorna rezolucija izvedenih modela iznosila je 32,6 cm (Slika III-19).



Slika III-19. Termalni snimak šireg područja kanala Sv. Ante (prvo termovizijsko snimanje)

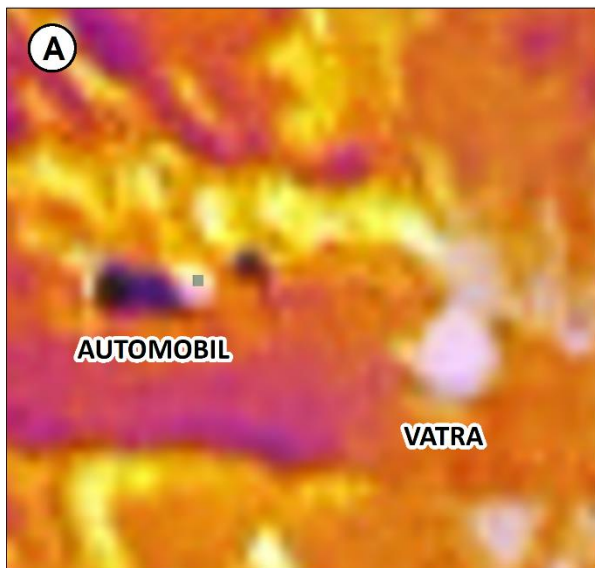


Slika III-20. Termalni snimak šireg područja kanala Sv. Ante (drugo termovizijsko snimanje)

c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

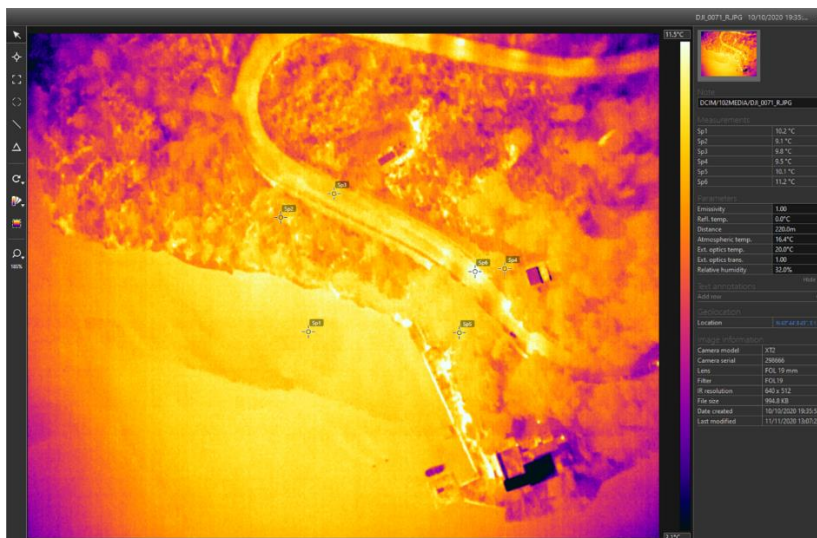
Iz termovizijskih snimanja mogu se detektirati određene temperaturne i ostale anomalije i promjene u prostoru. U nastavku je dano nekoliko primjera gdje su iz intervalnih termalnih modela uočene određene zanimljivosti.

Izvedena je provjera točnosti i primjenjivosti termalnog digitalnog ortofoto snimka. Naime, prilikom izvođenja termalnog snimanja na terenu (u blizini stajališta misije) u kontroliranim uvjetima zapaljena je mala vatra (promjera od nekih pola metra) s ciljem provjere učinkovitosti temperaturne detekcije na izvedenom termalnom snimku. Na slici III-21 može se vidjeti lokacija provedenog testiranja. (Slika III-21A). U konačnici, može se uočiti da se pri postojećim parametrima snimanja (visina leta od 220 - 230 metara, prostorna rezolucija modela 32,7 cm) na generiranom termalnom modelu, jasno mogu vidjeti temperaturne razlike između tek upaljene vatrice, vegetacije, okolnog tla i automobila koji u ovom slučaju ima najmanju temperaturu (Slika III-21A). Ovaj test ukazuje na moguću primjenjivost termalne kamere u nadzoru opožarnih površina i površina koje imaju povećani rizik od izbijanja otvorenih (šumskih) požara.

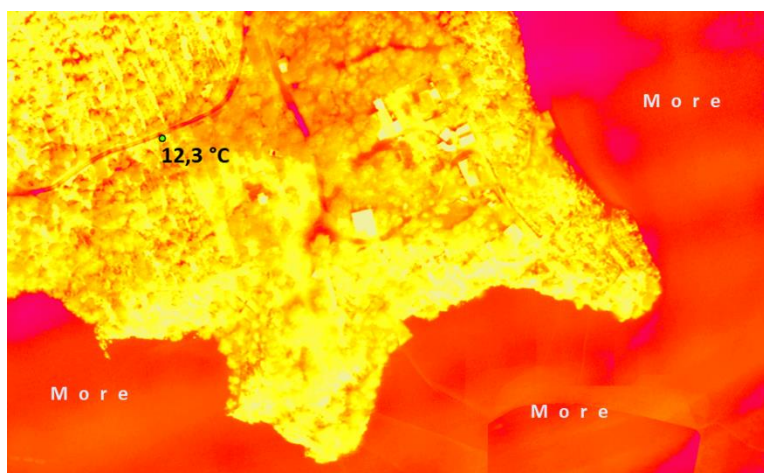


Slika III-21. *Provjera točnosti i primjenjivosti termalnog digitalnog ortofoto snimka*

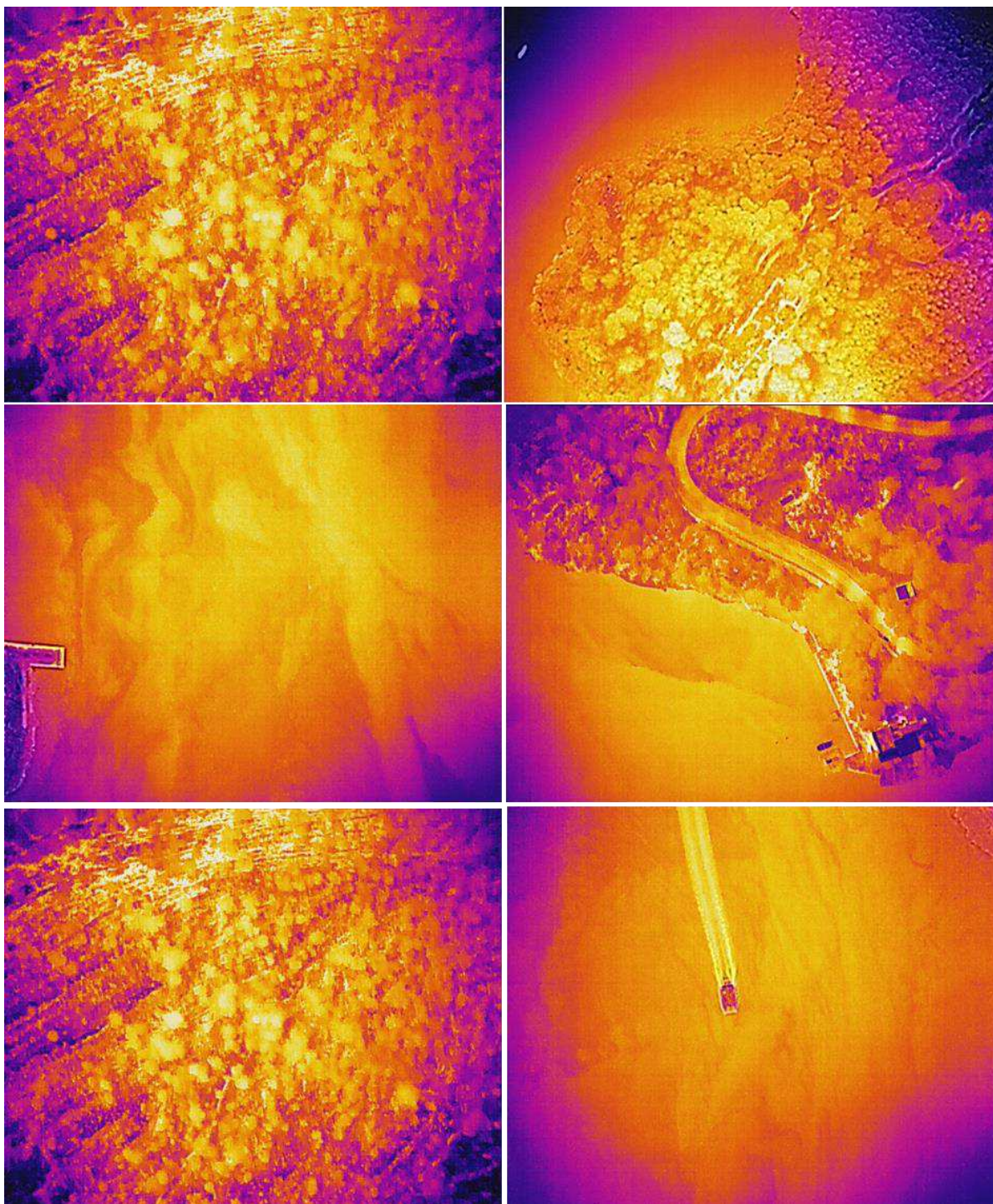
Na svakoj prikupljenoj termalnoj fotografiji mogu se očitati vrijednosti temperature za pojedini element slike (piksel). Apsolutna točnost očitovanja *Zenmuse XT2* kamere iznosi $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ($\pm 50^{\circ}\text{F}$). Na slici III-22. dan je primjer očitavanja temperature za šest proizvoljnih uzoraka unutar snimljenog područja fotografije na području istraživačke postaje Martinska.



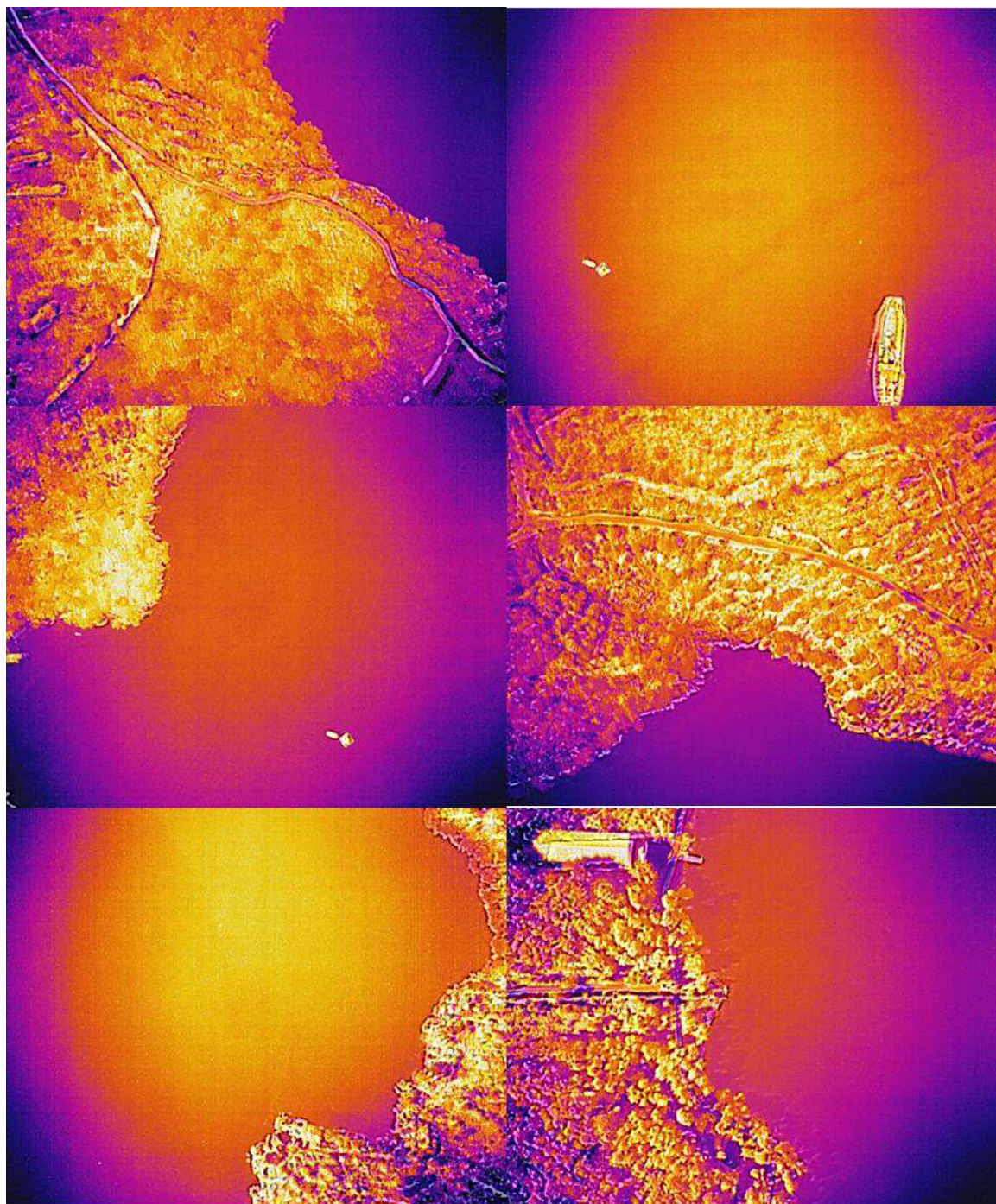
Slika III-22. Primjer očitavanja vrijednosti temperature na odabranim uzorcima unutar termalne fotografije



Slika III-23. Primjer očitavanja vrijednosti temperature na modelu izvedenom drugim termovizijskim snimanjem

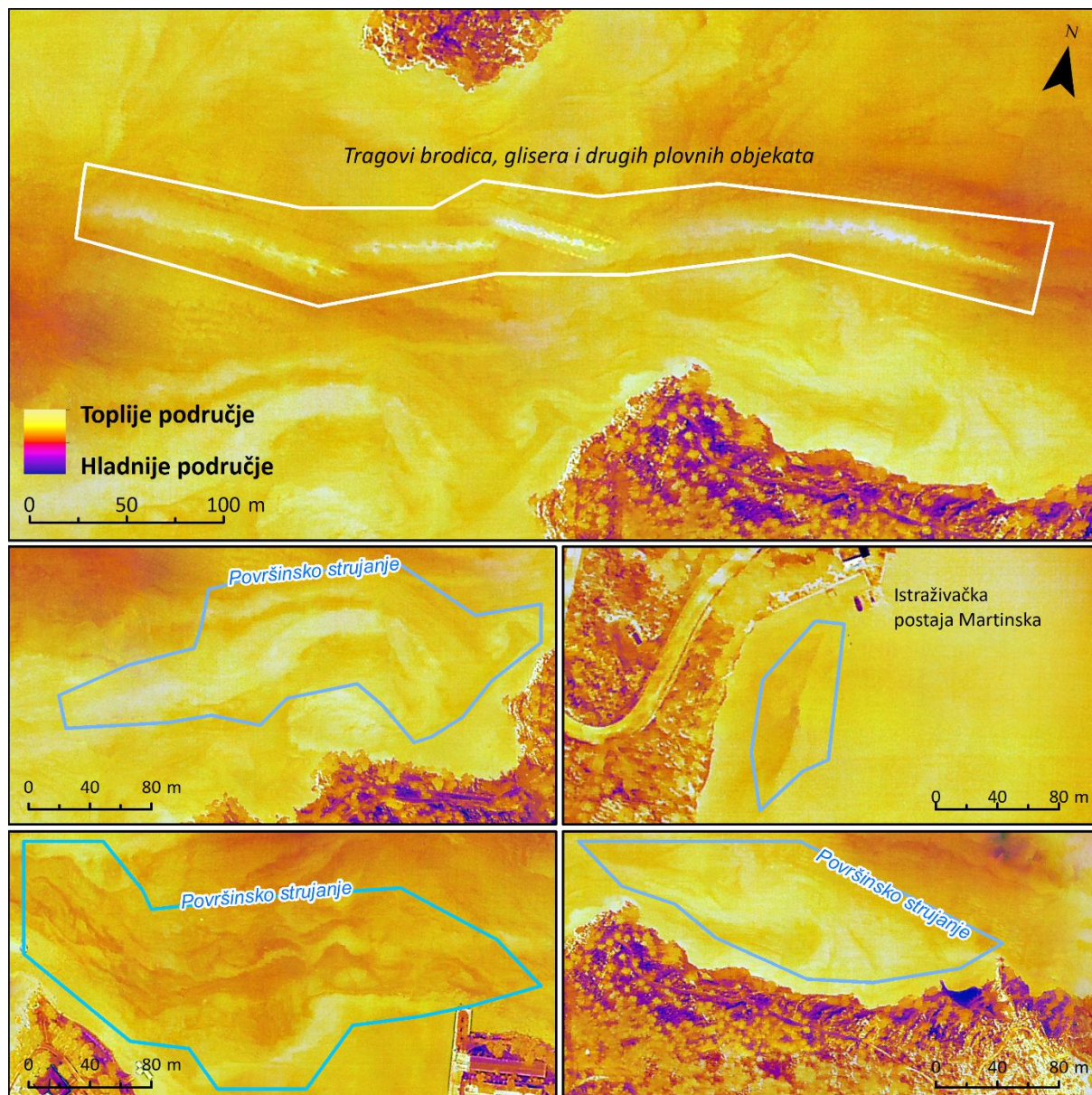


Slika III-24. *Primjeri snimljenih termalnih fotografija (1. snimanje)*



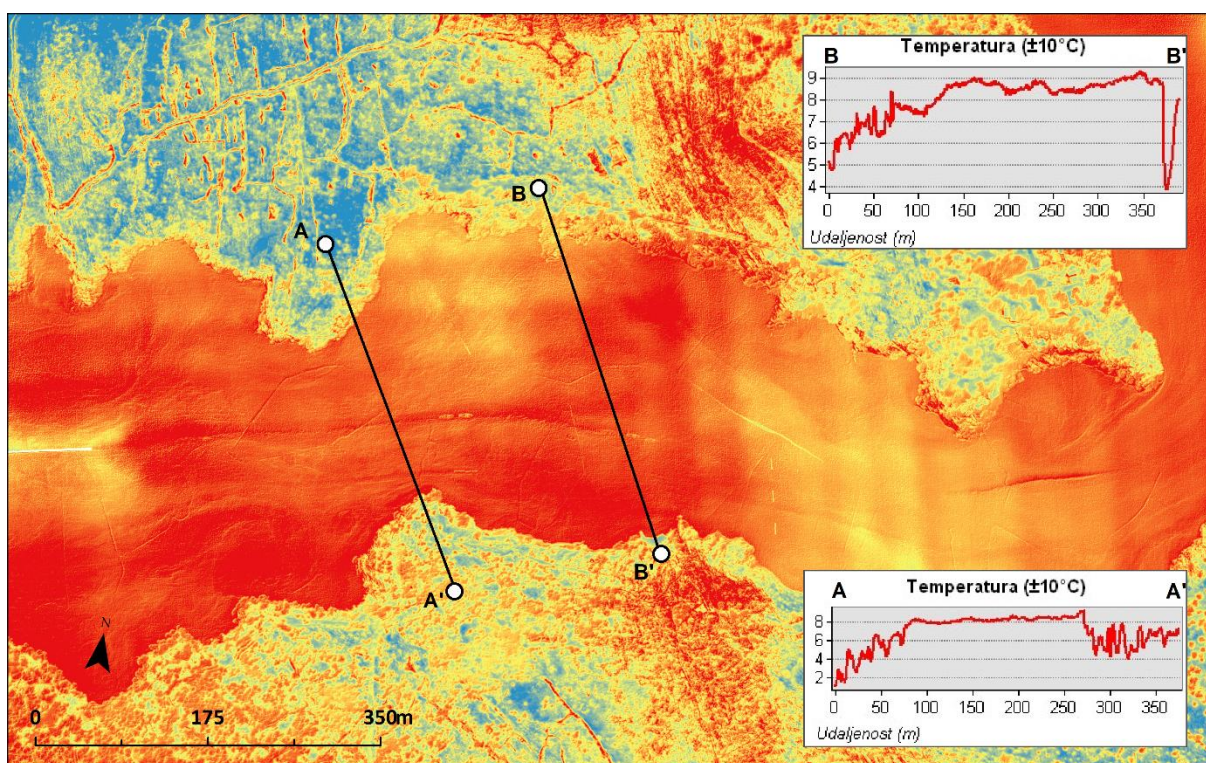
Slika III-25. *Primjeri snimljenih termalnih fotografija (2. snimanje)*

Na termalnom modelu kanala Sv. Ante na površini mora moguće je uočiti tragove brodica i drugih plovih objekata te smjer površinskog strujanja mora (Slika III-26).



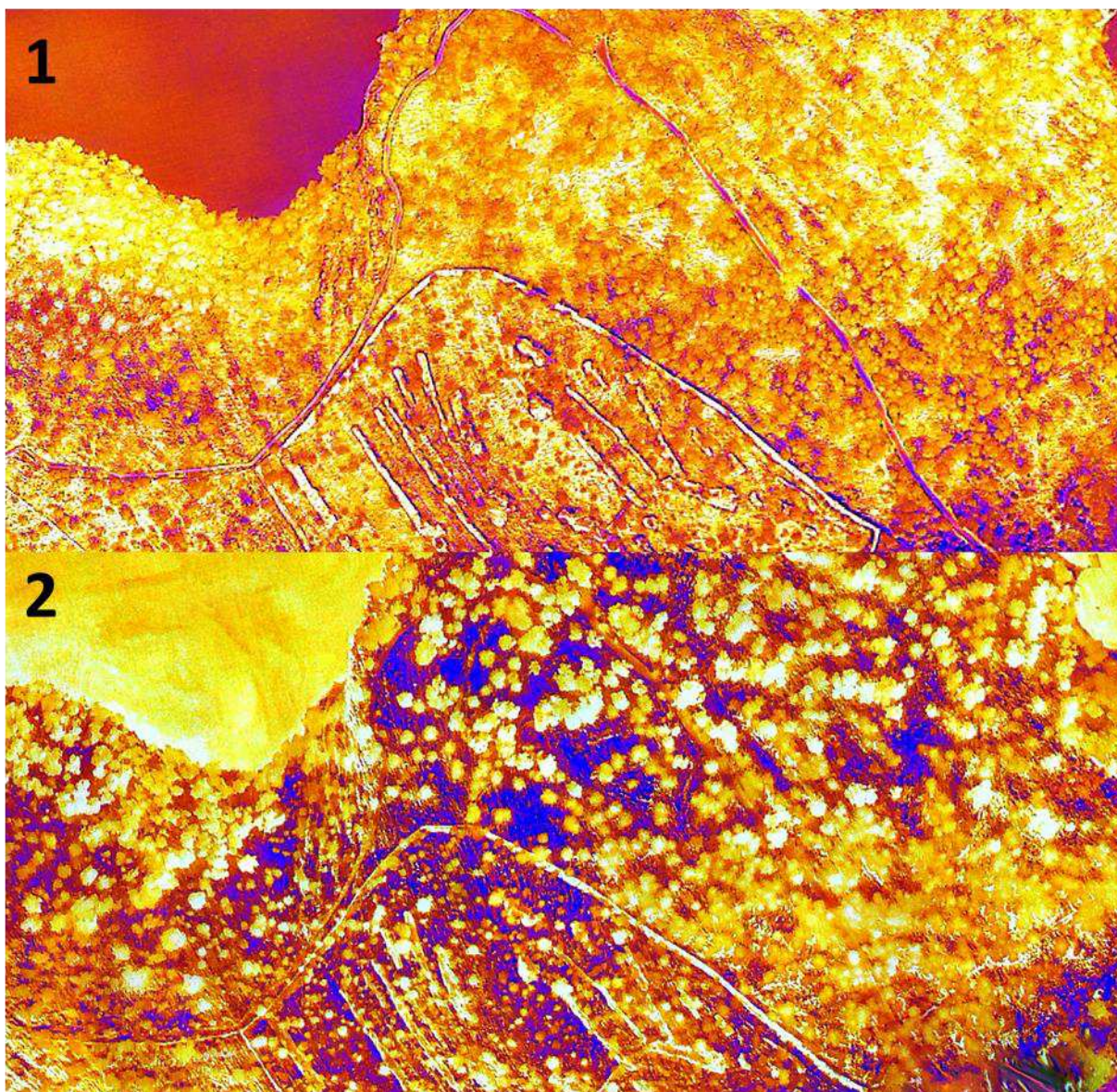
Slika III-26. Primjeri detekcije tragova brodica na moru i drugih plovila te površinskog strujanja mora

Iz generiranog termalnog modela Zenmuse XT2 moguće je detektirati temperaturu za svaki pixel (element) modela. Međutim, prilikom analiziranja vrijednosti temperatura nužno je poznavati ograničenja samog uređaja. Očitovanje temperature je točno u rasponu od $\pm 10^{\circ}\text{C}$. U idealnim uvjetima točnost iznosi 5°C . Iskustvo na terenu je pokazalo da je razlike ovise o vrsti analiziranog predmeta, ali prema dosadašnjim primjerima većini slučajeva temperatura očitana na modelu je 9 do 10°C niža u odnosu na stvarnost. Primjerice, ako je temperatura mora 18°C , na modelu će more imati temperaturu od oko 8°C . Na izvedenom modelu emperatura mora, ovisno o dubini, varira između $6,5$ do $8,5^{\circ}\text{C}$. Ako se uračuna razlika, odnosno pogreška uređaja od 10°C , dobiju se vrijednosti koje odgovaraju izmjerenim temperaturama mora u kanalu Sv. Ante za listopad.

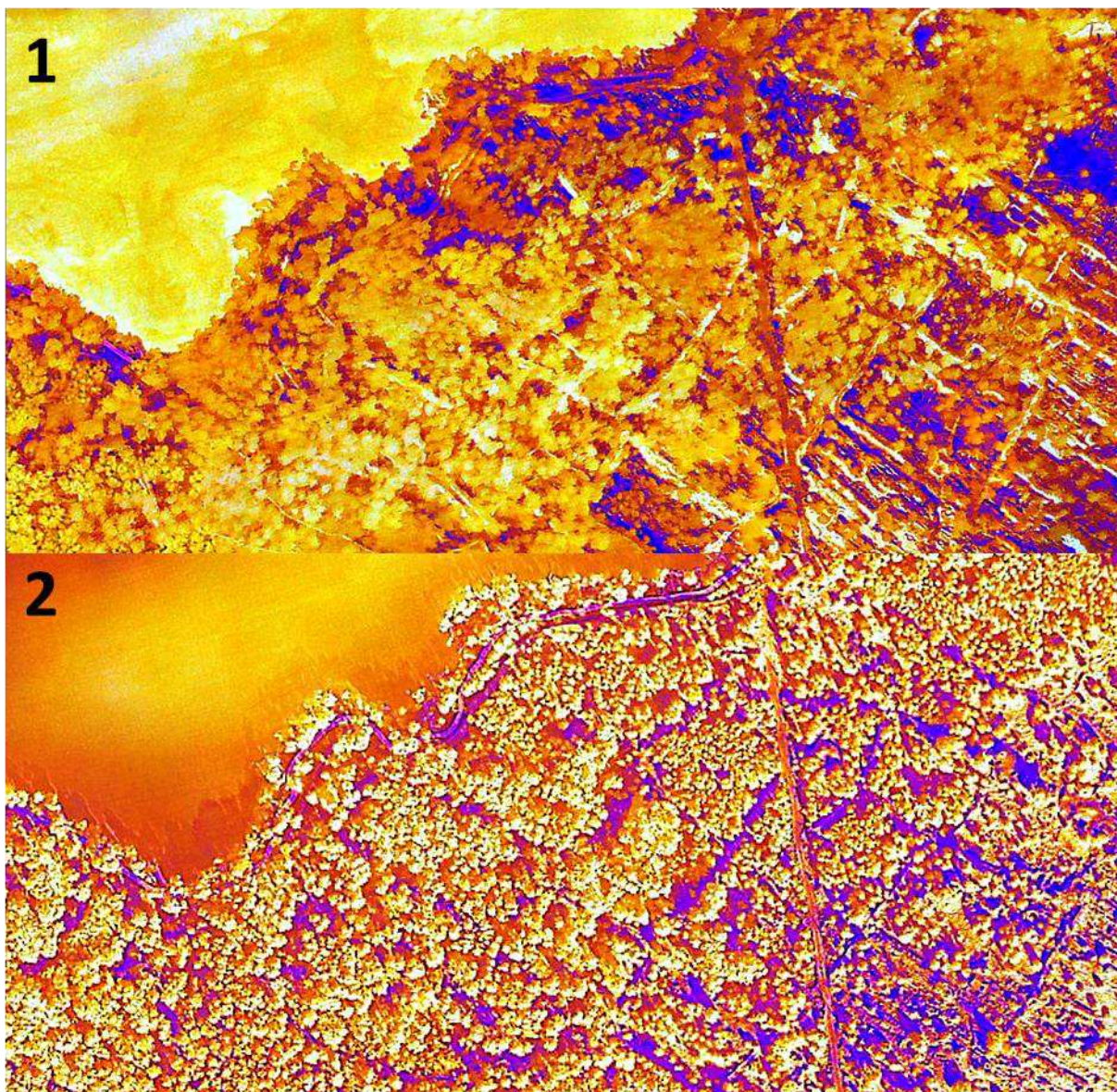


Slika III-27. *Primjer očitavanja temperaturnih profila iz izvedenog termalnog modela*

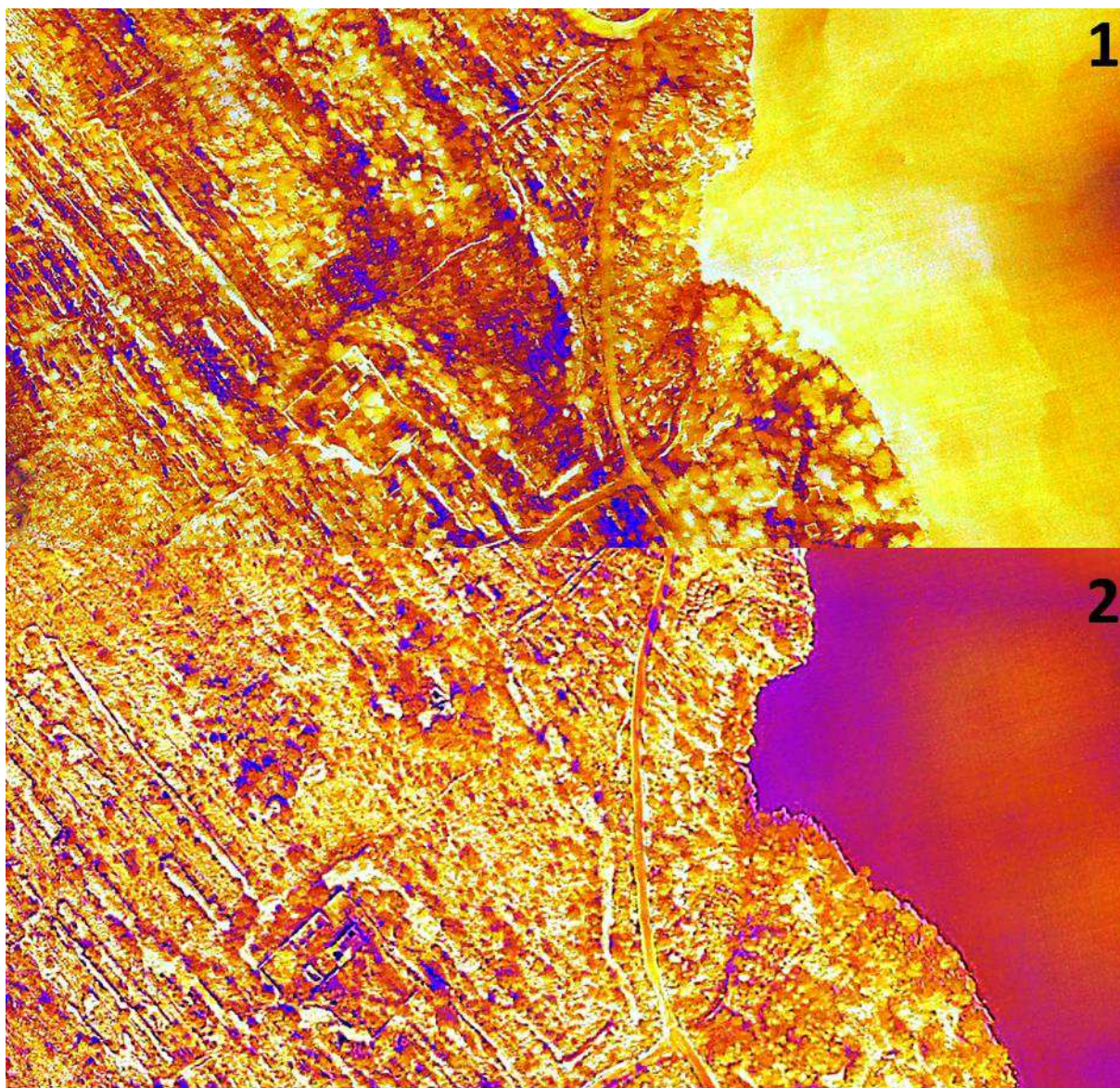
Na sljedećim slikama prikazane su temperaturne razlike između izvedenih termalnih modela.



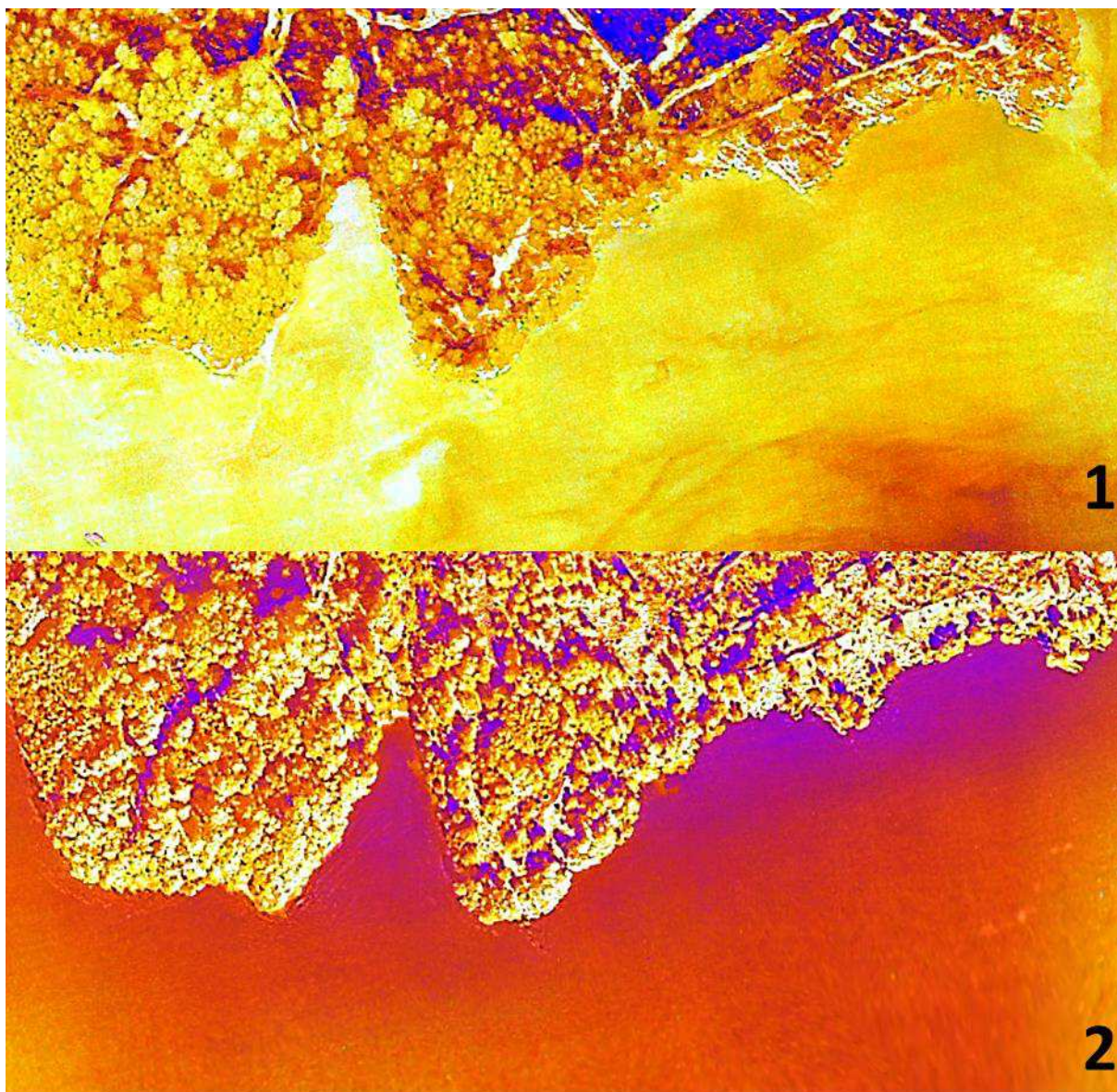
Slika III-28. Usporedba specifičnog prostora na (1) i (2) termalnom modelu (a)



Slika III-29. *Usporedba specifičnog prostora na (1) i (2) termalnom modelu (b)*

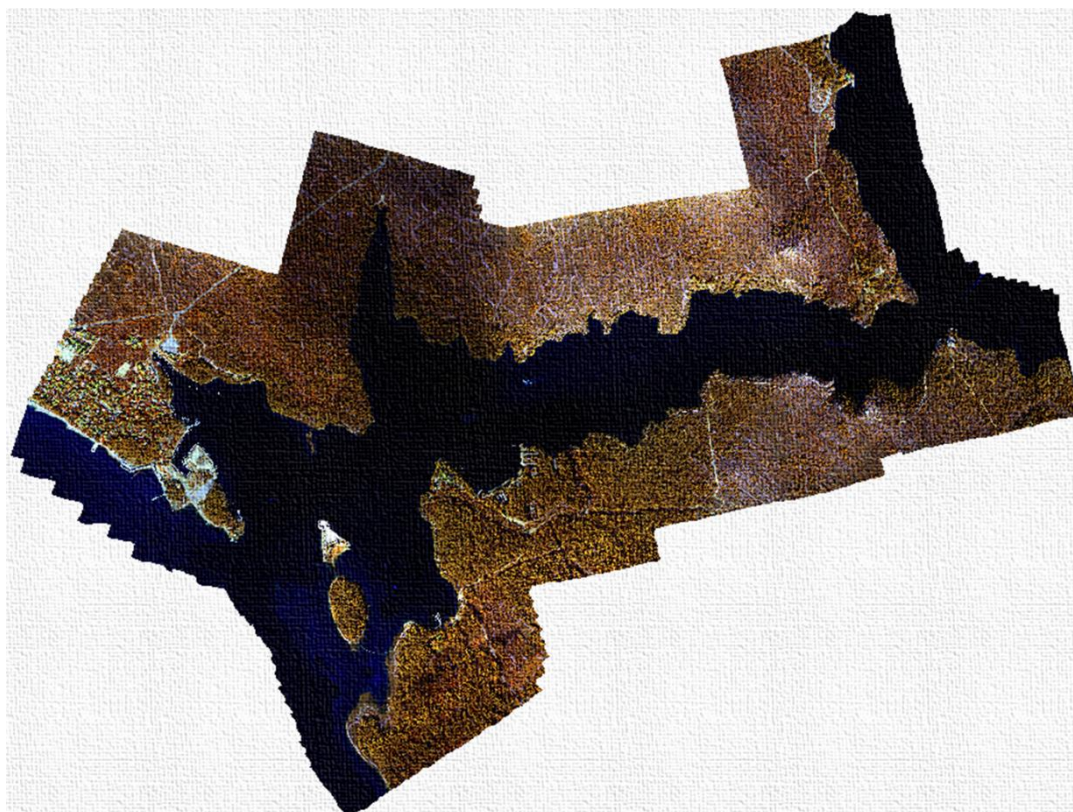


Slika III-30. Usporedba specifičnog prostora na (1) i (2) termalnom modelu (c)



Slika III-31. *Usporedba specifičnog prostora na (1) i (2) termalnom modelu (c)*

IV.AERO SNIMANJE KANAA SV.ANTE MULTISPEKTRALNOM KAMEROM



Aero snimanje kanala Sv. Ante multispektralnom kamerom (do 5 kanala)

- a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm
- b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno-orijentiranih analiza
- c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

Aero recording of the St. Anthony's Channel with multispectral camera (up to 5 channels)

Abstract

The report describes in detail the performance of recording with a multispectral camera, as well as the recording of the St. Anthony's Channel and its surroundings at a spatial resolution of 5m. In doing so, a modern drone was used, with the help of which several thousand photographs were collected. In addition, sampling and mapping of land cover was performed using supervised classification and object-oriented analyzes. From the generated land cover model, descriptive statistics of the share of land cover classes within the studied area were calculated. The area of each class and its share in the total area of the study area were calculated. Of the vegetation cover, the most dominant are, as expected, the pine forest classes and low dry vegetation.

Sažetak

U izvješću je detaljno opisano izvođenje snimanja multispektralnom kamerom, te izrada snimka kanala Sv. Ante i njegove okolice pri prostornoj rezoluciji od 5m. Pri tome je korištena suvremena bespilotna letjelica uz pomoć koje je prikupljeno nekoliko tisuća fotografija. Uz to obavljeno je uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno-orijentiranih analiza. Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora. Izračunata je površina svake klase te njezin udjel u ukupnoj površini istraživanog područja. Od vegetacijskog pokrova najdominantnije su očekivano klase Borove šume, te niska suha vegetacija.

a) Izrada multispektralnog snimka prostorne rezolucije do 5 cm

Aerofotogrametrijsko snimanje multispektralnom kamerom kanala Sv. Ante izvršeno je u listopadu, 2020. godine. U procesu prikupljanja podataka korištena je bespilotna letjelica (UAV) *DJI Matrice Pro 600* (Slika IV-1 i IV-2. A-D) i *RTK-GPS Stonex S10*. *Matrice 600 Pro* je veća bespilotna letjelica kineske tvrtke *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.* (DJI) sa sjedištem u *Shenzhen, Guangdongu*. Na njega je montirana multispektralna kamera *Red Edge-Mica SenseMX* (Slika IV-1-2-3-4).



Slika IV-1. a) *DJI Matrice 600 Pro*, b) *Stonex S10* i c) *Red-Edge Mica SenseMX*



Slika IV-2. A) Matrice 600 Pro - prvo stajalište



Slika IV-3. A) Matrice 600 Pro - prvo stajalište (2)



Slika IV-4. A) Matrice 600 Pro - prvo stajalište (3)

UAV *Matrice 600 Pro* je opremljen autopilotom koji neprekidno analizira podatke inercijalne mjerne jedinice (*Inertial Measurement Unit*), uključujući podatke integriranog GPS-a. GPS i inercijalni sustavi određuju trenutnu prostornu poziciju i kutne momente uređaja. Dobivena razlučivost terena rezultat je odabira visine leta te obilježja kamere (npr. visina 120 m = 8 cm)¹⁶.

¹⁶ Prvi visini leta od 120 metara dobije se multispektralni snimak prostorne rezolucije od 8 cm

Snimke se ne prenose u realnom vremenu, već se pohranjuju na SD memorijsku karticu. U Tablici IV-1 navedene su karakteristike multispektralne kamere *MicaSense RedEdgeMX*.

Tablica IV-1. Obilježja *MicaSense RedEdgeMX* multispektralne kamere

Obilježja	
Težina	231.9 g
Dimenzije	8.7cm x 5.9cm x 4.54cm
Spektralni kanali	Blue, green, red, red edge, near-IR (global shutter, narrowband)
Valna duljina (nm)	Blue (475 nm center, 20 nm bandwidth), green (560 nm center, 20 nm bandwidth), red (668 nm center, 10 nm bandwidth), red edge (717 nm center, 10 nm bandwidth), near-IR (840 nm center, 40 nm bandwidth)
Ground Samplig Distance (GSD)	8 cm per pixel (per band) at 120 m (~400 ft) AGL
Stopa snimanja	1 capture per second (all bands), 12-bit RAW
FoV (Field of View)	47.2° HFOV

MicaSense Red Edge je povezana na *Downwelling Light Sensor* (DLS2) (Slika IV-5). To je napredni senzor upadnog svjetla koji je izravno povezan na *MicaSense* senzore. Tijekom izvođenja misije DLS2 mjeri okolnu svjetlost i kut sunca za svaki od pet kanala kamere te sprema ove informacije u metapodacima (meta data) TIFF snimaka. Te informacije zatim mogu koristiti specijalizirani alati za obradu (poput *Pix4Dmapper*) za ispravljanje globalnih promjena osvjetljenja usred leta, poput onih koje se mogu dogoditi zbog oblaka koji prekrivaju sunce. Pored toga, DLS2 pruža GPS podatke *MicaSense* senzoru ako GPS podaci nisu osigurani iz vanjskog izvora. Ako se koristi alternativni GPS izvor, GPS prijamnik će biti uključen pri jako maloj snazi (uBlox C/A code GPS @ 5 Hz). DLS2 bi uvijek trebao biti najviši objekt na UAV-u kako bi se izbjegle sjene ili refleksije.

Sadrži integrirani GPS senzor koji se može koristiti za geografsko označavanje (geokodiranje) slika *MicaSense* senzora ako se GPS signali senzoru se dostavljaju na drugi način. Modul treba instalirati tamo gdje će imati jasan pogled u nebo, daleko od bilo kojeg uređaja koji bi ga mogli ometati (poput podatkovne veze ili video odašiljača).



Slika IV-5. *DLS2 senzor*

Cilj terenskog istraživanja provedenog u listopadu 2020. bio je snimiti šire područje kanala Sv. Ante multispektralnom kamerom *RedEdge-MX - MicaSense*. Tjedan dana prije planiranja terenskog rada, izv. prof. dr sc. Ante Šiljeg i dr. sc. Ivan Marić otišli su na navedeno područje s ciljem upoznavanja morfometrije terena te što učinkovitijeg planiranja misije. Provedenim terenskim istraživanjem definirano je nekoliko primjerenih točaka stajališta (Slika IV-6).



Slika IV-6. *Potencijalna stajališta definirana terenskim istraživanjem*

Prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove

Aerofotogrametrijsko snimanje i obrada podataka izvršena je u nekoliko koraka. Prvi korak se odnosio na označavanje i prikupljanje točaka lokalne geodetske osnove. Orijentacijske točke (OT) su prikupljene s ciljem postizanja bolje apsolutne orijentacije modela. OT se mogu identificirati na snimkama ili rekonstruiranom modelu, a imaju poznate (x, y i z) koordinate u specifičnom koordinatnom sustavu. Koriste se za povezivanje bloka s referentnim koordinatnim sustavom i izjednačenje bloka aerotriangulacije. Označeno je i prikupljeno ukupno 12 točaka lokalne geodetske osnove (Slika IV-7).

Tablica IV-2. Koordinate prikupljenih orijentacijskih točaka

LABEL	X	Y	Z
OT1	450154.510	4843246.755	19.094
OT2	449844.053	4843041.581	60.569
OT3	449626.034	4843181.451	38.646
OT4	449160.667	4843005.161	8.342
OT5	448646.942	4842942.687	1.602
OT6	448482.143	4842381.865	3.861
OT7	448463.285	4842375.916	2.409
OT8	448157.690	4843810.826	4.080
OT9	447427.232	4843402.679	4.609
OT10	447483.280	4842779.120	0.641
OT11	449578.830	4843525.395	20.316
OT12	449805.643	4844207.712	0.806

Točke su prikupljene na različitim nadmorskim visinama (Tablica IV-2), uvažavajući pravila prostornog rasporeda postavljanja orijentacijskih točaka u fotogrametriji (distribucija kroz cijeli plan snimanja) (Slika IV-7). Plan postavljanja točaka je napravljen u softveru *ArcMap 10.1* uvažavajući morfometriju terena.



Slika IV-7. Distribucija prikupljenih orijentacijskih točaka

Ukupno je prikupljeno 12 orijentacijskih točaka (OT1-12) koje će poslužiti za postizanje bolje apsolutne orijentacije modela.

Prilikom označavanja OT-a vođeno je računa da su oznake dovoljno velike, korištena je kontrastna (crvena) boja u odnosu na lokalni teren te se pazilo na otvorenost horizonta iznad oznaka kako bi se olakšalo dodavanje markera (Slika IV-8-9-10). Orijetacijske točke prikupljene za potrebe generiranja multispektralnog snimka korištene su za aerofotogrametrijsko snimanje s običnom (Zemuse X7) RGB kamerom. Označene geodetske točke su prikupljene koristeći *GNSS RTK Stonex S10*. Točke su prikupljanje u službenom projekcijskom koordinatnom referentnom sustavu poprečne Mercatorove projekcije (HTRS96/TM) (Tablica IV-2).



Slika IV-8. Orijentacijska točka na Jadriji (1)



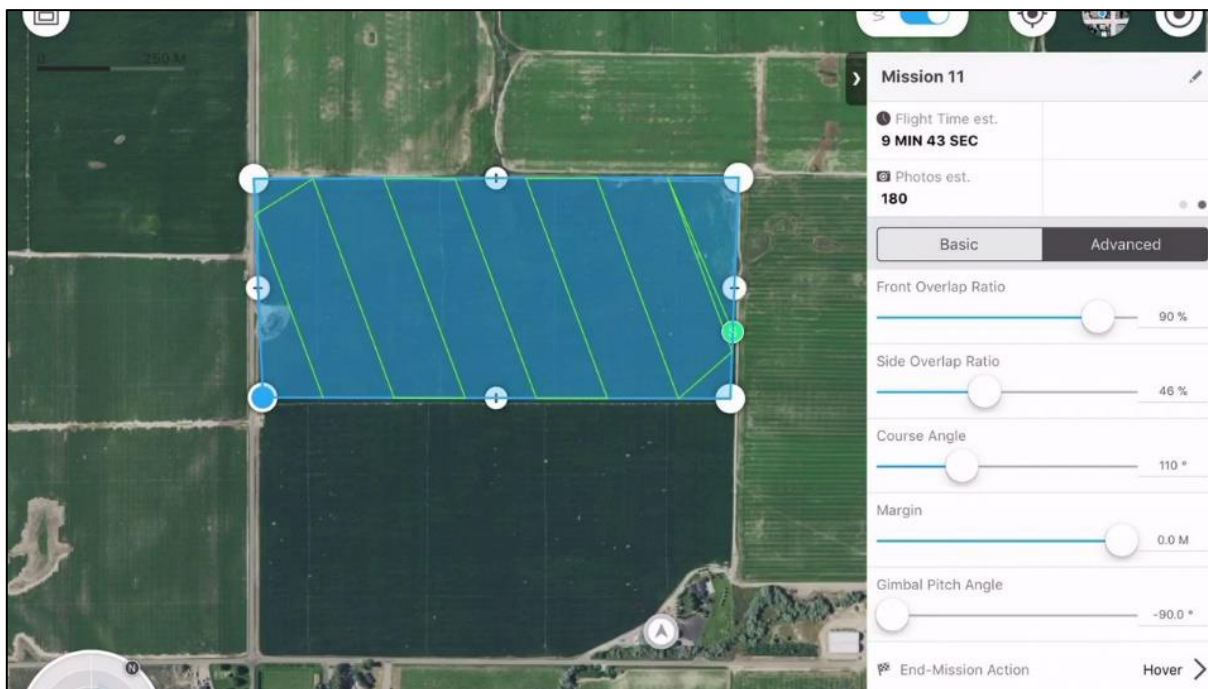
Slika IV-9. Orijentacijska točka na Jadriji (2)



Slika IV-10. Prikupljanje orijentacijske točke u blizini Vidikovca

Izrada plana snimanja

Izrada optimalnog plana snimanja uključivala je odabir vrsta misija s obzirom na morfologiju terena, objekt istraživanja te distribuciju OT-a. Izrada misija UAV-om je izvršena u softveru *DJI GS PRO* (Slika IV-11). Kanal Sv. Ante snimljen je koristeći jednu vrstu misija: *Single Grid Mission* s prednjim i bočnim preklapanjem od 80%.



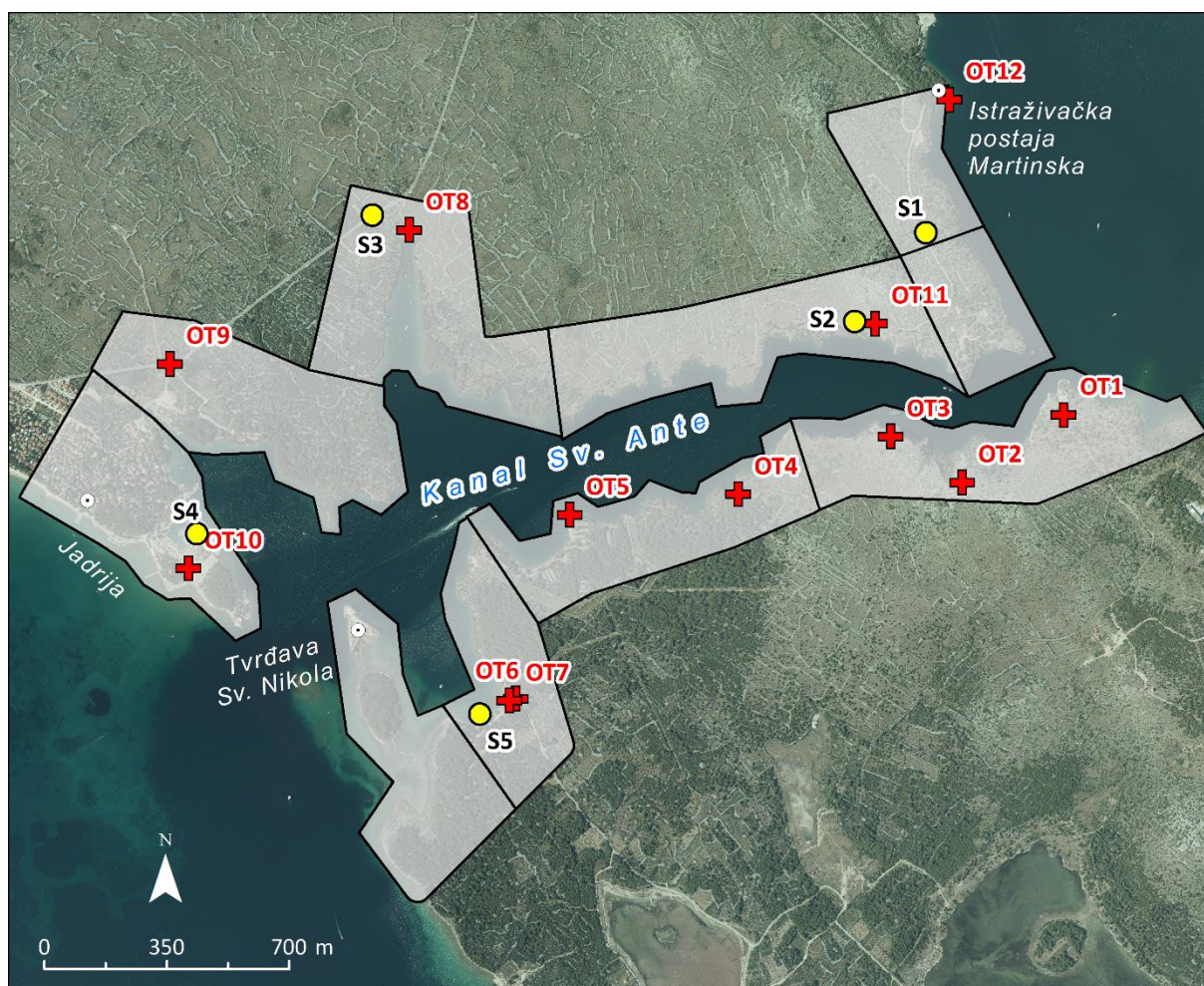
Slika IV-11. Primjer izgleda sučelja DJI GS Pro aplikacije

Misije su obuhvaćale širi prostor kanala Sv. Ante (Slika IV-12). S obzirom na obuhvatnost terena, te željenu prostornu rezoluciju koja se u ovoj projektnoj aktivnosti željela postići (GSD = 5 cm) prosječna visina leta odnosno snimanja bila je oko 75 metara (Slika IV-13).

Calculator		
Sw	4,8	= the sensor width of the camera (millimeters)
FR	5,5	= the focal length of the camera (millimeters)
H	75	= the flight height (meters)
imW	1280	= the image width (pixels)
imH	960	= the image height (pixels)
GSD	5,11	= Ground Sampling Distance (centimeters/pixel)
Dw	65	= width of single image footprint on the ground (meters)
DH	49	= height of single image footprint on the ground (meters)

Slika IV-13. Izračun GSD-a u Pix4D kalkulatoru

Prostor snimanja je podijeljen u 10 misija (Slika IV-12), a predviđeno trajanje svake misije bilo oko 22 minute. Nakon izvođenja jedne misije, UAV bi se vratio na točku ishodišta (*home point*). Set baterija bi mu bio gotovo u potpunosti potrošen. Potom bi mu se istrošeni set baterija stavio puniti, a novi set postavio u UAV. S obzirom na dugotrajnost procesa snimanja, broj misija, te vrijeme punjenja baterija, u jednom danu uspješno je izvršeno snimanje cijelog šireg područja kanala Sv. Ante.



Slika IV-12. *Isplanirane misije te predviđena stajališta za dizanje UAV-a*

Izvođenje multispektralnog snimanja

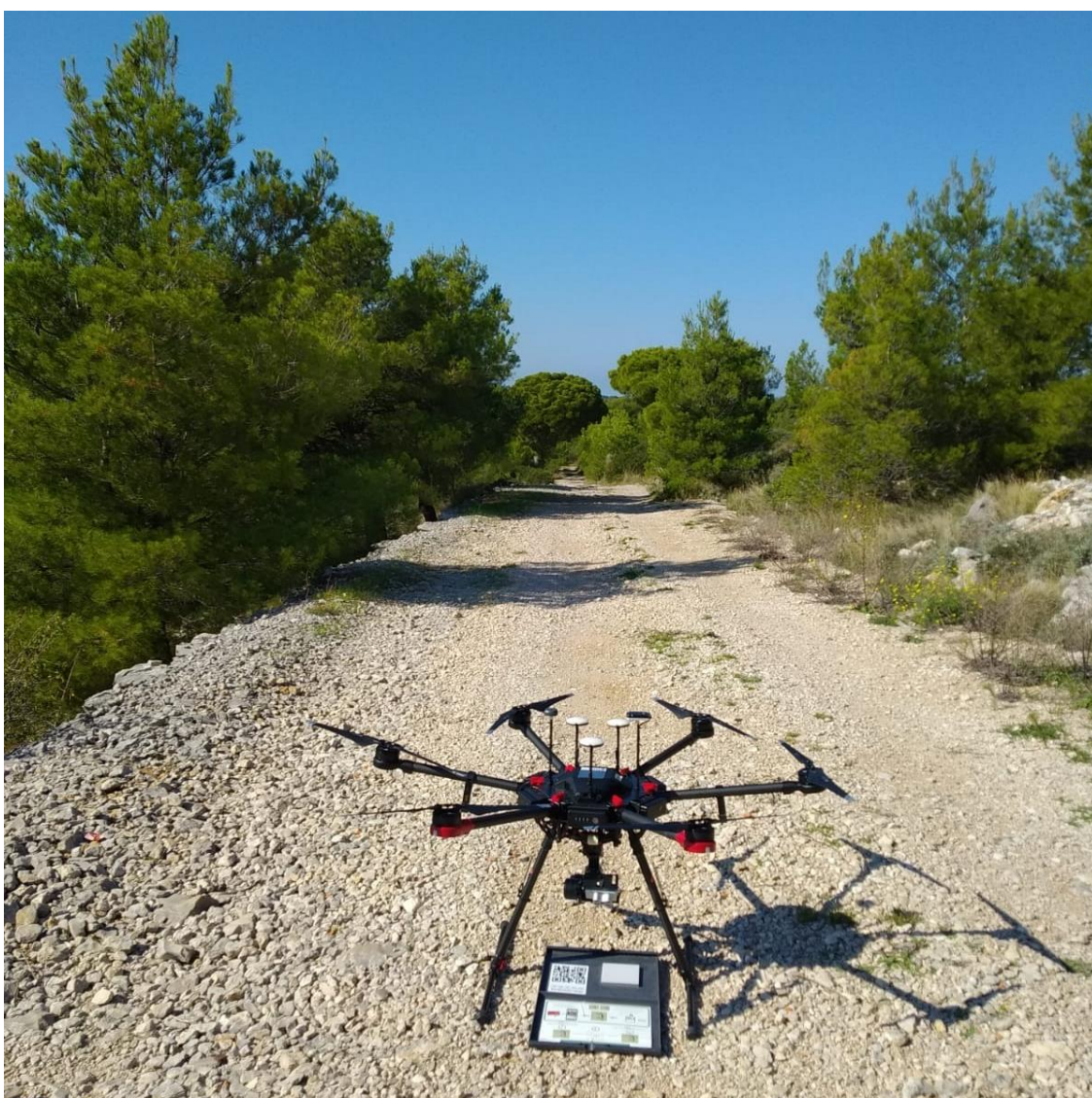
Nakon prikupljanja točaka lokalne geodetske osnove (OT1-OT12) otišli smo na prvu lokaciju predviđenu za dizanje bespilotne letjelice. Potom je izvršena je radiometrijska kalibracija multispektralne kamere, kalibracija kompasa i IMU sustava. Kalibracija *Mica Sense RedEdge MX* kamere izvršena je pomoću refleksijskog kalibracijskog panela (CRP¹⁷) (Slika IV-14).



Slika IV-14. Izgled refleksijskog kalibracijskog panela te upute za kalibraciju

¹⁷ Calibrated Reflectance Panel

Radiometrijska kalibracija pretvara sirove vrijednosti piksela slike u apsolutne vrijednosti spektralnog zračenja. Korištenje spomenutog panela omogućuje precizniju kompenzaciju za upadne svjetlosne uvjete i generiranje kvalitetnijih podataka. CRP ima poznate vrijednosti refleksije u vidljivom i spektru infracrvenog svjetla. Prema primjerima najbolje prakse CRP slike trebaju se snimiti prije i nakon svakog leta (Slika IV-16) kako bi se osigurao precizan prikaz svjetlosnih uvjeta tijekom leta. Tako je napravljeno u slučaju multispektralnog snimanja kanala Sv. Ante (Slika IV-15).



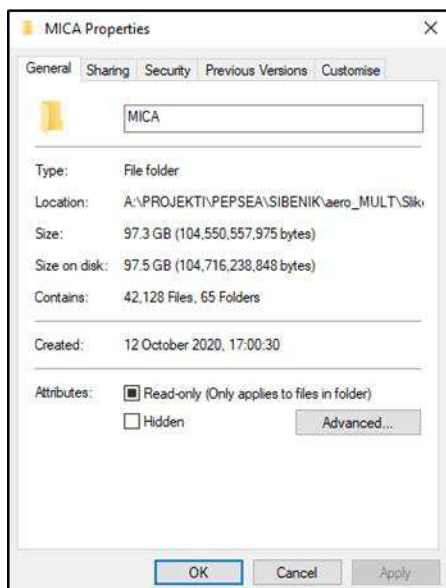
Slika IV-15. Radiometrijska kalibracija kamere prije izvođenja prve misije



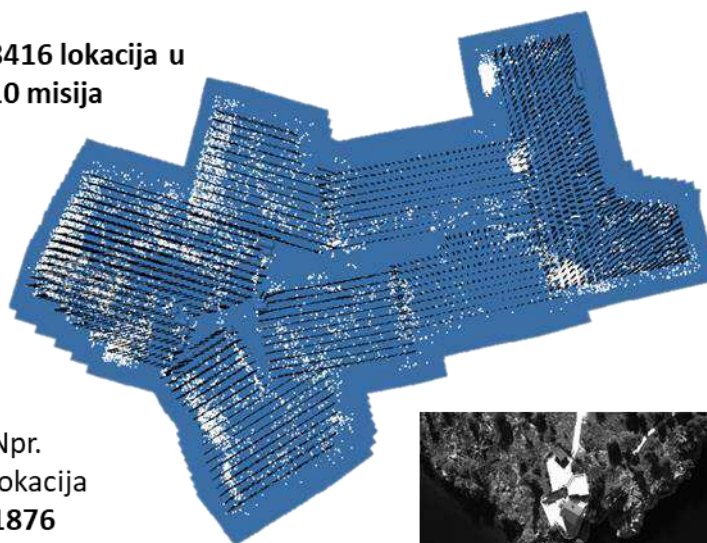
Slika IV-16. Slike kalibracijskog panela A) prije i B) nakon izvođenja misije

Proces kalibracije je izvršen na način da je panel spušten na ravnu podlogu. Potom je putem Wi-Fi mreže kamera spojena s konfiguracijskom stranicom. Posebna pozornost je obraćena na to da panel ne bude na sjeni prilikom snimanja kalibracijske fotografije. Ako je fotografija kalibracijskog panela uspješno snimljena senzori s unutarnjim zvučnicima reproducirat će zvuk dok senzor ne prepozna ploču refleksije MicaSense i QR kod. Potrebno je držati senzor (UAV + senzor) najmanje 1 metar iznad MicaSense kalibrirane ploče refleksije. Bitno je pokušati centrirati ploču i QR kod u vidnom polju. Nakon reprodukcije zvuka bljeska plavo LED svjetlo koje pokazuje da je kalibracijski panel snimljen. Ako senzor ne prepozna ploču, nastavit će proizvoditi zvuk sve dok korisnik ne pritisne gumb "Stop". Nakon kalibracije UAV je spojen s tabletom i aplikacijom *DJI GS Pro* te je pokrenuta svaka od isplaniranih misija.

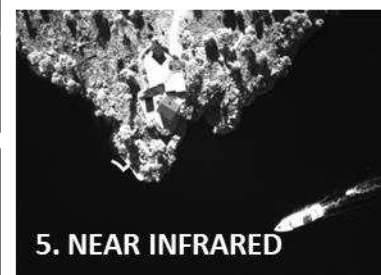
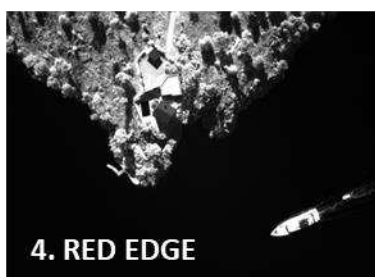
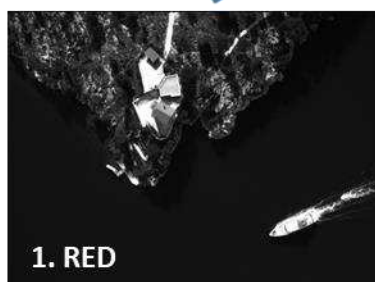
U isplaniranih 10 misija ukupno je prikupljeno 97,3 GB fotografija. U svim misija bilo je ukupno 8416 lokacija snimanja. Iz toga proizlazi da je ukupno snimljeno ($8416 * 5 = 42080$ fotografija). Naime, na svakoj lokaciji snimanja prikupljeno je 5 fotografija za svaki kanal (*red, green, blue, red-edge, near infra red*) koji multispektralna kamera snima (Slika IV-17). Iz izvješća generiranog u Agisoft Metashapeu utvrđeno je da je cijeli prostor snimanja kanala Sv. Ante vidljiv na više od 9 fotografija (Slika IV-18).



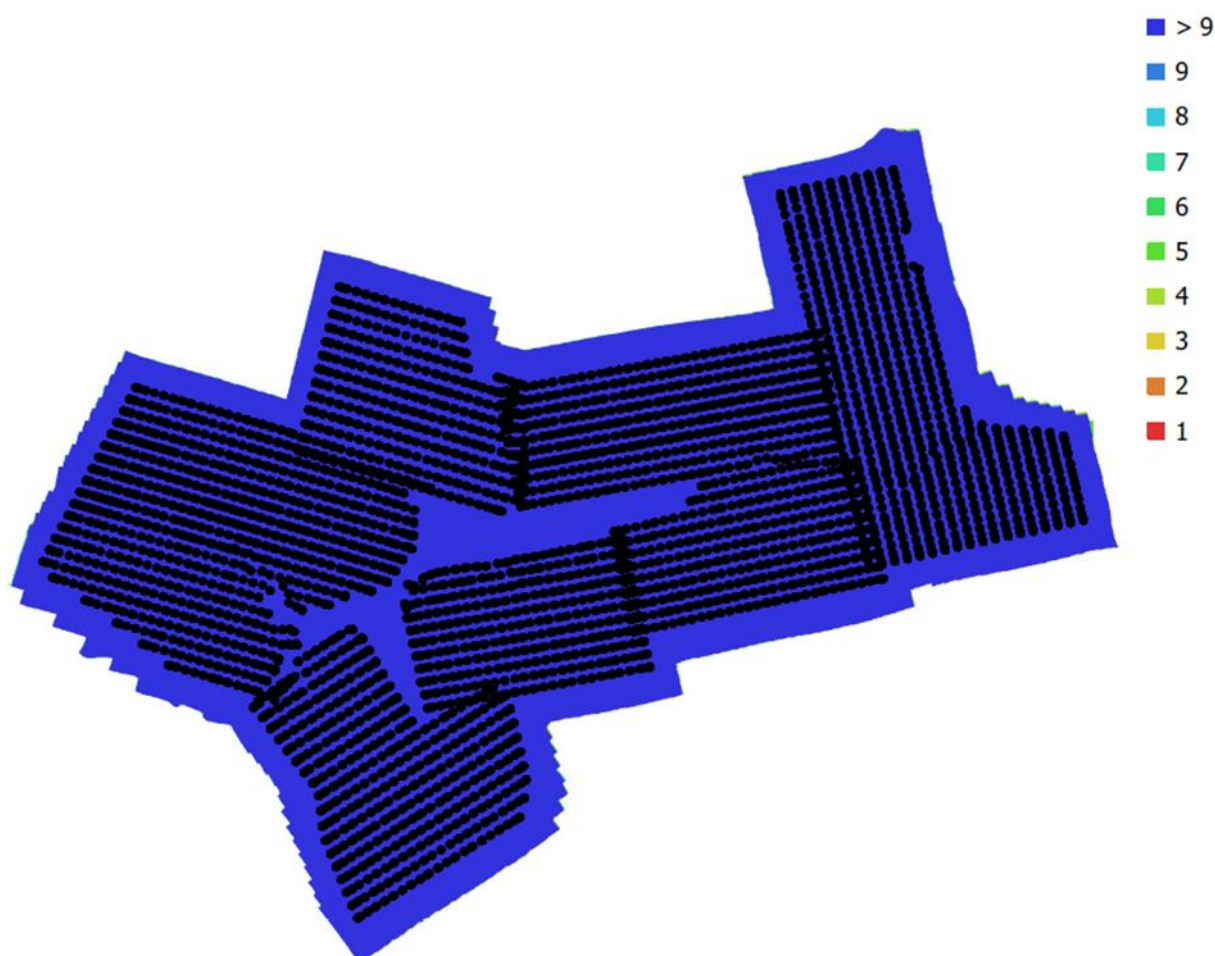
**8416 lokacija u
10 misija**



**Npr.
lokacija
1876**



Slika IV-17. Ukupan broj snimljenih fotografija te primjer jedne lokacije snimanja



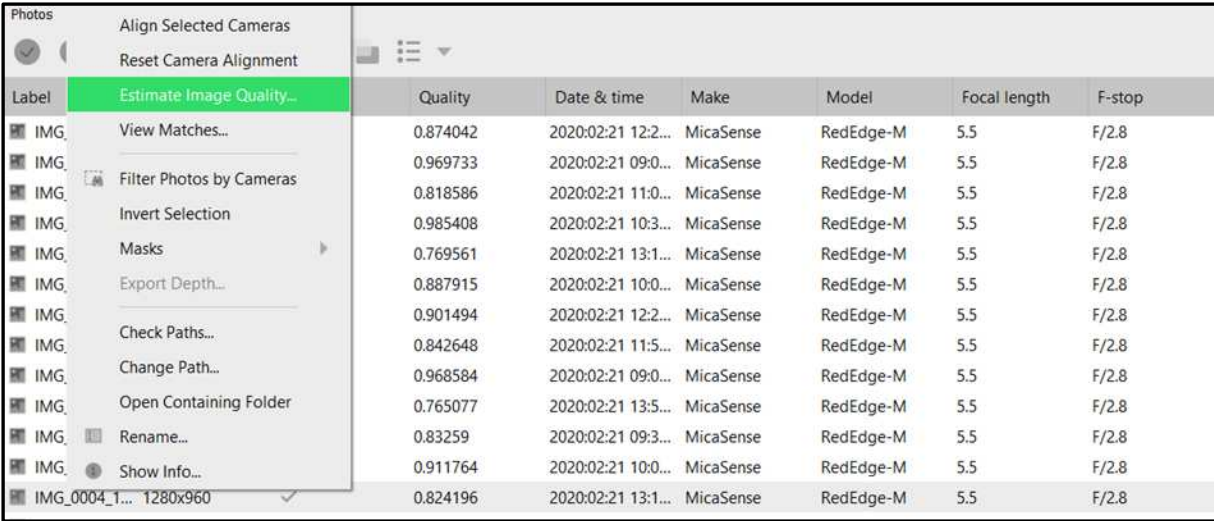
Slika IV-18. Lokacija te broj preklapanja fotografija

Obrada snimaka - izrada multispektralnog snimka

U procesu obrade snimki korišten je računalni program *Agisoft Metashape Professional 1.5.1* specijaliziran SfM-MVS za fotogrametriju. To je napredni softver za 3D modeliranje koji kroz obradu digitalnih fotografija stvara visokokvalitetne 3D prostorne podatke. Primjenjuje metodu SfM koja omogućuje da se tehnikom prilagođavanja snopova (BA) istodobno odredi orijentacija i položaj kamere u prostoru (vanjski orijentacijski parametri) kao i 3D koordinate točaka objekata za veliki broj snimki. Uz vanjske, istodobno se određuju i unutarnji orijentacijski parametri kamere.

Povezivanje snimki i rekonstrukcija 3D modela u programu su potpuno automatizirani. Proces obrade snimki i generiranja izlaznih modela (digitalnog modela površina (DSM), digitalnog ortofota (DOF), oblaka točaka i 3D modela) izvršen je u nekoliko koraka.

Prvi korak odnosio se na ubacivanje svih fotografija u kreirani projekt Kanal Sv. Ante.psx te provjeru uvezenih podataka. Potom je izvršena provjera prikupljenih snimaka kroz automatsku procjenu kvalitete *Image quality* (Slika IV-19). Zamućene i loše fokusirane snimke mogu negativno utjecati na rezultate spajanja snimaka (*align*). Prema službenim uputama *Agisoft Metashape* preporuka je da granična vrijednost kvalitete bude 0,5. Slijedeće primjere dobre prakse navedene vrijednosti je uzeta u ovoj analizi.



Label	Quality	Date & time	Make	Model	Focal length	F-stop
IMG_0004_1... 1280x960	0.824196	2020:02:21 13:1...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_2...	0.874042	2020:02:21 12:2...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_3...	0.969733	2020:02:21 09:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_4...	0.818586	2020:02:21 11:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_5...	0.985408	2020:02:21 10:3...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_6...	0.769561	2020:02:21 13:1...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_7...	0.887915	2020:02:21 10:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_8...	0.901494	2020:02:21 12:2...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_9...	0.842648	2020:02:21 11:5...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_10...	0.968584	2020:02:21 09:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_11...	0.765077	2020:02:21 13:5...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_12...	0.83259	2020:02:21 09:3...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8
IMG_0004_13...	0.911764	2020:02:21 10:0...	MicaSense	RedEdge-M	5.5	F/2.8

Slika IV-19. Procjena kvalitete prikupljenih fotografija u Agisoft Metashapeu

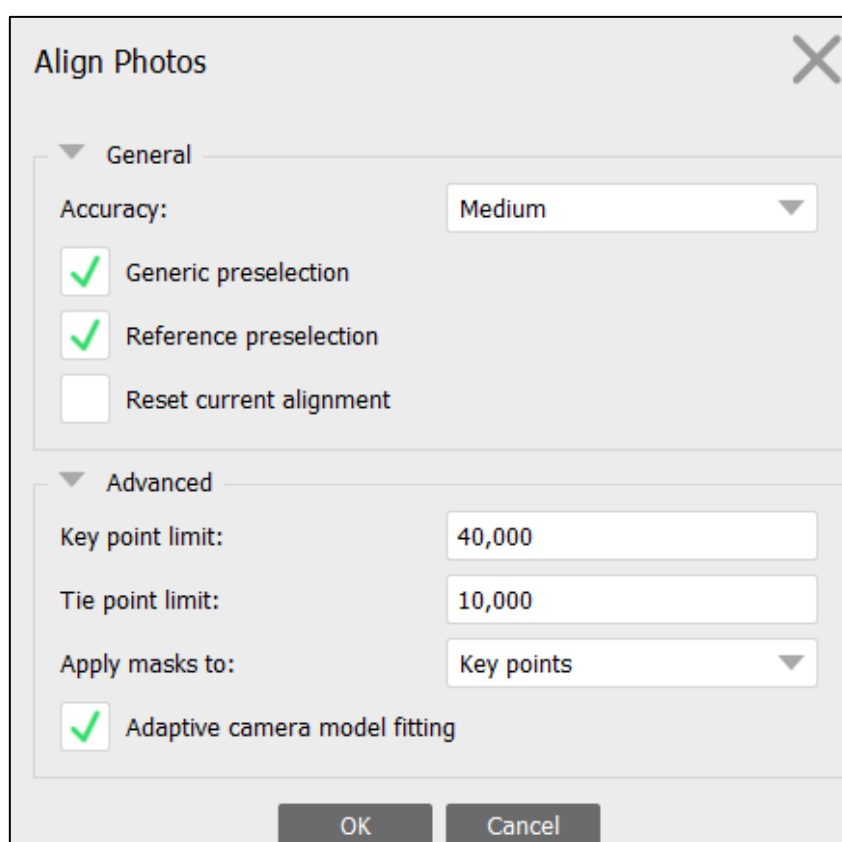
Nakon detekcije fotografija koje imaju vrijednost manju od 0,5 odabrana je opcija *Disable camera*.

Pri tome je vođeno računa da se ne brišu uzastopne snimke, npr. ako tri snimke za redom imaju kvalitetu manju od 0.5, trebalo bi izbrisati prvu i treću snimku, a drugu ostaviti jer je važnije da imamo izrađen multispektralni snimak za cijelo područje kanal Sv. Ante na osnovi svih snimki od toga da su sve snimke oštre.

Nakon procjene kvalitete fotografija izvršeno je ručno brisanje snimaka u kojima je očigledno došlo do pogreške. Pogreška se u ovom slučaju odnosi na fotografije koje su snimljene prije polijetanja ili tijekom dizanja drona. Potom su isključeni (maskirani) pomični i nepotrebni dijelovi (npr. nebo, ljudi u pokretu)

na snimkama koje prilikom izvođenja rijetkog i gustog oblaka točaka mogu otežati povezivanje snimki. Maskirana područja algoritam ne koristi prilikom procesa fototriangulacije.

Prije inicijalne izrade modela izvršena je orijentacija i spajanje snimki (*align*). Zbog velike količine snimaka align je napravljen prema sljedećim parametrima *Accuracy* je postavljen na *Medium*, odabrane su opcije *Generic* i *Reference preselection*, *Key point limit* je postavljen na 40 000, a tie point limit na 10 000 (Slika IV-20). Cijeli proces spajanja je trajao nekoliko sati.



Slika IV-20. Primjer postavljenih parametara u procesu spajanja fotografija

Nakon inicijalnog povezivanja (Slika IV-21) izvršeno je resetiranje *aligna* za netočno pozicionirane snimke (snimke bez *aligna*). U prozoru *Photos* označene su sve nepovezane fotografije → desni klik → *Reset Camera Alignment*. Sljedeći korak se odnosio na ručno brisanje veznih točaka koje sugeriraju na grubu pogrešku. Spomenute vezne točke nastale su kao pogreška pri alignu snimki. U glavnom prozoru Metashapea pomoću jednog od alata za označavanje označene su grube pogreške točaka nastalih pri

alignu snimke te su izbrisane. Potom je pomoću seta alata *Gradual selection* izvršena reoptimizacija snimki kroz poluautomatsko brisanje veznih točaka prema zadanim parametrima.

U *Gradual selectionu* korištena su dva parametra: reprojekcijska pogreška (*Reprojection error*) i rekonstrukcijska nesigurnost (*Reconstruction uncertainty*). Od ukupnog broja veznih točaka označeno je i izbrisano njih 10% koji imaju najveći reprojekciju pogrešku. Nakon brisanja izvršena je optimizacija kamera (*Optimize Cameras*) nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametara (f , c_x , c_y , k_1 , k_2 ...itd). Potom je od preostalog broja veznih točaka označeno i izbrisano njih 10% koji imaju najveću nesigurnost rekonstrukcije. Opet je nakon brisanja izvršena optimizacija kamera nakon koje je došlo do ponovno procjene intrinzičnih kalibracijskih parametar.







Tie points =
6 288 647



Slika IV-21. Preostale vezne točke nakon izvršene gradualne selekcije

Dakle, softver je unutarnje kalibracijske parametre kamere nakon svake optimizacije ažurirao (Slika IV-22).

Očitani parametri kalibracije su u softveru uzeti kao početni elementi za izračun elemenata orijentacije u procesu fototriangulacije. Inicijalno je generirano 15 182 962 veznih točaka, međutim kroz ručno brisanje grubih pogrešaka i primjenu alata gradualne selekcije u konačnici je ostalo njih 6 288 647 s RMS reprojection error od 0.592681 pix.

Type:	Precalibrated		A		  	
f:	1449.26959					
cx:	3.69064	b1:	0			
cy:	2.85602	b2:	0			
k1:	-0.0991088	p1:	0			
k2:	0	p2:	0			
k3:	0	p3:	0			
k4:	0	p4:	0			
  						
f:	1458.68993			B		
cx:	5.34948	b1:	0.254383			
cy:	-1.80693	b2:	-0.431185			
k1:	-0.0950163	p1:	0.000205094			
k2:	0.15546	p2:	0.00044588			
k3:	-0.0918284	p3:	0.835817			
k4:	0.139895	p4:	0.294733			

Slika IV-22. A) Inicijalni i B) procijenjeni kalibracijski parametri nakon iterativne optimizacije kamera

Nakon izgradnje rijetkog oblaka (*sparse cloud*) točaka sljedeći korak se odnosio na izvođenje i vizualizaciju gustog oblaka (*dense cloud*) točaka. Na osnovi procijenjenih lokacija kamera izračunava se dubina za svaku kameru.

Tim procesom izvodi se oblak točaka koji može biti jednake gustoće ili čak gušći od oblaka točaka dobivenog LiDAR-om. Inicijalno je generiran gusti oblak točaka po parametrom kvalitete *Low*. Razlog tome je taj jer je spomenuti model poslužio kao osnova za dodavanje orijentacijskih točaka. Iz izvedenog gustog oblaka točaka potom je rekonstruirana 3D mreža poligona kao prikaz površine objekta.

Ona je izvedena primjenom algoritamske metode *Height field*. Rezultat rekonstrukcije geometrije, odnosno izrade mreže poligona u daljnjem procesu je teksturiran. Teksturirana mreža poligona poslužila je kao osnova za dodavanje orijentacijskih točaka prikupljenih na terenu s RTK GNSS Stonex S10 (Slika IV-23).



Slika IV-23. *Primjer pozicioniranja OTX na odabranom snimku*

Nakon što su dodane i pozicionirane sve orijentacijske točke na inicijalno izgrađenom modelu izvršen je *Update* te ponovna optimizacija kamere. Nakon dodavanja orijentacijskih točaka izračunata je točnost izvedenih modela (Tablica IV-3). Korišteni su sljedeći statistički pokazatelji: srednja apsolutna pogreška

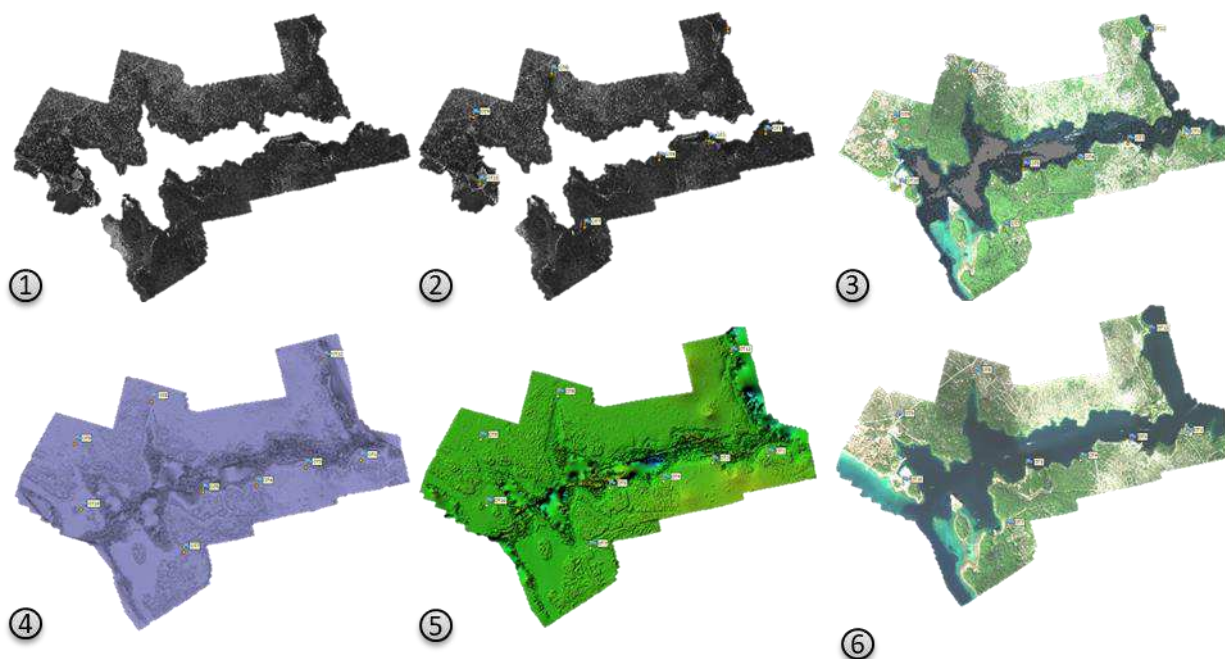
(*mean absolute error* – MAE) te srednja kvadratna pogreška (*root mean square error* – RMSE). RMSE se uobičajeno navodi i koristi se kao metrika provjere kvalitete površine modela, dok MAE pruža prirodnu i usporedivu mjeru performansi modela i indicaciju ne usmjerenih visinskih pogrešaka. Kvaliteta modela (točnost i preciznost) uvjetovana je širokim spektrom čimbenika koji uključuju: odabrane postavke snimanje, površinu snimanog područja, kalibraciju kamere, performanse podudaranja fotografija, teksturu površine snimanog objekta, uvjete osvjetljenja te najvažnijih obilježja korištenih orijentacijskih točaka (ovisno o RTK GPS-u).

Tablica IV-3. Izračun točnosti modela

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total error (m)	Image (pix)
OT1	-2.42	1.91	0.61	3.15	0.09
OT3	4.63	-0.91	-0.50	4.74	0.15
OT4	-1.61	-6.35	0.26	6.56	0.10
OT5	-4.80	4.92	-0.27	6.88	0.10
OT7	3.51	0.47	0.06	3.54	0.12
OT8	-0.17	0.25	0.20	0.36	0.07
OT9	0.26	-0.83	-0.02	0.87	0.10
OT10	-0.20	0.41	-0.09	0.46	0.06
OT12	0.74	0.21	-0.23	0.80	0.06
RMSE	2.71	2.79	0.31	3.90	0.10
MEA	2.037	1.806	0.249	3.039	0.095

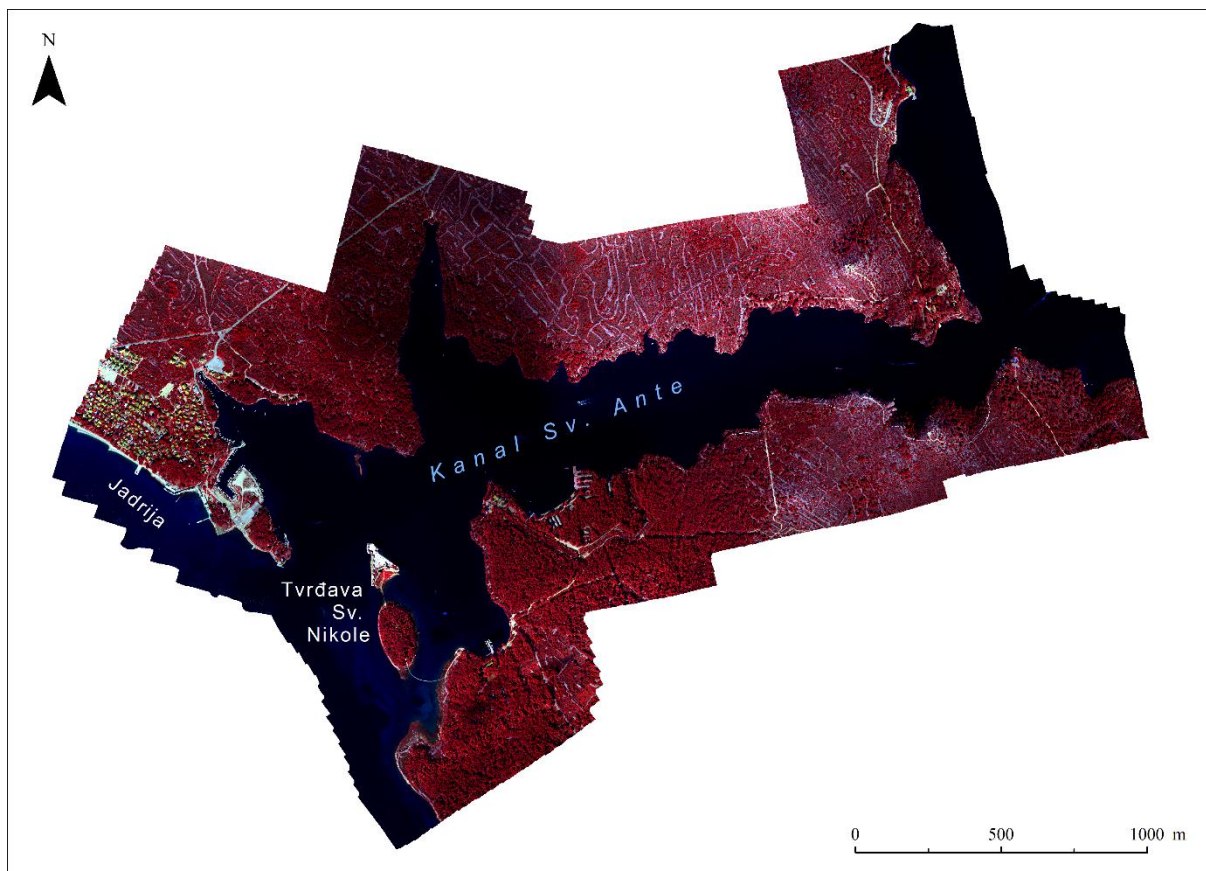
RMSE orijentacijskih točaka za X os iznosi 2,71 cm, za Y os 2,79 cm, a za Z os 0,310 cm. Ukupna RMSE orijentacijskih točaka iznosi 3,90 m. RMSE u koordinatnom sustavu slike iznosi 0,101 pix. Ukupna pogreška pomaka odgovara vrijednostima koje su postignute u sličnim studijama i radovima, a orijentacijske točke se nalaze unutar oštrog prostora slike (DoF). Nakon preciznijeg apsolutnog orijentiranja modela te optimizacije veznih točaka generiran je gusti oblak točaka (dense cloud).

Odabrani su sljedeći parametri: *Quality: High* i *Depth filtering: Aggressive*. Generirani oblak točaka se sastoji od nešto više od 16 813 344 mil. točaka. Iz gustog oblaka točaka generiran je poligonski model kanala Sv. Ante. Odabrane su sljedeće postavke: *Source data* (Dense cloud), *Surface type* (Height), *Face count* (High). Generirani poligonski model jezera je u konačnici teksturiran (Slika IV-24).

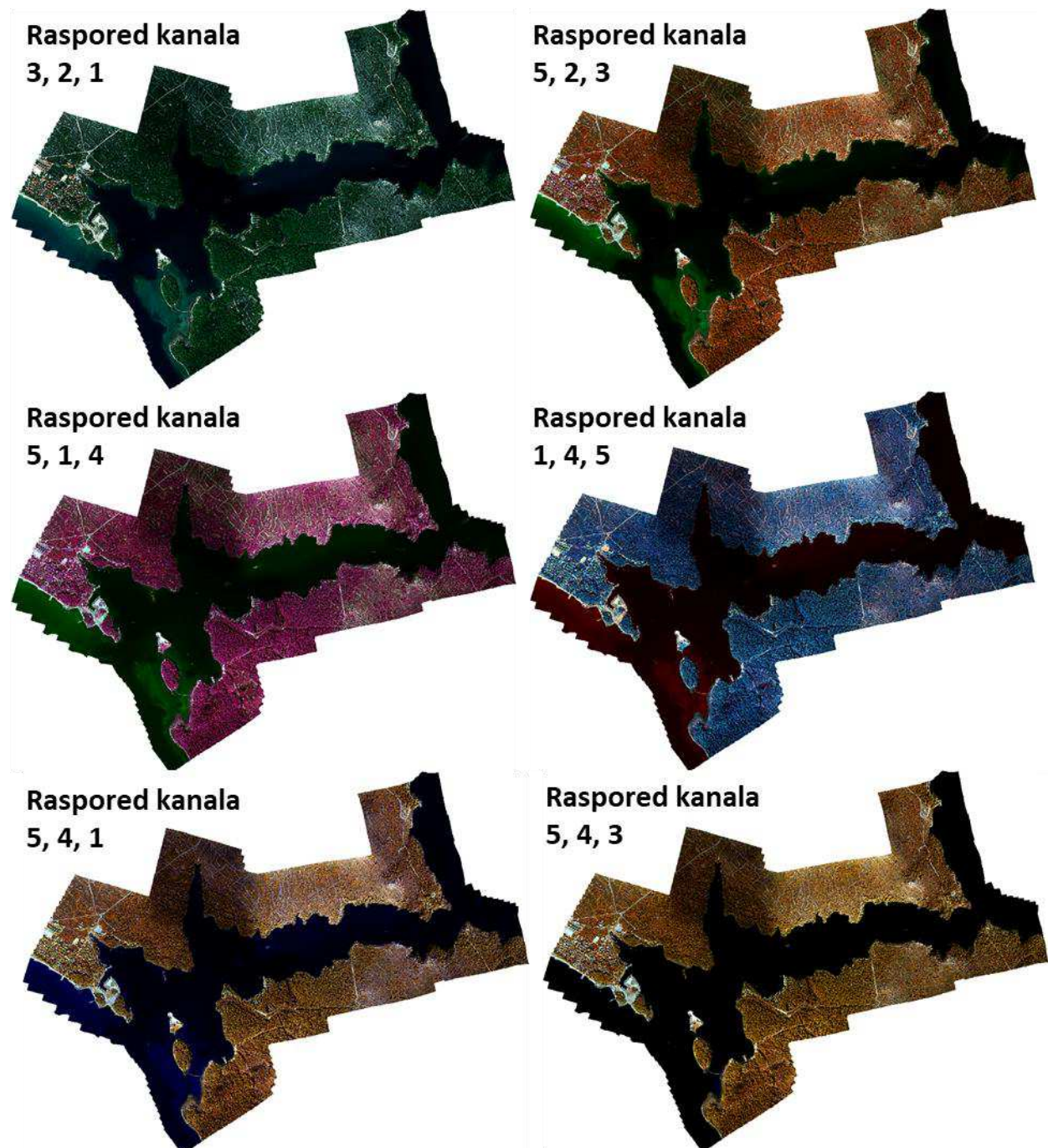


Slika IV-24. Cijeli proces izvođenja multispektralnog snimka kanala Sv. Ante: 1) vezne točke, 2) dodavanje orijentacijskih točaka, 3) gusti oblak točaka, 4) izgradnja poligonske mreže, 5) generiranje DEM-a te 6) generiranje multispektralnog snimka

U konačnici je iz aerofotogrametrijskog snimanja provedenog u listopad, 2020. izveden sljedeći model:
 a) visoko-rezolucijski (5 cm) multispektralni snimak (DOF) (Slika IV-25-26).



Slika IV-25. Multispektralni snimak kanala Sv. Ante s odabranom kombinacijom spektralnih kanala



Slika IV-26. Multispektralni snimak s različitim rasporedom kanala

b) Uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno-orijentiranih analiza

Uvod - teorijska osnova

Klasifikacija multispektralnih snimki je složen proces, koji uključuje rigoroznu provjeru testnog uzorka (*signature*) ovisnog o upotrebljenom klasifikacijskom algoritmu. Klasifikacija multispektralnih snimaka provodi se radi lakšeg identificiranja i prepoznavanja objekata na snimkama. Postupak i izbor klasifikacije vrlo su važni prilikom izrade klasificirane snimke (Rumora i dr., 2018). Pogrešan izbor metode klasifikacije ili pogrešno definiran uzorak (*signatura*) mogu dovesti do značajnih pogrešaka u izlaznom modelu. To povlači za sobom i daljnje pogreške u primjeni izvedenih informacija. Istraživanje krajolika na lokalnim i regionalnim razinama moguće je već na satelitskim multispektralnim snimaka prostorne rezolucije <0,5 m. Najjednostavnija definicija klasifikacije bi bila grupiranje određenih dijelova snimke u spektralne, te potom informacijske klase (Janeš, 2019) na temelju sličnosti. Osnovni element multispektralne snimke i svakog rasterskog podatka je piksel. On se tretira kao zasebna jedinica koja u sebi sadrži vrijednosti (DN¹⁸) od nekoliko spektralnih pojaseva. Broj DN-a se zapisuje ovisno o radiometrijskoj rezoluciji satelitskog snimka (6-bit, 18 bit...). Međusobnom usporedbom piksela moguće je odrediti klase (grupe) koje se potom povezuju s informacijskim kategorijama koje su od interesa korisnicima. Klase u pravilu predstavljaju zemljišni pokrov (*land cover*).

Zemljišni pokrov mogu činiti prirodne ili umjetne strukture koje prekrivaju određeni dio Zemljine površine, kao što su: vegetacija, vodena površina, zgrade, put, itd.

S obzirom na to da snimke sadrže informacije u više dijelova elektromagnetnog spektra (izvan čovjekove vizualne percepcije), za klasifikaciju se koriste spektralne informacije predstavljene vrijednostima piksela u različitim spektralnim opsezima.

Skupovi piksela čije su vrijednosti međusobno slične predstavljaju **spektralne klase**. Za korisnika klasifikacije od interesa su, međutim, **informacijske klase**. Informacijske klase mogu biti, npr. različiti tipovi zemljišnog pokrova: vegetacija, rijeka, urbano zemljište, poljoprivreda, krš. Osnovni problem klasifikacije slika je uspostavljanje povezanosti između spektralnih i informacijskih klasa. Problem komplicira činjenica da unutar jedne informacijske klase može postojati varijabilnost tako da njeni pikseli pripadaju različitim spektralnim klasama.

S druge strane, moguće je i da pikseli koji posjeduju iste spektralne vrijednosti pripadaju različitim informacijskim klasama.

¹⁸ Digital Number

Metode klasifikacije generalno se mogu grupirati u (Weih i Riggan 2010)

- **Nadzirane** (polu-automatske) klasifikacijske metode
- **Nenadzirane** (automatske) klasifikacijske metode
- **Objektno orijentirane** (*object-based*) klasifikacijske metode

Nadzirana metoda klasifikacije predstavlja klasifikaciju određene scene/snimka temeljem uzoraka (*signatura*) koje je definirao korisnik. Uzorci se koriste kako bi se definirale klase pokrova zemljišta, a određivanje klase se vrši na spektralnim karakteristikama svakog uzorka. Najpoznatiji algoritmi nadzirane klasifikacije su maksimalna sličnost (*maximum-likelihood*) i minimalna udaljenost (*minimum distance*) (Weih i Riggan 2010).

U nadziranoj klasifikaciji se uzimaju uzorci poznatog identiteta za klasifikaciju piksela nepoznatog identiteta (smještaj neklasificiranih piksela u jednu od informacijskih klasa). Uzorci poznatog identiteta su oni pikseli koji se nalaze unutar označenih uzoraka (*signature*). Operator definira uzorke tako što identificira regije na snimci koje se mogu jasno parirati s područjima poznatog identiteta. Takva područja bi trebala definirati spektralne karakteristike one kategorije (npr. šuma) koju reprezentiraju te ujedno biti homogene u odnosu na informacijsku kategoriju koja se u tom trenutku klasificira. Označeni uzorci, koji su sastavljeni od velike količine piksela, uzrokuju spektralne karakteristike informacijskih kategorija.

Ove informacije pružaju bazu za klasifikaciju preostalih piksela izvan uzorkovanog područja. Kao generalna preporuka, operator bi trebao osigurati da označena područja sadrže najmanje 100 piksela za svaku kategoriju (Janeš, 2019).

Prednosti nadzirane klasifikacije su sljedeće. Operator ima kontrolu nad odabranim izbornikom informacijskih kategorija predviđenih za određeni prostor. Ovo je veoma bitno jer omogućuje izvođenje klasifikacije za specifičnu svrhu usporedbe s drugom klasifikacijom istog područja, ali različitog datuma. Zbog toga, nepredvidive kvalitete kategorija generirane nenadziranom klasifikacijom mogu biti nepogodne ili neodgovarajuće. Drugo, nadzirana klasifikacija je vezana uz specifična područja poznatih identiteta, određena kroz proces odabira područja za obuku. Zadnja prednost uključuje sposobnost analitičara da pronađe probleme ili greške pri klasifikaciji proučavanjem podataka za obuku kako bi se utvrdilo jesu li točno klasificirani tijekom postupka (Janeš, 2019). Mane nadzirane klasifikacije su sljedeće. Prva mana je ta što operator sam definira klasifikacijsku strukturu podataka. Ove klase ne moraju se podudarati prirodnim klasama.

Drugo, uzorci su često definirani primarno u odnosu na informacijske kategorije, a sekundarno u odnosu na spektralne karakteristike. Treće, uzorci koje je odabrao operator mogu biti neprecizna slika onih uvjeta koji se odvijaju unutar ostatka snimke.

Sljedeća mana uključuje sam rad koji analitičar mora odraditi kako bi završio analizu. Sam odabir podataka za uzorke može oduzeti izuzetnu količinu vremena. Preostala značajna mana nadzirane klasifikacije opisuje ograničenost čovjeka kao klasifikatora.

S obzirom na to da operator sam definira informacijske kategorije velika je mogućnost da se kategorija koja je trebala biti prisutna izostavi zato što samom operatora nije poznata (Janeš, 2019).

Nenadzirana metoda klasifikacije automatski klasificira scenu na temelju statističkog grupiranja spektralnih značajki i obilježja (Rumora i dr., 2018). Zasniva se na grupiranju piksela tako da njihove spektralne vrijednosti zadovoljavaju neki kriterij homogenosti. Kod nekih algoritama ovaj kriterij se može unaprijed zadati navođenjem dozvoljene varijabilnosti vrijednosti piksela, dok se kod nekih algoritama samo navodi željeni broj klastera. Polazeći od zadanih parametara algoritam za klasterizaciju pronalazi prirodnu strukturu u skupu podataka. Rezultat klasterizacije je skup spektralnih klasa koje je, zatim, potrebno upariti s informacijskim klasama. Korisnik treba definirati samo broj klasa koje će se kreirati. Razni algoritmi grupiranja se koriste kako bi se odredila prirodna, statistička skupina podataka. Pikseli se grupiraju zajedno ovisno o njihovoj spektralnoj sličnosti. Računalo zatim svaku skupinu analizira te posebno kategorizira u odgovarajuće klase. Ako analitičar odredi da se snimka klasificira u 10 različitih klasa, algoritam će prema spektralnoj sličnosti piksela kreirati predloženih 10 klasa. Najpoznatiji algoritmi su *K-means* i *ISODATA*.

Nekolicina prednosti nenadzirane klasifikacije su automatizacija, olakšan rad analitičara, smanjen prostor za ljudsku grešku te nije potrebno temeljito poznavanje nimke koja se obrađuje. U nenadziranoj klasifikaciji većina procesa je automatizirana i utjecaj analitičara na sam proces klasifikacije je minimaliziran.

Mane te ograničenja nenadzirane klasifikacije najviše proizlaze iz oslanjanja na „prirodno“ grupiranje te poteškoća kategoriziranja navedenih u informacijske kategorije koje su od interesa analitičaru.

Nadzirana i nenadzirana metoda klasifikacije je temeljena na analizi spektralnih svojstava svakog piksela unutar njegov područja interesa, zanemarujući prostorne i kontekstualne informacije okružujućih piksela. Istraživanja su pokazala da kad se ovakvi piksel-temeljeni pristupi koriste na visoko-rezolucijskim slikama može doći do pojave efekta "soli i papra" što doprinosi netočnosti klasifikacije (Campagnolo and Cerdeira, 2007; Van de Voorde et al., 2004).

S ciljem uklanjanja navedenih problema došlo je do razvoja **objektno-orijentiranih klasifikacijskih procedura** koji analiziraju spektralna i prostorno/kontekstualna svojstva piksela te koriste segmentacijske procese i iterativne algoritme učenja u postizanju točnijih klasifikacijskih rezultata primjenom u odnosu na pixel-temeljene metode (Hay and Castilla, 2006). Objektno orijentirana

klasifikacijska metoda (OBIA) je metoda koja kreira objekte različitih oblika i veličina, dok metode temeljene na klasifikaciji piksela generiraju kvadrate (oblik piksela) (Weih i Riggan 2010).

Tradicionalna klasifikacija slika na temelju piksela (*pixel based*) određuje klasu zemljišnog pokrova isključivo za pojedini piksel.

Svi pikseli su iste veličine, istog oblika te u takvim analizama ne postoji spoznaja o okružujućim obrascima. Međutim, GEOBIA¹⁹ segmentira sliku grupirajući "slične" piksele u vektorske objekte (oblike).

Pomoću ovih segmentiranih objekata te poznavajući njihove spektralne, geometrijske i prostorne karakteristike generira se model zemljišnog pokrova. Suprotno, ako se koriste tradicionalne klasifikacije tehnike, često se dobije efekt "soli i papra" (Slika IV-27) u klasifikacijskom rezultatu.



Slika IV-27. Efekt "soli i papra" koji se javlja u *pixel-based* procesu klasifikacije na visoko-rezolucijskim slikama

¹⁹ GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis)

Sumirano dva su osnovna načela OBIA: **segmentacija** i **klasifikacija**. Ipak, objektno-orijentirani postupak izvlačenja značajki uključuje proces rada koji pokriva tri glavna funkcionalna područja:

1) Segmentaciju slike

2) Generiranje analitičkih podataka o segmentiranim dijelovima

3) Klasifikaciju

Izlazni podatak iz jednog koraka ili alata predstavlja ulazni podatak za sljedeći korak/alata. Može se reći da je OBIA sličan proces tradicionalnom pixel-based klasifikacijskom pristupu nadzirane i nenadzirane klasifikacije, samo što se umjesto klasificiranja pojedinačnog piksela klasificira segment ("super pixel"). Svaki segment ili super piksel je predstavljen skupom atributa prema kojima se u konačnici određuje kojoj klasi spada.

Prilikom **segmentacijom** slike, proces grupira piksele radi formiranja objekata. Segmentacijom se grupiraju pikseli sličnih spektralnih karakteristika koji se nalaze u neposrednoj blizini u jedan segment. Segmenti koji pokazuju određene spektralne, prostorne i slične karakteristike oblika mogu se dalje grupirati u objekte. Objekti se zatim mogu grupirati u klase koje predstavljaju značajke stvarnog svijeta na terenu.

Segmentacija slika u GIS-u se temelji na **Mean Shift** (srednji pomak) pristupu. Ova tehnika koristi pomičnu matricu kvadrata (prozor) prilikom izračuna prosječne vrijednosti piksela s ciljem utvrđivanja koji pikseli mogu biti uključeni u određeni segment. Kako se pomična mreža kvadrata pomiče preko multispektralne slike, iterativno se izračunavaju vrijednosti piksela kako bi se provjerila prikladnost svakog segmenta. Rezultat je grupiranje piksela slike u segmente koje karakterizira spektralna sličnost refleksije.

Izlazni rezultat *Mean Shift* alata je 3-kanalna, 8-bit rezolucijska segmentirana slika.

Obilježja segmenata slike ovise o četiri parametra:

a) spektralnoj detaljnosti (*spectral detail*) - parametar kojim se postavlja razina važnost koja se daje spektralnim razlikama u vašoj multispektralnoj slici. U GIS-u varira od 1 do 20. Veće vrijednosti znače da se u procesu segmentacije daje veća važnost spektralnim razlikama između piksela. Drugim riječima, veće vrijednosti se koriste kad neke značajke na multispektralnom modelu imaju slične spektralne karakteristike, ali Vi ih želite klasificirati u odvojene klase.

Manje vrijednosti kreiraju spektralno glatke izlazne rezultate. Primjerice, veće vrijednosti omogućuju diferencijaciju između različitih vrsta drveća, dok niže vrijednosti promatraju sve kao jednu klasu.

b) prostornoj detaljnosti (*spatial detail*) - parametar kojim se kojim se utvrđuje važnost blizine između značajki u multispektralnom modelu. Važeće vrijednosti u GIS-u su od 1 do 20. Viša vrijednost prikladna

je za scenu u kojoj se žele izdvojiti male zbijene značajke, dok manje vrijednosti stvaraju prostorno gladak rezultat. Primjerice, ako se u sceni urbanog krajobraza postave visoke vrijednosti zgrade i ceste se mogu klasificirati kao posebne klase (veća prostorna detaljnost). S druge strane, ako se u istoj sceni odaberu manje vrijednosti urbana scena će biti klasificirana kao jedinstvena klasa (manja prostorna detaljnost).

c) minimalnoj jedinici segmenta (*min_segment_size*) - parametar koji se izražava u pikselima. Spoja segmente manje od ove veličine sa svojim najprikladnijim susjednim segmentom.

d) band_indexes - parametar koji se odnosi na odabir jednog ili više kanala koji će se koristiti u segmentiranju multispektralnog snimka. Odabiru se oni kanali u kojima su razlike između značajki najuočljivije.

Veličina objekata koji nastaju segmentacijom slike ovisi o detaljnosti željenog modela zemljišnog pokrova te ulaznom podatku. Nakon segmentacije, dolazi do **klasifikacije** izdvojenih objekata. Oni se klasificiraju na temelju statističkih parametara koji su specifični za svaki objekt. Primjerice, objekti se mogu klasificirati na temelju **geometrije, boje (refleksije), površine, oblika, teksture, susjednosti (blizine oblika)** itd. Potrebno je istaknuti da ne postoji najbolji način klasificiranja značajki zemljišnog pokrova koristeći OBIA. Ipak, analitičari često koriste ove statistike za klasificiranje zemljišnog pokrova primjenom OBIA:

- **Vodne površine:** ravne plohe (niske vrijednosti DSM), akumulira se u depresijama (visok TWI ili nizak TPI), niska temperatura (termalne karakteristike) i visoka apsorpcija near-infrared zračenja (NDVI-a je negativan)
- **Stabla:** neravne plohe (velika varijabilnosti u visinama, visoka SD u DSM-u), velika vrijednost refleksije infra-crvenog zračenja kod zdrave vegetacije (visok NDVI).
- **Građevine:** često pravokutnog oblika, visoka vrijednost DSM-a u odnosu na okolne oblike, veliki nagibi.
- **Trava:** uglavnom ravne površine, visoke vrijednosti u DSM-u (niska SD-a), umjerena refleksija infracrvenog zračenja (umjeren NDVI)
- **Ceste:** velika refleksija svjetlosti (visok RGB), uglavnom ravne plohe, nizak ili negativan NDVI.

Proces izrade modela zemljišnog pokrova primjenom GEOBIA u GIS-u se generalno može podijeliti na 5 koraka. Ovaj metodološki okvir bit će primijenjen za potrebe generiranja modela zemljišnog pokrova (Slika IV-28).

1. Izvođenje i segmentacija multispektralnog snimka

- Ulazni podatak može biti multispektralna i/ili crno-bijela slika.
- Odabir odgovarajućih vrijednosti parametara prilikom segmentacije slike.
- Odabir kanala u kojima su razlike u značajkama najuočljivije.
- Mora se postaviti kompromis između parametara prostorne i spektralne detaljnosti. U pravilu je dominantna spektralna detaljnost.
- Minimalna jedinica segmenta ovisi o minimalnoj jedinici kartirana (MMU²⁰).
- Brzina procesiranja ovisi o razinama prostorne i spektralne detaljnosti. Veća detaljnost - duže vrijeme procesiranja.

2. Označavanje i dodavanje uzoraka - *data augmentation*

- Definiranje klasifikacijske sheme.
- Prikupljanje poligonskih testnih uzoraka
- Provjera testnih uzoraka primjenom metode cross-validacije.
- *Data augmentation* ili povećanje podataka, koje se naziva i transformacija ili distorzija podataka, koristi se za umjetno povećanje broja uzoraka u testnom setu kroz primjenu specifičnih deformacija inputa (ulaznog podataka). Te deformacije uključuju: rotaciju, translaciju, rezanje te promjenu svjetline piksela.

3. Odabir klasifikatora (*train the classifier*)

- Odabir klasifikacije metode (*Support Vector Machine - SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster, Deep Learning*).
- Input uključuje: segmentiranu sliku, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata (boja, mean, sd., kvadratičnost, broj itd.).
- Izlazni rezultat je datoteka definicije klasifikator (*classifier definition .ecd*).

4. Klasifikacija slike

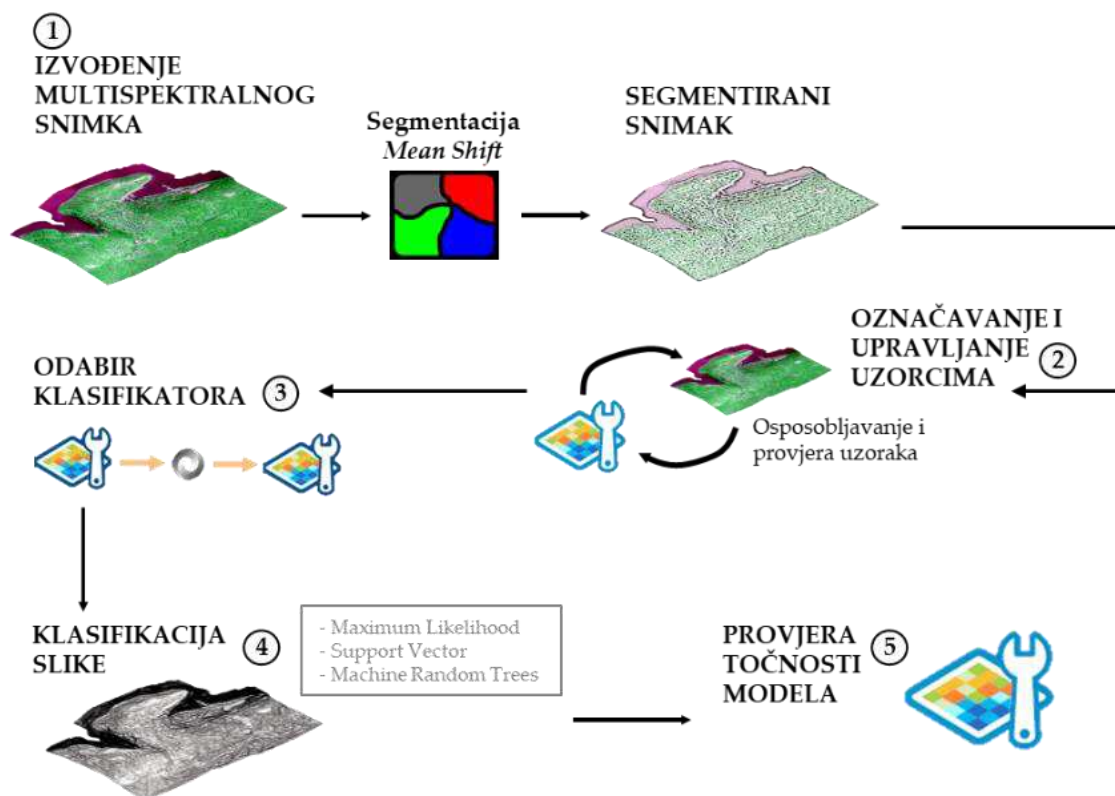
- Izvođenje klasifikacije (*SVM, Random Trees, Maximum Likelihood, Iso Cluster (unsupervised)*).
- Input uključuje: segmentirani rasterski fajl, dodatni rasterski set podataka (npr. DEM), testne uzorke, attribute segmenata

5. Procjena točnosti modela zemljišnog pokrova

- Procjena točnosti klasifikacije zemljišnog pokrova
- Usporedba izvedenih klasa s referentnim terenskim podacima (*GRD*).

²⁰ Minimal Mapping Unit

- Primjena različitih tehnika uzorkovanja
- Izvođenje matrice konfuzije.



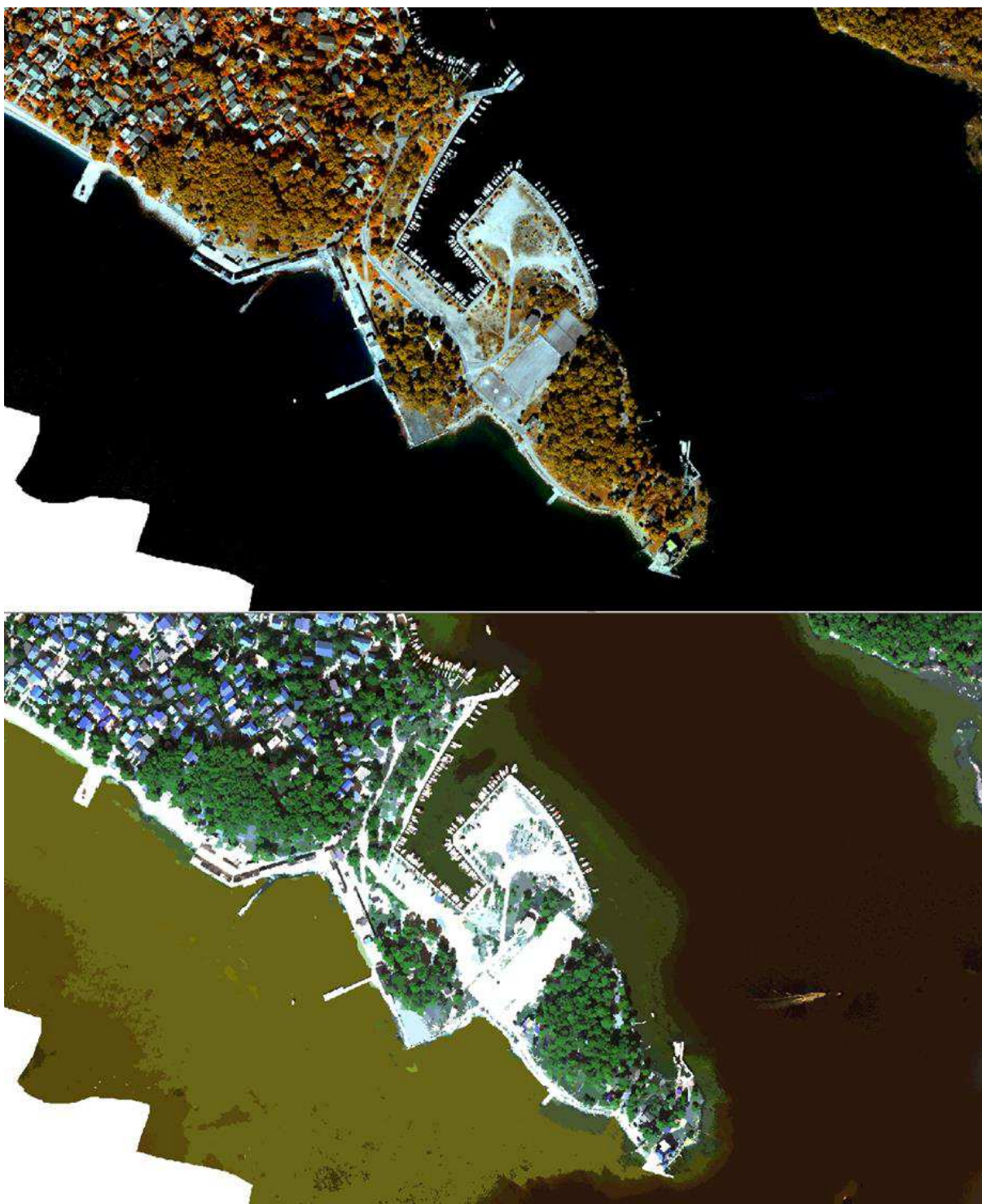
Slika IV-28. Metodološki okvir izvođenja zemljišnog pokrova

Segmentacija i klasifikacija multispektralnog snimka

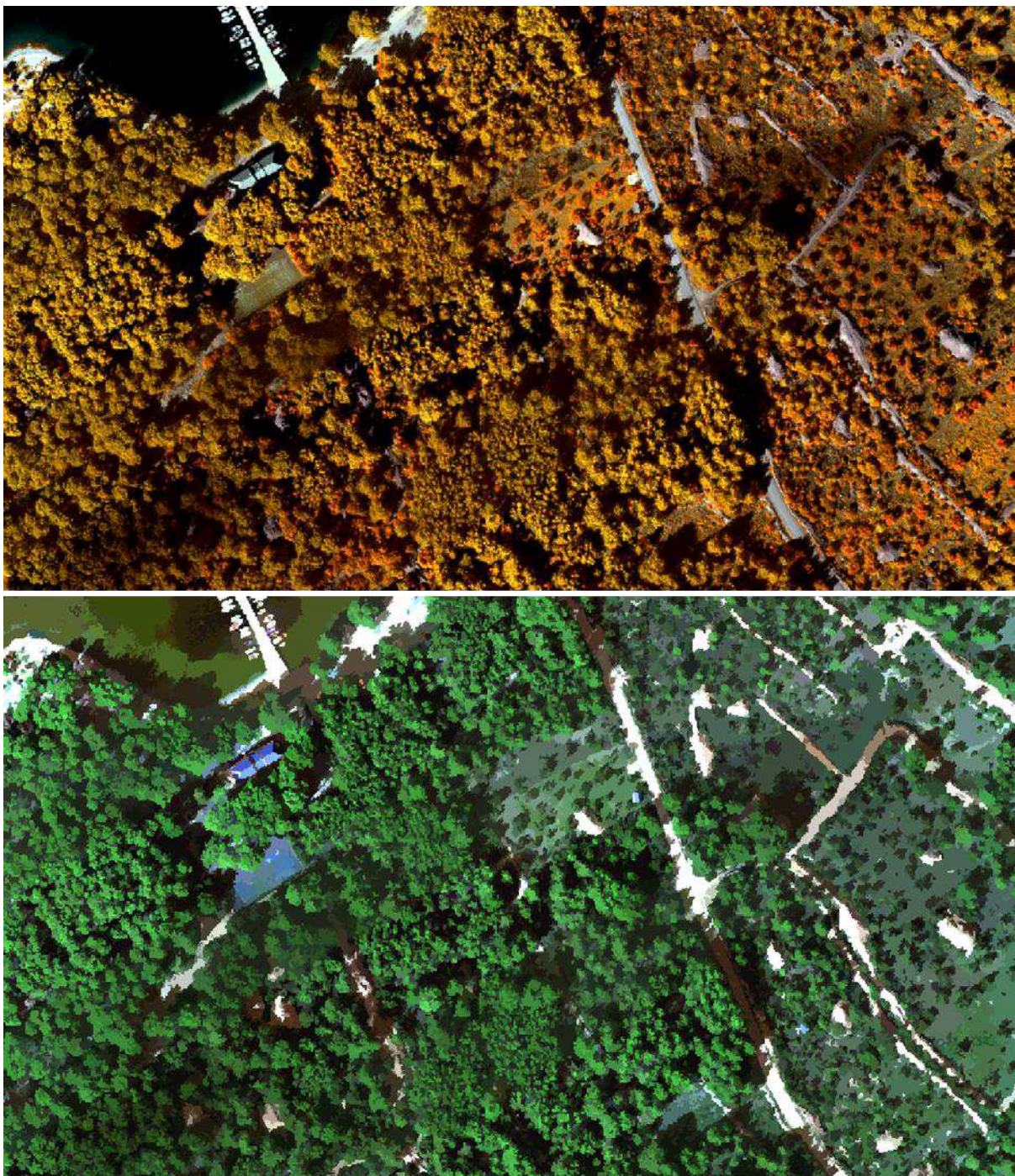
Unaprjeđenjem tehnologije satelitskih senzora prostorna rezolucija satelitskih snimaka se značajno povećala. U snimcima visoke prostorne rezolucije često se događa da različite klase (npr. betonske površine i krš) imaju slične spektralne značajke (refleksiju) ili da vrijednosti istih klasa imaju različite spektralne značajke (npr. cesta ili cesta u sjeni, cesta od makadama - snažna spektralna varijabilnost između klasa). Dakle, pixel-based pristup u takvim situacijama ne dovodi samo do pogrešne klasifikacije već i do rezultata koje karakteriziraju "razlomljeni" uzorci (površine).

Međutim, pravi izazov u OBIA metodi predstavlja definiranje odgovarajućih parametara segmentacije. Segmentacija multispektralnog snimka (*Segment Mean Shift*) je lokalna tehnika homogenizacije koja je vrlo korisna za prigušivanje sjenčanja ili razlike tona u lokaliziranim objektima. Njome se zamjenjuje svaki piksel s prosjekom piksela u rasponu (r) susjedstva i čija se vrijednost nalazi unutar udaljenosti (d). Na izlazne rezultate multispektralnog snimka najviše utječu prostorna i spektralna domena slike (parametri *spectral and spatial detail*). Naime, multispektralni snimak je kombinacija između prostorne i spektralne domene, gdje prostorna domena znači prostor koordinata slikovnih piksela, dok spektralna domena znači vrijednosti piksela digitalnog broja (DN).

U procesu je pomoću alata *Segment Mean Shift* generiran je segmentirani multispektralni snimak (Slika IV-29-30) šireg područja kanala Sv. Ante, pod sljedećim postavkama: *Spectral Detail = 19, Spatial Detail = 15, Min. Segment Size = 5*.



Slika IV-29. *Primjer multispektralnog i segmentiranog snimka (1)*



Slika IV-30. Primjer multispektralnog i segmentiranog snimka (2)

Kombinacijom kanala utvrđeno je da se na rasporedu kanala 5, 4, 1 najbolje uočavaju razlike između vegetacijskih vrsta. Na slici IV-31 prikazani su primjeri različitih vegetacijskih vrsta.

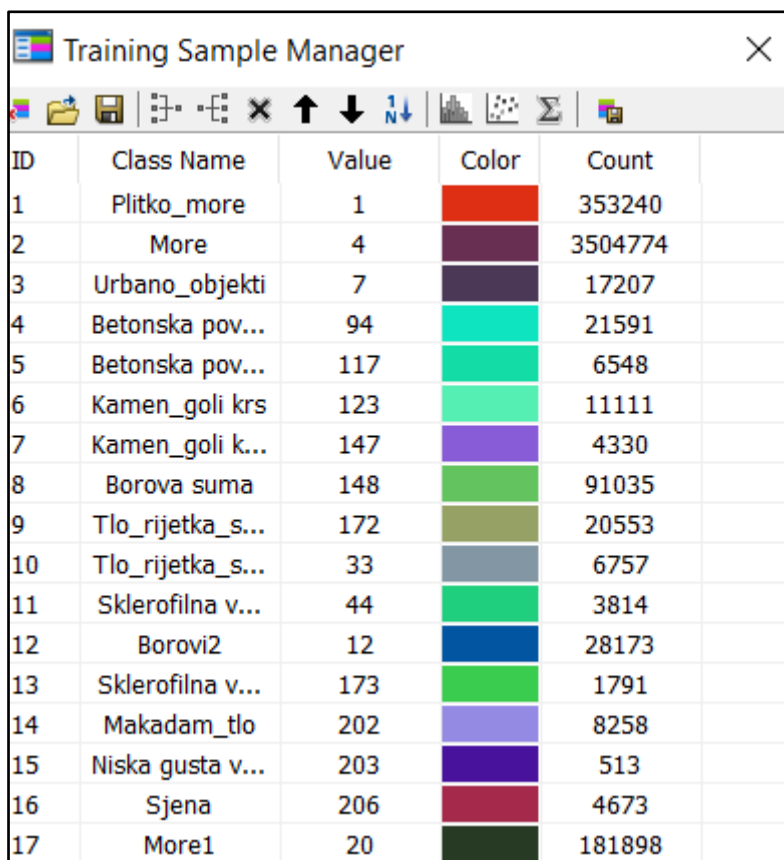



















Slika IV-31. Kombinacija kanala 5, 4, 1 na kojoj se mogu uočiti razlike u zemljišnom pokrovu

○ **Označavanje i upravljanje uzorcima**

Potom su u *Training Sample Manageru* uzorkovani elementi klasa. Elementi klasa su uzorkovani prema izvedenom segmentiranom snimku. U procesu uzorkovanja nastojalo se da sve klase budu, koliko je to moguće s obzirom na dominantnost određenih vrsta na proučavanom području, zastupljene s jednakim brojem piksela unutar elemenata. Ukupno je uzorkovano oko 30 klasa od kojih su neke u iterativnim uzorkovanjima duplo uzorkovane (npr. masline, krovovi).

Dodavanje duplih klasa je napravljeno s ciljem bolje detekcije onih klasa koje u inicijalnoj klasifikaciji nisu prepoznate ili su krivo klasificirane (Slika IV-32). U konačnici su elementi duplih klasa spojeni u jednu.



ID	Class Name	Value	Color	Count
1	Plitko_more	1		353240
2	More	4		3504774
3	Urbano_objekti	7		17207
4	Betonska pov...	94		21591
5	Betonska pov...	117		6548
6	Kamen_goli krs	123		11111
7	Kamen_goli k...	147		4330
8	Borova suma	148		91035
9	Tlo_rijetka_s...	172		20553
10	Tlo_rijetka_s...	33		6757
11	Sklerofilna v...	44		3814
12	Borovi2	12		28173
13	Sklerofilna v...	173		1791
14	Makadam_tlo	202		8258
15	Niska gusta v...	203		513
16	Sjena	206		4673
17	More1	20		181898

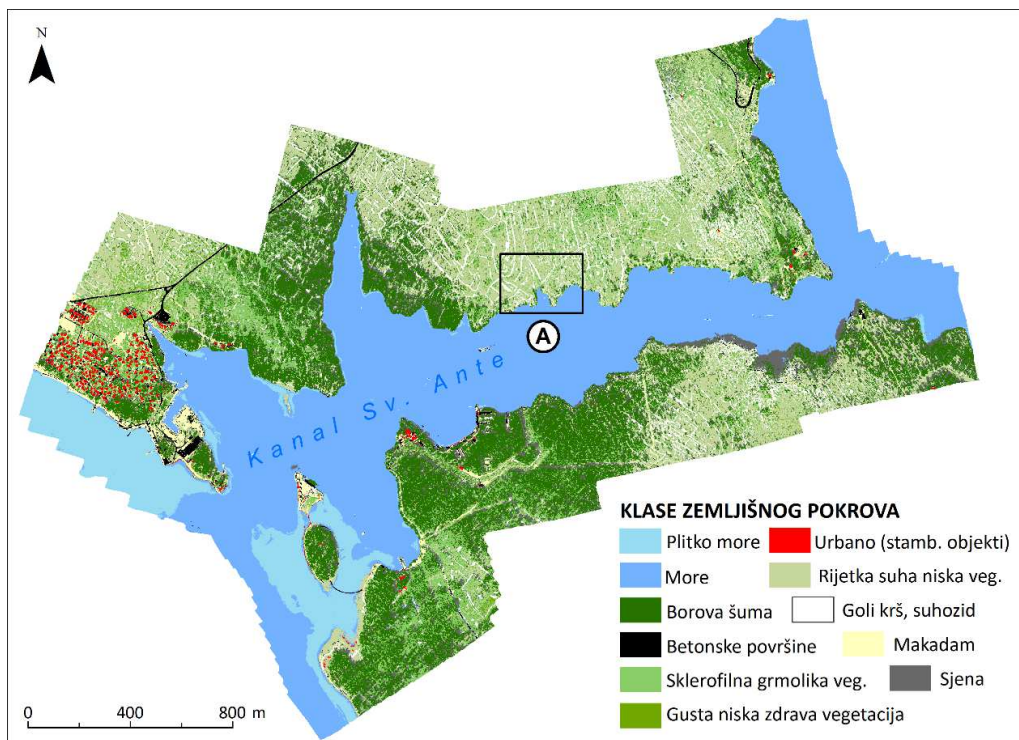
Slika IV-32 Uzorci klasa u Training Sample Manageru

Dakle, na odabranom segmentiranom snimku označeni su testni uzorci. U nastavku procesa korišten je klasifikator *Train Support Vector Machine* (SVM). SVM klasifikator predstavlja snažnu, popularnu klasifikacijsku metodu koja može analizirati segmentirani rasterski unos ili standardnu sliku. Ovo je relativno nova metoda klasifikacije koja se široko koristi među istraživačima. Klasifikator SVM ima nekoliko prednosti, za razliku od tradicionalnih metoda klasifikacije. SVM klasifikator može obraditi vrlo velike segmentirane slike, čija tablica atributa može postati prilično velika, što je posebno korisno kod slika visoke razlučivosti. Manje je podložan buci, koreliranim pojasevima i neuravnoteženom broju.

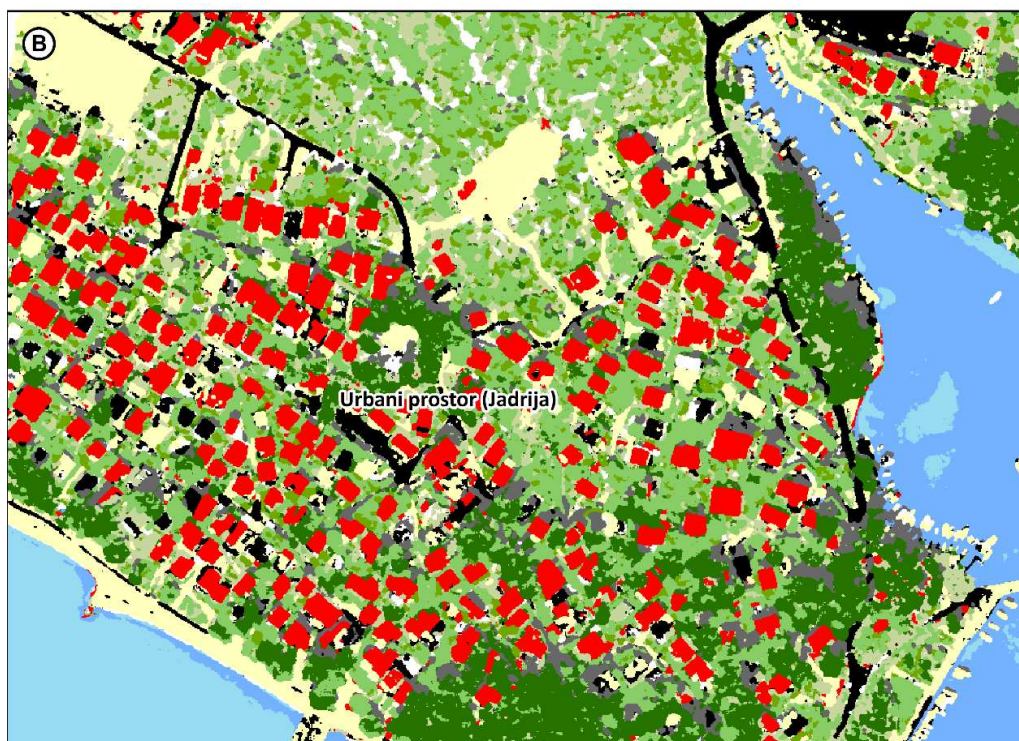
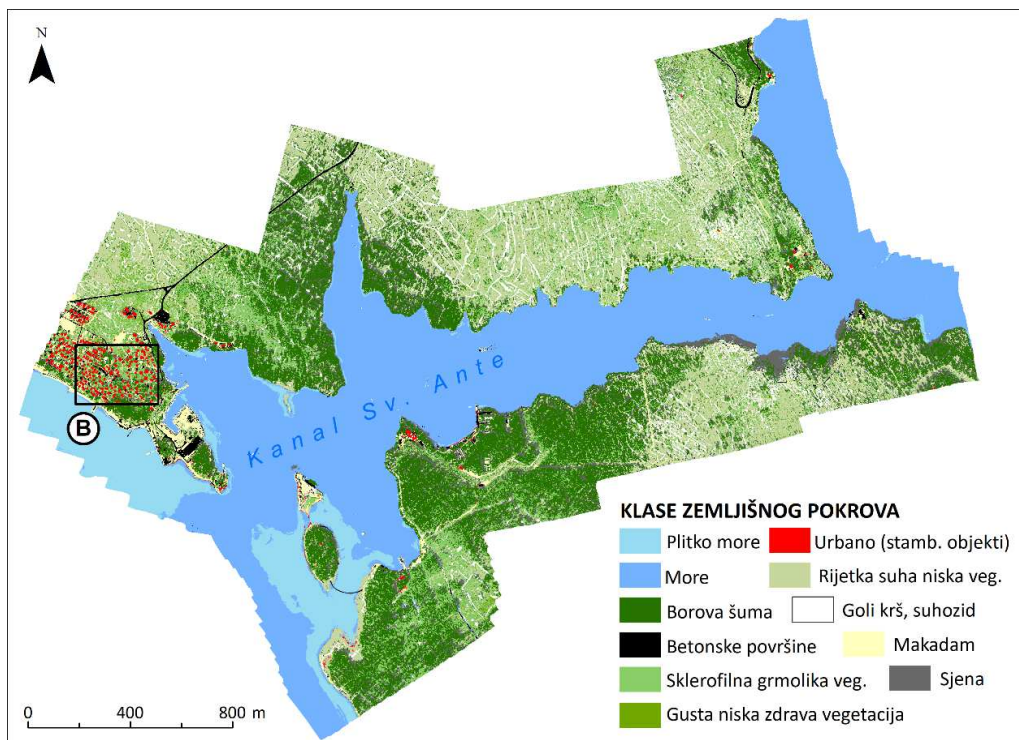
Bilo koji raster koji podržava Esri prihvaćen je kao ulaz, uključujući rasterske proizvode, segmentirani raster, mozaike, usluge slike ili generičke skupove rasterskih podataka. Segmentirani rasteri moraju biti 8-bitni rasteri s 3-opsegom.

c) Obrada, analiza, interpretacija i vizualizacija prikupljenih podataka

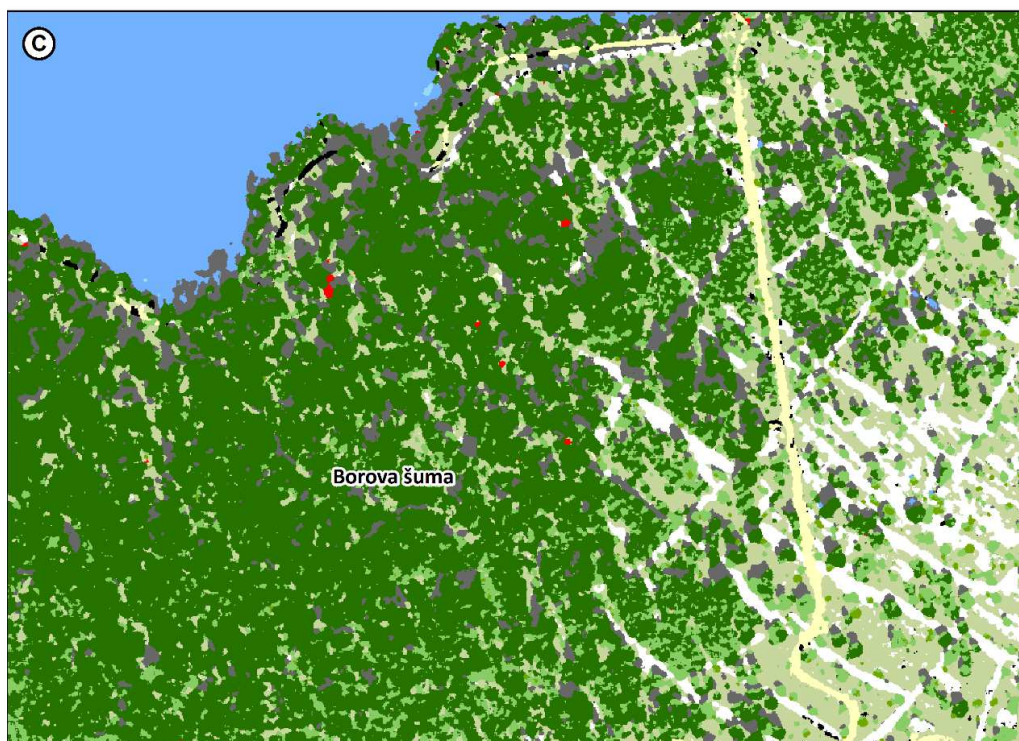
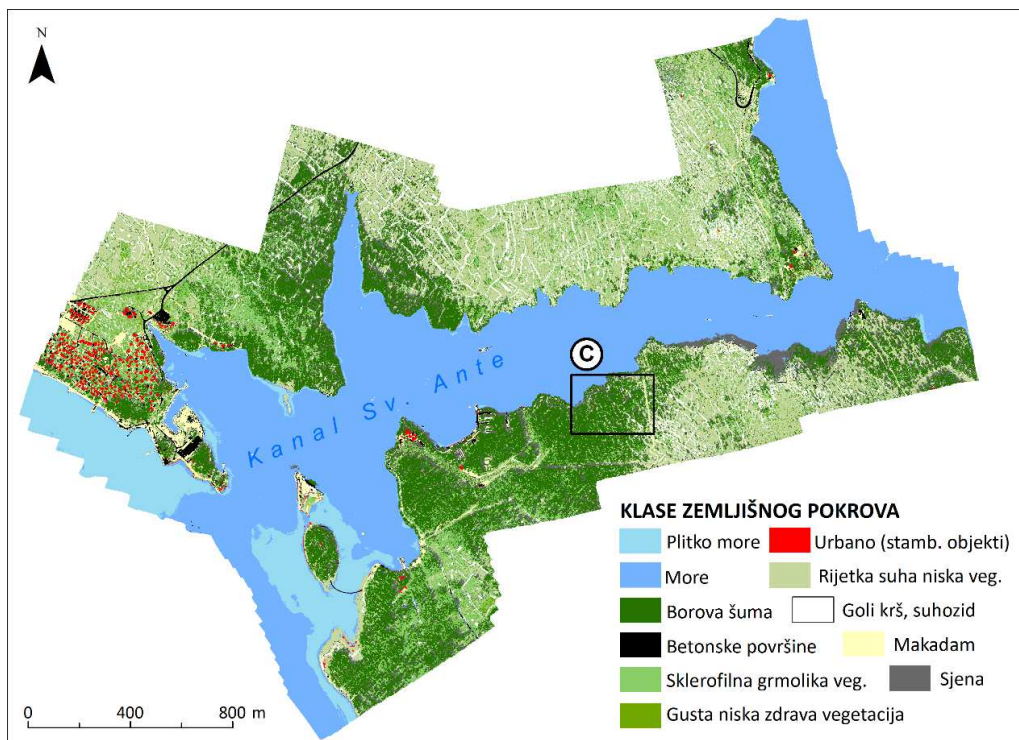
Klasifikacija slike je napravljena prema definiranoj datoteci klasifikatora (.ecd). Input je bio segmentirani snimak te definirana datoteka klasifikatora (.ecd). Izlazni rezultat je tematski klasificiran skup podataka s definiranim klasama simboliziranim prilikom procesa označavanja uzoraka (Slika IV-33-34-35).



Slika IV-33. Zemljišni pokrov šireg prostora kanala Sv. Ante (1)



Slika IV-34. Zemljišni pokrov šireg prostora kanala Sv. Ante (2)



Slika IV-35. Zemljišni pokrov šireg prostora kanala Sv. Ante (5)

Na slici IV-36. prikazan je 3D model zemljišnog pokrova šireg područja kanala Sv. Ante.



Slika IV-35. 3D model zemljišnog pokrova kanala Sv. Ante

Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora. Rasterski model zemljišnog pokrova pretvoren je poligon. Potom su poligonski elementi okupljeni na temelju sličnosti atributa klase i identifikacijskog broja. Nakon okupljanja izračunata je površina svake klase te njezin udjel u ukupnoj površini istraživanog područja (Tablica IV-4). Od vegetacijskog pokrova najdominantnije su očekivano klase Borove šume, te rijetke suhe niske vegetacije.

Tablica IV-4. *Deskriptivna statistika modela zemljišnog pokrova*

ID	Klasa	Površina (ha)
0	Plitko more	31.37
1	More	164.88
2	Urbano (stamb. objekti)	3.48
3	Betonske površine	6.69
4	Kamen, goli krš	25.38
5	Borova šuma	78.48
6	Rijetka suha niska vegetacija	69.66
7	Skleofilna grmolika vegetacija	64.31
8	Makadam	8.22
9	Gusta niska zdrava vegetacija	9.88
10	Sjena	28.26
	TOTAL	490.61

Zaključak

U izvješću je detaljno opisana batimetrijska i geodetska izmjera kanala Sv. Ante primjenom integralnog višesnog (multibeam) sustava WASSP S3. Nadalje, izvedeno je UAV fotogrametrijsko snimanje širega područja kanala s ciljem dobivanja podatka o duljini obalne linije i izrade modela visoke rezolucije u svrhu kvalitetnije vizualizacije područja istraživanja. Provedene aktivnosti su rezultirale izradom detaljne batimetrijske karte (modela visoke rezolucije), modelom tvrdoće dna te dokumentacijom trenutnog stanja kanala.

U izvješću je detaljno opisano izvođenje visokorezolucijskih modela (DMR, DMP, DOP) šireg područja kanala Sv. Ante na temelju podataka prikupljenih UAV fotogrametrijom. Korištene su suvremene bespilotne letjelice te je prikupljeno nekoliko tisuća fotografija. Provedene aktivnosti su rezultirale izradom DOF-a prostorne rezolucije do 5 cm digitalnog modela površina (DSM) prostorne rezolucije do 5 cm.

U izvješću je detaljno opisano izvođenje intervalnih zračnih snimanja termalnom kamerom. Širi prostor kanala Sv. Ante snimljen je termovizijskom kamerom DJI Zenmuse XT2 koja je integrirana na DJI Matrice 210 RTK bespilotnu letjelicu. Provedene aktivnosti su rezultirale intervalnim termalnim modelima prostorne rezolucije do 50 cm.

U izvješću je detaljno opisano izvođenje snimanja multispektralnom kamerom, te izrada snimka kanala Sv. Ante i njegove okolice pri prostornoj rezoluciji od 5m. Pri tome je korištena suvremena bespilotna letjelica uz pomoć koje je prikupljeno nekoliko tisuća fotografija. Uz to obavljeno je uzorkovanje i kartiranje zemljišnog pokrova primjenom nadzirane klasifikacije i objektno-orijentiranih analiza. Iz generiranog modela zemljišnog pokrova izračunata je deskriptivna statistika udjela klasa zemljišnog pokrova unutar proučavanog prostora. Izračunata je površina svake klase te njezin udjel u ukupnoj površini istraživanog područja. Od vegetacijskog pokrova najdominantnije su očekivano klase Borove šume, te niska suha vegetacija.

Conclusion

The report describes in detail the bathymetric and geodetic survey of the St. Anthony's Channel using the integrated multibeam system WASSP S3. Furthermore, UAV photogrammetric imaging of a wider area of the Channel was performed in order to obtain data on the length of the coastline and to develop a high-resolution model for the better visualization of the research area. The carried-out activities resulted in the development of a detailed bathymetric map (high resolution model), a model of bottom hardness and documentation of the current state of the Channel.

The report describes in detail the performance of high-resolution models (DMR, DMP, CSR) of the wider area of the St. Anthony's Channel based on data collected by UAV photogrammetry. Modern drones were used, and several thousand photographs were collected. The implemented activities resulted in the development of DOF spatial resolution up to 5 cm digital surface model (DSM) spatial resolution up to 5 cm.

The report describes in detail the performance of interval aerial imaging with a thermal camera. The wider area of the St. Anthony's Channel was filmed with a DJI Zenmuse XT2 thermal imaging camera integrated into a DJI Matrix 210 RTK drone. The performed activities resulted in interval thermal models with a spatial resolution of up to 50 cm.

The report describes in detail the performance of recording with a multispectral camera, as well as the recording of the St. Anthony's Channel and its surroundings at a spatial resolution of 5m. In doing so, a modern drone was used, with the help of which several thousand photographs were collected. In addition, sampling and mapping of land cover was performed using supervised classification and object-oriented analyzes. From the generated land cover model, descriptive statistics of the share of land cover classes within the studied area were calculated. The area of each class and its share in the total area of the study area were calculated. Of the vegetation cover, the most dominant are, as expected, the pine forest classes and low dry vegetation.

Bibliography

- ✓ ALFA-TEST, Procjena rizika od velikih nesreća za grad Šibenik, 2018, 182 str
- ✓ Alexander, D. E., (1999): Bioaccumulation, bioconcentration, biomagn.. Environmental Geology 38, 3-44.
- ✓ Bakke, T., Källqvist, T., Ruus, A., Breedveld, G.D. i Hylland, K. (2010): Development of 532 sediment quality criteria in Norway. Journal of Soils and Sediments, 10, 172-178.
- ✓ Barišić, D., Vertačnik, A., Lulić, S., Mihelčić, G., Sondi, I., Juračić, M., Prohić, E. i Crmarić, R. (1996): Radiological characteristics of recent marine sediments of the Adriatic sea. International Seminar on the Use of Isotope Techniques in Marine Environmental Studies. Athens, Greece, IAEA-SR-194/8.
- ✓ Barišić, D., Lulić, S. i Miletić, P. (1992): Radium and Uranium in phosphate fertilizers and their impact on the radioactivity of waters, Water Research, 26, 5, 607-611.
- ✓ Belamarić, G., Kurtela Ž. i Bošnjak R., (2016) Procjena rizika pomorske nezgode za akvatorij luke Šibenik, Naše more, 63, 87-97.
- ✓ Bianchi, T.S. (2007): Biogeochemistry of estuaries. Oxford University Press New York, 706 str.
- ✓ Bilinski, H., Kwokal, Ž. i Branica, M. (1996): Formation of some manganese minerals from ferromanganese factory waste disposed in the Krka River Estuary. Water Research, 30, (3), 490-500.
- ✓ Bonacci, O. i Ljubenkov, I. (2005): Nove spoznaje o hidrologiji rijeke Krke. Hrvatske Vode, 13, 52, 265-281.
- ✓ Bogner, D. (2001): Površinski sedimenti i sedimentacija na dijelu sjevernojadranskog Hrvatskog šelfa, Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 203 str.
- ✓ Bogner, D., Ujević, I., Zvonarić, T. i Barić, A. (2004): Distribution of selected trace metals in coastal surface sediments from the middle and south adriatic sea. Fresenius Environmental Bulletin, 13, 1281-1287.
- ✓ Branica, M., Kwokal, Ž., Peharec, Ž., Martinčić, D., Pižeta, I. i Zelić, M. (1989): Trace metal speciation along a vertical profile of the Krka river estuary. Abstract of the 1st Int. Symp. On Small Estuaries, Primošten, Yugoslavia, May 21-27, 46-47.
- ✓ Burton Jr, G.A. (2002): Sediment quality criteria in use around the world. Limnology, 3, 65-76.
- ✓ Cabioch, J., Floch, J-Y., Le Toquin, A., Boudouresque, C-F., Meinesz, A., Verlaque, M. (1992) Guide des Algues des Mers d'Europe. Delachaux et Niestlé. 1-232.
- ✓ Calvo, J. C. C. (1995) El Ecosistema Marino Mediterráneo. Guía de su Flora y Fauna. Equipo de Diseño. La Luna de Madrid S. A. 1-797.

- ✓ Cindrić, A.-M., Garnier, C., Oursel, B., Pižeta, I. i Omanović, D. (2015): Evidencing the natural and anthropogenic processes controlling trace metals dynamic in a highly stratified estuary: The Krka River estuary (Adriatic, Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 94, 199-216.
- ✓ Cindrić, A.-M., Cukrov, N., Durrieu, G., Garnier, C., Pižeta, I., Omanović, D. (2017): Evaluation of discrete and passive sampling (Diffusive Gradient in Thin films - DGT) approach for the assessment of trace metal dynamics in marine waters – a case study in a small harbor.
- ✓ Coale, K. H., Johnson, K. S., Fitzwater, S. E., Gordon, et al., 1996. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 383, 495–501.
- ✓ Cuculić, V., Cukrov, N., Barišić, D. i Mlakar, M. (2006): Uranium in sediments, mussels (*Mytilus sp.*) and seawater of the Krka river estuary. *J. Environ. Radioactivity*, 59, 59-70.
- ✓ Cukrov, N., Barišić, D. i Branica, M. (2004): Content of the ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U & ^{137}Cs in the recent sediments of the Krka river estuary, 37th CIESM CONGRESS (Barcelona, 7-11 June 2004), 20.
- ✓ Cukrov, N., Barišić, D. (2006): Spatial Distribution of ^{40}K and ^{232}Th in Recent Sediments of the Krka River Estuary. *Croatica chemica acta*. 79, 1; 115-118.
- ✓ Cukrov, N., Barišić, D., Juračić, M. (2007): Calculated Sedimentation Rate in the Krka River Estuary Using Vertical Distribution of ^{137}Cs , 38th CIESM congress proceedings. Istanbul: CIESM, 81-81.
- ✓ Cukrov, N., Frančišković-Bilinski, S., Mikac, N., Roje, V. (2008): Natural and anthropogenic influences recorded in sediments from the Krka river estuary (Eastern Adriatic coast), evaluated by statistical methods. *Fresenius Environmental Bulletin*. 17, 7A; 855-863.
- ✓ Cukrov, N., Mlakar, M., Cuculić, V., Barišić, D., (2009) Origin and transport of ^{238}U and ^{226}Ra in riverine, estuarine and marine sediments of the Krka River, Croatia. *Journal of environmental radioactivity*. 100, 6; 497-504.
- ✓ Cukrov, N., Frančišković-Bilinski, S., Hlača, B. i Barišić, D. (2011): A recent history of metal accumulation in the sediments of Rijeka harbor, Adriatic Sea, Croatia. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 154-167.
- ✓ Cukrov, Nu., Doumandji, N., Garnier, C., Tucaković, I., Dang, D.H., Omanović, D. i Cukrov, Ne. (2020): Anthropogenic mercury contamination in sediments of Krka River estuary (Croatia). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 7628–7638.
- ✓ Dayan, A. D., Paine, A. J., (2001): Mechanisms of chromium toxicity, carcinogenicity and allergenicity: Review of the literature from 1985 to 2000. *Human & experimental toxicology* 20, 439-451.

- ✓ Di Toro, D. M., Allen, H. E., Bergman, H. L., Meyer, J. S., Paquin, P. R., Santore, R. C., 2001. Biotic ligand model of the acute toxicity of metals. 1. Technical basis. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 20, 2383-2396.
- ✓ Duce, R. A. (1986): The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity., p. 497-529. In P. Buat-Ménard [ed.], *The role of air-sea exchange in geochemical cycling*. Springer.
- ✓ Duffus, J. H., (2002): "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry* 74, 793-807.
- ✓ Duran, I., Beiras, R., (2013): Ecotoxicologically based marine acute water quality criteria for metals intended for protection of coastal areas. *Sci. Total Environ.* 463, 446-453.
- ✓ EKO-MONITORING d.o.o. (2017). *Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš rekonstrukcija, sanacija i dogradnja kupališta Jadrija, Grad Šibenik*. Varaždin: Grad Šibenik.
- ✓ EKONERG – Institut za energetiku i zaštitu okoliša d.o.o. (2019). *ELABORAT ZAŠTITE OKOLIŠA - Zahvat: Izgradnja zgrade pomorsko-putničkog terminala Luke Šibenik s uređenjem prometnih površina i instalacija iz obuhvata III.faze*. Zagreb: Lučka uprava Šibenik.
- ✓ Einsele, G. (2000): *Sedimentary Basins - Evolution, Facies, and Sediment Budget*. Springer, Berlin, 792 str.
- ✓ Emery, W., Thomson, R., (1998): *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon, Oxford.
- ✓ Falciai, L., Minervini, R. (1992): *Guida dei Crostacei Decapodi d'Europa*. Science naturali. Muzzio. 1-282.
- ✓ Fingas (2015) *Handbook of Oil Spill Science and Technology*.
- ✓ Furdek M. (2015) *Raspodjela i ponašanje organokositrenih spojeva u priobalnom moru istočnog dijela Jadrana, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb*.
- ✓ Foreman, M. G. G., (1996): *Manual for tidal heights and prediction*. Tech. rep., Institute of Ocean Science,
- ✓ Patricia Bay, Victoria B.C.
- ✓ Gledhill, M., Buck, K. N., (2012) *The organic complexation of iron in the marine environment: a review*. *Frontiers in microbiology* 3, 1-17.
- ✓ Godin, G., (1972): *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto.
- ✓ Gržetić, Z. (1990): *Osnovna hidrološka i kemijska svojstva estuarija Krke*. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 170 str.
- ✓ Gržetić, Z., Precali, R., Degobbis, D. i Škrivanić, A. (1991): *Nutrient enrichment and phytoplankton response in an Adriatic karstic estuary*. *Marine Chemistry*, 32 (2–4), 313-331.

- ✓ Hansell, D. A., Carlson, C. A. (2014): Biogeochemistry of marine dissolved organic matter. Academic Press.
- ✓ Hrvatski hidrografki institut:. (2012.): Peljar I.: Jadransko more - istočna obala - 5 izdanje. Split: Hrvatski hidrografki institut.
- ✓ Huy Duc Dang, Nicolas Layglon, Nicolas Ferretto, Dario Omanović, Jean Urlich Mullot, Véronique Lenoble, Stéphane Mounier, Cédric Garnier. (2020): Kinetic processes of copper and lead remobilization during sediment resuspension of marine polluted sediments, *Science of the Total Environment*, 698, 134120
- ✓ Institut za oceanografiju i ribarstvo. (2020.). Završni izvještaj o rezultatima praćenja stanja fizikalno-kemijskih parametara i bioloških zajednica područja ekološke mreže Natura 2000 Ušće Krke (HR30007171). Šibenik: Javna ustanova za upravljanje zaštićenim područjima i drugim zaštićenim dijelovima prirode Šibensko – kninske županije – Priroda.
- ✓ IPZ UNIPROJEKT TERRA d.o.o. (srpanj 2019.). Elaborat zaštite okoliša – izgradnja stambenog naselja Podsolarsko ocjena o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš. Zagreb: Podsolarsko riviera d.o.o.
- ✓ IRES EKOLOGIJA d.o.o. za zaštitu prirode i okoliša. (travanj 2019.). ELABORAT ZAŠTITE OKOLIŠA - Ocjena o potrebi procjene utjecaja zahvata „Rekonstrukcija i sanacija tvrđave sv. Nikole u Šibeniku“ na okoliš. Zagreb: Javna ustanova za upravljanje zaštićenim područjima i drugim zaštićenim dijelovima prirode Šibensko-kninske županije – Priroda.
- ✓ Janeković, I., Kuzmić, M., (2005): Numerical simulation of the adriatic sea principal tidal constituents. *Annales Geophysicae* 23 (10), 3207–3218.
- ✓
- ✓ Jardas, I. (1996): Jadranska ihtiofauna. Školska knjiga Zagreb. 1-533.
- ✓ Jerončić A., Ocjena ekološkog stanja mora na području Kaštelanskog zaljeva, Dubrovnika, Podstrane i Pelješca prema trofičkom indeksu TRIX. Fakultet kemije i tehnologije, Sveučilište u Splitu, Split, 2017.
- ✓ Jeter, H.W. (2000): Determining the ages of recent sediments using measurements of trace radioactivity. *Terra et Aqua*, 78, 21-28.
- ✓ Juračić, M. (1987): Mehanizmi sedimentacije u nekim estuarijima Jadrana, svojstva recentnih sedimenata i suspendirane tvari, Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 103 str.
- ✓ Juračić, M. (1992): Sedimentation in some Adriatic Karstic river mouths (are they estuaries or rias. Proceedings of the international symposium “Geomorphology and sea” and the meeting of the geomorphological commission of the Carpatho-Balkan countries, Mali Lošinj, Septembar 22-26 1992, 55-63.
- ✓ Juračić M. i Prohić, E. (1986): Transfer of heavy metals by suspended matter in the Krka River estuary, Yugoslavia. *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.*, 30/2, 133.

- ✓ Juračić, M. i Prohić, E. (1991): Mineralogy, Sources of particles, and sedimentation in the Krka River Estuary (Croatia), *Geološki Vjesnik* 44, 195-200.
- ✓ Jørgensen, B. B., Kasten, S. (2006): Sulfur cycling and methane oxidation, p. 271-309. *Marine geochemistry*.
- ✓ Klinkhammer, G. P., Palmer, M. R., (1991): Uranium in the oceans: Where it goes and why. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 1799-1806.
- ✓ Koide, M., Soutar, A. i Goldberg, E.D. (1972): Marine geochronology with ²¹⁰Pb. *Earth and Planetary Science Letters*, 14, 442-446.
- ✓ Kennish, M.J. (2016) *Encyclopedia of Estuaries*. Springer.
- ✓ Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J. i Meybeck, M. (1971): Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11, 407-414.
- ✓ Krželj, M., Kuzmanić-Šamija, R., Lakoš, V., Šimat, V., Krželj, V. (2011): Problem unosa žive u organizam prehranom namirnicama iz mora, p. 92-101. In I. Barić [ed.], *Nasljedne metaboličke bolesti 2011, Djeca, metali i nove bolesti*. Medicinska naklada.
- ✓ Kušpilić, G. Rezultati sustavnog istraživanja kakvoće prijelaznih i priobalnih voda u 2016. i 2017. godini - Preliminarni rezultati istraživanja kemijskog i ekološkog stanja prijelaznih voda.
- ✓ Kwokal, Z., Frančišković-Bilinski, S., Bilinski, H. i Branica, M. (2002): A comparison of anthropogenic mercury pollution in Kaštela Bay (Croatia) with pristine estuaries in Ore (Sweden) and Krka (Croatia). *Marine Pollution Bulletin*, 44, 1152-1157.
- ✓ Legović, T. (1991): Exchange of water in a stratified estuary with application to Krka (Adriatic). *Marine Chemistry*, 32, 121-135.
- ✓ Legović, T., Petricioli, D. i Žutić, V. (1991): Hypoxia in a pristine stratified estuary (Krka, Adriatic Sea). *Marine Chemistry*, 32, 347-359.
- ✓ Legović T., Žutić V., Viličić D. and Gržetić Z. (1996) Transport of silica in a stratified estuary. *Marine Chemistry*, 53, 69-80.
- ✓ Lista opasnih kemikalija čiji je promet ograničen odnosno zabranjen, NN, 17/2006.
- ✓ Liu, J., Hrustić, E., Du, J., Gašparović, B., Čanković, M., Cukrov, N., Zhu, Z., Zhang, R. (2019): Net submarine groundwater-derived dissolved inorganic nutrients and carbon input to the oligotrophic stratified karstic estuary of the Krka River (Adriatic Sea, Croatia). *Journal of geophysical research-oceans*. 124, 6; 4334-4349.
- ✓ Lohan, M. C., Tagliabue, A., (2018): Oceanic micronutrients: trace metals that are essential for marine life. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology* 14, 385-390.
- ✓ Long, E.R., Macdonald, D.D., Smith, S.L. i Calder, F.D. (1995): Incidence of Adverse Biological Effects within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments. *Environmental Management*, 19, 81-97.

- ✓ Lovrenčić Mikelić, I., Oreščanin, V. i Škaro, K. (2017): Variation of sedimentation rate in the semi-enclosed bay determined by ¹³⁷Cs distribution in sediment (Kaštela Bay, Croatia). *Journal of environmental radioactivity*, 166, 112-125.
- ✓ Luckey, T. D., Venugopal, B. (1977): *Metal toxicity in mammals 1: Physiologic and chemical basis for metal toxicity*. Plenum press.
- ✓ Mabit, L., Benmansour, M., Abril, J., Walling, D., Meusburger, K., Iurian, A., Bernard, C., Tarján, S., Owens, P. i Blake, W. (2014): Fallout ²¹⁰Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: a review. *Earth-science reviews*, 138, 335-351.
- ✓ Mandić, J., Tronczyński, J. i Kušpilić, G. (2018): Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the mid-Adriatic and along the Croatian coast: Levels, distributions and sources. *Environmental Pollution*, 242, 519-527.
- ✓ Martinčić, D., Kwokal, Z., Stoeppler, M. i Branica, M. (1989): Trace-Metals in Sediments from the Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 84, 135-147.
- ✓ Martinčić, D., Kwokal, Ž. i Branica, M. (1990): Distribution of zinc, lead, cadmium and copper between different size fraction of sediments. II The Krka River Estuary and the Kornati islands (Central Adriatic Sea). *Science of Total Environment*, 95, 217-225.
- ✓ Martin, J. H., Coale, K. H., Johnson, K. S., Fitzwater, et. al., (1994): Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean. *Nature* 371, 123-129.
- ✓ Martin, J. H., Fitzwater, S. E., (1988): Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature* 331, 341-343.
- ✓ Mason, R. P. (2013): *Trace metals in aquatic systems*. John Wiley & sons.
- ✓ Mikac, N., Kwokal, Ž., May, K. i Branica, M. (1989): Mercury distribution in the Krka River Estuary (eastern Adriatic coast). *Marine Chemistry*, 28, 109-126.
- ✓ Mikac, N. i Kwokal, Ž. (1997): Distribution of mercury species in the water column of the stratified Krka River Estuary. *Croatica Chemica Acta*, 70, 271-288.
- ✓ Mikac, N., Roje, V., Dautović, J., Kniewald, G. i Cukrov, N. (2005): Raspodijela 30-tak metala i metaloida u sedimentu i vodi estuarija rijeke Krke. *Knjiga sažetaka RIJEKA KRKA I NACIONALNI PARK "KRKA*, 47.
- ✓ Mikac, N., Roje, V., Cukrov, N. i Foucher, D. (2006): Mercury in aquatic sediments and soils from Croatia. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, 57, 325.
- ✓ MMPI. (2013. - 2015.). *Pravilnik o sigurnosti pomorske plovidbe u unutarnjim morskim vodama i teritorijalnom moru Republike Hrvatske te načinu i uvjetima obavljanja nadzora i upravljanja pomorskim prometom*. "Narodne novine" br. 79/2013., 140/2014., 57/2015. Zagreb: Narodne novine .
- ✓ Oreščanin, V., Barišić, D., Mikelić, L., Lovrenčić, I., Rubčić, M., Rozmarić-Mačefat, M. i Lulić, S, (2004): *Environmental Contamination Assessment of the Surroundings of the ex-*

Šibenik's Ferro-manganese Smelter, Croatia. *Journal of Environmental Science and Health, Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, A39, 9, 2493-2506.

- ✓ Oreščanin, V., Mikelić, I.L., Mikelić, L., Rubčić, M. i Lulić, S. (2009): The influence of past metallurgical activity on the concentration of heavy metals in the soil/grass system in Šibenik (Croatia). *International journal of environment and pollution*, 37, 437-449.
- ✓ Orlić, M., Ferenčak, M., Gržetić, Z., Limić, N., Pasarić, Z., Smirčić, A., (1991): High-frequency oscillations observed in the Krka estuary. *Marine Chemistry* 32 (2), 137–151.
- ✓ Pađan, J., Marcinek, S., Cindrić, A. M., Layglon, N., Garnier, C., Garcia, A. C., Omanović, D., (2020): Determination of sub-pico-molar levels of platinum in the pristine Krka River estuary (Croatia) using improved voltammetric methodology. *Environmental Chemistry*, 172, 77-84.
- ✓ Pađan, J., Marcinek, S., Cindrić, A. M., Layglon, N., Lenoble, V., Salaün, P., Garnier, C., Omanović, D., (2019): Improved voltammetric methodology for chromium redox speciation in estuarine waters. *Analytica Chimica Acta*, 1089, 40-47.
- ✓ Pawłowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., (2002): Classical tidal harmonic analysis including error estimates. in *MATLAB using T_TIDE*. *Computers and Geosciences* 28 (8), 929–937.
- ✓ Percival, D., Walden, A., (1993): *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques*. Cambridge University Press.
- ✓ Pope, G. T., Goto, Y. (1991): *European Seashells. I Polyplacophora, Caudofoveata, Solenogastera, Gastropoda*. Hemmen. 1-352.
- ✓ Pope, G. T., Goto, Y. (1993): *European Seashells. II Scaphopoda, Bivalvia, Cephalopoda*. Hemmen. 1-221.
- ✓ Pravilniku o redu i uvjetima korištenja lučkog područja kojim upravlja Lučka uprava Šibenik . (lipanj 2016.). Šibenik : Lučka uprava Šibenik.
- ✓ Pravilnik o uvjetima i načinu održavanja reda u lukama, NN 10/2008.
- ✓ Prezerakos, N. G., Paliatsos, A. G., Koukouletsos, K. V., (2010): Diagnosis of the relationship between dust storms over the Sahara desert and dust deposit or coloured rain in the South Balkans. *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2010/760546.
- ✓ Prohić, E. (1984): *Raspodjela elemenata u tragovima u recentnim sedimentima estuarija Krke*. Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 200 str.
- ✓ Prohić, E. (1998): *Geokemija*. Targa, Zagreb, 554 str.
- ✓ Prohić, E. i Kniewald, G. (1987): Heavy metal distribution in recent sediments of the Krka River Estuary - an example of sequential extraction analysis. *Marine Chemistry*, 22, 279-297.

- ✓ Prohić, E. i Juračić, M. (1989): Heavy metals in sediments - Problems concerning determination of the anthropogenic influence. Study in the Krka River estuary, eastern Adriatic coast, Yugoslavia. *Environmental Geology and Water Sciences*, 13, 145-151.
- ✓ Richir, J., Gobert, S., (2016): Trace Elements in Marine Environments: Occurrence, Threats and Monitoring with Special Focus on the Costal Mediterranean. *Journal of environmental and analytical toxicology* 6, 349-368.
- ✓ Ridgway, J. i Shimmield, G. (2002): Estuaries as repositories of historical contamination and their impact on shelf seas. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 55, 903-928.
- ✓ Riedl, R., (1991) Fauna e flora del Mediterraneo. Franco Muzzio, Padova. 1-777.
- ✓ Sabelli, B., Giannuzzi-Savelli, R., Bedulli, D. (1990): Catalogo annotato dei moluschi marini del Mediterraneo. 1. S. I. M. Bologna. 1-348.
- ✓ Saulnier, I. i Mucci, A. (2000): Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada. *Applied Geochemistry*, 15, 191-210.
- ✓ Schmidt, H. (1972): Prodrömus zu einer Monographie der mediterranen Aktinien. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart. 1-146.
- ✓ Storelli, M. M., Stuffer, R. G., Storelli, A., Marcotrigiano, G. O., 2003. Total mercury and methylmercury content in edible fish from the Mediterranean Sea. *Journal of food protection* 66, 300-303.
- ✓ Sunda, W. G., Huntsman, S. A., (1995): Iron uptake and growth limitation in oceanic and coastal phytoplankton. *Marine Chemistry* 50, 189-206.
- ✓ Surić, M., Juračić, M., Horvatinčić, N. i Bronić, I. K. (2005): Late Pleistocene-Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic Coast. *Marine Geology* 214, 163-175.
- ✓ Šurija, B. (1993): Raspodjela Pb, Cd, Cu i Zn u odabranim frakcijama sedimenata estuarija rijeke Krke, Magistarski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 92 str.
- ✓ Šurija, B. i Branica, M. (1995): Distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in carbonate sediments from the Krka River Estuary obtained by sequential extraction. *Sci. Total Environ.*, 170, 101-118.
- ✓ Svensen, C., Viličić, D., Wassmann, P., Arashkevich, E. i Ratkova, T. (2007): Plankton distribution and vertical flux of biogenic matter during high summer stratification in the Krka estuary (Eastern Adriatic). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71, 381-390.
- ✓ TABLIČNI PRIKAZI METEOROLOŠKIH VELIČINA, POLOŽAJA I VISINA ZA KLIMATSKI MJERODAVNE METEOROLOŠKE POSTAJE. (2015). Dohvaćeno iz narodne-novine.nn.hr:<https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/432856.pdf>

- ✓ Tankere-Muller, S., Zhang, H., Davison, W., Finke, N., Larsen, O., Stahl, H. i Glud, R.N. (2007): Fine scale remobilisation of Fe, Mn, Co, Ni, Cu and Cd in contaminated marine sediment. *Marine Chemistry*, 106, 192-207.
- ✓ Tang, D., Warnken, K. W., Santschi, P. H., (2002) Distribution and partitioning of trace metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in Galveston Bay waters. *Marine Chemistry* 78, 29-45.
- ✓ Templeton, D. M., (2015): Speciation in metal toxicity and metal-based therapeutics. *Toxics* 3, 170-186.
- ✓ Templeton, D. M., Ariese, F., Cornelis, R., Danielsson, L. G., Muntau, H., Van Leeuwen, H. P., Lobinski, R., (2000): Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. definitions, structural aspects, and methodological approaches. *Pure and applied chemistry* 72, 1453-1470.
- ✓ Tessier, A., Fortin, D., Belzile, N., Devitre, R. R., Leppard, G. G., (1996): "Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic.
- ✓ Tortonese, E. (1965): Echinodermata. *Fauna d'Italia*, 6. Calderini, Bologna. 1-419.
- ✓ Turk, T. (1996): Živalski svet Jadranskega morja. DSZ Ljubljana. 1-456.
- ✓ Ujević, I., Kljaković-Gašpić, Z., Bogner, D., (2010): Utjecaj suspendirane tvari na akumulaciju kadmija u sediment Kaštelanskog zaljeva, Jadransko more, Hrvatska. *Acta Adriatica: international journal of Marine Sciences* 51, 79-88.
- ✓ Upravno vijeće Lučke uprave Šibensko-kninske županije. (23. prosinac 2008.). Pravilnik o redu u lukama Šibensko - kninske županije. Šibenik: Lučka uprava Šibensko - kninske županije .
- ✓ Uredba o standardu kakvoće voda, (NN 73/2013; NN 151/ 2014; NN 78/2015; NN 61/2016).
- ✓ Viličić D., Legović T., Žutić V., (1989) Vertical distribution of phytoplankton in a stratified estuary. *Aquatic Sciences*, 51, 31-46.
- ✓ Vraspir, J. M., Butler, A., (2009): Chemistry of marine ligands and siderophores. *Marine Science* 1, 43-63.
- ✓ Vučetić T. i sur. (2009) The Great Adriatic flood of 21 June 1978 revisited: An overview of the reports, *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 894-903.
- ✓ Vukosav, P., Mlakar, M., Cukrov, N., Kwokal, Ž., Pižeta, I., Pavlus, N., Špoljarić, I., Vurnek, M., Omanović, D., (2014): Heavy metal contents in water, sediment and fish in a karst aquatic ecosystem of the Plitvice Lakes National Park (Croatia). *Environmental science and pollution research* 21, 3826-3839.
- ✓ Weinberg, S. 1993. *Découvrir la Méditerranée*. Nathan Paris 1-351.
- ✓ Whitfield, M., Turner, D. R., (1986): Chemical speciation in tropical waters—A cautionary tale. *Science of the Total Environment* 58, 9-35.
- ✓ Windom, H. L. (1992): Contamination of the marine environment from land-based sources. *Marine Pollution Bulletin*, 25(1-4), 32-36.

- ✓ Zavodnik, D., Šimunović, A. (1997): Beskralješnjaci morskog dna Jadrana. Svjetlost Sarajevo. 1-217.
- ✓ Zibrowius, H. (1980): Les Scléreactiniales de la Méditerranée et de l'Atlantique nord-oriental. Mé. Inst. Océanogr. 11. 1-284.

D. PROJECT PARTNER 6 – PO DELTA VENETO REGIONAL PARK

1 Premise

The “Study for a morphological plan of Po Delta’s EPS” is funded by the Programme 20142020 Interreg V-A Italy-Croatia and represents a deliverable of Work Package 3.

The protection of the Enclosed Parts of the Sea in the Adriatic from pollution is the main aim of the project, with a special attention in proposing measures to tackle pollution originated from accidental events. WP3 is dedicated to planning the response system to pollution risks in EPS.

Planning the response system as a whole must encompass prevention aspects, therefore – in marine environment – the items of hydrodynamics, morphology and safeguard of natural, social and economics assets.

The study focuses on two areas of the Po Delta, located at North (Caleri lagoon) and South (Sacca del Canarin) of the Po Delta.

The area of the Po Delta is the result of manifold processes given by the interrelation of such a complex transition environment with effects induced by human activities. Quite an important amount of knowledge has been gained along the years and public administrations (Reclamation Consortium, Regional Government and the Po Delta Veneto Regional Park) elaborated several projects aimed at restoring morphological equilibrium as well as safeguarding environmental, social and economic context of the area.

The present study is based on the knowledge gained so far. The main aim is to perform a critical review of The General Programme of the Interventions - elaborated by the Delta del Po Reclamation Consortium in 2015 – taking into account most recent studies and monitoring activities as well as the guidelines for the execution of interventions elaborated by the Veneto Region in 2018.

The document is made up of seven chapters: The Reference Framework is presented in Chapter 2, in Chapter 3 the Strategy is presented to reach the objectives, whereas Methodology is presented in Chapter 4, with a specific discussion about sediment management in Chapter 5. Chapter 6 presents the Monitoring Programme and Chapter 7 gives estimation of costs. Finally in Chapter 8 main bibliographic references are reported.

2 Reference framework

2.1 Environmental framework

The Po River is the most important Italian river and its delta represents a wetland of outmost importance at European level, with an extension of about 180 km². Similarly to what happens in every transition system, the lagoon environment is the result of a delicate dynamic equilibrium between inland and marine dynamics.

Human intervention is fundamental in maintaining such a delicate equilibrium, even if sometimes it produces strong impacts. In recent times, gas extraction operated in the area since the first half of past century until early '60s provoked important sinking phenomena, which in some areas reached 2 -3 metres heavily exposing the population and the whole area to flooding. That was one of the reasons motivating the elaboration of a Plan of Interventions in the framework of Mediterranean Integrated Programmes since 1988. That Plan was followed by General Programme of the Interventions - elaborated by the Delta del Po Reclamation Consortium in 2015 (Consorzio di Bonifica Delta del Po, 2015) and the "Guidelines for the execution of interventions in the coastal area of the Po Delta (Regione del Veneto, 2018).

The institution Po Delta Veneto Regional Park, established in 1997, aims at the protection, valorisation and restoration of environmental, historical and cultural assets of the territory as well as promoting and favouring local communities' traditional activities and way of life.

The Delta area encompasses several lagoons (Caleri, Vallona, Barbamarco, Batteria, Burcio, Basson the so-called "Allagamento Bonelli") and bays ("sacche") such as the "Sacca del Canarin" and "Sacca degli Scardovari". In Figura 2-1 the whole area is represented and Caleri lagoon (North Delta) and Sacca del Canarin (South Delta) are highlighted.



Figura 2-1 Study area: “Caleri lagoon” and “Sacca del Canarin”

Caleri lagoon (Figura 2-2) is the second biggest lagoon of the Delta and occupies an area of about 10 km² between Adige River mouth (north border) and the “Porto Levante” Po River mouth (south border). It communicates with the sea through two inlets: Caleri Mouth and Varco Pozzatini (a regulated artifact) which gives access to the Marinetta-Vallona lagoon system.

The Caleri lagoon actually is not connected to any Po River branches and is not suffering of the excess of fresh water inputs occurring in the other lagoons. Fresh water inputs are quite scarce and originates mostly from drainage plants’ pumping stations and from the many fish farms (ten, covering about 30 km²) surrounding the lagoon itself. Such a type of bordering causes the absence of cane thicket. (Verza e Cattozzo, 2015). Considering its 1000 hectares of extension, an area of about 10% of the lagoon is used for molluscs farming. *Tapes philippinarum* production during the year 2008 was reported at about 900 tons/y (partial data, Provincia di Rovigo - Bioprogramm, 2013).

The “Sacca del Canarin” (Figura 2-3) covers an area of about 6.5 km² between two Po River branches: Busa di Scirocco, at north, and Busa del Bastimento at South, with an average depth of between 1.0 and 1.2 m. There is only one sea inlet and the bay is presently suffering of scarce water circulation as well as

of environmental stresses due to fresh water inputs originating from Po River branches and from two drainage plants' pumping stations (Boscolo e Pellestrina). More precisely, the "Sacca" belongs to the "Basson-Canarin" system that is considered the most complex of the Delta (Verza e Cattozzo, 2015). Despite such a complexity the systems lacks one very important morphological element: the marshes environment. The coastal strip between the two Po River mouths of Po della Pila, i.e. "Busa Dritta" and "Busa di Scirocco", is characterized by absence of rigid coastal defense work, so that the Delta is growing due to the riverine solid transport (Ruol e Pinato, 2016). *Tapes philippinarum* production during the year 2008 was reported at about 2000 tons/y (Provincia di Rovigo - Bioprogramm, 2013) using about 80 hectares, i.e. about 10% of the whole area. Unfortunately in recent years the reduction in the hydrodynamic circulation caused by sedimentation processes and the excess of fresh water inputs led to a progressive depletion of macrobenthic communities and finally to a reduction of productivity (Regione del Veneto, 2019).

Tav. 1.3.1.c
Sistema lagunare costiero
CALERI



Figura 2-2. Caleri lagoon (Verza e Cattozzo, 2015).



Figura 2-3 Basson-Canarin lagoon system (Verza e Cattozzo, 2015).

2.1.1 Hydromorphological Aspects

Dynamicty is the main feature of a lagoon; its shapes are continuously changing. Human interventions aim at a costant balance between the dynamics linked to river inputs and those linked to marine intrusion and coastal processes. The manifold Po River branches, real driver of Delta's hydrodynamics (Falcieri et al, 2013, Maicu et al., 2018), brings sediment which is transported along the coast through northern Adriatic circulation contributing in shaping sand bars ans littorals.

The river and drainage/irrigation system network play also an important role in terms of pollutants loads as well as fresh water input, which influences the development of vegetational associations and zoocenosis along the salinity gradients typical of ecotonal environments. Such input is variable in time, due to meteorological variability, but is changing also as a consequence of human interventions in the upstream river auctions. The interventions determined a general decrease in sedimentary inputs, which necessarily also entails the retreat of the coast line, a weakening of the coastlines and an aggravation of erosive phenomena together with a simplification of the network of internal channels, especially during storm surges.

These phenomena result in a general flattening of the lagoons, but above all in an important reduction in the hydrodynamics and water circulation and, in a vicious circle, a reduction in the efficiency of the mouths of communication between the sea and the lagoons.

The reduction of officiosity of the mouths and internal channels, as well as the flattening of the shallows, bring with it other implications such as a decrease in the safety of navigation and therefore an increase in the risk of accidents.

The particular environmental, social and landscape value of the Po Delta area has aroused the interest of institutions as well as of the world of research and professionals. Numerous experimental campaigns, studies and projects - also internationally - have produced a substantial amount of studies. In particular, the University of Padua, the CNR-ISMAR and various engineering studies have developed various modeling approaches and tools.

In recent times the aforementioned study by Maicu et al. (2018) investigated the hydrodynamics of the Delta through a 3D model, highlighting the role played by the river in regulating the coastal baroclinic circulation, arriving to estimate the renewal times of the lagoon waters, the distribution of the flows between the different branches²¹, and the good general turnover in terms of mass balance. However,

²¹ Also the Regione del Veneto, through its technical agency ARPAV (2012) – Dipartimento per la sicurezza del Territorio – estimated the distribution of flow among Po River branches.

the study confirms in particular the limited exchange and circulation at the Sacca del Canarin and the distinctly marine characteristics of the Caleri lagoon.

The hydrodynamic aspects that characterize the Lagoon of Caleri and the Sacca del Canarin have also been recently investigated by Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l. on behalf of the Po Delta Veneto Regional Park as part of the studies "Numerical modeling to support monitoring activities and the design and implementation of interventions in the Lagoon of Caleri and in the Lagoon of Barbamarco on the Po Delta" (Ente Parco - Ipros, 2018a) and "Numerical modeling to support monitoring activities and the design and implementation of interventions in the Sacca del Canarin on the Po delta", (Ente Parco - Ipros, 2018b).

The hydrodynamic mathematical model made it possible to simulate the general dynamics of the lagoon currents induced by the tide and wind and to identify the bodies of water most penalized from the point of view of hydrodynamic circulation and water exchange. The aim of the modeling was to analyze the current state of the lagoon, evaluate the functionality of the interventions carried out to improve the hydraulic regime and point out the need for adjustments or for the implementation of new interventions.

The two-dimensional simulation software used for the investigations describes, under various motion conditions, the circulation of currents on the shallow lagoon beds (induced by the action of the tide and the wind) and the connected phenomena of convective and diffusive transport that allow to survey the mixing and the water exchange in the different parts of the lagoon basin.

Below are some considerations drawn from the results of the modeling study developed for the Caleri lagoon and the Sacca del Canarin in order to investigate the problems associated with:

- loss of hydraulic functionality of the lagoon mouth;
- loss of hydro-morphodynamic functionality of the lagoon canals;
- poor circulation, excessive residence times and penalization of water exchange in peripheral lagoon areas;
- diffusion of fresh water of fluvial origin in the lagoon, reduction of the salinity of the lagoon waters and scarce exchange with marine waters through the mouth (in particular for the Sacca del Canarin);
- risk from possible pollution, even accidental.

2.1.1.1 Caleri lagoon

Caleri lagoon schematization (Figura 2-4) was obtained from the bathymetry of the lagoon detected in September 2018 and the LIDAR analysis carried out in April 2018 on the entire coastal strip of the Po Delta.

The model includes, in addition to the Caleri lagoon, also a large band of sea in front which allows you to correctly place the boundary conditions in the open sea. It also includes the nearby Laguna Marinetta - Vallona, which is connected to the Caleri lagoon through the Varco Pozzatini, near the island of Albarella, to take into account the non-negligible flow rates that the two lagoons exchange with each other due to the action of the tide. Finally, it includes the Po di Levante, Po di Brondolo and Canal Bianco up to the support of Baricetta, to take into account the effects that these bodies of water have on the dynamics of the tidal currents in the Marinetta - Vallona lagoon, the course of the Po di Maistra and a strip of sea in front of the lagoons of Caleri and Marinetta - Vallona extended approximately up to the bathymetric -15.

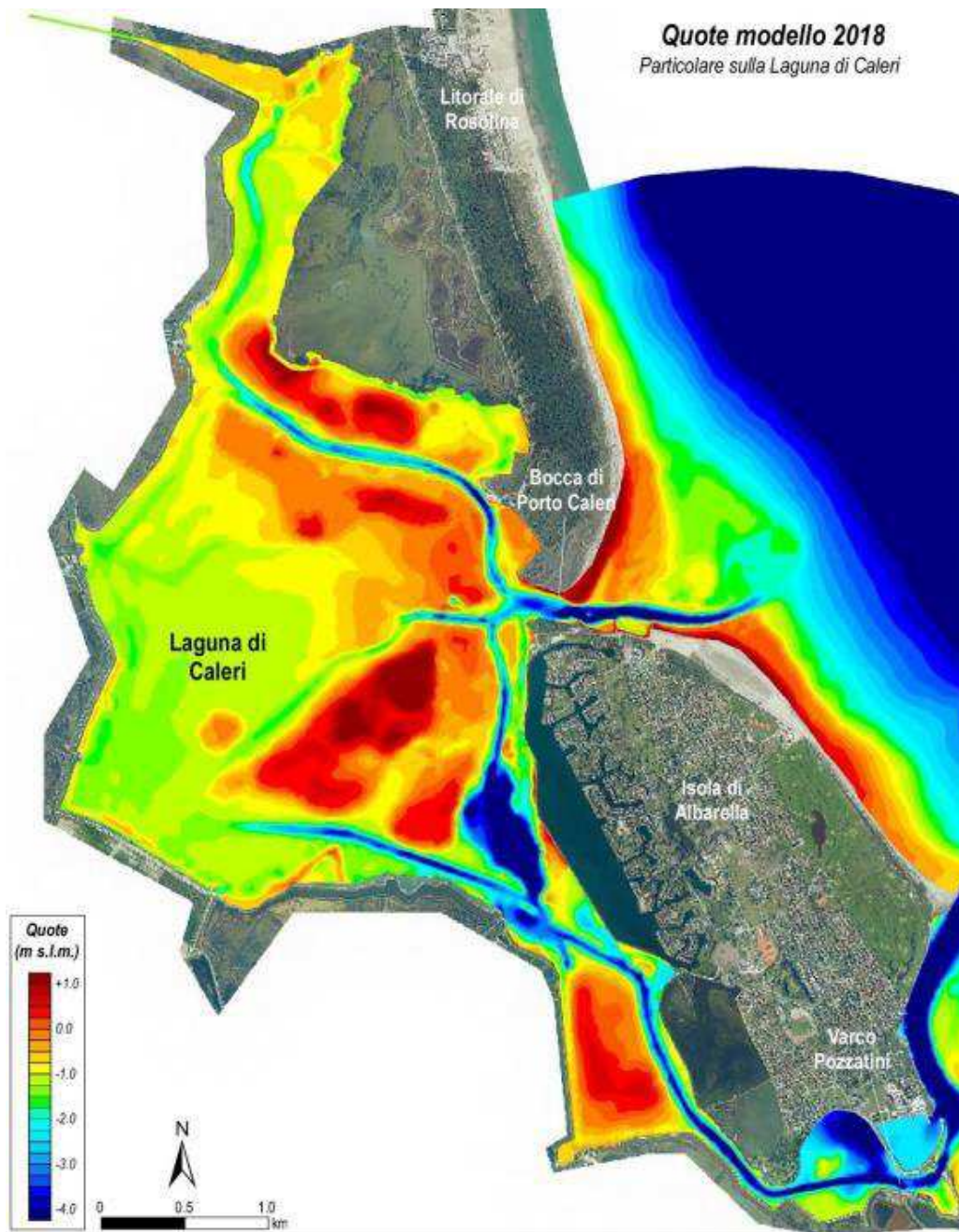


Figura 2-4 Caleri lagoon schematization. Base: ortofoto volo LIDAR aprile 2018 Regione del Veneto, georeferenziata - Fonte: Ente Parco – Ipros, 2018°

Loss of hydraulic functionality at the sea mouth

The study highlighted the main aspects of the morphological evolution undergone by the mouth of Porto Caleri between 1962 and today through the overlapping of georeferenced aerial photos found in the "Geographical Archive of the Po Delta Lagoons", of the portal created by the Reclamation Consortium Delta del Po in support of lagoon monitoring activities (<http://sil.deltapo.it/web>).

From the comparison of the aerial photos, it has been found that, while on the one hand it seems evident that the interventions carried out to defend the island of Albarella from the end of the 1960s have contributed to changing the layout of the canal in its western part (inside the lagoon) and central, on the other it has emerged that, in recent years, the most external section of the canal itself has undergone the greatest changes. In particular, it should be noted that as a result of the advancement of the sandy deposits that delimit the northern mouth (Rosolina coast), the canal has progressively moved southward in recent years, narrowing the width of its section, and that this trend does not seem to have stopped.

The recent construction of the two groynes on the southern side of the mouth has allowed consolidating the direction of the axis of the canal in the WEST-EAST direction, favoring the maintenance of the seabed. However, the efficiency of the mouth is still penalized by the provision of sandy sediments from the North which slide into the canal reducing its depth.

Through the hydrodynamic modeling it was therefore possible to evaluate the effects of the outgoing and incoming flows at the mouth:

- outside the mouth, especially in the outgoing flow phase, the tidal current remains substantially confined in the mouth channel up to the open;
- in the incoming flow phase, part of the current entering the lagoon also comes from the flats that mark the mouth channel on its northern side. Considering the intensity of the currents and the reduced depth of the seabed, it has been verified that the currents themselves can transport not negligible quantities of sandy sediments into the mouth channel.

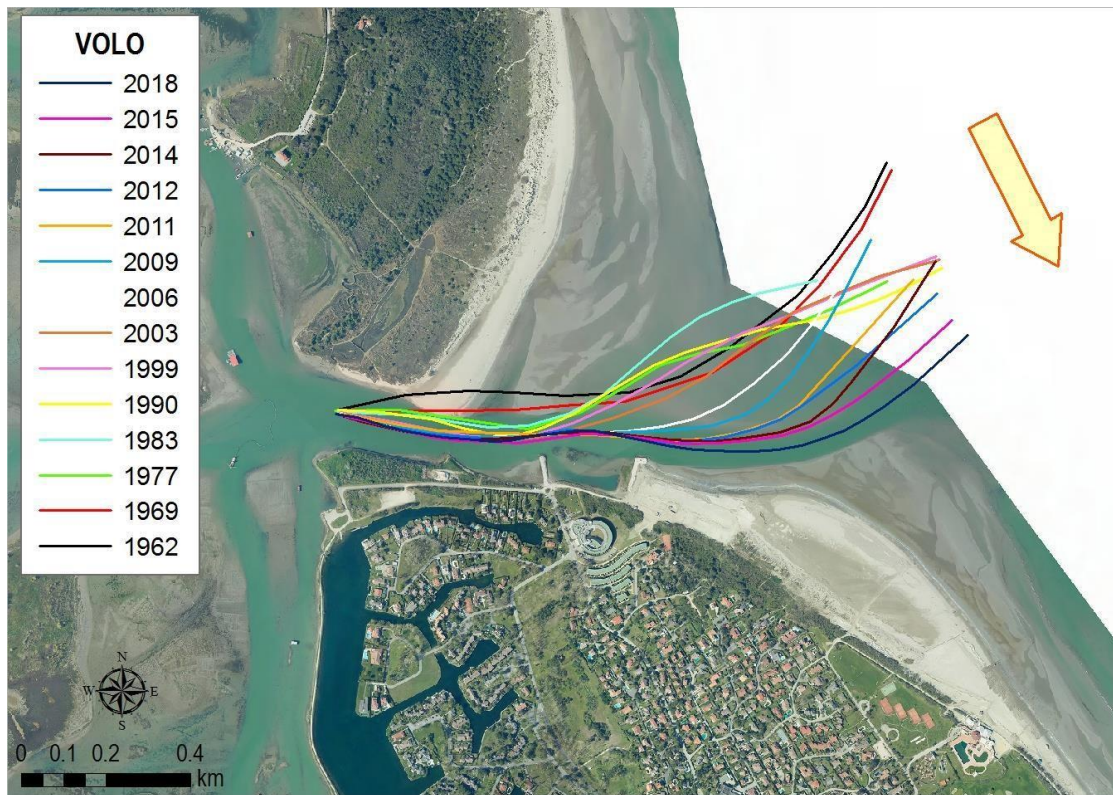


Figura 2-5 Axis of Caleri mouth channel derived from aerial photos from 1962 to 2018 - Source: Ente Parco – Ipros, 2018a

These morphological dynamics generally involve the narrowing of the width of the channel of the mouth channel, with consequent increase in speed and penalization of hydraulic efficiency, and the interruption of the channels immediately inside, which penalizes the tidal flows that occur through the mouth itself and the exchange of lagoon waters.

Loss of hydro-morphodynamic functionality lagoon channels

From the hydrodynamic modeling it is possible to grasp some main aspects of the tidal circulation within the lagoon canals:

- the higher speeds of the current both in incoming and outgoing flow are concentrated in the areas closest to the mouth. In these areas the speed itself exceeds 0.8 m/s with peaks of just over 1.0 m/s in the narrowing of the mouth itself. The speed of the current remains sustained along the canal branches which branch off from the mouth towards the north (branch A), towards the west (branch D) and towards the south (branch B);

- in the western part of the lagoon, beyond the marshes and shallows carved by the aforementioned main channel branches (which represents the so-called "flood delta" or "flow delta") the action of the tide is very weak (maximum speeds lower than 10 cm/s);
- the maps also highlight the complexity of the circulation of the tidal currents that is established in the southern part of the lagoon where the strip of water is located which separates the basins of influence of the Bocca and Varco Pozzatini. In fact, it can be observed that, while keeping the gate open, in the incoming flow phase the currents that feed the pools of water located along the south-western edge (which separates the lagoon from the adjacent Valle Capitanìa) are fed almost exclusively by the mouth. Conversely, in the outgoing flow phase, always maintaining the opening of the Pozzatini gate, the flows coming from the same bodies of water also belong, at least in part, to the gate itself.

It can therefore be concluded that the currents in the innermost part of the basin, towards the western margin, are weak or almost absent, where the action of the tide does not arrive and where the exchange of water depends on the slower and more uncertain dispersive processes linked to the action of the wind. The canals of the western part of the lagoon are therefore not very active.

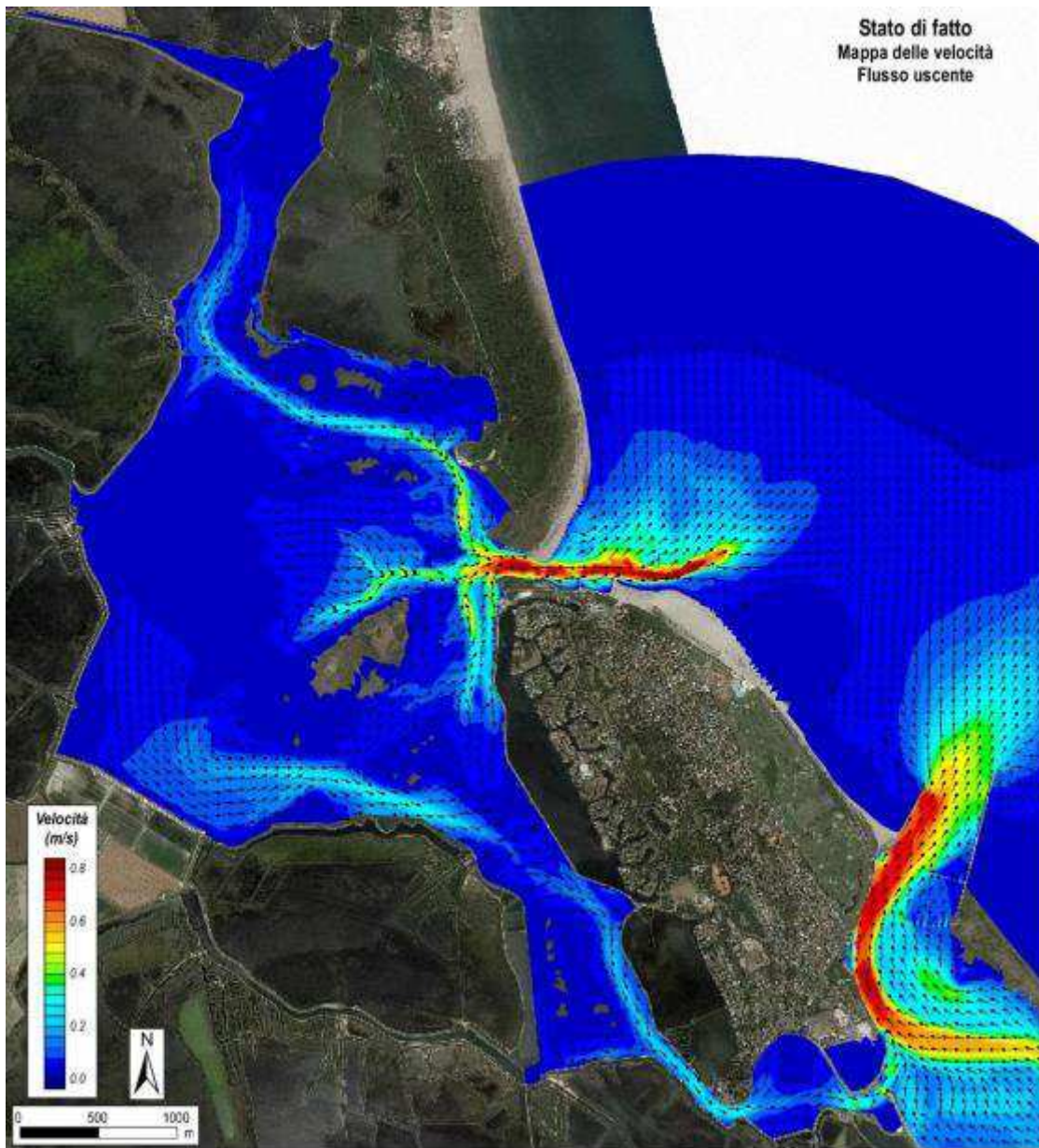


Figura 2-6 Maximum speeds during outflow phase. Source: Ente Parco – Ipros, 2018a

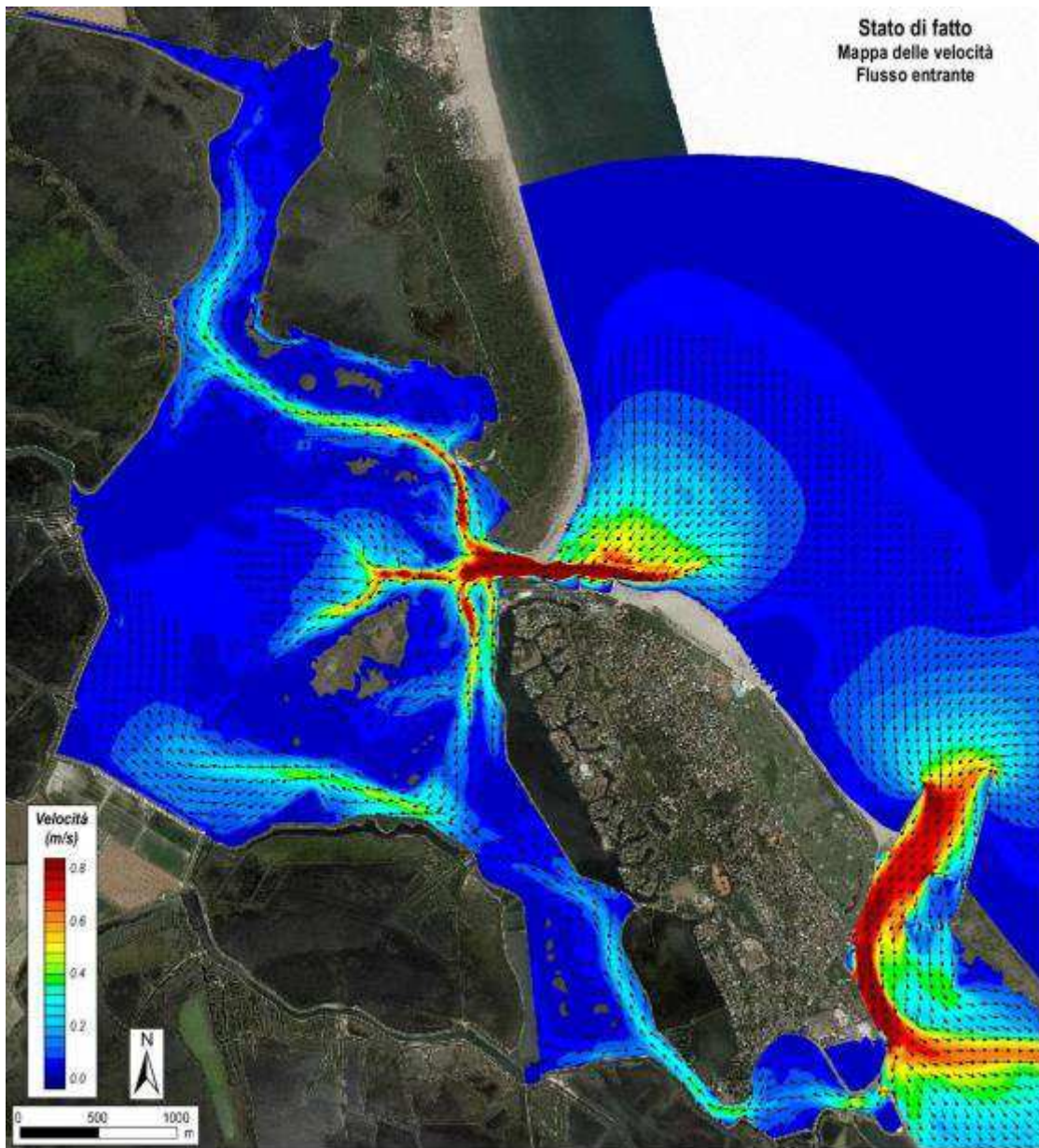


Figura 2-7 Maximum velocities during incoming flow phase. Source: Ente Parco – Ipros, 2018a

Poor circulation and flushing time

The Caleri lagoon model allowed to evaluate the parameter called "Local Flushing Time" which can be considered a very effective parameter for evaluations of practical interest on the capacity of water renewal in semi-confined tidal basins, as is the case of Caleri.

From the results of the simulations, it was possible to observe that the Flushing Time is quite low (less than 5 days) in the whole body of water pertaining to the mouth. Low values of the Flushing Time (less than 10 days) were also detected along the canal branches departing from the mouth towards the interior of the lagoon (branches A, B, D).

The Flushing Time was high throughout the western portion of the lagoon, beyond the belt of shallows and marshes which is located in the central part of the lagoon itself and which constitutes the so-called "flow delta". In these areas, due to the absence of channels that favor the propagation of the tidal currents and the triggering of secondary circulation phenomena, the water masses move locally but, in fact, are not renewed except in very long times based on the action of the diffusive processes alone, and on the random action of the wind.

Low Flushing Time values are also found near Varco Pozzadini, the positive effects of which extend substantially to the northern limit of the first of the two confined basins that occupy the west side of the island of Albarella. Further north, beside the second of the two aforementioned basins, Flushing Time is somewhat longer in the stretches of water where, in fact, the "watershed belt" is established, which separates the basins of influence of the mouth and Varco Pozzadini.

In conclusion, the feeding of the lagoon from the two mouths (the actual mouth and the Varco Pozzadini) inevitably leads to the formation of the watershed belt that separates the basins of influence of each mouth, and in which the currents are very weak or almost absent.

It can therefore be said that the modeling simulations have quantified the Flushing Time of the lagoon, which is contained within acceptable values (a few days at most) in all the stretches of water close to the mouth and in the first stretch of the channels that from the mouth branch out into the lagoon.

In the innermost parts of the lagoon and along the western margin, the Flushing Time values are considerably longer, indicating conditions of substantial stagnation of the waters.

In the stretches of water next to the Varco Pozzadini, the Flushing Time values are in turn relatively limited, due to the exchanges that take place with the Marinetta - Vallona lagoon.

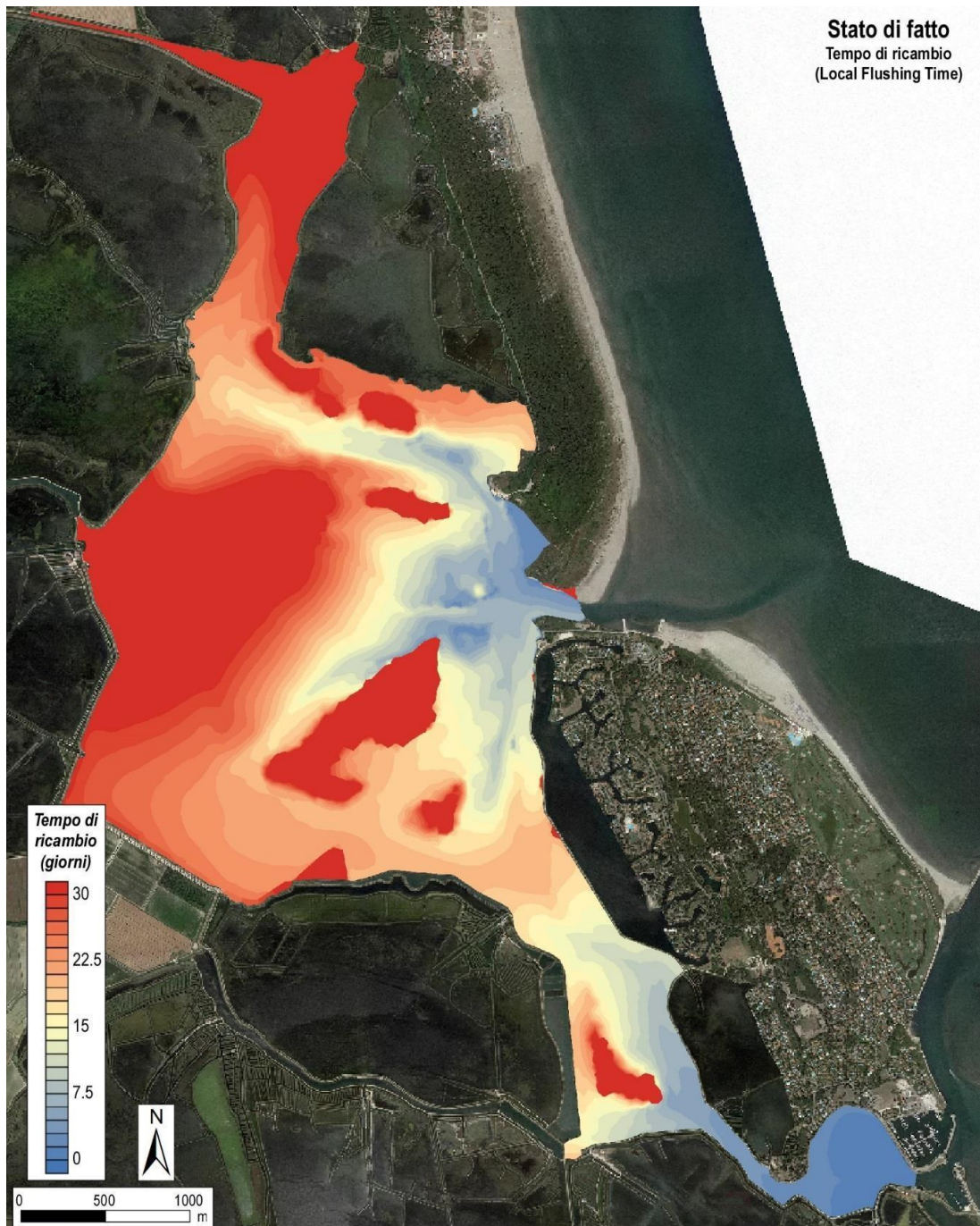


Figura 2-8 Local Flushing Time in December 2018 – Source: Ente Parco – Ipros, 2018a

Risk of pollution from accidental events

On the basis of the maps of the maximum speeds during the flood tide, shown in Figura 2-6 and Figura 2-7, it is possible in a completely qualitative way to identify the main vulnerabilities in the event of any accidental spills within the lagoon.

Possible sources of pollutants into the lagoon waters could be any spills of hydrocarbons from boats and motor boats moored in – or moving from and to - Porto Caleri and Porto Mocenigo, rather than from a possible naval accident at sea just off the coast.

There are two further possible critical issues that must be taken into consideration in relation to the spread of pollutants in the Caleri Lagoon:

- Diffusion of pollutants in the upstream rivers, which due to the coastal currents, once they reach the mouth of the sea, could enter the lagoon through the two mouths; in this sense, it will be necessary to use appropriate systems for the interception of pollutants along the two mouths in order to avoid their entry and diffusion along the lagoon canals;
- Entry of pollutants through the water discharged from the water pumps or from the flow regulation devices present along the lagoon end; evidently, these contributions must necessarily be avoided by the managing body of the aforementioned hydraulic artefact in order to avoid their diffusion within the lagoon.

For each of the aforementioned locations, a possible diffusion of a pollutant was evaluated as the tide flow and the currents in the internal channels changed. All areas with poor internal circulation appeared to be particularly critical, having been calculated from the modeling of Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l. a water changeover time of up to 30 days.

In the event of accidental spill occurring during flood tide, some internal areas have been identified (Figura 2-9) at particularly reduced speeds (maximum speeds below 10 cm/s), where it is believed that the possible dispersion of a pollutant could be more concentrated.

In particular:

- A spill in Porto Caleri could cause, due to the effect of the currents, an accumulation of pollutants in the most western parts (locality Valle Casonetto) and north of the lagoon (towards Rosolina Mare), where the current speeds are substantially zero and the Flushing Times are particularly long (of the order of 30 days); it is estimated that a particle of pollutant takes about 5 hours to reach the most extreme areas in the north, which in any case is less than a flood tide cycle, equal to an average of 6 hours; therefore, although the speeds in the

terminal part of the channel heading north are very low, it's not possible to conclude that the area near Rosolina Mare is free from pollution phenomena;

- A spill of pollutants at Porto Mocenigo would have similar effects, being the flow of the current directed towards the western part of the lagoon (Valle Casonetto locality); in this case, considering the proximity of the two areas, the pollutants would take a relatively short time to spread to the site in question;
- Similar effects could be found if the entry of pollutants occurred from the sea through the Bocca di Caleri, even if in this case the diffusion times could be longer;
- The monitoring and control of Varco Pozzatini is also very important, especially in consideration of the large, very confined area dedicated to shellfish farming and the breeding of oysters right near the passage. In this area the current speeds are not particularly high, the Flushing Time is short (1-2 days) in consideration of the relative proximity to the sea inlet, but for the same reason it could be reached quickly enough by one spread originating in the sea.

The following table provides an estimate of the times of diffusion of pollutants to the most critical areas in case of flood tide and the relative water Flushing Times deduced from the Figura 2-8:

Tabella 2-1 Estimate of pollutant's diffusion times toward most critical areas and flushing times

Spill area	Critical area	Distance (km)	Diffusion time (h)	Flushing time (d)
Bocca	Area nord (località Rosolina Mare)	5.0	4 ÷ 5	25-30
	Area ovest (località Valle Casonetto)	4.0	3 ÷ 4	25-30
Porto Caleri	Area nord (località Rosolina Mare)	4.0	3 ÷ 4	25-30
	Area ovest (località Valle Casonetto)	3.0	2 ÷ 3	25-30
Porto Mocenigo	Area ovest (località Valle Casonetto)	2.5	3 ÷ 4	25-30
Varco Pozzatini	Area sud (località area di molluschicoltura)	0.7	0,5 ÷ 1	2-3

Conversely, in the event of an ebb tide, there are no particularly critical areas, as the current speeds are sufficiently high (maximum speeds between 0.2 and 0.6 m/s) to allow the waters to flow out to sea through the mouth di Caleri and the Varco Pozzadini.

For further information on the circulation of pollutants, however, it is considered essential to prepare a suitable transport and diffusion model of the pollutants in the Caleri lagoon in order to carefully verify the areas subject to a higher risk of pollution.

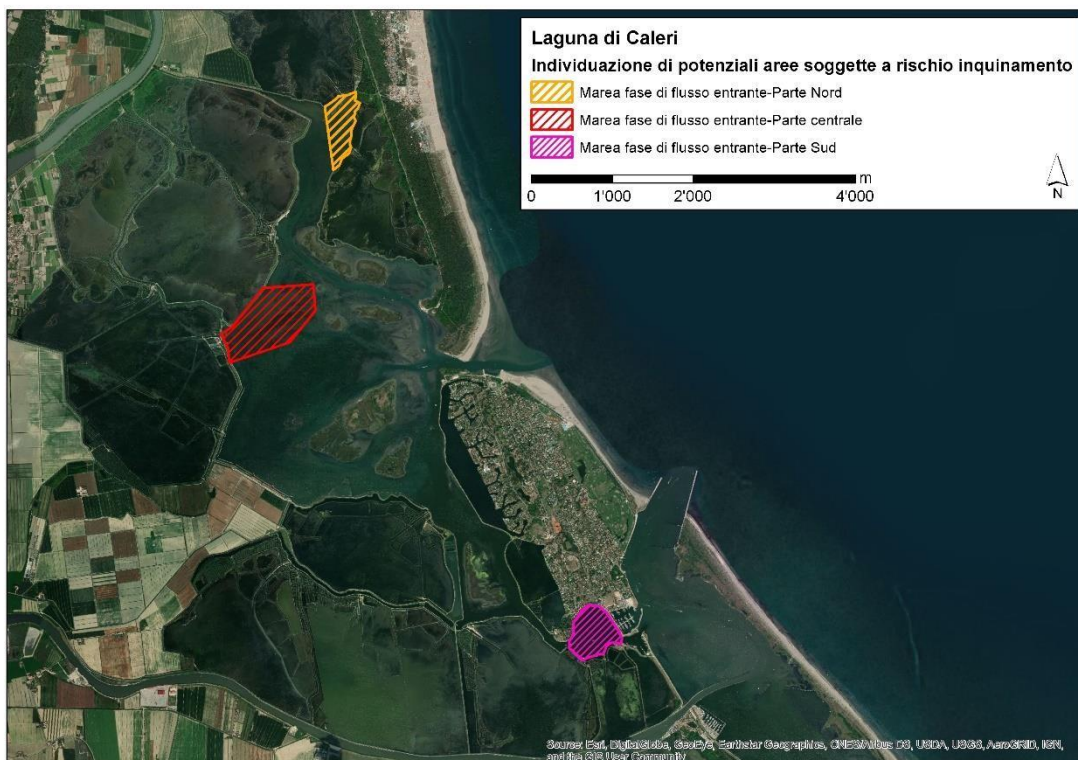


Figura 2-9 Critical areas in case of spill during flood tide

2.1.1.2 Canarin lagoon

As far as the Sacca del Canarin modelling is concerned, elaborated in the aforementioned study (Ente Parco – Ipros, 2018), in addition to a 2D analysis, a three-dimensional multi-layer with variable density one was also made. The aim was to describe the diffusion in the lagoon of the fresh water coming from the connections with the nearby branches of the Po (Busa di Scirocco and Busa del Bastimento) and that of fresh water transferred into the sea by the same branches of the Po that return to the lagoon through the mouth.

The schematization of the Sacca (Figura 2-10) was obtained from the bathymetry detected in September 20118 and LIDAR analysis executed in April 2018 on the entire coastal strip of the Po Delta.

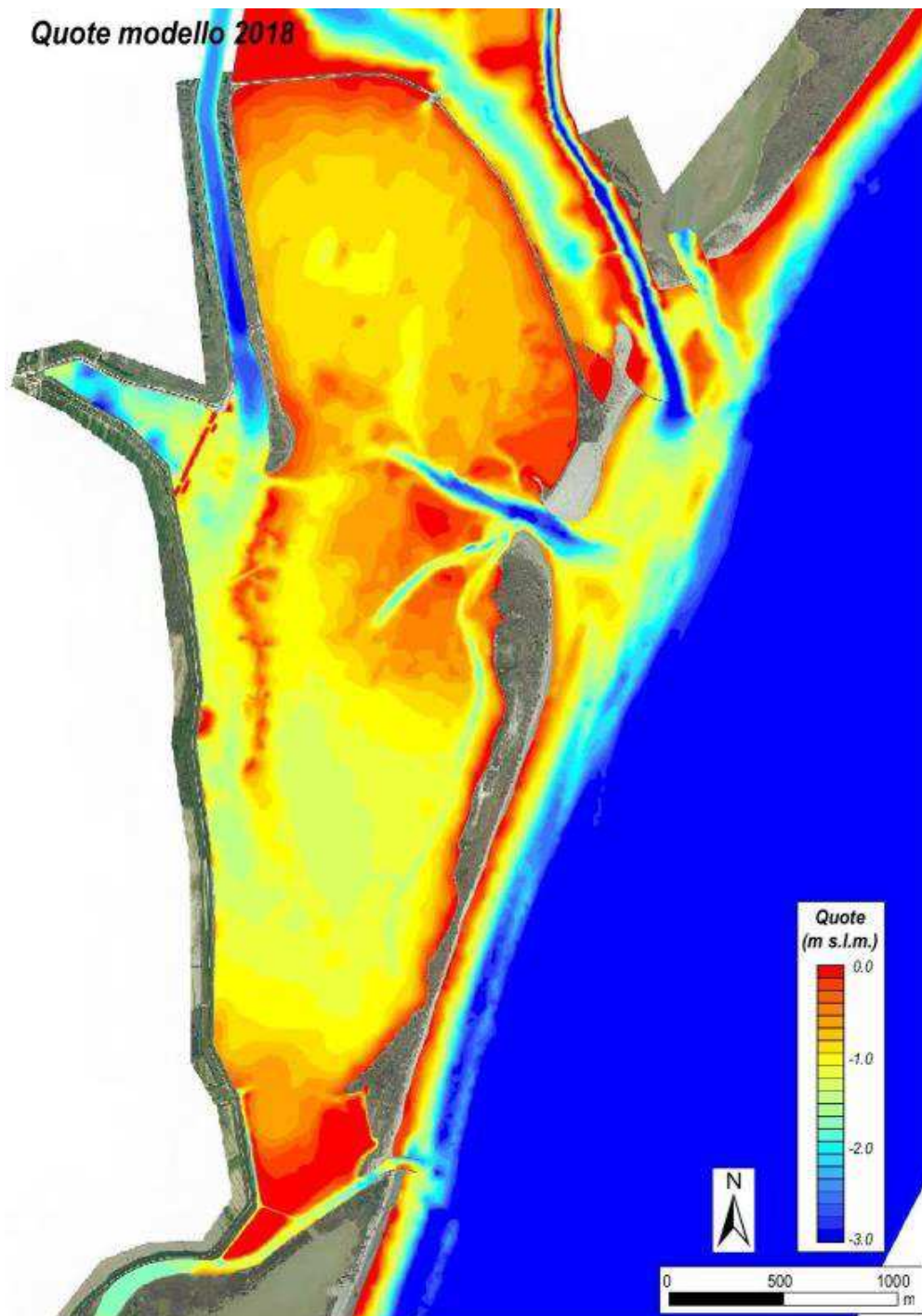


Figura 2-10 *Sacca del Canarin schematization. Base: ortofoto volo LIDAR aprile 2018 Regione del Veneto, georeferenziata. Source: Ente Parco – Ipros, 2018b*

In addition to the Sacca del Canarin area, the model includes a large band of sea which allows you to correctly position the boundary conditions in the open sea. It also includes the delta branches of the Po to schematize the dynamics of the river flows which, in ordinary and flood conditions of the river, determine both the fresh water inlets that enter the lagoon through the aforementioned passages to the north and south, and the dynamics of stratification and mixing between fresh and salt water in the marine area in front of the mouth.

Loss of hydraulic functionality at the sea mouth

The results of the simulations with the model show that the highest speeds of the current, both in the incoming and outgoing flow phase, are observed in the areas close to the mouth, with values greater than 0.5 m/s and with peaks greater than 1 m/s calculated in the narrowing of the mouth.

The study also shows that the water exchange through the sea inlet is not affected by the wind and its direction, but only by the tide.

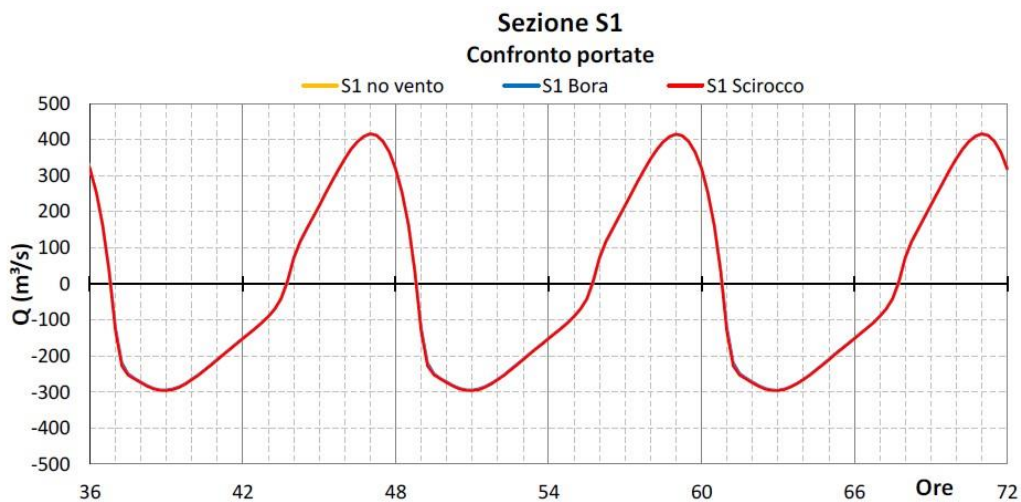


Figura 2-11 Comparison between flow at the mouth (S1 section) with no wind, Bora wind (35°) and Scirocco (135°) wind. It's not possible to distinguish different patterns. Source: Ente Parco – Ipros, 2018b

The morphology of the seabed in the areas adjacent to the mouth is subject to continuous mutations caused by the effect of the tide and storm surges. These morphological dynamics involve, in general, the narrowing of the mouth channel, with consequent increase in speed and penalization of hydraulic efficiency as well as the interruption of the channels immediately inside. This phenomenon penalizes the tidal flows that occur through the mouth itself and the exchange of lagoon waters.

Loss of hydro-morphodynamic functionality lagoon channels

As regards the circulation of the lagoon currents induced by the tide and the wind examined through the mathematical modeling in conditions of maximum incoming and outgoing flow (Figura 2-12, Figura 2-13 e Figura 2-14) some important aspects can be grasped:

- the highest speeds of the current, both in incoming and outgoing flow, are concentrated in the areas closest to the mouth. In these areas the speed itself exceeds 0.5 m/s with peaks of just over 1 m/s in the narrowing of the mouth itself. Outside these areas, the action of the tide is very weak (maximum speeds below 10 cm/s). The preferential lines of the current are those along the canal branches adjacent to the mouth, which have recently been reactivated with dredging operations. It is observed that these routes go west and south while they are practically absent, due to the absence of canals, towards the northern basin;
- it is observed that in the southern part of the Sacca a "partiacque" zone is established where the speeds practically approach zero. To the south of this belt the tidal dynamics is evidently controlled by exchanges through the nearby mouth of the Po (the Busa del Bastimento), connected to the lagoon through two channels (the so-called "paradelli");
- it is observed that in the northern part of the Sacca the currents in proximity to the passage connecting with the external river branch have the same direction as those that flow through the mouth, for which reason there is not a real watershed belt;
- finally, it is noted that the effect of the wind on the tidal circulation is modest, both in the case of the Bora wind and in the case of the Scirocco wind. Obviously, due to the action of the wind, the current intensifies in the open sea, where the action of the tide is not significant, but does not change significantly within the Sacca.

From these considerations, it can be deduced that the action of the tide cannot reach the most peripheral parts of the lagoon, in particular, in the southern part, the two channels connecting the branches of the mouth of the Po represent the only ways for a partial water exchange.

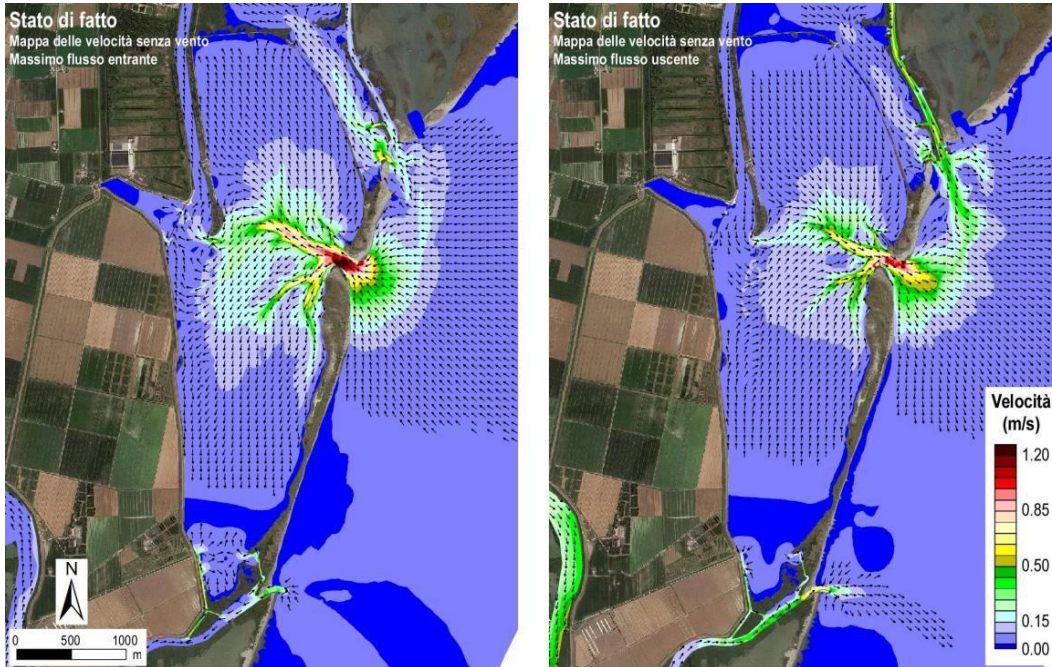


Figura 2-12 Maximum speeds during flood tide (left) and ebb tide (right) with no wind – Source: Ente Parco – Ipros, 2018b

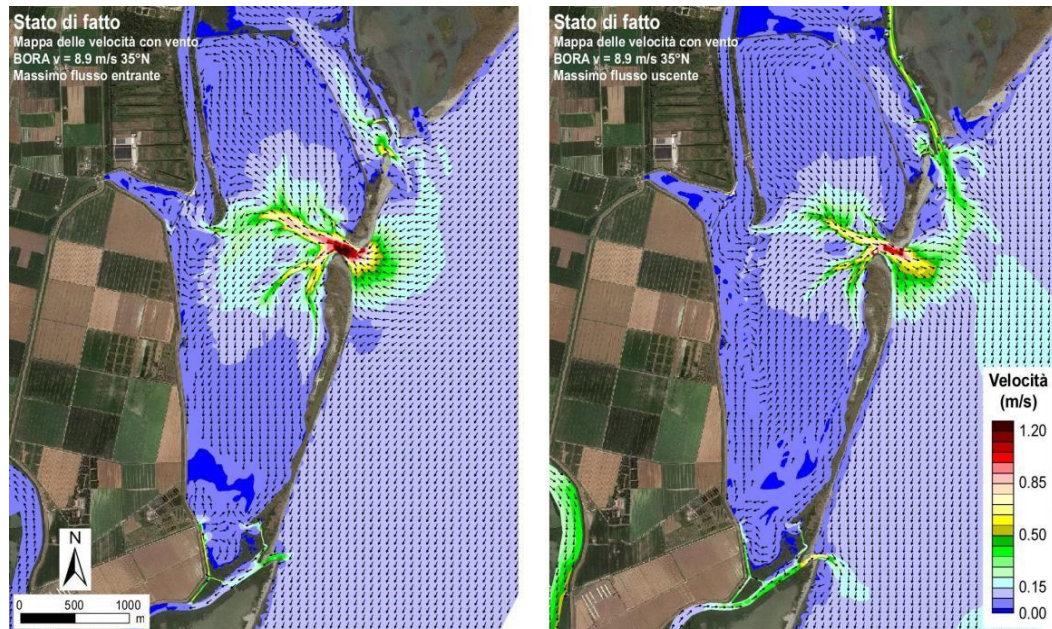


Figura 2-13 Maximum speeds during flood tide (left) and ebb tide (right) in case of Bora wind - Source: Ente Parco – Ipros, 2018b

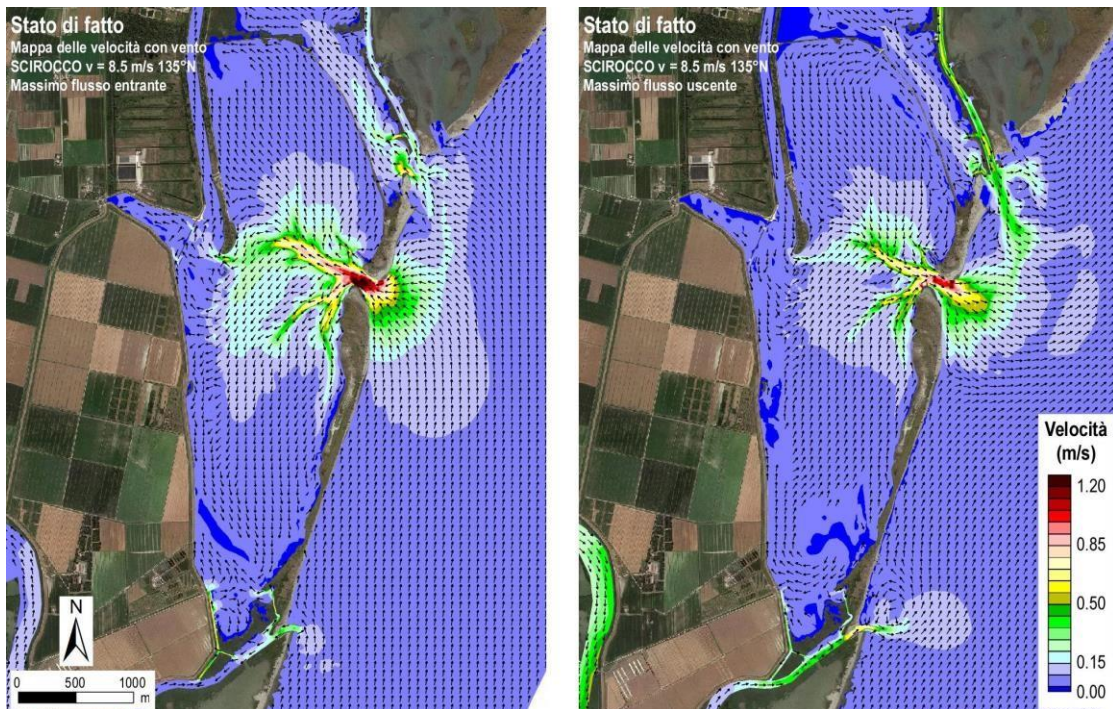


Figura 2-14 Maximum speeds during flood tide (left) and ebb tide (right) in case of Scirocco wind -
 Source: Ente Parco – Ipros, 2018b

Poor circulation and flushing time

The modeling study assessed the "Local Flushing Time" which can be considered a very effective parameter for evaluations of practical interest on the water renewal capacity in semiconfined tidal basins, as is the case with the Sacca of Canarin.

From the results of the simulations, it has been observed that the Flushing time is short (less than 5 days) in the whole body of water afferent to the mouth with lower values in the bodies of water pertaining to the small north passage and in the areas in communication with the fluvial branches to the south. The highest values are recorded in the central part and along the margins and in particular, in the discharge basin of the Boscolo dewatering pump. In these areas, due to the lack of branches of internal channels capable of spreading the tidal current, the water masses move locally, but in fact they are not renewed except in very long times and only due to diffusion phenomena. This indicates the presence of water stagnation phenomena.

In the areas close to the connection channels between the lagoon and the nearby branches of the Po, the Flushing time values are very short. This indicates that, although the model assumes the Po river in

lean conditions implying low flows entering the lagoon, such flows have a significant effect on water changes. In fact, the lagoon-river exchanges are not in equilibrium, but the flow rates directed from the river to the lagoon prevail over those directed in the opposite direction. Consequently, unlike the tidal exchanges through the mouth which on average have a zero balance, the exchanges with the river induce a direct net flow from the river to the lagoon which produces significant effects on the local exchange of waters.

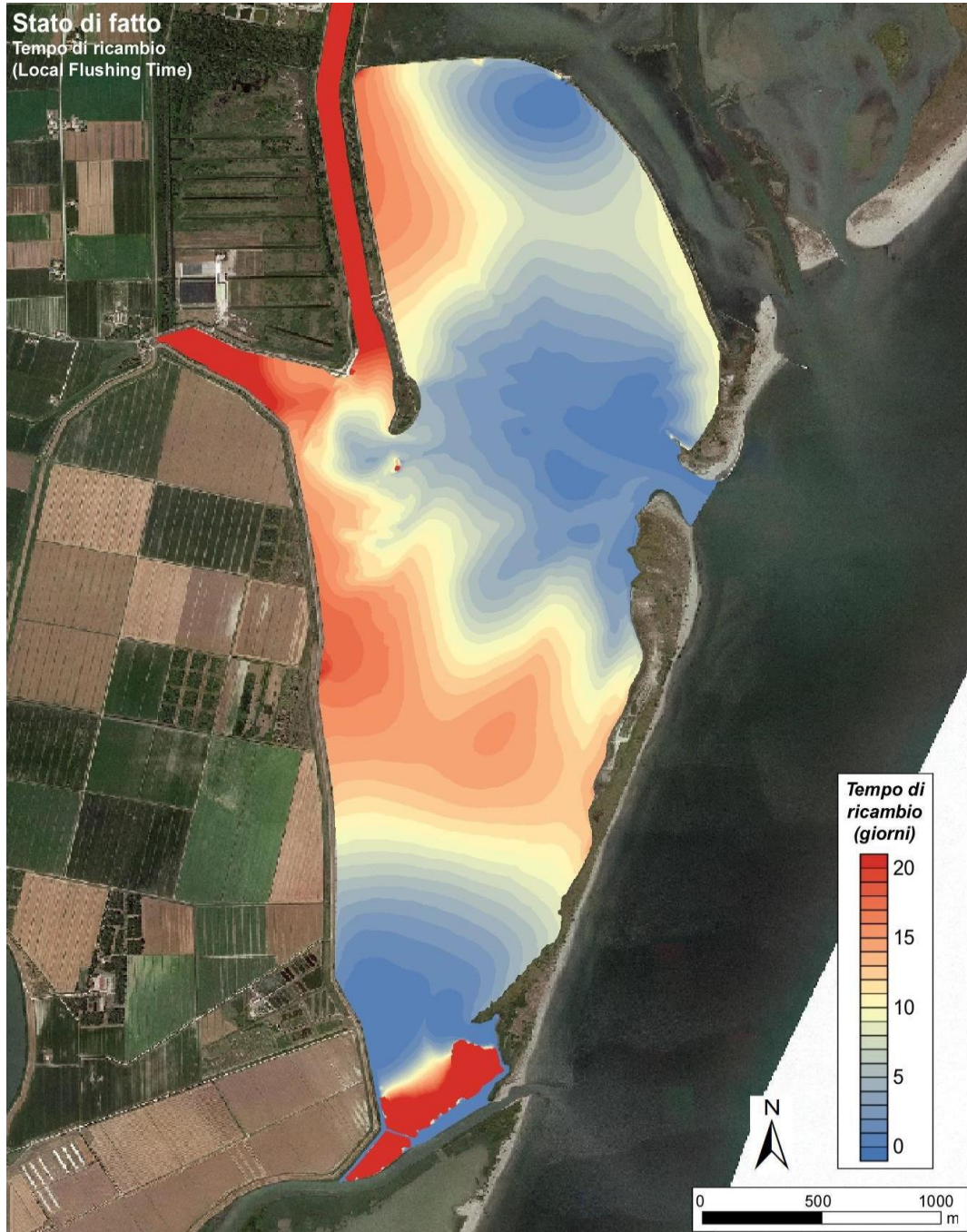


Figura 2-15 Local Flushing Time – Source: Ente Parco – Ipros, 2018b

Fresh water inputs and salinity reduction

The study shows how the waters of the Sacca exchange with the waters coming from the river Po through two communication routes: a small passage in the North, which in normal conditions conveys $3 \div 4 \text{ m}^3/\text{s}$ of fresh water, and a second place to the south that in normal conditions conveys flow rates of the order of $12 \text{ m}^3/\text{s}$ into the lagoon.

The model highlights how the southern passage in connection with the Busa di Scirocco plays a fundamental role in the diffusion of fresh water in the lagoon. This is because, although the flow exchanged is not very high - in quantitative terms - compared to the exchanges that take place at the mouth, it is still very relevant for the effects it can have on the salty content of the Sacca. All the more if we consider that the evaluation does not take into consideration the contribution of the further canal (or "paradello") existing at the southern end of the Sacca, which connects the Sacca itself with the Busa del Bastimento near the mouth of the latter. Although there is no direct measurement, the model estimates a fresh water supply of around $25 \div 30\%$ compared to that of the main passage.

The criticality of these contributions lies in the fact that these are permanently directed towards the lagoon without following the trend of the tide, thus significantly affecting salinity in the bodies of water in the marginal areas of the Sacca.

It follows, on the one hand, that the introduction of fresh water from these passages tends to progressively invade and saturate the lagoon bodies of water from the rear edge without interacting with the tidal dynamics, on the other that in the areas where these passages introduce fresh water the residence time of the fresh water itself is very long.

Risk of pollution from accidental events

From the analysis of the currents and residence times, it is possible to make some qualitative considerations by checking two possible scenarios: spillage inside the Lagoon and entry of polluted water through the mouth and the north and south passages.

Possible sources of pollutants could be any spills from boats and motor boats moored at the Boscolo dewatering basin or in navigation within the lagoon or spills from a possible naval accident at sea not far from the coast or the occurrence of a spill in the waters of the river Po.

The possibility of a pollution event originating from the dewatering pumps or from the flow regulation devices present along the lagoon border must also be taken into consideration; evidently, these contributions must necessarily be avoided by the managing body of the aforementioned hydraulic structures in order to avoid their diffusion within the lagoon.

For each of the feasible sources of pollution, a possible spread and dispersion within the lagoon was assessed as the tide and currents in the internal canals vary.

The analysis of the currents within the lagoon both ebb and flood tide highlights large areas not adequately reached by the tidal currents. The consequence of this is that if the spillage takes place in these areas, the lagoon would not be able to guarantee rapid water exchange. In fact, the water renewal times are in the order of 15-20 days, with consequent persistence of the pollutant in the waters, entrusting the re-mixing of the waters only with the effects of secondary circulation induced by the wind, albeit discontinuous and uncertain. The same problem occurs in the event that the spill occurs inside the drainage basin of the Boscolo dewatering pump (which communicates with the lagoon waters only through two small passages) as well as in the canal of the Enel power plant.



Figura 2-16 *Critical areas in the Sacca del Canarin*

In the event of spillage into the sea during flood tide conditions, entry into the lagoon would occur through the mouth. The currents in the entrance channel would disperse the pollutant throughout the north lagoon in an estimated time of 2-3 hours, up to the southern part of the watershed separation strip in just over 3 hours. The renewal times of the two areas are different and are estimated at 5 ÷ 8 days for the north lagoon while around double for the south belt.

In case the pollutant came upstream from the river Po, the entry into the lagoon would take place through the northern passage which, although small, causes the pollutant to be dispersed very slowly in the northern part by the currents. However the branches of the internal channels of the lagoon are able to guarantee a very short renewal time, in the order of a few days.

On the contrary, if the pollution came from the connection to the south with the Busa del Bastimento through the two so-called "paradelli" channels, the presence of the watershed separatino area would create a sort of buffer zone against the dispersion of the pollutant thus protecting the rest of the lagoon, circumscribing the problems to the southern part and in any case in a few days the waters would be completely renewed.

The flows that the two rivers convey in the lagoon under normal conditions are of the order of $3 \div 4 \text{ m}^3/\text{s}$ from the north passage and about $12 \text{ m}^3/\text{s}$ through the single southern passage while there is no direct estimate of the flow exchanged by the second channel placed near the mouth all the way, the model calculation indicates that it provides a water contribution equal to about $25 \div 30\%$ compared to that of the main passage. These flows can increase, even if not much, in the event that the river's hydrometric levels are sustained during soft and flood events. However, it should be remembered that exchanges through the gates are permanent and are not affected by the trend of the tide.

The following table provides an estimate of the times of diffusion of pollutants to the most critical areas and the relative water renewal times deduced from Figura 2-16:

Tabella 2-2 Estimate of pollutant's diffusion times toward most critical areas and flushing times

Spill area	Critical area	Distance (km)	Diffusion time (h)	Flushing time (d)
Bocca	Area nord	2.3	$2 \div 3$	5 - 8
	Area ovest (in prossimità bacino idrovora Boscolo)	1.6	$0 \div 1$	3 - 8
	Area sud (fascia partiacque)	3.2	$2 \div 3$	10 - 15
Varco nord	Area nord	2.3	$2 \div 3$	5 - 8
Varco sud	Area sud (fascia partiacque)	0.8	$1 \div 2$	2 - 3

For further information on the circulation of pollutants, it is essential to prepare a suitable transport and diffusion model of the pollutants in the Canarin lagoon in order to carefully verify the areas subject to a higher risk of pollution.

The progressive prevalence of river flows entails further considerable ecosystem problems as better illustrated in the following paragraph. The reduction of salinity in fact determines difficult conditions for the establishment of the fauna and flora typical of brackish environments, bivalve molluscs are more subject to potential anoxic crises and other fish resources find few suitable environments as nursery and shelter areas.

These phenomena also have serious repercussions on the socio-economic context of the entire delta area, as the shellfish farms and the exploitation of fish resources represent the first source of income for an important part of the population, especially in the municipalities of Rosolina and Porto Tolle.

2.1.2 Environmental aspects

2.1.2.1 Biodiversity and habitats

The uniqueness of the lagoon environment consists in an incomparable wealth in terms of biodiversity and presence of valuable habitats.

The salt marshes are islets formed by silt-clay sediments constantly emerged except in periods of high tide. In these environments, vegetation characterized by typical adaptations to salinity (halophilous) develops. Among the main species present, we find *Salicornia veneta*, *Arthrocnemum fruticosum*, *Limonium serotinum*, *Aster tripolium*, *Puccinellia palustris* and *Inula crithmoides*. These plants perform an important stabilizing action, thanks to their protection, construction and soil reconstruction capabilities. In fact, they dissipate the energies of currents and winds, maintain the shade and therefore the humidity and cohesion of the soils, protect the surfaces with the root systems, capture and retain the debris and sediment brought by the tides.

At the mouths of the river, where the supply of fresh water prevails over the salty one of the sea, there are the "bonelli", muddy soils emerging at low tide, in which a thick reed bed mainly consisting of *Phragmites australis* develops.

The sand stripes ("scanni") of the littoral, intrinsically unstable and constantly evolving, are affected, on the one hand, by the "construction" phenomena related to the supply of sediments and, on the other, by "destructive" phenomena such as marine and wind erosion. Numerous anthropogenic interventions are added to the natural disturbing agents. It follows that the natural vegetation series are altered and interpenetrated, giving rise to complex and difficult to frame mosaics. The marked dynamism of the "scanni" determines the continuous change in the vegetation and habitats that grow on them. It can be said that a habitat on the beach is unlikely to maintain its perimeter from year to year, with extreme examples even of disappearance or reappearance of entire bands of vegetation.

As reported in the coastal lagoon Atlas of the Po Delta (Verza and Cattozzo, 2015), the vegetation seriation of the areas of the “scanni” can be summarized as follows:

- aphitic zone (shoreline, without vegetation)
- debris deposit area with cakileto (*Salsolo kali - Cakiletum marítimae*)
- embryonic mobile dunes with agropireto (*Sporobolo arenarii Agropyretumjuncei*)
- white dunes with ammophilet (*Echinophoro spinosae Ammophiletum arenariae*)
- stable gray dunes with tortulo scabioseto (*Tortulo Scabiosetum*)
- dunes with annual meadows with silenus vulpieto (*Silenus colored* and *Vulpietum membranaceae*)
- rear dune or buffer area (spartinieto)
- lagoon margin (halophilous species; reeds; halophile reeds)

The Delta area is included in SIC IT3270017, called "Po Delta: terminal stretch and Venetian delta" and in SPA IT3270023 "Po Delta" (Figura 2-17).

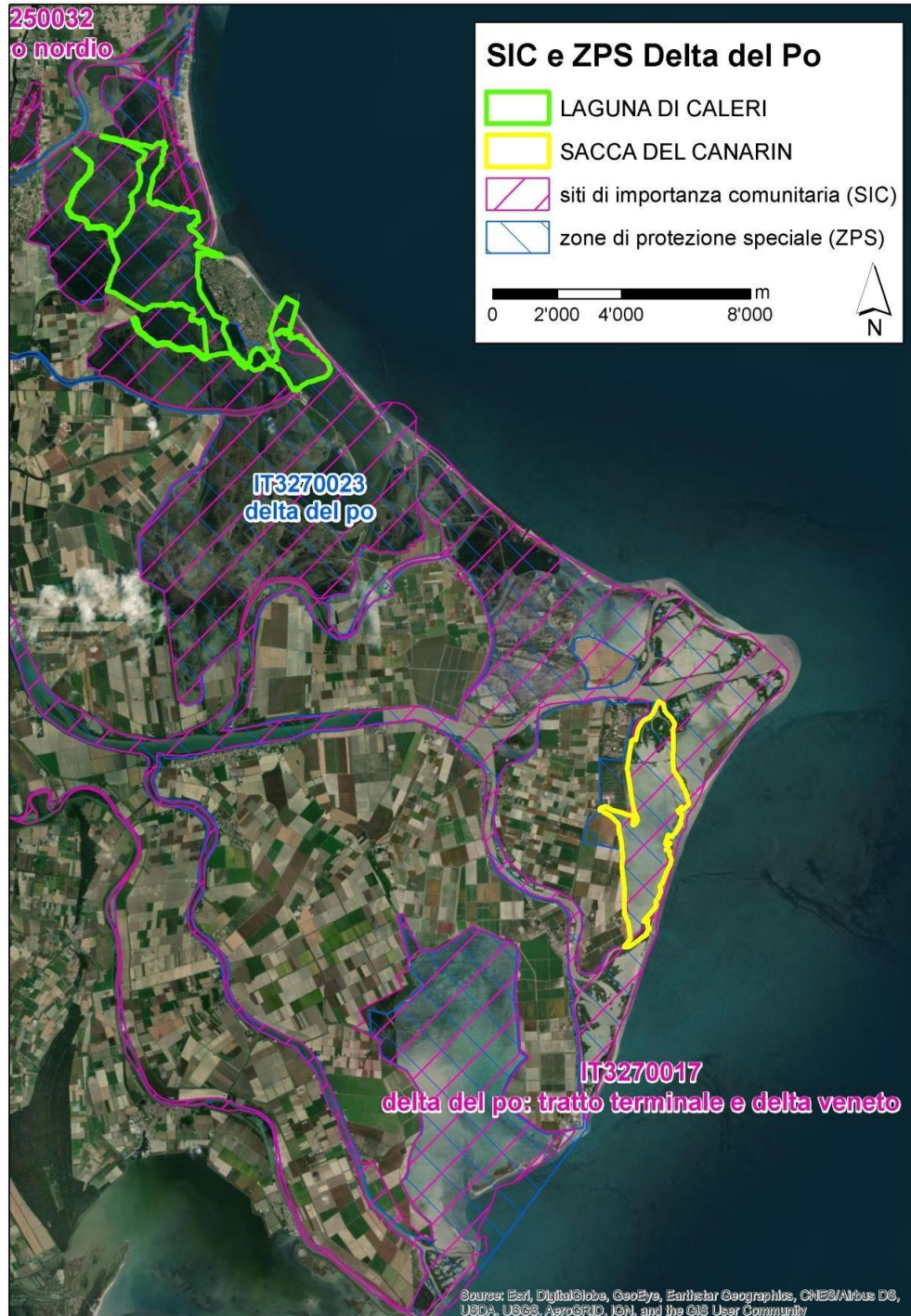


Figura 2-17 SIC and SPA areas in the Po Delta

As illustrated by Figura 2-17, SIC area is almost completely included in SPA IT3270023 "Delta del Po".

According to the Standard Data Form, the site is represented by a river system characterized by a stretch of river of considerable size and capacity, with delta system, dune-coastal systems, wetland valleys, sandy formations (sandbars) and river islands with floodplains.

The quality and importance of the site are determined by the "presence of complex vegetation associations, with wide reed beds and psammophilous and halophilic series. Strips of thermophilic and hygrophilic forest". In particular, the types of habitats that characterize SIC IT3270017 "Po Delta: terminal stretch and Veneto delta" are as follows:

- 1110 Sandbanks which are slightly covered by sea water all the time
- 1130 Estuaries
- 1140 Mudflats and sandflats not covered by seawater at low tide
- 1150* Lagune costiere
- 1210 Vegetazione annua delle linee di deposito marine
- 1310 Vegetazione pioniera a *Salicornia* e altre specie annuali delle zone fangose e sabbiose
- 1320 Prati di *Spartina* (*Spartinion maritimae*)
- 1410 Pascoli inondati mediterranei (*Juncetalia maritimi*)
- 1420 Praterie e fruticeti alofili mediterranei e termoatlantici (*Sarcocornetea fruticosi*)
- 1510* Mediterranean salt steppes (*Limonietalia*)
- 2110 Dune mobili embrionali
- 2120 Dune mobili del cordone litorale con presenza di *Ammophila arenaria* ("dune bianche")
- 2130* Dune costiere fisse a vegetazione erbacea ("dune grigie")
- 2160 Dune con presenza di *Hippophaë rhamnoides*
- 2190 Depressioni umide interdunari
- 2250* Dune costiere con *Juniperus* spp.
- 2270* Dune con foreste di *Pinus pinea* e/o *Pinus pinaster*
- 6420 Praterie umide mediterranee con piante erbacee alte del *MolinioHoloschoenion*
- 7210* Paludi calcaree con *Cladium mariscus* e specie del *Caricion davallianae*

- 91E0* Alluvial forests with *Alnus glutinosa* and *Fraxinus excelsior* (*AlnoPadion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)
- 92A0 *Salix alba* and *Populus alba* galleries
- 9340 *Quercus ilex* e *Quercus rotundifolia* forests

As regards the fauna aspects, the quality and importance of the site derive from its relevance as a site for the nesting, migration and wintering of aquatic birds. The area of the “scanni” represents an important site for the nesting of some Charadriiformes species. Some floodplain areas with vast reeds and tree coverings allow the nesting of Ardeidae, Rallidae and Passeriformes.

In particular, the habitats present in the two areas covered by this Plan are shown in the Figura 2-18 e Figura 2-19. Tabella 2-3 and Tabella 2-4 show the extent of each of them.

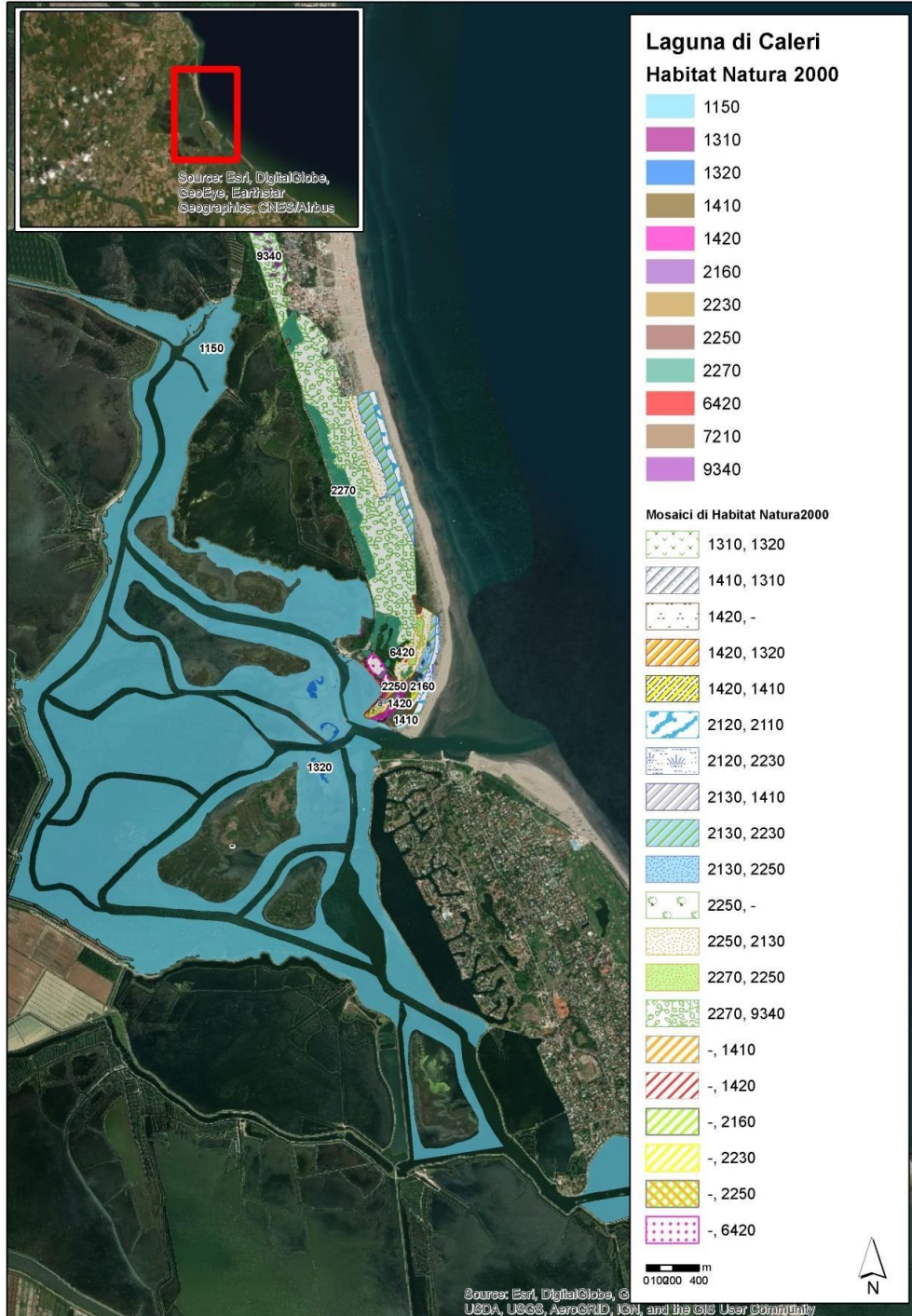


Figura 2-18 Habitats present in the area of Caleri lagoon

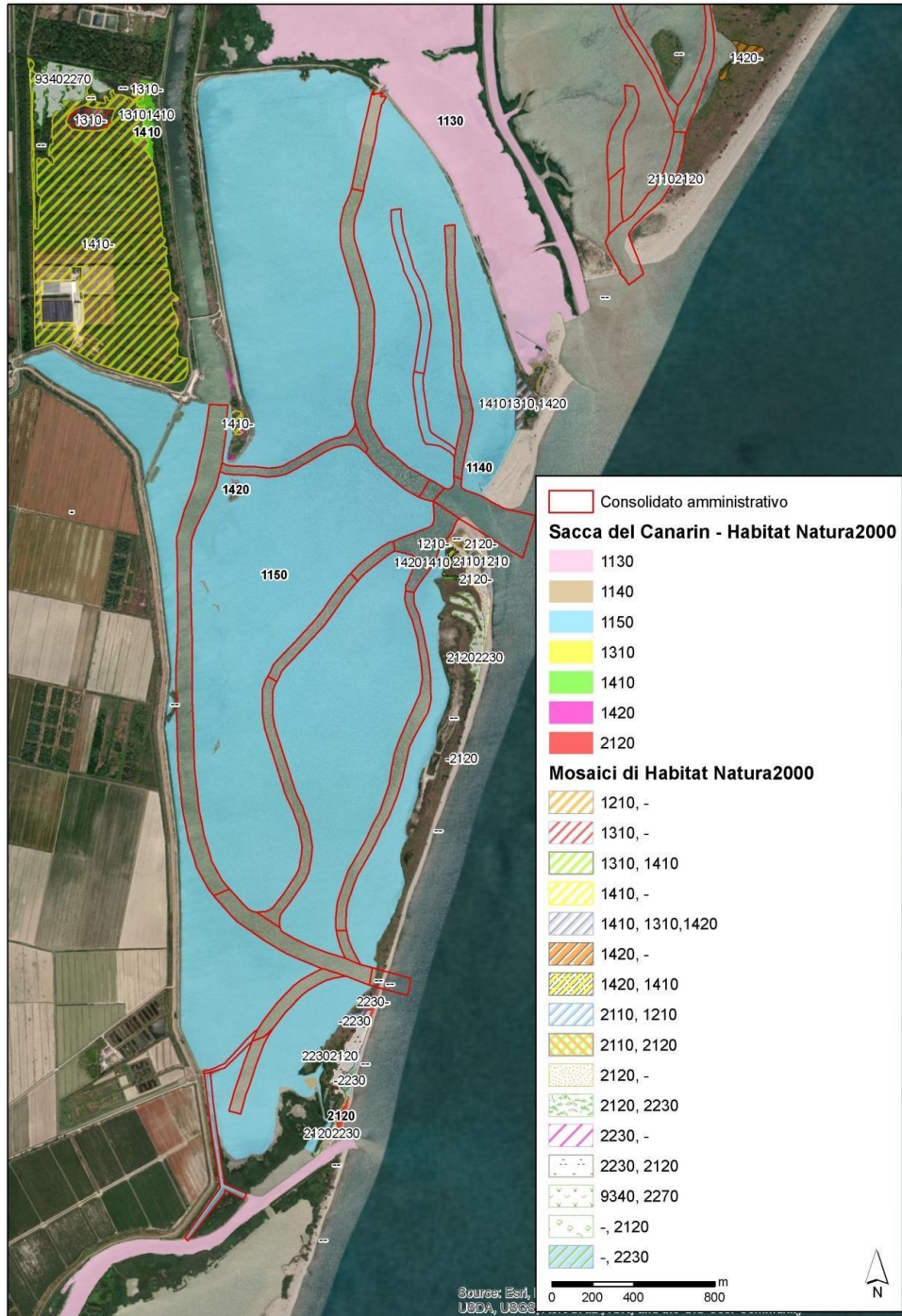


Figura 2-19 Habitats present in the area of Sacca del Canarin

Tabella 2-3 *Estensione degli habitat nella laguna di Caleri*

cod. Natura 2000 (puro o mosaico)	Superficie (ha)
1150	628,31
1310	0,05
1320	2,63
1410	1,27
1420	2,36
2160	0,29
2230	0,45
2250	1,70
2270	19,08
6420	1,83
7210	0,04
9340	1,44
1310/1320	0,08
1410/1310	0,10
1420/1320	0,66
1420/1410	0,04
2120/2110	5,57
2120/2230	2,27
2130/1410	0,05
2130/2230	11,27
2130/2250	11,23
2270/2250	1,78
2270/9340	72,16

Tabella 2-4 Estensione degli habitat nella Sacca del Canarin

cod. Natura 2000 (puro o mosaico)	Superficie (ha)
1210	496,49
1130	139,49
1140	1,43
1150	529,43
1310	2,70
1410	73,38
1420	1,61
2120	3,06
2230	0,21
1210/2110	0,75
2120/2230	5,85
2110/2120	0,00
1410/1420	0,44
1310/1410	0,11
2270/9340	5,16

2.1.2.2 Water environment

The variability in the contributions of fresh waters, nutrients and pollutants from the Po branches, as well as the morphological and hydrodynamic aspects described above contribute in defining the ecological conditions of the transition systems of the Po Delta.

The variability in nutrient concentrations follows seasonal dynamics (linked to biological consumption processes by primary producers and subsequent release following degradation phenomena) and dynamics linked to meteorological and hydrological conditions, with consequent wide inter-annual differences. In 2018, the concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in almost all deltaic lagoons were on average above the threshold (420 µg/l for polyhaline water bodies), identified by DM 260/2010 for the classification of ecological status of transitional water bodies for the implementation of Directive 2000/60. This highlights a general excess of this nutrient, more evident for the lagoons of Vallona, Barbamarco and Canarin, with average annual concentrations of DIN higher than 800 µg/l.

Caleri lagoon is less critical, with dissolved nitrogen concentrations below the threshold. The branches of the Po Delta investigated in the same transitional waters monitoring activity show quite higher concentrations of DIN, equal to about 2 mg/l in the last years of monitoring, although a reference threshold value has not yet been identified for this type of environment (Po di Maistra, Pila, Tolle, Gnocca, Goro).

The wide availability of nutrients, together with the conditions of high turbidity, characteristics of shallow microtidal environments, favor the presence of macrophytic communities of scarce ecological value, with the growth of opportunistic species well adapted to eutrophic environments (Sfriso et al., 2016). The presence of these species, which has also been documented in the lagoons of the Ferrara basin (Pellizzari et al., 2009), influences the value of the MaQI index. Such an index is used for the evaluation of the macrophyte biological quality element (EQB), for the purpose of classification of ecological status of transition water bodies according to directive 2000/60/EC and its implementation decrees at national level (Legislative Decree 152/2006, DM 260/2010).

In the three-year monitoring period 2014-2016 (DGR 893 issued 19/06/2018) the water bodies corresponding to the lagoons of the Po Delta were all classified in **Poor** ecological status or, in the only case of the Marinetta lagoon, Bad. This judgment results from the integration of multiple indicators including macrophytic communities (in a Poor status in all water bodies) and macrobenthic communities (in a Good status only for the Barbamarco lagoon, from Poor to Bad in other cases).

In the following year of monitoring (2018), the application of the M-AMBI index to the results of the monitoring of benthic macroinvertebrates led to confirming the status judgment Sufficient for the Sacca del Canarin, while an improvement was found in the Caleri lagoon, which goes into a Good state. The nearby lagoon of Marinetta appears however in a Bad state. In the same year, the analysis of the macrophytic component indicates a prevalence of laminar and filamentous Ulvaceae and various species of Gracilariaceae, with the presence of recently introduced invasive species or typical of eutrophicated environments and with scarce water exchange. In addition, no marine phanerogams were detected. Monitoring therefore confirms, with reference to macrophytes, the assignment of a **Poor** quality status to all lagoons of the Po Delta, with the exception of the Marinetta lagoon, whose status is defined as bad (ARPAV, 2018).

A Poor status of the macrophytic component corresponds to a situation in which blooms of some species are possible, favored by eutrophic conditions, which then tend to degenerate into dystrophic conditions producing extensive anoxias and deaths of benthic organisms and fish (Sfriso et al., 2016, ARPAV, 2018). In the Sacca del Canarin, as in other deltaic lagoons, for example in the summer (ARPAV, 2018), the presence of Ulvaceae and Gracilariaceae with alterations in the conditions of

oxygenation was reported. The anomalous presence of toxic microalgae (*Heterosigma akashiwo*) giving a reddish coloring to waters and potentially dangerous for fish has been reported as well.

The data of the year 2018 (ARPAV, 2018) highlights some critical oxygenation situations (indirect evaluation through analysis of the relationship between volatile acid sulphides and labile iron in the sediment), with frequent hypoxia or episodic anoxia in the lagoons of Barbamarco, Canarin and Scardovari, as already happened in 2017. Furthermore, the continuous monitoring of dissolved oxygen at the different buoys located in the lagoons of the Po Delta identify the occurrence of some episodes of hypoxia / anoxia with dissolved oxygen values that drop below 2 mg/L or 1 mg/L in almost all deltaic lagoons, without however highlighting consequences for clam farms (ARPAV, 2018a). Figura 2-1 shows two examples of the trend of dissolved oxygen in the Sacca del Canarin (southern delta) and in the Marinetta lagoon (northern delta), in two months of the summer.

In the Sacca del Canarin in particular, possible anoxia can be favored by excess of fresh water input from Po di Scirocco in periods of soft water and during specific weather conditions, being able to determine a stratification of the water column, with consequent reduction of dissolved oxygen in bottom waters. Although *Tapes philippinarum* is a species with a high degree of adaptability, the environmental changes experienced in recent years in the Sacca del Canarin, with a reduction in tidal exchanges and a reduction in the circulation of water, can favor the establishment of situations of depletion of the dissolved oxygen, with potential impact on shellfish farming.

The compliance of the waters for the life of the molluscs is assessed by ARPAV on the basis of the parameters indicated by Legislative Decree 152/2006. The lagoons suffer from the presence of faecal coliforms, which in some cases present exceedances of the legal limits. In 2018, three water bodies, Caleri-Marinetta, Barbamarco and Canarin, were found to be noncompliant for the total coliform parameter.

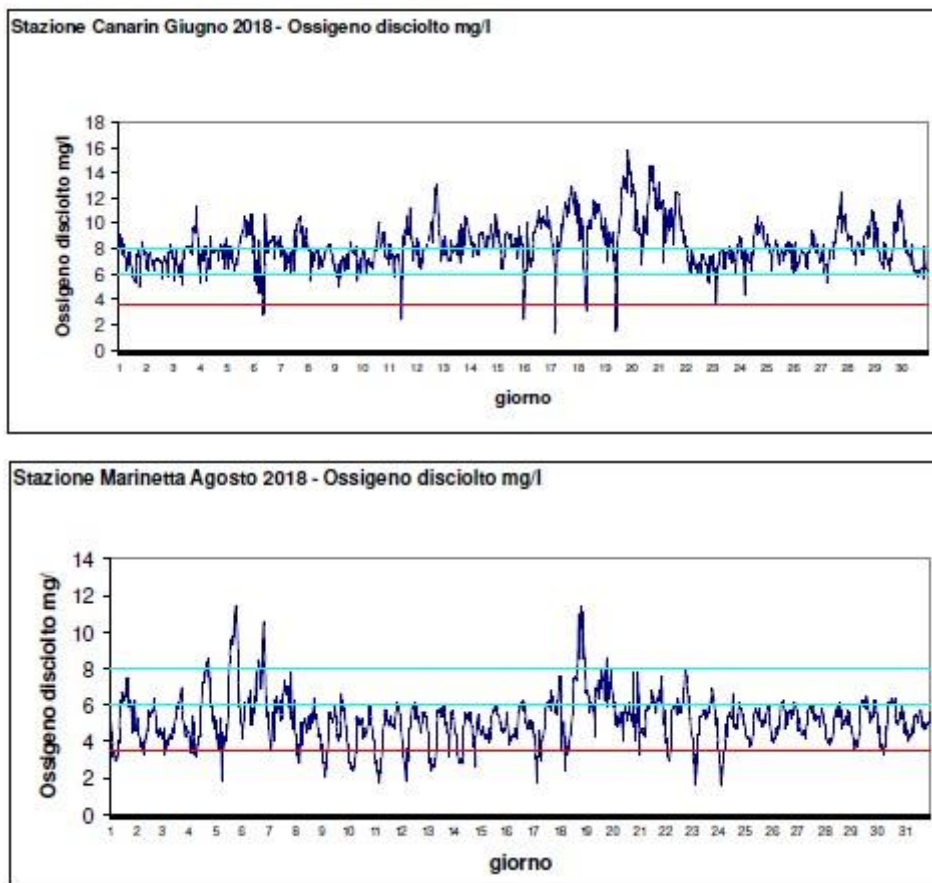


Figura 2-20 Dissolved oxygen at Sacca del Canarin (delta sud, June 2018) and at Laguna di Marinetta (delta nord, August 2018). The two light blue lines indicate the optimal range for shellfish (*Tapes philippinarum*) growth. The red line indicates the vital limit. Source: ARPAV, 2018a.

With regard to the chemical quality of the water, ARPAV monitoring detects compliance with the quality standards of Legislative Decree 172/2015. The CHEMICAL status of the lagoons of the Po Delta, in accordance with the implementation of Directive 2000/60/EC, is **Good** with reference to the water matrix and the 2014-2016 evaluation period in all water bodies, with the exception of the lagoon of Marinetta for exceeding the quality standard relating to para-tert octylphenol, detected only in 2014. In the subsequent years of monitoring, the results confirm the absence of exceedances as regards the priority substances in water.

A possible problem is instead related to triphenyltin which in some cases has led to exceedances of the quality standard in water. The substance is included in the list of specific pollutants that are monitored for the purpose of classifying ecological status (Tab 1/B of Legislative Decree 172/2015). In 2016 the exceedance concerned the lagoons of Caleri, Marinetta and Scardovari as well as the delta river

mouths excluding that of Maistra. In 2017 exceedances were detected only in some river mouths, while in 2018 there are no exceedances. The almost ubiquitous presence of some pesticides such as Terbutylazine, Metolachlor, Azoxystrobin and Bentazone (ARPAV, 2016, 2017, 2018) was also detected, even if with low concentrations.

2.2 Programmatic framework

2.2.1 Main Legislative references

At **European** level, the regulatory reference currently in force and binding on Strategic Environmental Assessment is represented by Directive 2001/42/EC concerning the evaluation of the effects of certain plans and programs on the environment.

The Directive aims to ensure a high level of environmental protection and to contribute to the integration of environmental considerations when drawing up and adopting plans and programs in order to promote sustainable development, ensuring that environmental assessment is carried out for certain plans and programs that can have significant effects on the environment.

The Strategic Environmental Assessment is useful for activating a participatory and coherent decision-making process and for the realization of sustainable development. It is, in fact, a fundamental moment of verification of the sustainability of the set of planned actions.

Furthermore, it is important to remember Directive 85/337/EEC relating to the Environmental Impact Assessment of projects and the three main pillars of the European regulatory framework regarding environmental protection: "Habitat" Directive (92/43/EEC), "Birds" Directive (2009/147/EC) and the "Water Framework Directive" (2000/60/EC).

In particular, with the Habitat Directive (Directive 92/43/EEC) the European ecological network "Natura 2000" was established: a complex of sites characterized by the presence of habitats and species both animal and plant, of Community interest (indicated in Annexes I and II of the Directive) whose function is to guarantee the long-term survival of biodiversity present on the European continent.

The network is made up of Special Protection Areas (SPAs) - established in accordance with the Birds Directive (2009/147/EEC) in order to rigorously protect the sites where the ornithic species contained in Annex 1 of the same live - and by Special Areas of Conservation (SACs) established under the

Habitats Directive in order to contribute to maintaining or restoring a natural habitat (Annex 1 of Directive 92/43/EEC) or a species (Annex 2 of the Directive 92/43/EEC) in a satisfactory state of conservation.

At **national** level, the Italian State has implemented the aforementioned European directive, with Legislative Decree no. 152 (also called "Environmental Code"), modified in the part relating to the EIA and the SEA by Legislative Decree no. 4 of 2008 "Further corrective and supplementary provisions of Legislative Decree 3 April 2006, n. 152, containing environmental regulations" and by Legislative Decree 29 June 2010, n. 128 "Amendments and additions to Legislative Decree 3 April 2006, 152 cd " Corrections on Air-EIA-Ippc ".

The environmental assessment of plans and programs that can have a significant impact on the environment, as established in art. 4 of Legislative Decree 152/2006 and subsequent amendments, "has the aim of guaranteeing a high level of environmental protection and contributing to the integration of environmental considerations when drafting, adopting and approving such plans and programs ensuring that they are consistent and contribute to the conditions for sustainable development".

Other environmental directives have been transposed at national level by Presidential Decree 8 September 1997, n. 357-Regulation implementing Directive 92/43/EEC on the conservation of natural and semi-natural habitats, as well as wild flora and fauna and its subsequent amendments and additions.

From an administrative point of view, the "Natura 2000" sites (SPAs and SACs) are subject to a particular protection regime. The current rules prescribe that every intervention (urban territorial plan, building project etc.) is preliminarily evaluated to verify if it determines habitat degradation or disturbances of animal and plant species. In the event of negative consequences, the intervention must be modified according to alternative design solutions, or measures to mitigate and compensate the effects must be provided.

Finally, at the **regional** level, the legal context is partially enriched with the Regional Law of 23 April 2004, n. 11, "Rules for the governance of the territory", which, transposing the obligations set by Directive 2001/42/EC, forces to perform the SEA in case of territorial and urban plans of Regions, Provinces and Municipalities (PTRC, PTCP, PAT and PATI), so as to highlight "the congruity of the planning choices (...) with respect to their sustainability objectives, the possible synergies with the other planning tools, also identifying the alternatives considered in the preparation of the plan, the potential impacts, as well as the mitigation and/or compensation measures to be included in the plan "(art. 4, paragraph 3, LR 11/2004). The same L.R. 11/2004 provides in art. 46, paragraph 1, lett. a) the preparation by the Regional Council of a disciplinary act which regulates "the sustainability and

compatibility checks necessary for the preparation of territorial and urban planning instruments with particular reference to the community directive n. 2001/42/CE on strategic environmental assessment (SEA)".

The Veneto Region has also issued other various Regional Council Deliberations regarding SEA.

Furthermore, in compliance with European and national legislation, various provisions have been issued by the Veneto Region regarding the protection of habitats, in particular the most relevant are:

- D.G.R. of 11 December 2007, no. 4059 - Natura 2000 European Ecological Network. Establishment of new Special Protection Areas, identification of new Sites of Community Importance and modifications to existing sites in compliance with the obligations deriving from the application of Directives 79/409/EEC and 92/43/EEC. Database update;
- D.G.R. of April 17, 2007, no. 1066 - Approval of new technical specifications for the identification and cartographic restitution of habitats and species habitats in the Natura 2000 network of the Veneto Region. Amendment to D.G.R. 4441 of 30.12.2005;
- D.G.R. n. 1709 of 24/10/2014 "Conservation Measures of the Special Areas of Conservation (SAC) of the Natura 2000 Network (Article 4, paragraph 4, of Directive 92/43/EEC). Reformulation of articles Conservation Measures";
- D.G.R. 2299 of 2014 - New provisions relating to the implementation of the community directive 92/43/EEC and Presidential Decree 357/1997 and subsequent amendments Methodological guide for incidence assessment. Procedures and operating procedures;
- D.G.R. 786 of 2016 - Approval of the Conservation Measures of the Special Areas of Conservation (SAC) of the Natura 2000 Network;
- D.G.R. 1331 of 2017 - Conservation Measures of the Special Conservation Areas (SACs) of the Natura 2000 Network (Article 4, paragraph 4, of Directive 92/43/EEC). Changes and additions;
- D.G.R. 1400 of 2017 - New provisions relating to the implementation of the community directive 92/43/EEC and Presidential Decree 357/1997 and subsequent amendments. Approval of the new "Methodological Guide for Impact Assessment. Procedures and operating procedures", as well as other operating subsidies and revocation of the D.G.R. n. 2299 of 9.12.2014.

Finally, with reference to the aspects related to the management of the coastline, the L.R. n. 38 of 28/11/2014 established that "the Veneto Region directly manages the overall management of the Veneto coast, the mouths and sea quarries offshore exclusively with the procedures set out in

Legislative Decree 163/2006 and subsequent amendments or through the Veneto Coastal Basin Section".

2.2.2 Planning issues

As regards the spatial planning tools in force, the following plans have been taken into consideration:

at regional level:

- Regional Development Program (PRS) approved in 2007;
- Regional Territorial Coordination Plan (PTRC) approved in 1992 and being updated;
- Area Plan of the Po Delta approved in 1994;
- Plan of the Po Delta Regional Park adopted in 2012;
- General Land Reclamation and Protection Plan approved in 2010;
- Regional fish charter at the province level:
- Province Territorial Coordination Plan (PTCP) approved in 2012; □ Fish map of the Province of Rovigo Lagoon and valley areas at municipal level:
- P.A.T. of the Municipality of Rosolina adopted in 2011;
- P.A.T. of the Municipality of Porto Tolle adopted in 2009.

In particular, at the regional level, for the PRS, the Po Delta area falls within the targeted support areas due to the conformation of the territory which poses usability problems and complex environmental management issues. It is an area where man has been able to develop important activities such as fishing, valliculture and the cultivation of molluscs, which today are accompanied by traditional and new tourist activities, connected to the use of an environment of great naturalistic value. The conditions for their permanence and strengthening must therefore be guaranteed by ensuring "in the first place a careful work of hydraulic maintenance and continuous vivification of the lagoons".

The Po Delta Area Plan includes a greater degree of definition of the planning precepts for the territory that affects the municipalities of Rosolina, Porto Viro, Taglio di Po, Porto Tolle, Corbola, Ariano nel Polesine and reduced part of the municipalities of Loreo and Papozze. Article. 2 of the Plan legislation, states that the following areas belonging to the Natura 2000 Network are included in the area under study:

- * SIC IT3270017 "Po Delta: terminal stretch and Venetian delta";

- * SPA IT3270023 "Po Delta".

In particular, Table 1 "System and Projects' areas" (Figura 2-21), identifies the area as "Lagoons, bays, mudflats and marshes" regulated by art. 8 of the implementing legislation. Article. 8 of the prescriptions and constraints states that "reclamation interventions are prohibited, as well as soil excavations, without prejudice to the works of arrangement, hydraulic defense and maintenance or improvement of the water flushing, as well as works related to activities of aquaculture and fishing, which must be carried out favoring naturalistic engineering criteria or in any case adopting solutions and techniques that respect the environmental and ecological systems present. The alteration of the position and the course of the canals and "ghebi" is prohibited, except as provided in the specific vivification projects of the lagoons, duly approved by the competent bodies for the purpose of depollution, revitalization and increase of the productivity of the lagoon environments; constant maintenance of the completed projects is permitted on these works. Maintenance of the main canals and deposit of the resulting soil in suitable areas is allowed, taking into account the morphological structure of the places, as well as the plant species present there. For the purpose of restoring eroded lagoon systems and for vivification of the lagoons, sediments deriving from maintenance or restoration of lagoon canals can be used, compatibly with their quality characteristics, and in compliance with the altimetric profiles typical of marshes and mudflats (...)".

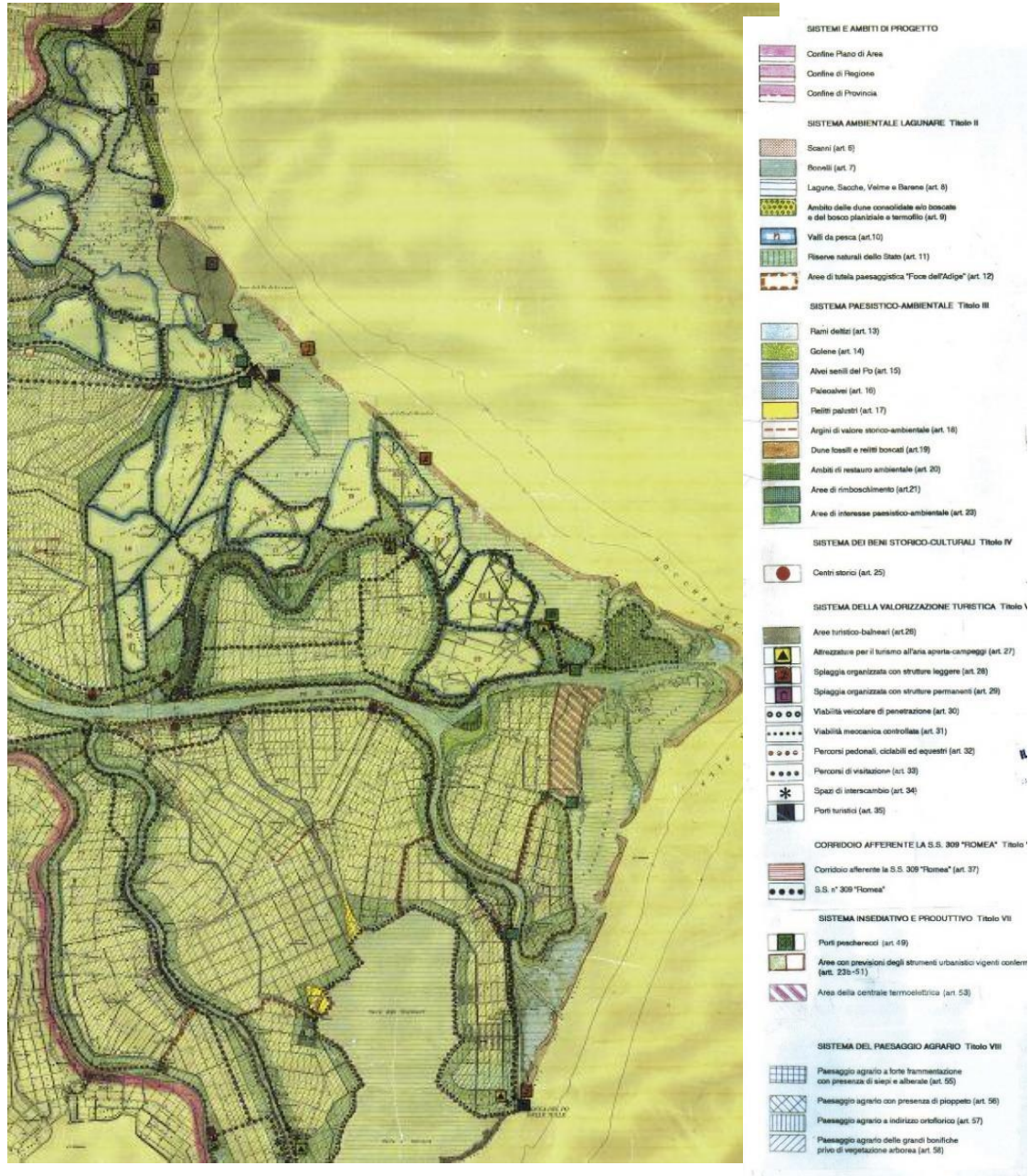


Figura 2-21 Sistemi ed ambiti di progetto, Piano d'Area Delta del Po

3 The strategy

The succession of studies and planning acts described in chapter 2, dedicated to the composition of the Reference Framework, and in particular the Operational Plan of the interventions for the maintenance and management of the lagoons of the Po Delta (Po Delta Reclamation Consortium, 2015), the Guidelines for the interventions to be carried out in the areas of the Po Delta coast issued by the Veneto Region (Veneto Region, 2018) and also the most recent studies promoted by the Veneto Regional Park Authority of the Po Delta (Ente Parco - Ipros 2018a and Ente Parco - Ipros 2018b) has led to the development of various design solutions, which however all move within the context of a broad sharing of approach, technique and method.

In a nutshell, the interventions must be oriented to maintaining the efficiency of the mouths at sea, to the maintenance and, where possible, to the increase of the hydrodynamic circulation in the lagoon areas, the reinforcement of the littorals, the contrast of erosion, the conservation and increase in biodiversity, the reduction of impacts caused by fresh water supplies, the general improvement of environmental quality, also for the purpose of safeguarding the socioeconomic context, that is, the areas related to the fishing and tourism sectors.

The Guidelines of the Veneto Region have identified nine types of intervention and have also specified the territorial areas covered by the works:

1. Dredging of sublagunar channels and outlet channels to the sea;
2. Dredging of waterways for the restoration of navigation quotas
3. Restoration of mudflats and marshes
4. Initiation interventions of halophilous vegetation in marshes
5. Restoration of the coast line
6. Restoration, protection and consolidation of coastal morphologies
7. Reinforcement and stabilization of sea mouths, breakwaters, reefs and groynes
8. Delimitation of navigation channels
9. Arrangement of existing roads and access to mooring-piers.

Over the years, numerous interventions have been carried out aimed at improving the hydrodynamic circulation of the Caleri lagoon such as the dredging of the canals, the reconstruction of morphological elements and the widening of the Varco Pozzadini. In the five-year period 2003-2008 a dredging of about 80,000 m³ of the Caleri mouth was authorized with subsequent nourishment in the stretch in front of the tourist village of Rosapineta. In the period 2009-2014 the nourishment of 361,000 m³ (in 2012) and a further 300,000 m³ (in 2013) was authorized at the Rosolina coast with material coming

from the mouths of Caleri and Scardovari and from the mouths of the Adige and the Po di Maistra. Moreover, the "Guidelines for Integrated Coastal Zone Management" (Ruol and Pinato, 2016) indicated the maintenance dredging requirement at Caleri's mouth at around 70,000 m³/year, determined by the sedimentary deposition due to solid transport along the coast in a north-south direction (Figura 3-1). Recent maintenance work on the efficiency of the mouth and on a section of canal towards the interior of the lagoon - for a total of 95,000 m³ - have foreseen the reuse of the dredged material for the recharge of morphological structures and for the realization of submerged sandbanks (Ente Parco - Veneto Region, 2015a).



Figura 3-1 Defense strategy, interventions and solid transport trends in the Caleri littoral. Source: Ruol e Pinato, 2016.

Similarly, with regard to the Sacca del Canarin in order to reduce the fresh water supplies of the Busa di Scirocco, the sea mouth has undergone considerable anthropic interventions, in particular in the northern section, with the creation of a filler box and a groyne. The Veneto Region through the "Guidelines for Integrated Coastal Zone Management" (Ruol and Pinato, 2016) indicated that the whole Canarin littoral needs reinforcement, being subject to erosion for almost all of its extension (Figura 3-2). Recent dredging operations of the mouth and the canals connected to it - for a quantity of

about 125,000 m³ (Ente Parco - Veneto Region, 2015b) - have foreseen the reuse of dredged material for the nourishment of the littorals.



Figura 3-2 Defense strategy, interventions and solid transport trends in the Sacca del Canarin littoral.
 Source: Ruol e Pinato, 2016

3.1 Main objectives

The main objective of this Plan is to re-evaluate the interventions described in the Guidelines of the Veneto Region, re-analyze the order of priority on the basis of the Operational Program developed by the Reclamation Consortium and in light of the results of the most recent monitoring, environmental and modeling studies which have been described in the definition of the Reference framework reported in Chapter 2.

The analysis of the state of affairs confirmed the need for interventions aimed at improving **firstly** the physical and hydrodynamic aspects of the two lagoons and **secondly** favoring the enrichment of the ecosystem in terms of biodiversity and landscape, tending towards a - more typically lagoon formation of these transition environments.

It is believed that the first aspect can bring significant benefits to the balance between fresh and brackish water, allowing the development of healthy biological communities, including molluscs, with important favorable effects from the point of view of job creation and production of income.

The second aspect gives the lagoons more natural features, promotes an increase in resilience, proposes new areas for birdlife feeding and nesting, helping to improve the landscape, increase the pleasantness and attractiveness of the places from a tourist point of view and - not least - it contributes to the achievement of the environmental quality objectives of the water bodies pursued by the main European environmental directives.

The new marshes morphological structures will evolve in habitats in about 8-10 years: in the early years they will be colonized by pioneer plant species (*Salicornia veneta*) and by valuable birdlife species that will exploit these naked sites as nesting areas; then within a few years different species of perennial halophils will begin to differentiate, such as: *Puccinellia palustris*, *Arthrocnemum fruticosum*, *Limonium serotinum*, *Aster tripolium*, *Inula crithmoides*, *Halimione portulacoides*, which, depending on the different elevation above sea level, will colonize the whole marsh surface. With the subsequent evolution, a surface water network will begin to develop and take on an increasingly pronounced shape.

For the Caleri lagoon, dredging of the mouth channel and lagoon canals are proposed with the recovery of dredged material for the creation of mud flats and for the recovery of artificial marshes which have not still developed in accordance with expectations.

For the Sacca del Canarin, the interventions are more complex and in addition to the interventions at the mouth, in the canals and on the morphological structures of the lagoon, it is foreseen the reinforcement of the littoral and the banks as well as interventions aimed at contrasting the progressive increase in the impact determined from the contributions of fresh water.

In the following paragraph the interventions are described in more detail.

4 Methodological approach

4.1 Caleri Lagoon

The studies have shown that, as for the other lagoons in the Delta, the primary need for the Caleri lagoon is to guarantee the hydraulic efficiency of the mouth. This entails both the maintenance of the correct channel structure and the periodic implementation of maintenance dredges to remove the sandy sediments which, due to the combined effect of the storms and the tide, tend to accumulate at the mouth of the channels that from the mouth penetrate inside the lagoon. Equally essential is the maintenance of the efficiency of the connection with the Vallona Lagoon through the Varco Pozzatini. In particular, the modeling study (see the Environmental reference framework in par. 2.1.1) has demonstrated the effectiveness of operating the existing artifact, the operation is able to trigger a secondary circulation throughout the system, a factor which, in last analysis, determines positive effects in terms of water exchange.

It is also essential to maintain an internal network of channels that ensures water circulation even in the most confined areas. To date, in fact, only the areas closest to the mouths benefit from water exchanges, precisely because the disappearance of the canal network prevents water from reaching the internal areas and, even more so, the marginal ones. Such a scarce vivification and hydraulic circulation favors the accumulation of pollutants and nutrients and, as an ultimate consequence, especially in the warmer months, the occurrence of eutrophication phenomena.

To facilitate the vivification of all areas of the lagoon, the dredging of the internal canals must be envisaged, also taking into account the location of the concessions for shellfish and aquaculture.

It will also be necessary to intervene on the lagoon morphology on the one hand to create the conditions for the maintenance of water circulation and on the other for the conservation of Natura 2000 network habitats and species habitats, in particular for avifauna and ichthyofauna.

Figura 4-1 illustrates the proposed interventions for Caleri lagoon.



Figura 4-1 Interventions for Caleri lagoon

4.1.1 First level interventions

4.1.1.1 Sea mouth and channels excavation (branches: A, B, D, E)

Le complesse dinamiche del trasporto litoraneo forzate dall'azione del moto ondoso e della marea portano ad un bilancio sedimentario positivo all'interno della Bocca di Caleri, dove i sedimenti sabbiosi tendono ad accumularsi all'interno della bocca (formando il cosiddetto "delta di flusso"). Pertanto per poter incrementare i flussi scambiati tra il mare e la laguna è necessario procedere ad un dragaggio periodico dell'area di bocca e della rete dei canali interni per mantenere da un lato la sezione di bocca e dall'altro la circolazione delle acque e il ricambio idrico in tutta la laguna e soprattutto nelle aree in cui si svolgono le attività di venericoltura. Gli studi realizzati hanno evidenziato che il dragaggio manutentivo dei canali nelle aree di bocca dovrà avere una frequenza all'incirca biennale. Le quote di scavo vanno dai 5 metri s.l. m.m per la bocca ai 3.5 – 4 m s.l.m.m. per i canali.

The complex dynamics of coastal transport forced by the action of the waves and the tide lead to a positive sedimentary balance within at Caleri mouth, where sandy sediments tend to accumulate inside the mouth (forming the so-called "flow delta"). Therefore, in order to increase the flows exchanged between the sea and the lagoon, it is necessary to periodically dredge the mouth area and the network of internal channels to maintain the mouth section and the water circulation and water exchange throughout the lagoon and especially in areas where venericulture activities take place. The studies carried out have shown that the maintenance dredging of the canals in the mouth areas must have a frequency of approximately two years. The excavation quotas range from 5 meters above mean sea level (at the mouth) to 3.5 - 4 m above m.s.l. for channels.

Figura 4-1 highlights (in orange) the high priority dredging interventions.

4.1.1.2 Interventions on artificial morphological structures (marshes)

Five salt marshes have been authorized and partially built in the Caleri lagoon as part of the general vivification project of the lagoons pursuant to EEC Reg. 2088/85 PIM. To date, these structures appear to be only partially completed, in fact each of them, albeit with different extensions, has non-vegetated and permanently submerged areas.

The areas already confined and permanently submerged can be considered suitable sites for the delivery of the dredging material of the lagoon canals. Their capacity can be established after specific detailed verification of the shares.

The marhes elevation above m.s.l. will be conceived by evaluating the consistency of the available material and trying to reach values between +40 cm and +50 cm above m.s.l.. However, the opportunity to differentiate the quotas (in any case below +50 cm) must be taken into consideration, creating opportunities for the consolidation of an internal hydrographic network, characterized by the presence of “chiari” and “ghebi”.

4.1.1.3 Navigable channels interventions

The works consist in the formation or replacement of groups of barked oak poles that delimit the navigable canal that crosses the lagoon (branches A, B, D, E). It is in fact appropriate that the maintenance of the mooring groups is carried out at the same time as the maintenance work on the canal itself.

4.1.1.4 Maintenance of Varco Pozzatini

I monitoraggi e gli studi modellistici effettuati hanno evidenziato che gli scambi idrodinamici che si attuano attraverso il Varco Pozzatini assumono un ruolo molto rilevante per la dinamica della circolazione mareale nella Laguna di Caleri, dato che – sulla base dello studio modellistico aggiornato al 2018 - attraverso il Varco la laguna scambia volumi dell’ordine del 20% del totale scambiato con l’esterno, essendo il restante 80% scambiato attraverso la Bocca

The monitoring and modeling studies carried out have shown that the hydrodynamic exchanges that take place through the Varco Pozzatini take on a very important role for the dynamics of the tidal circulation in the Caleri Lagoon. In fact - based on the model study - through the Varco the lagoon exchanges volumes of the order of 20% of the total volume exchanged with the sea (Ente Parco – Ipros, 2018a). If operated for a certain number of tidal cycles, preventing the flow in the flood tide phase and allowing it in the ebb phase, the artifact also allows to generate a unidirectional flow directed towards the Vallona Lagoon, which allows the renewal of the waters of the southern and central part of the Lagoon of Caleri.

It is therefore essential that the artifact is maintained in full efficiency with the necessary maintenance interventions. It is also necessary that the correct hydraulic operation of the channels connected to it is periodically checked, providing for local dredging interventions to counteract any interruptions.

4.1.1.5 Creation of shallows

Part of the dredged material will be used to create sand rises on the side of the canals. These morphological structures must never emerge as the tide phases vary and may constitute areas used for the development of venericulture activities.

In particular, a couple of areas (around 9 hectares in total) were identified close to the island of Albarella. In this way a double benefit would be obtained i.e.: identifying new shallows available for molluscs farming and helping force the circulation of the current in both directions. The proposal provides for the identification of two splitted areas in consideration of the existence of concession areas for shellfish farming activities.

4.1.2 Second level interventions

4.1.2.1 Inner channels excavation (branches: C, F, G, H, I, X)

Gli interventi di vivificazione della laguna troveranno adeguato completamento e consolidamento quando sarà raggiunta la configurazione della rete prevista dal Progetto Generale degli interventi e ripresa dalle Linee Guida (Regione del Veneto, 2018). Le quote di scavo variano tra i 2.5 m s.l.m.m. e i 3.5 m s.l.m.m.

The vivification interventions of the lagoon will find adequate completion and consolidation when the network configuration foreseen by the General Intervention Project and taken up by the Guidelines (Veneto Region, 2018) is reached. The dredging quota vary between 2.5 m above m.s.l. and 3.5 m above m.s.l.

Figura 4-1 highlights (in green) branches corresponding to such an intervention.

4.1.2.2 Navigable channels interventions

The works consist in the formation or replacement of groups of barked oak poles that delimit the navigable canal that crosses the lagoon (branches C, F, G, H, I, X). It is in fact appropriate that the maintenance of the mooring groups is carried out at the same time as the maintenance work on the canal itself.

4.1.2.3 Creation of artificial marshes

With the material dredged in the innermost canals, it will be possible to create a new marsh morphological structure with an extension of about 15 ha which could considerably increase the biodiversity of this marginal area. In fact, such an area appears to be characterized by a notable “simplification” as well as subject to a considerable wind fetch (Figura 4-2) with all the implications related to the turbidity deriving from the induced resuspension. Therefore, the benefit of the marsh structure would not be limited to the increase in biodiversity and the channeling of flows, increasing the hydrodynamic liveness, but could also reduce the impacts deriving from wind fetch.



Figura 4-2 *View of Caleri lagoon di Caleri from the margin towards the mouth in the area where a new marsh structure is proposed.*

The marshes elevation above m.s.l. will be conceived by evaluating the consistency of the available material and trying to reach values between +40 cm and +50 cm above m.s.l.. However, the opportunity to differentiate the quotas (in any case below +50 cm) must be taken into consideration,

creating opportunities for the consolidation of an internal hydrographic network, characterized by the presence of “chiari” and “ghebi”.

Canarin lagoon

As anticipated in the definition of the Reference framework, the Sacca del Canarin, part of the "Basson-Canarin" system, perhaps represents one of the most complex areas in the Delta and is subject to the most important degradation phenomena, determined by multiple factors. The reduction of the efficiency of the mouths and the progressive reduction of the circulation of the waters inside the lagoon, together with the effects determined by the contributions of fresh water through the multiple ways to enter the lagoon from the river branches and the drainage network represent the main determinants on which to intervene with measures aimed at lagoon rehabilitation.

Modeling studies (Park Authority - Ipros, 2018b) have also highlighted how the tide represents the most important forcing function able to drive the circulation within the lagoon. On the other hand, as highlighted in par. 2.1.2, on the basis of the continuous monitoring of the chemicalphysical parameters of the waters and on the basis of the data coming from the monitoring to establish the compliance of the waters for the life of the molluscs - performed by ARPAV - it emerges that conditions not compatible with the adequate development of benthic zoocenosis often occur (even if, during the year 2016, the Sacca del Canarin returned parameters compliant with the standard - ARPAV, 2018). The hypothesis that the water inlets from the river branches involve stratification phenomena capable of influencing the concentration of oxygen in the water column is at the basis of the projects carried out also in more recent times by the Civil Engineering Section of Rovigo - Veneto Region (Park Authority - Veneto Region, 2015b).

Lastly, taking up the themes related to biodiversity and the elements of value and naturalness of the transition environments, it should be remembered that the Sacca is characterized by the total absence of marshes. This factor gives the whole area a lower vocation for the establishment of valuable biological communities as well as a lower attractiveness of the landscape and prevents the establishment and consolidation of preferential routes for currents entering the lagoon, contributing to aggravate the aforementioned phenomena of flattening of the seabed and increase in water renewal times.

The interventions proposed for the Sacca del Canarin try to resolve the critical issues expressed so far and are described in Figura 4-3.

4.1.3 First level interventions

4.1.3.1 Sea mouth and channels excavation (branches: C2, C3, C4, C10)

L'intervento di dragaggio della bocca e dei tratti iniziali dei quattro canali che si diramano da essa è senza dubbio l'intervento di primaria importanza. Tale intervento va peraltro previsto con regolarità in considerazione delle specifiche dinamiche di quel tratto di costa. Le quote di scavo vanno dai 3.5 metri s.l. m.m per la bocca ai 2.5 – 3 m s.l.m.m. per i canali, con il valore inferiore corrispondente al ramo C3.

Dredging the mouth and the initial sections of the four channels that branch off from it is undoubtedly the intervention of primary importance. However, this intervention must be scheduled regularly in consideration of the specific dynamics of that stretch of coast. The excavation quotas range from -3.5 meters m.s.l for the mouth to -2.5 ÷ - 3 m s.l. for channels, with the lower value corresponding to branch C3.

Figura 4-3 highlights (in orange) the high priority dredging interventions.

4.1.3.2 Southern littoral reinforcement

Lagoon side

The Canarin littoral is characterized by a tendency towards erosion with the retreat of the shore line and represents an element of weakness also with reference to the risk of flooding. It is therefore proposed to reinforce the bench by depositing material from the dredging of the mouth, reaching an altitude of about 1 m a.s.l. This intervention could involve the use of about 70,000 m³ of sediment.

Sea side

Qualora si disponesse di ulteriore materiale si può procedere al ripascimento della spiaggia che allo stato attuale risulta di ampiezza particolarmente ristretta. Gli interventi andrebbero realizzati previo collocamento di pennelli in legno, ortogonali alla costa, al fine di garantire il trattenimento del materiale refluito. Interventi analoghi sono già stati realizzati nel tratto di litorale tra i rami del Po della Donzella.

If further material is available, it is possible to proceed with beach nourishment which, at present, is particularly narrow in size. The interventions should be carried out after placing wooden groynes,

orthogonal to the coast, in order to ensure the retention of the reflux material. Similar interventions have already been carried out in the stretch of coast between the branches of the Po della Donzella.

4.1.3.3 Northern littoral reinforcement

Norther border (Busa di Scirocco)

The groyne located in the northern edge of the littoral can constitute an embankment that delimits a beach nourishment that continues to align itself with the southern part.

Sothern border (bocca)

In the southern part, already subject to nourishment interventions, it is still possible to identify deposition areas. However, these areas may be detailed after a survey aimed at indentifying areas of particular naturalistic value that may have developed at the time of the interventions.

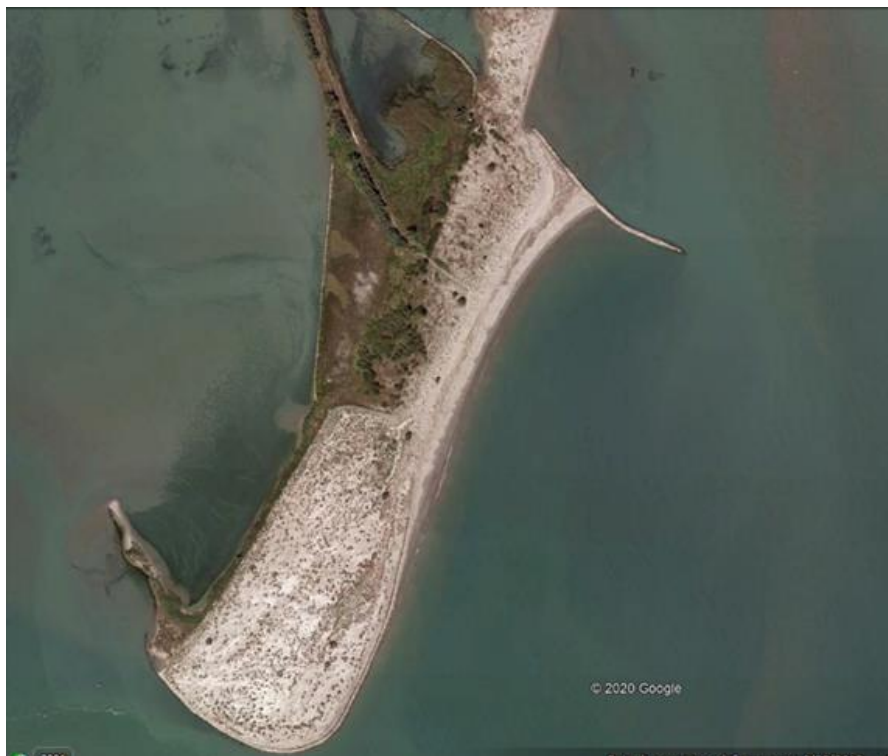


Figura 4-4 *Detail of the littoral located at the northern side of the mouth*

4.1.3.4 Creation of artificial marshes (Bar.1 - Bar.7)

In order to resolve the critical points outlined in the introduction and to increase the ecological quality of the environment of the Sacca, it is proposed the creation of new morphological elements. Some of these elements (from Bar.1 to Bar.5) are intended to house the material coming from the dredging of the branches of channel C2 and C3. The objective is to develop a marsh cordon longitudinal to the channel in order to consolidate the margins and avoid, at least partially, their continuous silting. The margins of the canal side structures will be made of wooden piling to which a hydraulic network is fixed, interposed between a double plasticized network which forms a filtering wall. On the other hand, a removable barrier will be placed in the shallow side with the function of limiting turbidity and with the aim of making the structure itself slope down to the shallow. The creation of structures characterized by a distinctly longitudinal development would also allow to significantly limit the interference with other areas such as those dedicated to shellfish farming.

The rationale supporting the creation of the marshes 6 and 7, longitudinal to the channels, are the same as those of the marshes 1 to 5 along the two channels oriented towards the south.

The project quotas will be conceived by evaluating the consistency of the available material and reaching values between +40 cm and +50 cm above the mean sea level. However, the opportunity to differentiate the quotas (always below the + 50 cm) will be taken into consideration, creating opportunities for the consolidation of an internal hydrographic network, characterized by the presence of “chiari” and “ghebi”.

4.1.3.5 North embankment reinforcement

Già nel Piano Operativo degli interventi del 2015 sono riportati episodi di tracimazione dell’argine di separazione tra la Sacca, nel suo margine settentrionale, e la Busa di Scirocco. Infatti, in occasione di livelli del mare abbastanza alti in concomitanza con significativo apporti del ramo fluviale, possono instaurarsi condizioni critiche che comportano la tracimazione delle acque dolci della Busa all’ingresso della Sacca. Per tale motivo è opportuno ripristinare le quote dell’argine. Analogamente è necessario un intervento di manutenzione del varco esistente, poiché non è più presidiato dal momento in cui la centrale ENEL ha cessato l’attività. A tal riguardo sono necessari la manutenzione del manufatto, dotato di una porta vinciana manovrabile, e l’individuazione di una procedura gestionale che permetta la chiusura del varco in occasione degli eventi di piena.

In the Plan of Intervention of the year 2015, episodes of overflowing of the separation embankment between the Sacca, in its northern margin, and the Busa di Scirocco are reported already. In fact, on the occasion of fairly high sea levels in conjunction with significant contributions from the river

branch, critical conditions may arise which entail the overflow of the fresh waters of the Busa at the entrance of the Sacca. For this reason it is appropriate to restore the quotas of the embankment. Similarly, maintenance work is required on the existing gate, since it is no longer manned from the moment the ENEL power plant ceased operations. In this regard, the maintenance of the artifact, equipped with a maneuverable gate, and the identification of a management procedure that allows the closure of the passage during flood events are necessary.



Figura 4-5 *Detail of the north embankment and the gate*

4.1.3.6 Reshape of connection channel with Busa del Bastimento Po river branch

The channel ("paradello") that connects Busa del Bastimento with the southern part of the Sacca is able to make significant contributions of fresh water (and any pollutants dispersed along the river branch) to the Sacca. In order to partially obstruct the ingress of water, a gruyne has already been installed on the incile of the canal, but apparently the desired objectives have not been achieved. The canal is also used by small motor boats to pass from the Busa to the Sacca. Often these passages relate to professional fishing operators in transit from the Sacca degli Scardovari.

It is therefore proposed to narrow the canal, which currently has a variable width between 10 and 12 meters (which seems to have undergone a progressive widening over the years, Delta del Po

Reclamation Consortium, 2015), while maintaining the possibility of passage for small boats. The narrowing is carried out by means of a wooden piling and carry-over of the material from the dredging. It is also appropriate to install a new atrifact aimed at the total closure of the canal in the event of flood events or accidental spills in the Po.

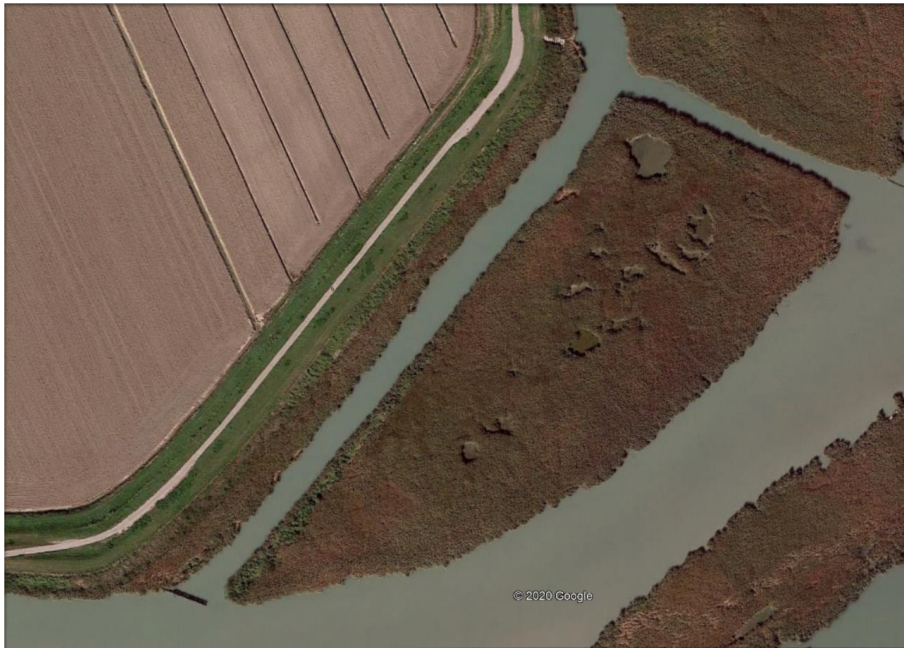


Figura 4-6 Channel connecting the Busa del Bastimento and the Sacca

4.1.3.7 Confinement of the area facing the Pellestrina pump

The intervention involves the insertion - in the area facing the pump station - of elements capable of limiting the dispersion of the waste water from the pump, acquiring the benefits associated with contrasting the reduction in salinity of the Sacca and increasing the possibility for the establishment of a more diversified environment with greater ecological gradients between the marginal areas and the mouth areas. These objectives can be achieved thanks to the inclusion of a submerged reef and a reed bed system.

4.1.4 Second level interventions

4.1.4.1 Inner channels excavation (branches: C4bis, C5, C6, C7, C9)

The vivification interventions of the lagoon will find adequate completion and consolidation when the channel network configuration foreseen by the General Intervention Project and taken up by the Guidelines (Veneto Region, 2018) is reached. The excavation quotas vary between -2.5 m and the -3.5 m s.l.m.m.

These interventions also concern the possibility of reopening the second sea mouth. Modeling studies have shown that the creation of the new connection with the sea would bring some benefits, but perhaps not commensurate with the additional costs originated from the need to maintain a further work. Moreover in-depth studies regarding the effects on the coastal dynamics are needed.

Figura 4-3 highlights (in green) branches corresponding to such an intervention.

4.1.4.2 Creation of artificial marshes (Barene 8 e 9, Barena Nord e Barena Sud)

I materiali derivanti dai dragaggi troveranno inoltre adeguata collocazione anche attraverso il recupero di strutture barenali storicamente presenti negli ambiti di gronda, in particolare nell'area delle barene Costa d'Avanzo (cfr per il toponimo e per le dinamiche evolutive), ubicate nell'area prospiciente il bacino dell'idrovora Boscolo e con uno sviluppo che costituisce un ideale prolungamento – con opportune interruzioni - dell'argine del canale Ex Enel.

The materials deriving from dredging will find an appropriate location also through the restoration of marshes structures historically present along the landside margin, in particular in the area of the salt marshes Costa d'Avanzo (see Figura 2-3 for the toponym and Figura 4-7 for the evolutionary dynamics), located in the area overlooking the Boscolo pump station drainage basin. The development of such structures constitutes an ideal extension - with appropriate interruptions - of the embankment of the Enel canal.

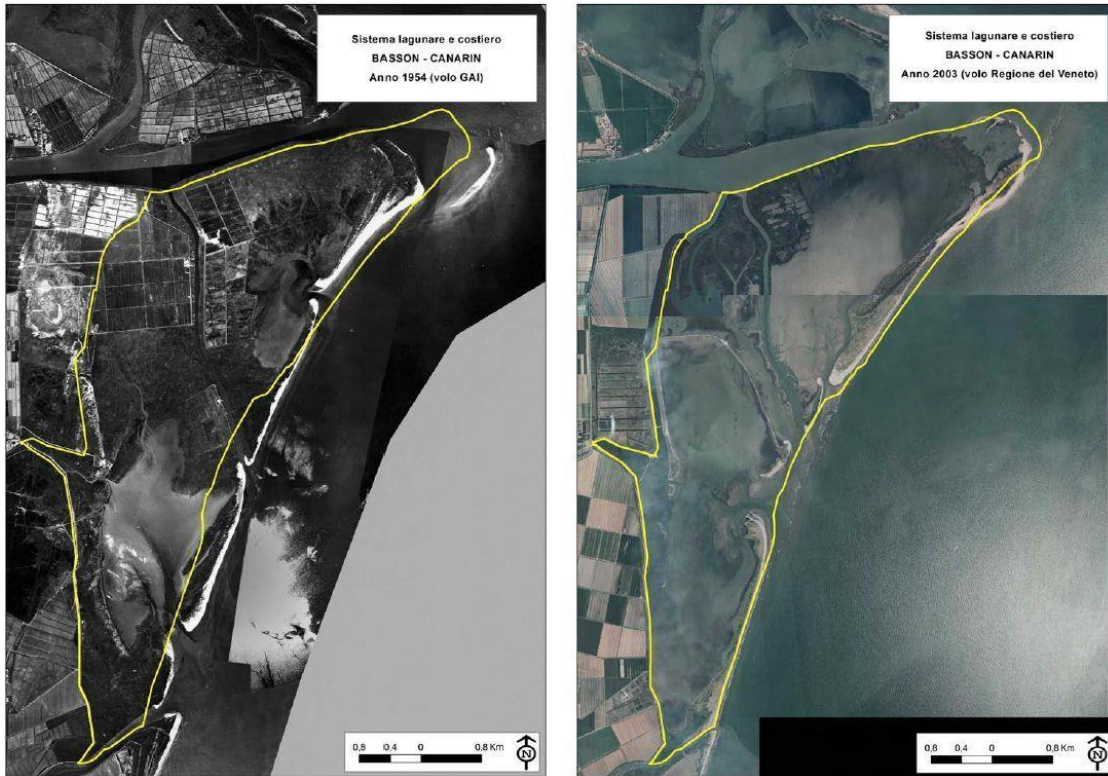


Figura 4-7 Sacca del Canarin – evolution dynamics during 1954 – 2003 (Verza e Cattozzo, 2015)

Two other storage areas are also identified which are destined to evolve into marshes environments along the border respectively one in the north and one in the south.

The southern marshes would recover the areas lost due to the documented erosive phenomena that have taken place in recent decades (Po Delta Reclamation Consortium, 2015).

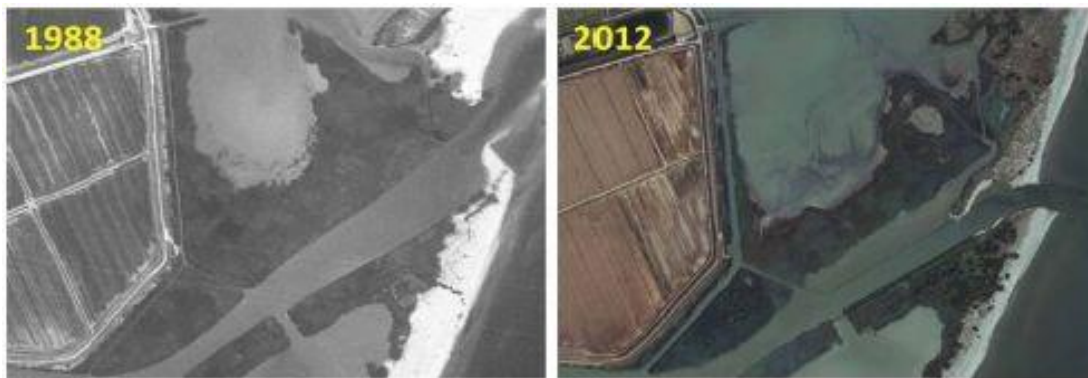


Figura 4-8 Comparison between marshes extension in the southern part of Sacca del Canarin

The northern marshes would also have the advantage of constituting a further line to strengthen the embankment.

The marshes elevation above m.s.l. will be conceived by evaluating the consistency of the available material and trying to reach values between +40 cm and +50 cm above m.s.l.. However, the opportunity to differentiate the quotas (in any case below +50 cm) must be taken into consideration, creating opportunities for the consolidation of an internal hydrographic network, characterized by the presence of “chiari” and “ghebi”.

4.1.4.3 Inserimento di un pennello lungo la Busa del Bastimento

The fresh water input from the Busa del Bastimento could be further hampered by the insertion of a bruyne similar to that existing at the other end of the morphological element that separates the Busa from the Sacca (Figura 4-6).

5 Sediment's management

The sediments of Sacca del Canarin and Caleri Lagoon have particle size and chemical-physical characteristics significantly influenced by natural factors (supply of solid material from rivers, tidal exchange, coastal currents) and by anthropic interventions that have occurred over time, aimed at vivification as well as at the improvement of the hydraulic safety of the agricultural and settlement area behind it.

In the most recent history of the Sacca del Canarin, the most significant natural event that greatly changed its hydromorphological structure was the closure of a mouth communicating with the sea, originally located in the southern part, near the mouth of the Po di Tolle. With the closure of this tidal water exchange area, which occurred in the early 1980s, the sediments, once mainly sandy, were covered with a layer of fine clay and silt, with relative impact on the local benthic community. At the same time, the cross section of the other mouth of communication with the sea has narrowed due to the formation of a series of partially submerged sandy banks (Veneto Region - Bioprogramm, 2015).

The contribution of solid material from the Po branches that is conveyed in the deltaic lagoons directly or through transport processes along the coast is a factor of primary importance in determining the chemical and granulometric characteristics of the sediments. The suspended materials transported from the Po are intercepted by the tidal currents and transported to the lagoon areas, depositing even in the innermost areas.

The continuous accumulation of sediment, combined - in the case of Sacca del Canarin - with the closure of one of the two mouths of communication with the sea and the narrowing of the second, is recognized as a risk factor for the progressive siltation of the lagoon and on water circulation .

Periodic interventions of revitalization of the deltaic lagoons were therefore necessary, involving the dredging of sediments in the canal areas and their reuse for sea defense works or for the restoration of typical lagoon morphologies.

Sediment management, as a resource for environmental remediation, rather than as waste, must be carried out knowing the characteristics of the sediment to be moved and the characteristics of the site where the material is to be transferred, verifying its compatibility according to scientific evidence and in compliance with the current legislation.

5.1 Legislative framework

For the purpose of managing lagoon sediments, environments of transition between the sea and the land, it is appropriate to take into consideration the complex regulatory framework governing the reuse of materials resulting from excavations and dredging in both marinecoastal and terrestrial environments. Beyond the regulatory complexity that governs this sector and its constantly evolving character, it is clear that the main purpose of the standard is to ensure that the relocation operations of the materials resulting from excavations and dredging do not cause environmental deterioration in the deposition sites, worsening the environmental status of the sites and causing impacts on local biological communities or human health.

The guidelines of the Veneto Region (2018) for the realization of maintenance and restoration works in the areas of the Po delta indicate the operating methods of these interventions, including actions that involve the movement of sediments. Interventions in fact include:

- a) Excavation work on the network of lagoon canals and outlet channels to the sea, aimed at restoring sections suitable for the development of a hydrodynamic regime that favors water exchange and consequent environmental vivification;
- b) Excavation work on waterways for the restoration of navigation quotas;
- c) Reconstruction of mudflats and marshes, for the restoration of the original lagoon morphologies and enrichment in terms of biodiversity;
- d) Restoration of the coastline and eroded beach following meteorological events.

In the case of mudflats and marshes reconstruction (c), the guidelines indicate that the sediment to be used originates from the excavation of the canals (a, b), subject to characterization in accordance with current legislation and verification of compliance.

For the restoration of the coast line (d), the guidelines indicate that the artificial nourishment material must generally come from areas identified within the same coastal cell. The material must however be selected taking into account the granulometric and mineralogical and, if possible, chromatic characteristics of the original sediments, in compliance with the provisions of the current legislation.

The main regulatory text for the proper management of the materials resulting from excavation and dredging is made up of Legislative Decree 152/2006 as amended, with particular reference to article 109 (part III of the decree) which governs disposal at sea of material (including materials resulting

from dredging) and article 185 (part IV of the decree) which governs exclusions from the scope of application of the legislation on waste and remediation.

In detail, art. 109 of Legislative Decree 152/2006 (part III) regulates the disposal at sea of various types of material. The materials include those resulting from excavation of seabed or brackish and coastal soils emerged, with prior authorization from the Region. The regional authorization is issued on the basis of what is reported in the following Ministerial Decree 173/2016, which with its technical annex establishes the procedures for classifying the material and defines different management options based on the results of the chemical and ecotoxicological classification: nourishment of the emerged and submerged beach, immersion in non-coastal marine areas, immersion in a confined marine-coastal environment and, in the case of more contaminated sediments, possible safe removal from the marine environment after risk assessment.

Article 185 of Legislative Decree 152/2006 (part IV), in detailing the possibilities of exclusion from the legislation referred to in part IV of the decree (waste and reclamation), in paragraph 4 regulates the management methods of excavated soils establishing that "*uncontaminated excavated soil and other materials in their natural state, used in sites other than those in which they were excavated, must be assessed pursuant to articles 183, paragraph 1, letter a), 184bis and 184-ter.*", that is, they fall into the categories of by-product (and non-waste), for the management of which the standard refers to further decrees for the identification of criteria for their use. In this regard, Ministerial Decree 161/2012 was inserted, subsequently repealed by Presidential Decree 120/2017. The latter is the current regulation governing the management of excavated soil. For the use of these materials, the decree provides for the comparison with the limits set in Table 1 of Annex 5 to part IV of Legislative Decree 152/2006. These limits are distinguished between "column A", referring to the use of the excavated material for "sites for public and private and residential green use" and column B (commercial and industrial areas), depending on the intended use of the material. The excavation materials disciplined by the DPR 120/2017 can be used for backfilling, filling, remodeling, restoration and environmental improvement interventions. The field of application of the decree relating to the management of excavated soil (art.3) excludes the marine-coastal area for which, as expressly indicated, the aforementioned article 109 applies (disposal at sea of material deriving from excavation and laying of cables and pipelines at sea).

The aforementioned art. 185 of Legislative Decree 152/2006, also establishes in paragraph 3 that as regards "sediments moved within surface waters or in the context of hydraulic appliances" for purposes related to water management, prevention of floods or drought, or soil restoration, the "non-dangerousness" of the materials must be verified, in accordance with Decision 2000/532/EC. Furthermore, compliance with the obligations deriving from other EU directives must be guaranteed, so it is clear that the relocation of the material must not cause a deterioration in the state of

environmental quality or cause impacts on local biological communities or on human health (Water Directive 2000/60/CE, Habitat Directive 92/43/CEE, Birds Directive 2009/147/CE).

In particular, for the purposes of implementing Directive 2000/60/EC, its Italian transposing Legislative Decree 152/2006 - Part III (as modified in particular by Legislative Decree 172/2015) defines quality standards for protection of the environment and human health from water, biota and sediment. For the latter, limited to some substances, the chemical characteristics can contribute to the classification of the chemical status of the water body and are in any case to be evaluated with a three-year frequency for the verification of the long-term trend of contamination or for site-specific investigations. With reference to the obligations deriving from Directive 2000/60, therefore, it can be deduced that the interventions of relocation of the sediments must not impair the good chemical state of the water bodies, nor in any case worsen their state. It follows that it is appropriate, where possible, to relocate the material moved within the same water body from which it was taken and in any case, for each operation of moving the sediment, the characteristics of both the origin and destination sites must be verified, so that there are no changes worsening the chemical status, with reference to the aforementioned environmental quality standards.

As regards the obligations deriving from Directives 92/43/EEC and 2009/147/EC, the aforementioned guidelines of the Veneto Region (2018) indicate precise limitations in the timing of excavation interventions in the lagoon canals aimed at the protection of local fauna, with particular reference to nesting and wintering birds in areas bordering heronries, marshes, reeds, littorals, nesting sites, feeding or resting, as well as in the vicinity of nursery areas for fish fauna. In the case of habitats or species of Community interest, the same guidelines indicate the reference to what is established by the Conservation Measures for habitats and species, adopted with DGR n. 786 of 27/05/2016 and subsequently integrated with DGR n. 1331 of 16 August 2017. Turbidity containment measures should be used, especially in areas of intervention close to areas where the presence of marine phanerogams or other species of conservation interest is ascertained (Salicornia and habitat 1310, shallow waters constituting areas breeding of fish species of community interest, Sandbank border habitat - habitat 1320).

Tabella 5-1, illustrates a comparison between some legislation limits and environmental quality standards for some contaminants.

In summary, in the light of current legislation, interventions involving dredging of sediments should follow the following guidelines:

- prioritize reuse rather than disposal and landfilling;

- in the case of reuse of dredged sediment within the same lagoon areas for creation / restoration / reinforcement of lagoon morphologies:
- ensure that the materials are not dangerous according to Decision 2000/532/CE;
- privilege the transfer of sediments within the same body of water from which they were dredged;
- ensure that the refluxed sediment does not cause a significant deterioration of the characteristics of the sediments on site, with particular reference to the environmental quality standards established for the purposes of classification of chemical status or other supporting evaluations, according to the provisions of the transposition regulation and implementation of Directive 2000/60 (Tab. 2/A, 3/A and 3/B of Legislative Decree 172/2015). The assessments must be carried out on a case-by-case basis, for each dredging operation, by means of a specific compatibility assessment of the sediments to be removed and the sediments of the area identified for their reflow.
- ensure the absence of negative impacts on biological communities related to dredging, transport and relocation operations, with particular attention to the nesting, resting and feeding areas of nesting and wintering birds, shallow areas used for the reproduction of fish fauna and in presence of habitats or species of community interest as required by the Veneto Region guidelines (2018).
- in the case of disposal in a marine or coastal marine environment, comply with the provisions of Legislative Decree 173/2016 and its technical annex which defines the sediment sampling, characterization and classification procedures according to its chemical and ecotoxicological characteristics. The general criteria for the planning of maintenance nourishment interventions and reconstruction of coastal morphologies are also indicated, at regional level, by DGRV 1215 of 15 July 2014, in addition to the provisions of DGR 1019 of 23 March 2010.

Tabella 5-1 *Substances and Environmental Quality Standards (D.Lgs 172/2015) compared with other legislation limits*

		SQA	L1	L2	Colonna A	Colonna B
		D.lgs 172/2015	D. Lgs 173/2016		D.lgs 152/2006 parte IV	
As	mg/kg	12	12	20	20	50
Cr VI	mg/kg	2	2	2	2	15
Cr tot	mg/kg	50	50	150	150	800
Ni	mg/kg		30	75	120	500
Pb	mg/kg	30	30	70	100	1000
Cd	mg/kg	0.3	0.3	0.8	2	15
Hg	mg/kg	0.3	0.3	0.8	1	5
TBT	µg/kg	5	5	72 Somma di MTB, DBT, TBT	1000 (organostannici tot)	350000 (organostannici tot)
PCB tot	µg/kg	8	8	60	60	5000
PCB+ PCDD/F T.E.	µg/kg	0.002	0.002	0.01	0.01 *	0.10 *
IPA tot	µg/kg		900	4000	10000	100000
Benzo(a)pirene	µg/kg	30	30	100	100	10000
Benzo(b)fluorantene		40	40	500	500	10000
Benzo(k)fluorantene		20	20	500	500	10000
Benzo(g,h,i)perilene		55	55	100	100	1000
Indenopirene		70	70	100	100	5000
Antracene	µg/kg	24	24	245	100	1000
Fluorantene		110	110	1494		
Naftalene		35	35	391		
Aldrin		0.2	0.2	10	10	100
Esaclorocicloesano (alfa, beta, gamma)		0.2 (alfa) 0.2 (beta) 0.2 (gamma)	0.2 (alfa) 0.2 (beta) 0.2 (gamma)	10 10 1	10 alfa 10 beta 10 gamma	100 alfa 500 beta 500 gamma
DDT		1	1	4.8	10	100
DDD		0.8	0.8	7.8		
DDE		1.8	1.8	3.7		

Dieldrin		0,2	0.7	4.3	10	100
Esaclorobenzene		0,4	0.4	50	50	5000

5.2 Available data

As part of the monitoring activities for the implementation of Directive 2000/60, ARPAV monitors the water, biota and sediment matrices of the transition environments of the Veneto Region. The data therefore allow to describe the spatial distribution of the chemical contamination of these areas, with reference to the quality standards provided by the implementation legislation (DM 260/2010 and Legislative Decree 172/2015 amending Legislative Decree 152/2006, part III). Specifically, the monitoring network includes 3 survey points in the Caleri lagoon and 2 survey points in the Sacca del Canarin, on a total of 17 stations distributed between lagoons and river branches of the Po delta (Figura 5-1).

As regards Sacca del Canarin, the results of a detailed characterization of the sediments of the canal section communicating with the sea inlet carried out in 2015 as part of specific dredging and repositioning of sediments are available (Veneto Region, 2015, Veneto Po Delta Regional Park, 2016). In this context, the granulometric and chemical characterization of the surface and deep sediments (1.5 m) of the outlet channel to the sea of the Sacca del Canarin was carried out, sampled with a dense mesh (100m x 100m or 50m x 200m). The characterization was aimed at the classification of sediments on the basis of the provisions of Legislative Decree 152/2006, part four, Title V, with reference to the table limits of column A ("Sites for public and private and residential green use") or B ("Sites for commercial or industrial use") of Table 1, attachment 5 of the aforementioned decree. The data of this characterization refer to metals and organic pollutants (PCBs, IPAs, pesticides), although for the latter the limits of analytical quantification do not allow an adequate description.

Overall, the scientific literature relating to the Po delta areas has focused mainly on the study of the trophic state, with attention to the nutrients and oxygenation conditions of the lagoon areas, due to the use of these environments for aquaculture and risk linked to possible anoxic crises, especially during summer. Data relating to metals and other pollutants are scarce (Casatta et al., 2016, Zonta et al., 2019), with more information available on the Sacca di Goro (Pitacco et al., 2020) located in the southernmost part of the Delta. Sediment contamination and its effect on biota on the entire delta area (bioaccumulation and endocrine interference) have recently been the subject of specific studies (Zonta et al., 2019, Viganò et al., 2019) carried out within the Ritmare project (2012-2017), coordinated by the CNR-ISMAR. The study included five survey sites in the Caleri lagoon and three

survey sites in the Sacca del Canarin, for the analysis of metals and sediment texture, referring to a sampling performed in 2016.

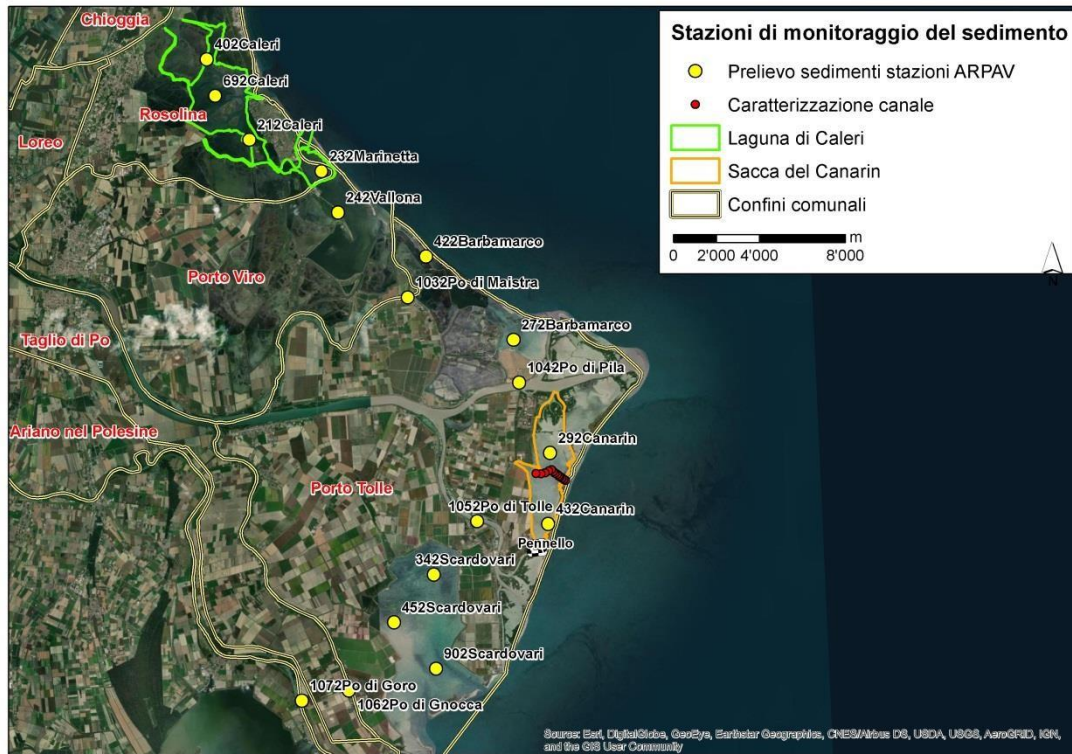


Figura 5-1 ARPAV's monitoring station (www.arpa.veneto.it) and sampling campaigns (Parco regionale del Veneto del Delta del Po, 2016).

The following discussion refers to a joint analysis of the results of the investigations and monitoring described above which allow to describe the main chemical-physical characteristics of the sediments of the lagoon areas of the Po delta, with particular reference to the lagoons of Caleri and Sacca del Canarin. They must be further investigated with targeted characterizations in the case of interventions that involve the movement of sediments for vivification and morphological recovery interventions.

5.3 Chemistry and granulometry

The sediments of the deltaic lagoons are characterized by a considerable variability in texture, varying from silty sand, sandy silt and clay silt, according to Shepard's classification. Finer particle size generally characterizes the internal areas of the lagoons, near the river outlets, while, in the areas near the mouths of communication with the sea, with higher energy, the fine fraction is less represented. In addition, a greater percentage of fine fraction was found in the lagoons located south of the mouth of Po di Pila - Busa Dritta, in relation to the large flow rates of this branch and the direction of the coastal current, typically oriented towards the south. It follows that in the Sacca del Canarin, as in other lagoons in the southern portion of the delta, in the innermost areas, sediments with a particularly fine particle size are observed, such as clay silts (Zonta et al., 2019). However, as emerged from the characterization of 2015 (Veneto Regional Park of the Po Delta, 2016), the sediments of the outlet channel to the sea consist of sands, with a sandy fraction equal to more than 99%.

The different content of fine particles influences the distribution of metals and organic contaminants, which in the available studies are present in generally higher concentrations in the sediments of the southern lagoons than those located in the northern part of the delta, highlighting in some cases exceedances of the identified thresholds for their evaluation and classification.

The results of the most recent available studies are described in relation to their spatial distribution and compared with the legal limits or quality standards referred to in par. 5.1, to allow an overall assessment of the level of contamination present in the area.

Heavy metals

Arsenic in sediments, according to the legislation implementing the Water Framework Directive (Legislative Decree 172/2015) does not contribute to the classification of the chemical status of water bodies. However, its presence in sediments is assessed in order to acquire further elements of deepening knowledge.

All available data show arsenic concentrations below the quality standard of 12 mg/kg s.s. established by Legislative Decree 172/2015. Specifically, the mouth canal, characterized in 2015, showed arsenic concentrations varying between values <1 mg/kg and 3.4 mg/kg, therefore well below this standard. According to ARPAV monitoring, the sediment concentrations in the Caleri and Sacca del Canarin lagoons vary between 2.4 and 10 mg/kg between 2016 and 2018. Very similar are the results of the study by Zonta et al (2019) which highlights in this case the absence of a correlation with the fine fraction, with relatively higher values, but still lower than 12 mg/kg, in the northern part of the delta.

In the case of chromium, which - like arsenic - does not belong to the list of priority substances and does not contribute to the classification of the water bodies of the lagoon, there is a level of contamination generally higher than the quality standard of the Decree 172/2015 which is equal to 50 mg/kg. The available data in fact indicate concentrations on average equal to 78 mg/kg (2016-2018 ARPAV data), confirming the values obtained in the study by Zonta et al. (2019). In the Sacca del Canarin the concentrations are higher than in the Caleri lagoon, reaching concentrations up to 90 mg/kg. The chromium contamination in the mouth canal characterized in 2015 is lower, given the clear prevalence of the sandy fraction in this area. In any case, the chromium concentrations in the area of interest are lower than those reported in column A by Legislative Decree 152/2006 (150 mg/kg annex 5, part IV), equivalent to the reference chemical level L2 identified by D.Lgs 173/2016. The latter allows to classify sediments in class A, only in the case where all the ecotoxicological analyzes show no toxicity. It should also be noted that the fraction of hexavalent chromium, which represents the most relevant fraction from an ecotoxicological point of view, results from the available investigations always lower than the limit of quantification of the analytical methods.

Although nickel is a priority substance whose concentration in water contributes to the classification of chemical status, it is not regulated by Legislative Decree 172/2015 which does not define quality standards. However, if we consider the two reference chemical levels L1 and L2 of Legislative Decree 173/2016 (30-75 mg/kg) the sediments of the delta lagoons of the Sacca del Canarin are characterized by a non-negligible level of contamination, reaching values higher than L2 in Sacca del Canarin. Values between L1 and L2 characterize the communication channel with the sea according to the characterization carried out in 2015, as well as the two ARPAV monitoring areas. According to Zonta et al (2019), the presence of nickel in the deltaic lagoons of the Po (between 35 mg/kg and 90 mg/kg) must be taken into account as the detected concentrations frequently exceed the toxicity threshold with probable effect (ERM, Effect Range Median, 51.6 mg/kg, Long et al., 1995), derived from toxicity tests on benthic organisms.

Lead is included in the the priority list, with a quality standard of 30 mg/kg. For the classification of chemical status, a concentration deviation of 20% of the standard (36 mg/kg) is allowed, the available data show lead concentrations that do not exceed the quality standard both in the northern part of the delta (Laguna di Caleri) both in the southern part (Sacca del Canarin), although in the latter the concentrations are higher, probably due to the effect of the finer particle size. The sandy sediments collected in the sea outlet channel of the Sacca di Canarin in 2015 show much lower concentrations, frequently lower than 8 mg/kg.

Cadmium, also a priority substance, is present in the lagoon sediments of the Po delta with concentrations frequently higher than the environmental quality standard (0.3 mg/kg). According to the data of the ARPAV monitoring (2016-2018), the concentrations in the Caleri lagoon and in the

Sacca del Canarin vary between 0.3 and 0.6 mg/kg, confirming the findings of Zonta et al (2019) which highlight higher concentrations in the southern areas of the delta and especially in the Sacca di Goro. On the other hand, a comparison with the characterization of the mouth canal in 2015 which shows values lower than a higher limit of quantification (1.7 mg/kg) is not possible.

Molto basse sono le concentrazioni di mercurio, che nei vari studi considerati non eccedono la soglia di 0.3 mg/kg, che rappresenta lo standard di qualità del D.Lgs 172/2015 e coincide con il livello chimico L1 del D.Lgs 173/2016.

Mercury concentrations are very low, which in the various studies considered do not exceed the threshold of 0.3 mg/kg, which represents the quality standard of Legislative Decree 172/2015 and coincides with the chemical level L1 of Legislative Decree 173/2016.

Copper and zinc are not elements considered by the implementing legislation of the water framework directive, which therefore does not provide quality standards and which does not fall within the parameter set analyzed by ARPAV. The characterization of the mouth canal of the Sacca del Canarin showed very low copper and zinc concentrations, with maximum values much lower than the reference chemical levels L1 and L2 of Legislative Decree 173/2016. The concentrations reported by Zonta et al (2019) are higher, up to over 50 mg/kg for copper and 160 mg/kg for zinc, with values tendentially higher in the southern part of the delta, i.e. in the Sacca del Canarin and in the Sacca di Goro, in relation to the greater presence of the fine fraction. The authors do not highlight any critical issues for these elements which do not however exceed the thresholds identified for toxicity on benthic communities (ERM).

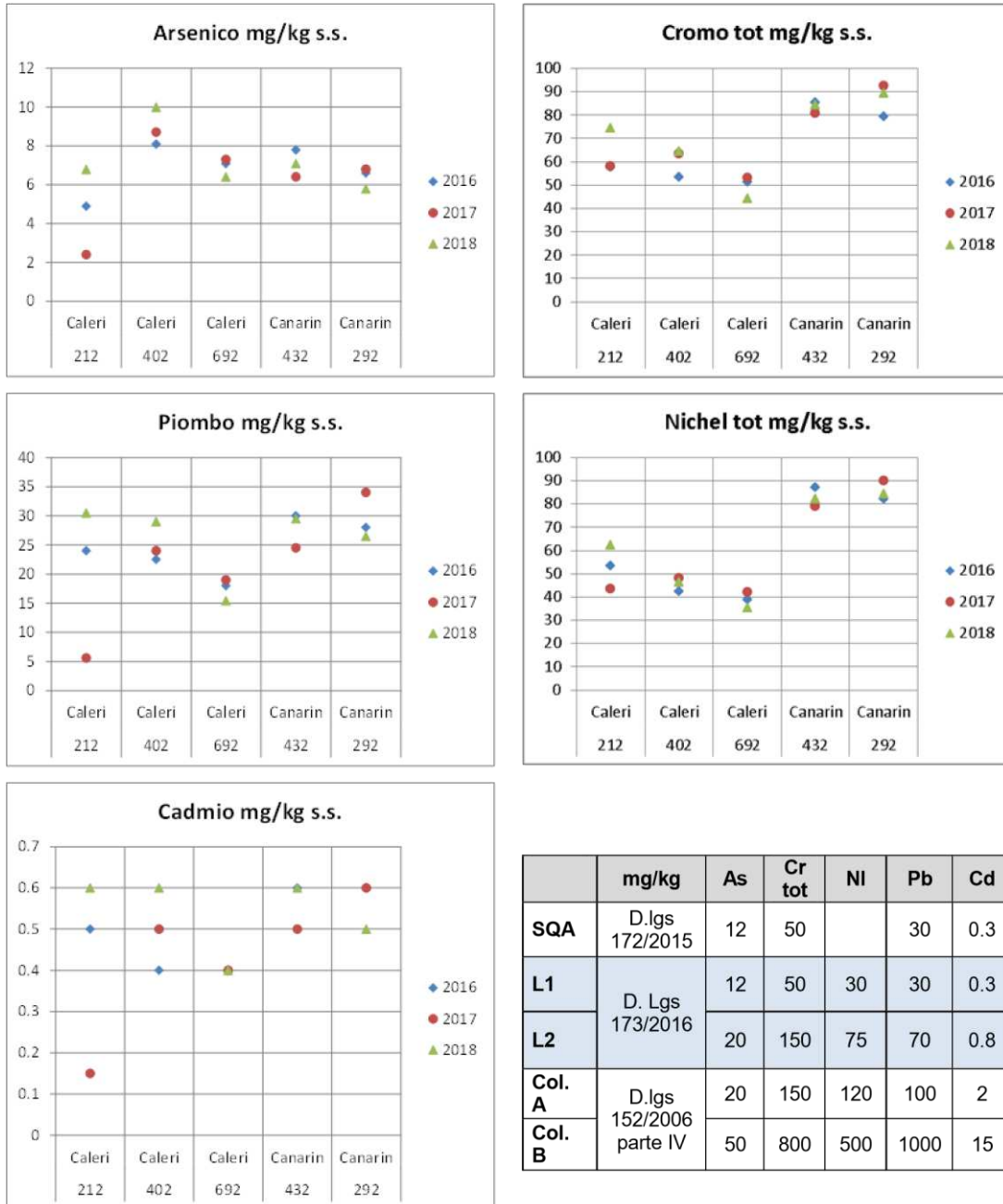


Figura 5-2 Heavy metals concentrations in surface sediments (mg/kg s.s.) and legislative references.
 Source: ARPAV (www.arpa.veneto.it) data elaborated in the present study.

Organic pollutants

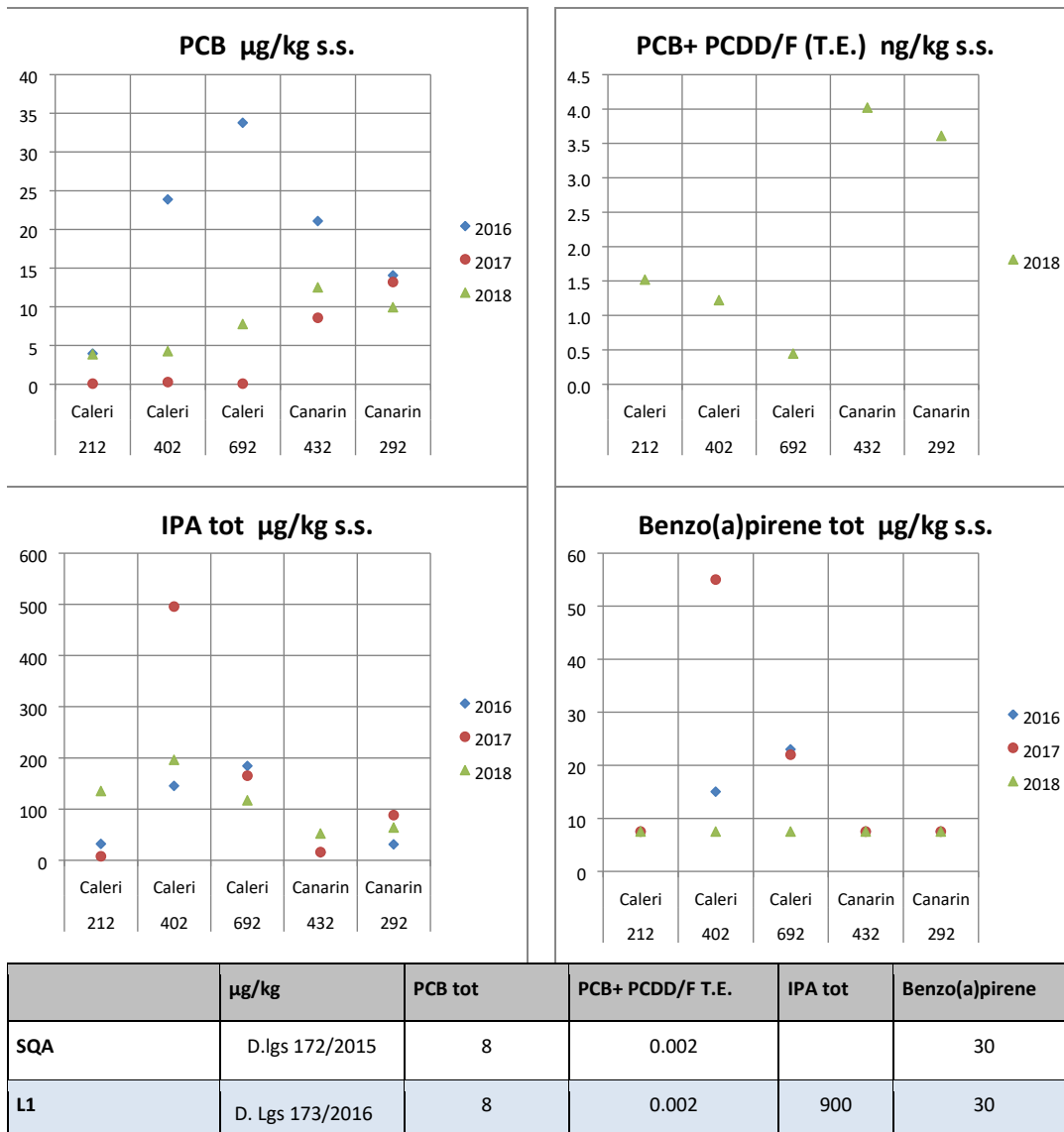
As in the case of metals, organic contaminants are also distributed preferentially in finegrained sediments, showing a generally higher level of contamination in the southern part of the delta. Although the use of PCBs and DDTs has long been banned in Italy in relation to the toxicity of these substances, their persistence in the environment can still determine their presence, especially in the sedimentary compartment where they accumulate. According to Viganò et al. (2019), the distribution of DDT isomers in the sediments of the Po delta is quite heterogeneous, with differences both between the different lagoons and between different areas of the same lagoon. The concentrations (expressed as the sum of the DDT isomers) vary between 0.7 µg/kg in the Caleri Lagoon to 5.9 µg/kg in the Sacca di Goro, with a variability that reflects the total organic carbon content, in turn linked to the distribution of the finer particle size. The concentrations are generally lower than the environmental quality standards established by the implementation legislation of Directive 2000/60 (D. Lgs 172/2015) equal to 1 µg/kg for DDT, 1.8 µg/kg for DDE and 0.8 µg/kg for DDD, with some exceptions related to the Sacca di Goro. ARPAV monitoring in the deltaic lagoons confirms the same evidence, with concentration values of the various isomers frequently lower than 0.1 µg/kg (limit of quantification) in all the lagoons of the delta, although occasionally exceeding the quality standard. In 2018, for example, ARPAV reports exceedances in the case of two isomers, at the mouth of the Po di Pila (4-4 'DDD and 4-4' DDT).

In the case of PCBs, the study by Viganò et al (2019) indicates a minimum level of contamination in the Caleri lagoon (2.5 µg/kg), south of which there are concentrations in several cases higher than 8 µg/kg (SQA) with values up to 12 µg/kg in the Sacca del Canarin. ARPAV data confirm the presence of several cases of exceeding the quality standard. In 2018 the total PCBs in the Sacca del Canarin were between 10 and 13 µg/kg, while in the Lagoon of Caleri the concentrations ranged between 4 and 8 µg/kg. However, much higher values had characterized the 2016 monitoring. PCB contamination in these areas would be influenced by the contributions of the Po and the concentrations detected could be significant, in relation to the bioaccumulation phenomena along the trophic chain and the possible toxic effects (interferences endocrine) also deriving from the presence of other compounds of toxicological interest detected in the sediments of the Po lagoons, such as alkylphenols, PBDEs, PAHs, pharmaceutical substances and pesticides (Viganò et al., 2019, Muscolo et al. , 2019, Casatta et al., 2016).

Among the PCBs, those of greatest interest from an ecotoxicological point of view are dioxinlike PCBs, which together with dioxins and furans (PCDD/F) are expressed in terms of equivalent toxicity. ARPAV monitoring reveals the presence of these substances in concentrations in several cases higher than the quality standard established by Legislative Decree 172/2015 (2 ng/kg). The monitoring carried out in 2018 highlights in particular total equivalent toxicity values from PCBs, dioxins and furans varying

between 0.2 and 5 ng/kg. Values above 2 ng/kg have been found in particular in the lagoons of Barbamarco, Canarin and Scardovari. The concentrations found in the Caleri lagoon are much lower, as in the other lagoons in the northernmost part of the delta.

In the case of PAHs, the available data indicate the absence of values higher than the reference chemical level L1 of Legislative Decree 173/2016 (900 µg/kg) and the quality standard equal to 800 µg/kg, which however is not more in force according to Legislative Decree 172/2015. However, the ARPAV monitoring in the Po delta areas reveals occasional exceedances of the quality standards for some IPAs belonging to the priority list even if data below the quantification limits are frequent.



L2		60	0.01	4000	100
Colonna A	D.lgs 152/2006parte IV	60	nd	10000	100
Colonna B		5000	nd	100000	10000

Figura 5-3 PCB, PCDD/Fs and PAHs concentrations. Source: ARPAV (www.arpa.veneto.it) data elaborated in the present study.

6 Monitoring programme

The monitoring activity is particularly important to support a management logic of the areas subject to intervention which are by their nature subject to evolutionary and transformation dynamics.

In order to follow the local evolutionary dynamics in the mouth areas and in the canals it will be necessary to perform periodically, with an indicative biennial frequency:

- Bathymetric survey
- Survey with aerial photogrammetry.

In order to constantly monitor the hydraulic efficiency of the system and the content of the sealagoon exchanges, it would be advisable to install current meters at the ports and periodically carry out campaigns for:

- flow measurements

In order to follow the evolution of the artificial marshes and mudflats morphological structures the following monitoring must be carried out:

- topographical surveys of the deposit areas, to be carried out annually for the first three years after construction and then every three years;
- survey of halophilous and phytobenthic vegetation, to be carried out every two years;
- survey of birdlife (nesting and feeding), to be carried out annually in the first three years of its implementation and subsequently every three years;
- survey of the fish fauna on the mudflats areas and in the areas adjacent to the artificial marshes structures, to be carried out every three years.

In order to follow the evolution of the coastal environments created:

- topographical surveys of the deposit areas to be carried out every three years;

- survey of birdlife (nesting and wintering / migratory birds) to be carried out on an annual basis in the first three years of its construction and thereafter on a three-year basis;
- survey of terrestrial vegetation, invertebrates and vertebrates to be carried out every three years.

In order to follow the evolution of the nourishment area:

- survey of the shore line and along the section perpendicular to the coast, on an annual basis (preferably in summer).

In addition to monitoring the evolution of the interventions carried out, the degree of conservation of the Habitats and habitats of species of Community interest present in the two areas subject to interventions will also be verified, every three years.

7 Bibliography

ARPAV, 2012. Dipartimento per la sicurezza del Territorio. Sulla ripartizione delle portate del Po tra i vari rami e le bocche a mare del delta: esperienze storiche e nuove indagini all'anno 2011. Relazione n° 02/12.

ARPAV, 2016. Monitoraggio delle acque di transizione della regione Veneto. Analisi dei dati osservati nell'anno 2016. Rapporto Tecnico.

ARPAV, 2017. Monitoraggio delle acque di transizione della regione Veneto. Analisi dei dati osservati nell'anno 2017. Rapporto Tecnico.

ARPAV, 2018. Monitoraggio delle acque di transizione della regione Veneto. Analisi dei dati osservati nell'anno 2018. Rapporto Tecnico.

ARPAV, 2018a. Monitoraggio ambientale delle lagune del delta del Po. Anno 2018.

Casatta, N., Stefani, F., Pozzoni, F. et al. 2016. Endocrine-disrupting chemicals in coastal lagoons of the Po River delta: sediment contamination, bioaccumulation and effects on Manila clams. *Environ Sci Pollut Res* 23, 10477–10493. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5656-3>

Consorzio di Bonifica Delta del Po, 2010. Piano Generale di Bonifica e Tutela del Territorio. Legge Regionale 08.05.2009 art.23, n.12 - D.G.R. 26.01.2010 n.102.

Consorzio di Bonifica Delta del Po, 2015. Piano Operativo degli interventi per la manutenzione e gestione delle lagune del Delta del Po – Art. 29 L.R. n. 7/99. Service Tecnico: IPROS srl.

Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po – Regione del Veneto, 2015a. “Lavori di vivificazione della Sacca di Scardovari, della laguna di Barbamarco e della laguna di Caleri per la valorizzazione di habitat e specie protette tramite lo scavo di canali sublagunari, la realizzazione di velme e barene”.

Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po – Regione del Veneto, 2015b. “Lavori di vivificazione della Sacca del Canarin per la valorizzazione di habitat e specie protette tramite lo scavo di canali sublagunari, la realizzazione di velme e barene e la protezione dello scanno a mare”.

Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po, 2016. Intervento relativo al progetto “Lavori di vivificazione della Sacca del Canarin per la valorizzazione di habitat e specie protette tramite lo scavo di canali sublagunari, la realizzazione di velme e barene e la protezione dello scanno a mare”. Caratterizzazione dei materiali di scavo della Sacca del Canarin. Indagine Ambientale. Esecutore: Tecnologica srl.

Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po – Ipros, 2018a. “Modellazione numerica a supporto delle attività di monitoraggio e della progettazione e realizzazione degli interventi nella Laguna di Caleri e nella Laguna di Barbamarco sul Delta del Po”.

Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po – Ipros, 2018b. “Modellazione numerica a supporto delle attività di monitoraggio e” della progettazione e realizzazione degli interventi nella Sacca del Canarin sul delta del Po”.

Falcieri, F., Benetazzo, A., Bergamasco A., Bonaldo D. Carniel S. Sclavo M., Russo A., 2013. Po river plume patterns variability and dynamics: a numerical modeling and statistical approach. Geophysical Research Abstracts. Vol. 45, EGU2013.

Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D., 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. Environ. Manag. 19, 81–97.

Maicu, F., De Pascalis, F., Ferrarin, C., & Umgiesser, G., 2018. Hydrodynamics of the Po River-Delta-Sea system. Journal of Geophysical Research: Oceans, Volume 123.
<https://doi.org/10.1029/2017JC013601>.

Mascolo, G., Murgolo, S., Stefani, F., Viganò, L., 2019. Target and suspect contaminants of emerging concern in the Po River Delta lagoons, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 230, 2019, 106424, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106424>

Pellizzari M., Naldi M., Castaldelli G., Ghion F., Manfredini E., Piccoli F., Viaroli P., 2009. Salt and brackish lagoons of the southern Po Delta. In: Flora and Vegetation of the Italian transitional water systems. A cura di: Cecere E., Petrocelli A., Izzo G., Sfriso A. Edizione CORILA. Venezia.

Pitacco, V., Mistri, M., Ferrari C. R., Sfriso, A., Sfriso, A.A., Munari, C., 2020. Multiannual Trend of Micro-Pollutants in Sediments and Benthic Community Response in a Mediterranean Lagoon (Sacca di Goro, Italy). Water 2020, 12, 1074; doi:10.3390/w12041074.

Provincia di Rovigo - Bioprogramm, 2013. Carta ittica Provinciale delle Aree lagunari e vallive (zona C). Studio per la valutazione di incidenza. Esecutore: Bioprogramm Soc.Coop.

Regione del Veneto – Ente Parco Regionale del Veneto del Delta del Po, 2010. Piano di Gestione della ZPS IT3270023 – Delta del Po.

Regione del Veneto – Bioprogramm, 2015. “Lavori di vivificazione della Sacca del Canarin per la valorizzazione di habitat e specie protette tramite lo scavo di canali sublagunari, la realizzazione di

velme e barene e la protezione dello scanno a mare”. Studio di Incidenza Ambientale (ai sensi D.P.R. n. 120/03 e D.G.R.V. n. 2299/2014). Esecutore: Bioprogramm Soc.Coop.

Regione del Veneto, 2018. Direzione Operativa – Unità Organizzativa Genio Civile Rovigo. Realizzazione di lavori di manutenzione e sistemazione da effettuarsi negli ambiti della fascia costiera del Delta del Po, compresi gli interventi di manutenzione delle lagune. Linee Guida Integrate ed adeguate all’esito dell’autorità regionale per la valutazione di incidenza ambientale del 12.03.2018. Esecutore: Agri.Te.Co srl.

Regione del Veneto, 2018a. Direzione Operativa – Unità Organizzativa Genio Civile Rovigo. Realizzazione di lavori di manutenzione e sistemazione da effettuarsi negli ambiti della fascia costiera del Delta del Po, compresi gli interventi di manutenzione delle lagune. Linee Guida Integrate ed adeguate all’esito dell’autorità regionale per la valutazione di incidenza ambientale del 12.03.2018. Studio per la Valutazione di Incidenza. Esecutore: Agri.Te.Co srl.

Regione del Veneto, 2019. Direzione Agroambiente Programmazione e Gestione ittica e faunistico-venatoria. Carta ittica regionale. Documento Preliminare (ai sensi DGR 791/2009 - Allegato A). Esecutore: Bioprogramm Soc.Coop - Aquaprogram s.r.l. - Dr. Thomas Busatto.

Ruol P. e Pinato T., 2016. Gestione integrata della zona costiera. Studio e monitoraggio per la definizione degli interventi di difesa dei litorali dall’erosione nella Regione Veneto - Linee Guida. Università degli Studi di Padova – Regione del Veneto.

Verza E., Cattozzo L., 2015. Atlante lagunare costiero del Delta del Po.

Viganò, L., Stefani, F., Casatta, N., Mascolo, G., Murgolo, S., Roscioli, C., Zonta, R., 2019. Contamination Levels and Spatial Distribution in the Lagoons of the Po River Delta: Are Chemicals Exerting Toxic Effects? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 231, 2019, 106467, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106467>.

Sfriso, A., Facca, C., Bon, D., & Buosi, A., 2016. Macrophytes and ecological status assessment in the Po delta transitional systems, Adriatic Sea (Italy). Application of Macrophyte Quality Index (MaQI). *Acta Adriatica: International Journal of Marine Sciences*, 52, 209-226.

Zonta, R., Cassin, D., Pin, R., Dominik, J., 2019. Assessment of heavy metal and As contamination in the surface sediments of Po delta lagoons (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 225, 2019, 106235. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.05.017>.