

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Petra Prlić

**3D KARTOGRAFSKA VIZUALIZACIJA  
SAKRALNIH OBJEKATA U SJEVERNOJ  
HRVATSKOJ  
(DONJA VIŠNJICA)**

Diplomski rad

Zagreb, 2025.

Petra Prlić ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2025.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GEODETSKI FAKULTET**

Petra Prlić

**3D KARTOGRAFSKA VIZUALIZACIJA**  
**SAKRALNIH OBJEKATA U SJEVERNOJ**  
**HRVATSKOJ**  
**(DONJA VIŠNJICA)**

Diplomski rad

Zagreb, 2025.

# SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

## GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1\_349\_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

### IZJAVLJUJEM

Ja, **Petra Prlić**, (JMBAG: 0007182471), rođen/a dana 01.03.2001. u Splitu, izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana 12.09.2025.

*Potpis studenta / studentice*

<b>I. AUTOR</b>	
<b>Ime i prezime:</b>	Petra Prlić
<b>Datum i mjesto rođenja:</b>	1. ožujka 2001., Split, Republika Hrvatska
<b>II. DIPLOMSKI RAD</b>	
<b>Naslov:</b>	3D kartografska vizualizacija sakralnih objekata u Sjevernoj Hrvatskoj (Donja Višnjica)
<b>Broj stranica:</b>	65
<b>Broj tablica:</b>	5
<b>Broj slika:</b>	52
<b>Broj bibliografskih podataka:</b>	17 + 17 URL
<b>Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:</b>	Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Vesna Poslončec-Petrić
<b>Komentor:</b>	dr. sc. Zvonimir Nevistić
<b>Voditelj:</b>	dr. sc. Zvonimir Nevistić
<b>III. OCJENA I OBRANA</b>	
<b>Datum zadavanja teme:</b>	10.01.2025.
<b>Datum obrane rada:</b>	19.09.2025.
<b>Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:</b>	izv. prof. dr. sc. Vesna Poslončec-Petrić
	dr. sc. Zvonimir Nevistić
	doc. dr. sc. Davor Stanko

## **Zahvala**

*Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Vesni Poslončec-Petrić i komentoru dr. sc. Zvonimiru Nevistiću na stručnom vodstvu, korisnim savjetima i podršci tijekom izrade i završetka diplomskog rada.*

*Od srca zahvaljujem svojim prijateljima koji su bili dio ovog puta, a posebno onima koji su tu i ostali – vaša podrška i druženja učinili su ovo razdoblje ljepšim.*

*Posebnu zahvalnost upućujem svom dečku na razumijevanju, strpljenju i podršci tijekom studija i pisanja ovog rada.*

*I na kraju, najveću zahvalnost iskazujem svojoj obitelji, bez koje ovaj uspjeh ne bi bio moguć!*

*Posebno hvala tebi tata, znam da si vjerovao u mene do neba, odakle me danas pratiš i čuvaš.*

### **3d kartografska vizualizacija sakralnih objekata u Sjevernoj Hrvatskoj (Donja Višnjica)**

**Sažetak:** Dokumentiranje i očuvanje kulturne baštine zahtijevaju metode koje omogućuju vjernu i dugotrajnu pohranu prostornih podataka, a 3D kartografska vizualizacija sve se više ističe kao pouzdan alat u konzervaciji, analizi i popularizaciji spomeničke baštine. Ovaj diplomski rad istražuje mogućnosti primjene suvremenih geodetskih tehnologija u trodimenzionalnoj (3D) kartografskoj vizualizaciji kulturne baštine, na primjeru župne crkve Pohođenja Blažene Djevice Marije u Donjoj Višnjici. Podaci su prikupljeni u sklopu znanstvenog projekta SIGMATOPCRO, a obuhvaćaju zračno LiDAR snimanje i fotogrametriju bespilotnom letjelicom (UAV). Podaci su obrađeni u softverima Agisoft Metashape, CloudCompare i AutoCAD, čime su izrađena tri modela: LiDAR, UAV i kombinirani model koji spaja LiDAR geometriju s UAV teksturama. Provedene su kvantitativne analize (mjerenja dimenzija, volumena i usporedba oblaka točaka) te vizualne usporedbe modela. Rezultati pokazuju da LiDAR podaci osiguravaju veću geometrijsku točnost, dok UAV podaci pružaju detaljniji vizualni prikaz. Kombinacija obje metode pokazala se najpouzdanijim rješenjem jer istovremeno omogućuje preciznu dokumentaciju i realističnu vizualizaciju objekta. Rad ukazuje na prednosti i ograničenja svake tehnologije, ističe važnost njihove integracije te naglašava potencijal 3D vizualizacija u očuvanju i popularizaciji kulturne baštine. Dobivena iskustva mogu poslužiti kao podloga za buduće projekte dokumentiranja i prezentacije sakralnih i drugih baštinskih objekata u Hrvatskoj.

**Ključne riječi:** 3D model, kartografska vizualizacija, kulturna baština, LiDAR, UAV.

### **3D Cartographic Visualization of Sacral Objects in Northern Croatia (Donja Višnjica)**

**Abstract:** The documentation and preservation of cultural heritage require methods that ensure accurate and long-term storage of spatial data, with 3D cartographic visualization increasingly emerging as a reliable tool for conservation, analysis, and dissemination of heritage monuments. This thesis explores the potential of applying modern geodetic technologies in three-dimensional (3D) cartographic visualization of cultural heritage, using the parish church of the Visitation of the Blessed Virgin Mary in Donja Višnjica as a case study. The data were collected within the scientific project SIGMATOPCRO and included airborne LiDAR scanning and UAV photogrammetry. The datasets were processed in Agisoft Metashape, CloudCompare, and AutoCAD, resulting in three models: a LiDAR model, a UAV model, and a combined model integrating LiDAR geometry with UAV textures. Quantitative analyses (measurements of dimensions, volume, and point cloud comparison) and visual comparisons of the models were carried out. The results demonstrate that LiDAR data provides higher geometric accuracy, while UAV data offers more detailed visual representation. The combination of both methods proved to be the most reliable approach, simultaneously enabling precise documentation and realistic visualization of the object. The study highlights the advantages and limitations of each technology, emphasizes the importance of their integration, and underlines the potential of 3D visualization in the preservation and promotion of cultural heritage. The experiences gained may serve as a foundation for future projects dedicated to documenting and presenting sacred and other heritage objects in Croatia.

**Keywords:** 3D model, cartographic visualization, cultural heritage, LiDAR, UAV.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KARTOGRAFIJA I KARTOGRAFSKA 3D VIZUALIZACIJA .....	3
2.1 POJAM I ULOGA KARTOGRAFIJE .....	3
2.2 KARTOGRAFSKA 3D VIZUALIZACIJA .....	4
2.3 POSTOJEĆI 3D MODELI .....	6
2.3.1 Primjeri 3D modela kulturne baštine u svijetu.....	6
2.3.2 Primjeri 3D modela kulturne baštine u Hrvatskoj.....	9
3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA I SURADNJA SA SIGMATOPCRO PROJEKTOM.....	13
3.1 SIGMATOPCRO PROJEKT .....	13
3.2 PILOT PODRUČJE – DONJA VIŠNJICA .....	14
4. ZRAČNO LIDAR SNIMANJE .....	18
4.1 OPREMA I INSTRUMENTI .....	19
4.1.1 Letjelica.....	20
4.1.2 LiDAR skener .....	22
4.1.3 Integrirani sustav GNSS-a s inercijalnim mjernim sustavom (GNSS/INS).....	23
5. TOPOGRAFSKO 2D I 3D SNIMANJE DRONOM .....	25
5.1 KORIŠTENI INSTRUMENTARIJ .....	26
5.1.1 Bepilotna letjelica: DJI Matrice 350 RTK.....	26
5.1.2 GNSS referentna stanica: EMLID Reach RS2.....	28
5.1.3 LiDAR senzor: DJI Zenmuse L2 .....	29
6. OBRADA PODATAKA .....	31
6.1 OBRADA SIROVIH PODATAKA .....	31
6.2 SOFTVER KORIŠTEN ZA IZRADU 3D MODELA .....	32
6.3 IZRADA 3D MODELA .....	33
6.3.1 Učitavanje i priprema snimaka.....	34
6.3.2 Poravnanje snimaka .....	35
6.3.3 Gusti oblak točaka.....	38
6.3.4 Izrada mreže .....	39
6.3.5 Ortomozaik.....	45
7. ANALIZA I VIZUALIZACIJA REZULTATA .....	48
7.1 SOFTVER KORIŠTEN ZA ANALIZE .....	49
7.2 ANALIZA I USPOREDBA NA LiDAR I UAV OBLAKU TOČAKA.....	50
7.2.1 Sažetak i diskusija provedenih analiza.....	55
ZAKLJUČAK .....	58

LITERATURA.....	59
POPIS SLIKA.....	63
POPIS TABLICA.....	65
ŽIVOTOPIS .....	

## 1. UVOD

Kulturna baština predstavlja neprocjenjiv dio identiteta i povijesti svake zajednice, a njezino očuvanje i dokumentiranje sve se više oslanja na suvremene geoinformatičke tehnologije. Tradicionalne metode bilježenja i arhiviranja baštinskih objekata često su ograničene u pogledu preciznosti i dostupnosti podataka, dok trodimenzionalna (3D) vizualizacija omogućuje detaljnije i realističnije prikaze koji se mogu koristiti u konzervatorske, edukativne i prezentacijske svrhe. U kontekstu kulturne baštine, 3D modeli imaju važnu ulogu u dugotrajnom očuvanju prostornih informacija te u podizanju svijesti javnosti o vrijednosti baštinskih objekata. Razvoj tehnologija kao što su LiDAR skeniranje i fotogrametrija iz bespilotnih letjelica (UAV) uvelike je unaprijedio postupke prikupljanja prostornih podataka. Tradicionalne metode i dalje imaju svoju primjenu, no u usporedbi s novim tehnologijama zahtijevaju više vremena i rada na terenu. LiDAR se ističe preciznošću geometrijske rekonstrukcije, dok UAV omogućuje detaljan vizualni prikaz zahvaljujući visokoj rezoluciji snimaka i jednostavnoj primjeni. Kombinacija ovih tehnologija pruža cjelovitiji prikaz objekata i krajolika jer spaja geometrijsku točnost laserskog skeniranja s fotorealističnim prikazom UAV podataka. Upravo takva integracija otvara nove mogućnosti u području kartografske vizualizacije i dokumentiranja kulturne baštine. Motivacija za izradu ovog diplomskog rada proizlazi iz potrebe da se istraže prednosti i ograničenja pojedinih metoda snimanja i obrade podataka, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u kartografskoj vizualizaciji sakralnih objekata. Kao studija slučaja izrađen je 3D modeli crkve u Donjoj Višnjici čiji je odabir dodatno opravdan činjenicom da je lokalitet dio multidisciplinarnih istraživanja u sklopu znanstvenog projekta SIGMATOPCRO (Amplifikacija seizmičkog gibanja tla zbog topografskih učinaka u sjevernoj Hrvatskoj), čime je ovaj diplomski rad povezan s aktualnim istraživanjima u području seizmičke sigurnosti. Cilj rada jest izraditi i usporediti 3D modele objekta dobivene LiDAR i UAV metodom, analizirati njihove prednosti i ograničenja te prikazati mogućnosti njihove integracije u jedinstven, kombinirani model. Posebna pažnja usmjerena je na geometrijsku točnost, vizualnu kvalitetu i potencijalnu primjenjivost dobivenih modela u kontekstu očuvanja i prezentacije kulturne baštine. Izrađeni su zasebni modeli za svaki izvor podataka,

a dodatno je konstruiran i kombinirani model koji koristi LiDAR geometriju i UAV teksture. Na taj je način dobiven cjelovit prikaz objekata koji povezuje prednosti obje metoda.

Daljnji dio rada usmjeren je na analizu i usporedbu izrađenih modela. U okviru rada provedene su različite analize izrađenih modela, s naglaskom na njihovu geometrijsku točnost i usporedbu podataka dobivenih različitim metodama snimanja. Dobiveni rezultati pokazuju prednosti i ograničenja pojedinih metoda te naglašavaju važnost kombinacije LiDAR-a i UAV-a za vjerodostojan prikaz složenih arhitektonskih objekata. Na taj se način rad doprinosi razvoju metodologije 3D dokumentiranja kulturne baštine i potvrđuje vrijednost suvremenih geodetskih tehnologija u očuvanju prostornih podataka.

## 2. KARTOGRAFIJA I KARTOGRAFSKA 3D VIZUALIZACIJA

U ovom poglavlju polazi se od osnovne ideje kartografije kao discipline koja osmišljava, izrađuje i tumači prostorne prikaze, a zatim se fokusira na digitalnu kartografiju i 3D vizualizaciju – okruženje u kojem podaci iz UAV fotogrametrije i LiDAR-a postaju čitljivi, usporedivi i upotrebljivi.

### 2.1 POJAM I ULOGA KARTOGRAFIJE

Pojam kartografije moguće je definirati na više načina, što proizlazi iz njezina dugog razvoja i različitih pristupa u znanstvenoj i stručnoj literaturi. Prema starijoj definiciji koju je usvojila Generalna skupština Međunarodnog kartografskog društva (ICA) u Barceloni 1995. godine, „kartografija je disciplina koja se bavi osmišljavanjem, izradom, širenjem i proučavanjem karata“. U novijem strateškom planu ICA-e (2003–2011) definicija je proširena pa se kartografija definira kao „disciplina koja se bavi umjetnošću, znanošću i tehnologijom izrade i korištenja karata“ (URL 1).

Frangeš (2020) navodi kako je jedna od sveobuhvatnijih definicija kartografije ona koju je formulirao njemački kartograf Günter Hake, prema kojoj je „kartografija djelatnost koja se bavi prikupljanjem, preradom, pohranjivanjem i upotrebom prostornih informacija, a posebno njihovom vizualizacijom kartografskim prikazom, pri čemu se prostornom informacijom smatra svaki navod kojemu, uz iskaz o značenju objekta, pripada i položajna određenost u danom sustavu“.

Kartografija se ne definira isključivo kroz znanost i tehnologiju, već i kroz umjetničku komponentu. Robinson i dr. (1995) naglašavaju kako je kartografija zasigurno kreativna umjetnost na način na koji je pažljivo i kreativno književno izražavanje umjetnost. Osim toga, isti autori naglašavaju njezinu tehničku dimenziju, definirajući je kao tehniku koja se u osnovi bavi smanjivanjem prostornih karakteristika velikog područja – dijela ili cijele Zemlje, ili nekog drugog nebeskog tijela – i prikazivanjem u obliku koji ga čini vidljivim. Razvoj suvremene kartografije neodvojiv je od digitalne tehnologije.

Razvoj digitalne kartografije temelji se na uvođenju računalnih tehnologija u tradicionalne kartografske postupke, čime se značajno mijenja način izrade i uporabe kartografskih prikaza (Frančula, 2004). S obzirom na to da digitalna kartografija otvara mogućnosti

dinamičnijeg i interaktivnog prikaza prostornih podataka, razvile su se i metode koje nadilaze tradicionalni dvodimenzionalni kartografski prikaz. U tom se kontekstu ističe 3D vizualizacija, koja omogućuje realističnije i informativnije predstavljanje prostornih objekata i krajolika.

## 2.2 KARTOGRAFSKA 3D VIZUALIZACIJA

Kartografska vizualizacija obuhvaća digitalnu kartografiju i računalnu grafiku. U pogledu kvalitete, to je znatna promjena vizualnog izlaganja u gotovo realnom vremenu, koje omogućuje povećanje razumijevanja mnoštva prostornih objekata. U pogledu kvantitete, to je mogućnost brže i jeftinije proizvodnje široke lepeze različitih kartografskih proizvoda (Gajski, 2024).

Kartografska 3D vizualizacija sakralnih objekata kombinira digitalne geoprostorne metode i trodimenzionalni prikaz radi točnog dokumentiranja i prezentacije arhitektonske baštine. Korištenjem fotogrametrije s UAV dronovima, TLS skeniranja i laserske tehnike moguće je izraditi visoko precizne 3D modele koji omogućuju mjerenje, analizu i interpretaciju objekata u njihovu prostornom kontekstu. Takvi modeli pružaju dublje razumijevanje volumena, teksture i položaja građevina u krajoliku, što se pokazuje ključnim u konzervatorskim i obrazovnim primjenama, kako ističe Remondino (2011). Interaktivni pristupi poput tematskih 3D karata dodatno obogaćuju korisničko iskustvo vizualizacije baštine. Horbiński i Smaczyński (2023) naglašavaju da takvi alati omogućuju pregled slojeva informacija, legendi i geometrijskih podataka kroz intuitivno sučelje, čime se stručnjacima, ali i široj javnosti, otvara mogućnost istraživanja baštine na način prilagođen svrsi i potrebama korisnika.

Unatoč brojnim prednostima, primjena 3D vizualizacije u praksi suočava se s nizom izazova. Jedan od ključnih problema je nedostatak standardiziranih radnih postupaka i formata podataka, što otežava interoperabilnost i razmjenu među različitim softverima i institucijama. Također, velike količine podataka koje nastaju LiDAR snimanjem i fotogrametrijom zahtijevaju snažnu računalnu infrastrukturu i dugotrajnu obradu, što ograničava njihovu širu upotrebu. Pitanje dugoročne pohrane i dostupnosti digitalnih modela također je neriješeno, budući da su potrebna stabilna rješenja za arhiviranje i održavanje podataka. Uz tehničke prepreke, u praksi su prisutni i organizacijski izazovi, poput visokih

troškova opreme i nedostatka stručnog kadra za naprednu obradu i interpretaciju. Zbog navedenih ograničenja, uspješna implementacija 3D vizualizacije kulturne baštine zahtijeva integrirani pristup u kojem se kombiniraju tehnička, organizacijska i konzervatorska rješenja.

U kartografskoj 3D vizualizaciji, posebno kod dokumentacije sakralnih objekata, važno je razumjeti koncept razina detalja (Level of Detail – LoD). CityGML standard definira pet ključnih razina (Slika 2.1):

- LoD0 predstavlja osnovni model terena (2.5D), bez volumena objekata.
- LoD1 je pojednostavljeni blok-model zgrade: geometrija je generička, s ravnim krovom i bez arhitektonskih detalja.
- LoD2 uključuje dodatne elemente poput krovnih oblika i osnovne strukture zidova – ali i dalje bez prozora ili vrata.
- LoD3 uvodi arhitektonski detaljne modele s otvorima poput vrata i prozora, ali bez unutarnjih prostorija.
- LoD4 nadograđuje LoD3 dodatkom interijera – unutarnjim prostorijama i opremom (Ergun, B. i dr., 2023).



Slika 2.1 LoD razine (Ergun, B. i dr., 2023)

Kako raste razina LoD-a, model postaje precizniji i geometrijski složeniji, što omogućuje užu analitičku primjenu – ali i zahtijeva veći trošak resursa (računalne snage, vremena za izradu). Studije pokazuju i praktične rezultate: fotogrametrijom putem UAV dronova moguće je kreirati modele sakralnih objekata na razini LoD3 s centimetarskom preciznošću (Ergun, B. i dr., 2023).

Sve ove tehnologije osnažuju digitalnu dokumentaciju jer povezuju analitičku dimenziju (mjerjenja, profile, presjeke) s komunikativnom snagom vizualizacije (proširena stvarnost, web-prikazi). Smaczyński i Horbiński (2021) pokazuju kako implementacija 3D modela u internetsko okruženje baštinu čini dostupnijom široj publici, bez gubitka stručne vrijednosti za konzervatorske i znanstvene analize.

## 2.3 POSTOJEĆI 3D MODELI

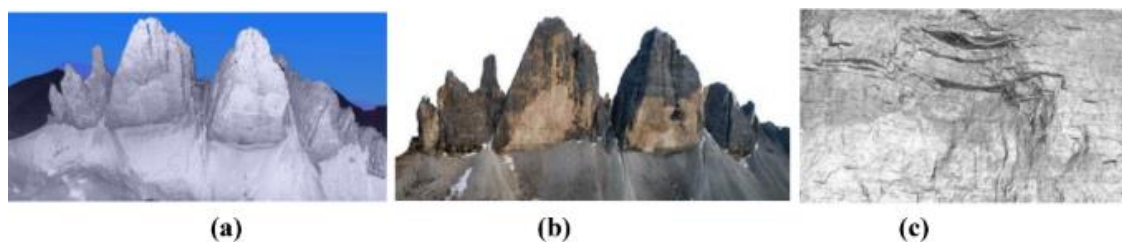
Razvoj naprednih tehnologija kao što su lasersko skeniranje i fotogrametrija, zajedno s računalnim modeliranjem, omogućuje izradu visoko preciznih 3D modela kulturne baštine. Ovi digitalni zapisi reproduciraju geometriju, teksturu, oblik i boju izvornog objekta, čime se omogućuje vjerodostojna i detaljna reprodukcija stvarnih struktura. To je od ključnog značaja za dokumentiranje, konzervaciju, znanstvenu analizu i digitalnu prezentaciju baštinskih objekata (Remondino, 2011).

U posljednjih desetak godina, koncept digitalnog blizanca (Digital Twin) postao je od iznimne važnosti u području kulturne baštine. On omogućuje stvaranje dinamičko-interaktivnih modela koji zajedno prate digitalne modele i stvarne objekte tijekom vremena. Ključni elementi uključuju interoperabilnost, praćenje stanja i primjenu senzora za promatranje promjena (Niccolucci & Felicetti, 2024).

Ograničenja u primjeni ovih tehnologija često su povezana s nedostatkom standardiziranih radnih procesa, interoperabilnosti i infrastrukture za pohranu i dijeljenje podataka (Storeide i dr., 2023).

### 2.3.1 Primjeri 3D modela kulturne baštine u svijetu

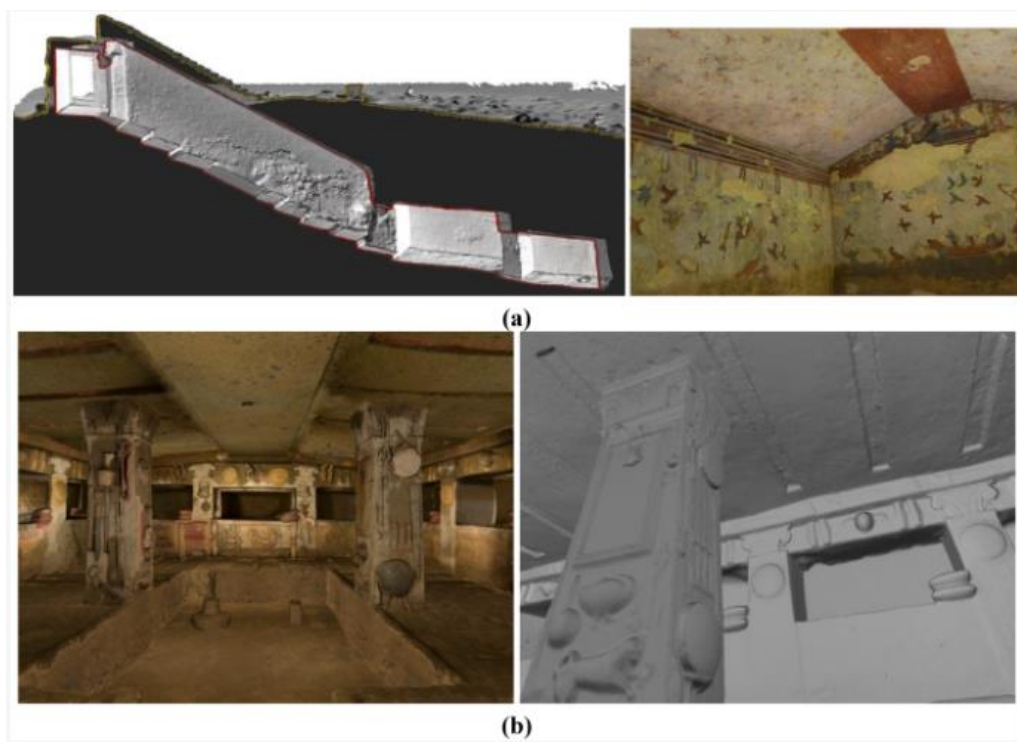
U svijetu je provedeno mnoštvo projekata izrade 3D modela kulturne baštine, u kojima se primjenjuju različite metode prikupljanja podataka, poput laserskog skeniranja, fotogrametrije i kombiniranih tehnika, s ciljem dokumentiranja, očuvanja i prezentacije vrijednih povijesnih lokaliteta. Istraživanje Remondina (2011) obuhvaća više studija slučaja koje demonstriraju mogućnosti 3D dokumentacije kulturne baštine pomoću različitih metoda snimanja i obrade podataka. Iz tog istraživanja izdvojena su tri primjera. Projekt 3D modeliranja Tre Cime di Lavaredo (poznatog i kao Three Peaks), značajnog UNESCO-ova lokaliteta u Dolomitima (Italija). Rad se fokusirao na vertikalne litice koje dosežu visinu do 600 m, čime se postavila visoka geometrijska zahtjevnost modeliranja. Na slici 2.2 prikazan je 3D model područja Tre Cime di Lavaredo, pri čemu se na prikazu (a) vidi model dobiven zračnom fotogrametrijom, (b) prikazuje rezultat kombinacije terestričkog laserskog skeniranja i bliske fotogrametrije, dok (c) prikazuje integrirani model s dodanim teksturama radi realističnog vizualnog dojma (Remondino, 2011).



Slika 2.2 3D model područja Tre Cime di Lavaredo (Remondino, 2011)

Taj 3D model poslužio je ne samo za arhivsku i konzervatorsku dokumentaciju, nego i za daljnje znanstvene analize poput geološke interpretacije, modeliranja rizičnih područja, planiranja uspona i digitalne prezentacije (Remondino, 2011).

Na slici 2.3 prikazani su 3D modeli podzemnih etruščanskih grobnica u Italiji, izrađeni u svrhu dokumentacije, konzervacije i valorizacije. Prikaz (a) odnosi se na grobnicu „Hunting and Fish“ u Tarquiniji, s jasno vidljivom 3D rekonstrukcijom ulaznog hodnika i fresaka u unutrašnjosti. Prikaz (b) prikazuje „Relief“ grobnicu u Cerveteriju, gdje su na 3D modelu vidljivi reljefni ukrasi i unutarnji stupovi, u realističnom i u geometrijskom prikazu bez tekstura (Remondino, 2011).



Slika 2.3 3D modeli podzemnih etruščanskih grobnica u Italiji (Remondino, 2011)

Primjer na slici 2.4 iz rada Remondina (2011) prikazuje rezultate 3D modeliranja kompleksnog arheološkog lokaliteta – foruma u Pompejima, Italija.



*Slika 2.4 3D model foruma u Pompejima (Remondino, 2011)*

Model je izrađen kombiniranjem više izvora podataka: terestričkih fotografija, dalekometnog TOF (Time-of-Flight) laserskog skeniranja te zračnih snimaka. Integracija ovih metoda omogućila je detaljnu i visoko preciznu rekonstrukciju lokaliteta, uključujući i fine arhitektonske elemente te prostorne odnose unutar cijelog kompleksa. Rezultat je realističan 3D model koji se može koristiti za dokumentaciju, konzervatorske analize, virtualne rekonstrukcije i prezentaciju lokaliteta široj javnosti (Remondino, 2011).

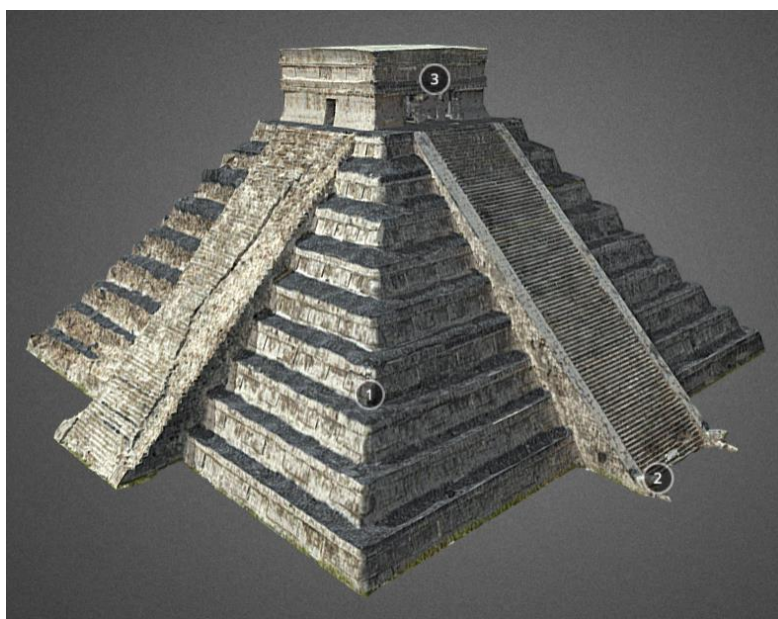
Osim znanstvenih i akademskih projekata, značajnu ulogu u dokumentiranju i očuvanju svjetske kulturne baštine imaju i globalne neprofitne organizacije poput CyArk. Ova organizacija, osnovana 2003. godine, posvećena je digitalnom dokumentiranju, arhiviranju i dijeljenju kulturne baštine kako bi se osigurala njezina dugoročna zaštita i dostupnost javnosti (URL 2).

Svoje aktivnosti CyArk temelji na nekoliko ključnih misija:

- proširivanje pristupa kulturnoj baštini novim publikama,
- očuvanje kulturne baštine za buduće generacije,
- stvaranje ravnopravnog pristupa kulturnoj baštini,
- jačanje kapaciteta u sektoru kulturne baštine,
- osiguravanje otvorenog i ponovnog korištenja podataka (URL 2).

Među zabilježenim lokacijama nalaze se svjetski poznati spomenici poput Angkor Wata, Pompeja, Chichen Itze i Mount Rushmorea, ali i ugroženi objekti poput kraljevskih grobnica Kasubi u Ugandi, snimljenih upravo prije njihove destrukcije (URL 3).

3d model piramide El Castillo u Chichén Itzi prikazan na slici 2.5 nastao je kombinacijom laserskog skeniranja (LiDAR) i fotogrametrije, čime su postignuti visok stupanj geometrijske preciznosti i vizualna realističnost (URL 2) . Efektivna reprodukcija oblika, strukture i detalja piramide omogućava široke primjene — od digitalne arhivističke dokumentacije i znanstvenih analiza, do virtualnih edukacija i konzervatorskog planiranja.



*Slika 2.5 3D model piramide El Castillo, Chichén Itzá (URL 2)*

Zajedničko obilježje prikazanih svjetskih primjera jest primjena suvremenih tehnologija 3D snimanja i modeliranja, uključujući fotogrametriju, terestričko i zračno lasersko skeniranje te kombinaciju više izvora podataka radi postizanja visoke razine detalja i realističnog prikaza. Rezultati ovih projekata služe dokumentiranju, očuvanju i prezentaciji kulturne baštine te često omogućuju interaktivno istraživanje objekata široj javnosti. Ovakvi pristupi predstavljaju vrijedan uzor za razvoj sličnih projekata u Hrvatskoj.

### **2.3.2 Primjeri 3D modela kulturne baštine u Hrvatskoj**

U Hrvatskoj se 3D modeli izrađuju u različite svrhe – od zaštite i očuvanja kulturne baštine do arhitektonskih, urbanističkih, znanstvenih i edukativnih projekata. Primjeri uključuju

modele povijesnih građevina, arheoloških nalazišta, infrastrukturnih objekata i prirodnih cjelina.

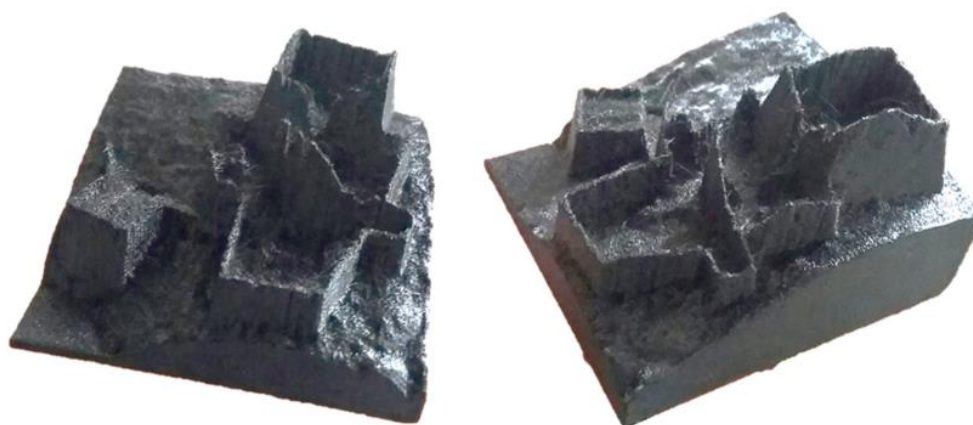
Adamićevi svjedoci predstavljaju skupinu kamenih portreta riječkih građana iz kasnog 18. stoljeća. Izrađeni su po narudžbi Šimuna Adamića, a prvotno su bili postavljeni ispred njegove kuće na Fiumari. Danas se čuva trinaest skulptura, smještenih u vrtu Guvernerove palače, unutar muzejskog lapidarija. Budući da su izložene nepovoljnim vremenskim uvjetima i mogućim oštećenjima, pokrenuta je njihova detaljna digitalna dokumentacija. Projekt digitalizacije, ostvaren uz potporu Ministarstva kulture i medija RH, Grada Rijeke i Primorsko-goranske županije, provela je tvrtka Camteh d.o.o.. Za snimanje je korišten optički 3D skener koji radi na principu strukturiranog svjetla, čime je omogućena visoka preciznost u prikazu geometrije. Skeniranje se obavljalo u kasnim popodnevним i večernjim satima kako bi se smanjio utjecaj dnevnog svjetla na refleksiju površine. Dobiveni podaci obrađeni su u softveru OpticalReveng, pri čemu su izrađeni detaljni digitalni modeli. Na temelju tih modela napravljene su i fizičke replike 3D printanjem te gipsanim lijevanjem. Kao završni korak, razvijena je AR razglednica i VR prezentacija, što je omogućilo širu dostupnost modela za edukativne, promotivne i konzervatorske svrhe (Tutek, 2022). Na slici 2.6 prikazane su 3D printane replike “Adamićevih svjedoka” visine 65 mm.



*Slika 2.6 3D printani Adamićevi svjedoci (Tutek, 2022)*

Fortica na Pagu (Slika 2.7), smještena iznad Paškog mosta, predstavlja značajan primjer povijesne fortifikacijske arhitekture te važan kulturno-povijesni element otoka. Radi izrade precizne digitalne dokumentacije objekta provedeno je fotogrametrijsko snimanje pomoću bespilotne letjelice DJI Phantom 4 RTK, opremljene integriranom kamerom visoke

rezolucije i RTK sustavom za precizno pozicioniranje. Letovi su izvedeni prema unaprijed planiranoj misiji kako bi se postiglo optimalno preklapanje fotografija (horizontalno i vertikalno), uključujući i snimke pod različitim kutovima radi bolje rekonstrukcije arhitektonskih detalja. Prikupljeni podaci obrađeni su u fotogrametrijskom softveru Agisoft Metashape, gdje je provedena automatska aerotriangulacija i georeferenciranje pomoću kontrolnih točaka postavljenih na terenu. Nakon toga generiran je gusti oblak točaka, iz kojeg su izrađeni digitalni model površine (DSM) i teksturirani 3D model visoke razlučivosti. Teksture su optimizirane kako bi se vjerno prikazala struktura kamena, zidnih otvora i ostalih arhitektonskih elemenata Fortice. Završni model omogućuje ne samo dokumentiranje trenutnog stanja objekta, već i njegovu daljnju analizu, praćenje eventualnih oštećenja te primjenu u interpretaciji i promociji kulturne baštine (Marić i dr., 2019).



*Slika 2.7 Fizički model utvrde Fortice (Marić i dr., 2019)*

Na nacionalnoj razini, Ministarstvo kulture i medija Republike Hrvatske navodi niz primjera objekata za koje je, nakon potresa 2020. godine, izrađena 3D dokumentacija. Među njima su, primjerice, dvorac Oršić u Gornjoj Bistri, Župna crkva Pohoda Blažene Djevice Marije na zagrebačkom Dolcu, zgradu Glavnog kolodvora u Zagrebu, Trg Franje Tuđmana u Petrinji, zgrada u Jurišićevoj ulici 9, povijesni kompleks groblja Mirogoj i brojni drugi (Slika 2.8). Ovi projekti potvrđuju važnost i široku primjenu suvremenih metoda dokumentiranja kulturne baštine na području cijele Hrvatske (URL 4).



Dvorac Oršić u Gornjoj Bistri



Župna crkva Pohoda Blažene Djevice Marije na zagrebačkom Dolcu



Zagrebački Glavni kolodvor



Trg Franje Tuđmana u Petrinji



Jurišićeva ulica 9 u Zagrebu



Povijesni kompleks groblja Mirogoj

*Slika 2.8 Primjeri 3D dokumentacije graditeljske baštine oštećene u potresu (URL 4)*

### 3. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA I SURADNJA SA SIGMATOPCRO PROJEKTOM

#### 3.1 SIGMATOPCRO PROJEKT

Motivacija za izradu diplomskog rada došla je suradnjom sa SIGMATOPCRO projektom. Puni naziv projekta je „Amplifikacija seizmičkoga gibanja tla uzrokovana topografskim efektima u Sjevernoj Hrvatskoj“. Projekt je financiran od Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ) i se provodi na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu u razdoblju od 2023. do 2027. godine. Projekt SIGMATOPCRO ima svoj vizualni identitet, čiji je logotip prikazan na slici 3.1.



*Slika 3.1 Logotip projekta SIGMATOPCRO (URL 5)*

Cilj SIGMATOPCRO projekta je razumjeti i kvantificirati pojačanje seizmičkog gibanja tla koja se javlja zbog nepravilnosti reljefa – poput vrhova, brežuljaka, padina, grebena i litica – a koja, prema opažanjima, može biti čak jednako značajna ili veća od one uzrokovane sedimentacijom.

Istraživanje uključuje makroseizmička opažanja, multidisciplinarna terenska istraživanja, mjerenja mikrosezmičkog nemira, kontinualni seizmički monitoring, numeričko modeliranje te GIS mapiranje. Središnji doprinos projekta bit će uspostava otvorene baze podataka te mikrozonacijskih karata koje će poslužiti kao vrijedna podloga za buduća istraživanja i primjene u seizmološkom i geotehničkom inženjerstvu. Konkretni doprinos ovog diplomskog rada uključuje izradu 3D vizualizacije crkve u Donjoj Višnjici, koja je

predmet zajedničkih multidisciplinarnih terenskih istraživanja unutar SIGMATOPCRO projekta (URL 5).

### 3.2 PILOT PODRUČJE – DONJA VIŠNJICA

Naselje Donja Višnjica administrativno je dio Grada Lepoglave u Varaždinskoj županiji, smještena u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Prema popisu iz 2021. godine, ukupni broj stanovnika koji naseljava ovo područje je 511 (URL 6). To područje karakterizira izražena topografija s obroncima blagih, zaobljenih brežuljaka koji se uzdižu iznad dolinskih naselja. Geološki je prostor definiran pretežito neogenskim klastitima i karbonatima (otnang, karpata), uz izraženu prisutnost pješčenjaka (Dimitrijević i dr, 1981). Na slici 3.2 prikazan je panoramski pogled na Donju Višnjicu, smještenu u brežuljkastom krajoliku, s prepoznatljivim rasporedom naselja i dominantnom pozicijom crkve na uzvišenju.



*Slika 3.2 Panoramski pogled na naselje Donja Višnjica (URL 7)*

Na uzvišenju iznad naselja smještena je župna crkva Pohođenja Blažene Djevice Marije (Slika 3.3). Građena je u više etapa, od 1640. do 1738. godine, a odlikuje se zvonikom uz glavno pročelje te tlocrtom u obliku križa. Sakralni kompleks ograđen je niskim zidom cintora, što naglašava njegovu prostornu izdvojenost. Unutrašnjost crkve ukrašena je freskama poznatog baroknog freskoslikara i pavlina Ivana Rangera te članova pavlinske

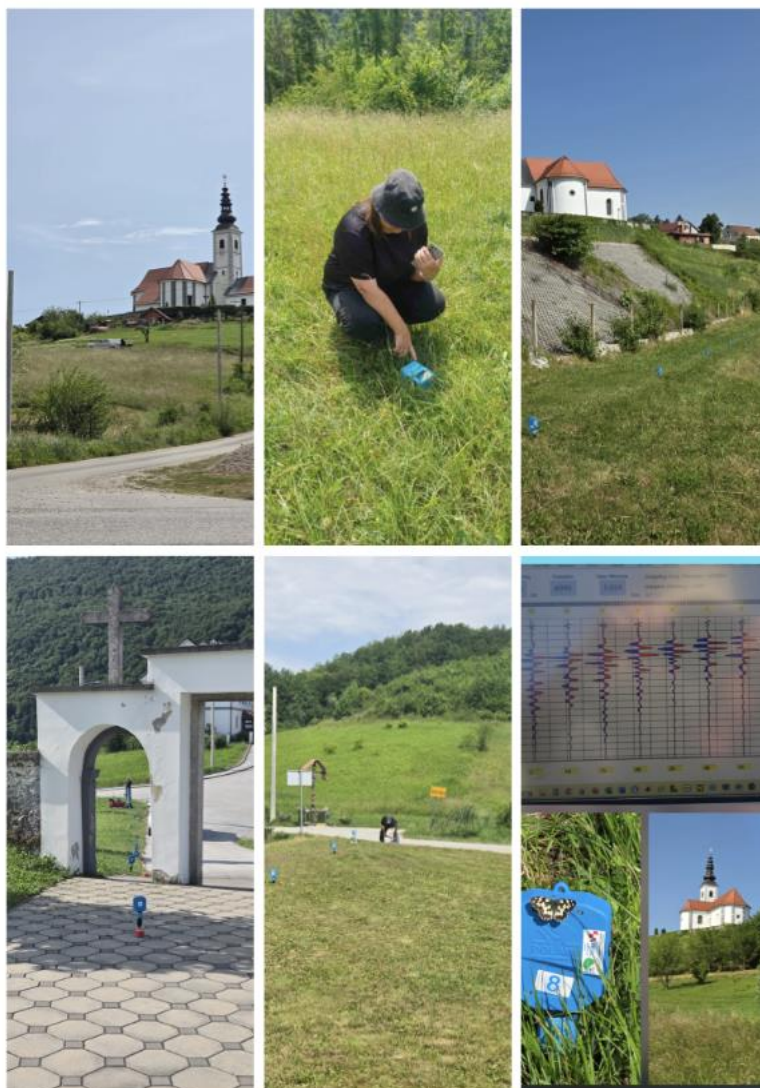
slikarske radionice iz pavlinskog samostana u Lepoglavi, koji su crkvu održavali do ukinuća reda. Među slikarskim ostvarenjima ističe se prikaz Pietà (URL 7).



*Slika 3.3 Župna crkva Pohodaenja Blažene Djevice Marije u Donjoj Višnjici (URL 7)*

Snimano područje obuhvaća padinu od crkve Pohodaenja Blažene Djevice Marije (322 m n.v.) prema podnožju livade i Osnovne škole (280 m n.v.), pri čemu visinska razlika iznosi 42 metra. Prosječni nagib padine kreće se između 20 % i 24 %. Topografija lokacije izrazito je simetrična, a zbog jasno definiranog odnosa „uzvišenje–podnožje” lokalitet predstavlja idealan primjer za istraživanje topografske amplifikacije seizmičkih valova. Prethodna geofizička i seizmološka mjerenja ukazala su na osnovne frekvencije od 2–3 Hz na vrhu te 4–5 Hz u podnožju, što potvrđuje prisutnost dinamike tla uzrokovane promjenama u topografiji i litologiji.

Na lokaciji Donja Višnjica, na brežuljku oko Crkve Pohodaenja Blažene Djevice Marije obavljena su multidisciplinarna terenska istraživanja suradnika projekta SIGMATOPCRO. Istraživanjem su obuhvaćena geofizička mjerenja MASW metodom, 2D-električna tomografija ERT metodom te geotehničko ispitivanje pomoću laganog dinamičkog penetrometra (DPL) (Slika 3.4).



*Slika 3.4 Terenska istraživanja u Donjoj Višnjici – geofizička i geotehnička mjerenja u sklopu projekta SIGMATOPCRO*

Svrha multidisciplinarnih mjerenja jest dobiti uvid u strukturu tla na topografskom području oko crkve kako bi se iz dobivenih podataka izveo inženjersko-geološki model potreban za daljnja numerička modeliranja, a izrađeni 3D model crkve poslužiti će u svrhu vizualizacije i diseminacije rezultata istraživanja.

Na slici 3.5 prikazana je lokacija snimanja te putanja leta bespilotne letjelice korištene u istraživanju.



Slika 3.5 Lokacija snimanja i trajektorija leta – Donja Višnjica

## 4. ZRAČNO LiDAR SNIMANJE

Tehnologija zračnog laserskog skeniranja – LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) temelji se na laserskom mjerenju udaljenosti te omogućuje prikupljanje iznimno preciznih i brzih podataka. Takvi podaci koriste se u topografskim mjerenjima i u izradi trodimenzionalnih modela reljefa, a osobito su vrijedni za njihovu analizu i vizualizaciju. Smatra se jednom od najdinamičnije razvijajućih i najmodernijih tehnologija u području kartiranja i obrade prostornih informacija (URL 8).

LiDAR sustav je razvijen još 1960-ih godina s prvotnom namjenom detekcije podmornica iz zraka, a već početkom 1970-ih uspješno se koristio u prvim operativnim misijama. Tijekom vremena prerastao je u jednu od najvažnijih metoda daljinskih istraživanja jer omogućuje prikupljanje podataka visoke prostorne rezolucije i to u različitim uvjetima, uključujući i složene atmosferske slojeve. Danas je teško zamisliti istraživanja okoliša, kartiranje ili inženjerske analize bez uporabe LiDAR tehnologije, koja se, uz radar, ubraja u najčešće korištene aktivne metode snimanja.

Osnovni princip rada relativno je jednostavan: senzor emitira vrlo brze impulse laserske svjetlosti prema površini, a mjerenjem vremena povratka reflektiranog signala određuje se udaljenost od cilja. Na taj se način za svaku točku u prostoru bilježe precizne koordinate (X, Y, Z), koje se kasnijom obradom pretvaraju u oblak točaka i detaljne digitalne modele reljefa. Formula za određivanje udaljenosti (1) temelji se na jednostavnom odnosu:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

gdje je:  $D$  izmjerena udaljenost,  $c$  brzina svjetlosti, a  $t$  vrijeme povratnog leta impulsa (URL 9).

Posebnost LiDAR-a je mogućnost da se jedan impuls reflektira više puta – od vegetacije, građevina ili same površine tla – pa sustav može registrirati nekoliko povratnih signala. Uz prostorne koordinate, bilježi se i intenzitet reflektiranog zračenja, pri čemu različiti materijali odražavaju svjetlost različitom snagom. Tako snježne ili svijetle površine daju jače refleksije, dok tamni materijali poput asfalta apsorbiraju veći dio zračenja pa je povratni

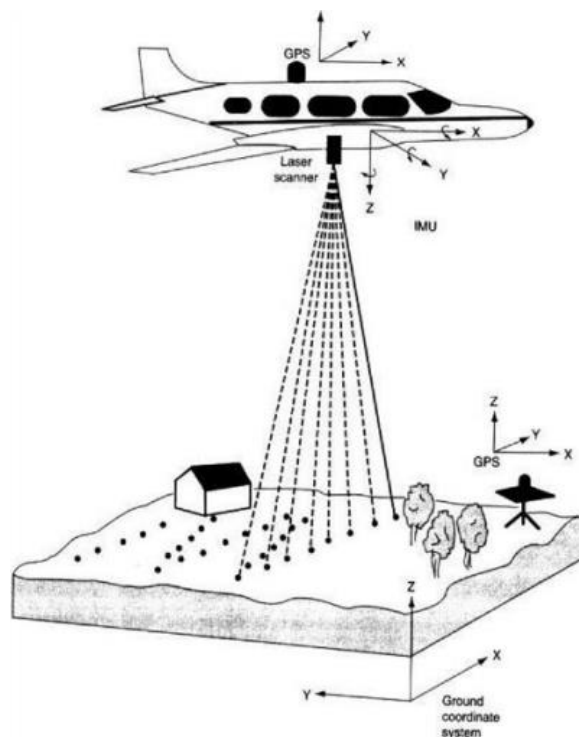
signal slabiji. Time se otvara mogućnost dodatnih analiza, ali i određena ograničenja u pogledu točnosti. Jedan od izazova u zračnom laserskom skeniranju jest nemogućnost snimanja područja poput tunela, gdje laserski signal ne može doprijeti. Zbog toga je prije početka mjerenja nužno provesti rekognosciranje terena i planirati optimalan način snimanja kako bi se postigla što veća učinkovitost i kvaliteta podataka (Baraba, 2020).

Primjena LiDAR-a posebno je izražena u planiranju prometne infrastrukture, modeliranju urbanih cjelina, analizi područja izloženih poplavama, praćenju deformacija i pomaka terena te u određivanju volumena iskopa na gradilištima. Prednost ove tehnologije očituje se i u snimanju prostora prekrivenih gustom vegetacijom. Zahvaljujući prodiranju laserskih zraka kroz krošnje, LiDAR omogućuje izradu kvalitetnih digitalnih modela terena (DTM) te digitalnih modela visina (DEM) (URL 8).

Prije početka zračnog snimanja potrebno je osigurati odgovarajuće dozvole nadležnih tijela, poput Državne geodetske uprave i Ministarstva obrane RH. Također, provodi se kalibracija LiDAR sustava kojom se smanjuje utjecaj sustavnih pogrešaka i nesavršenosti pojedinih komponenti na konačne podatke mjerenja, čime se osigurava njihova pouzdanost i visoka točnost (Baraba, 2020).

#### **4.1 OPREMA I INSTRUMENTI**

Osim platforme na koju se montiraju, LiDAR sustavi obično se sastoje od tri osnovne komponente: GNSS-a (za određivanje prostorne lokacije), inercijalne mjerne jedinice – IMU-a (za bilježenje orijentacije senzora u prostoru) te laserskog skenera. Uz njih, sustav može sadržavati i računalo s diskovnom memorijom za pohranu podataka, a kod određenih proizvođača i dodatne komponente poput digitalne kamere koja paralelno snima teren, čime se olakšava identifikacija i obrada podataka. Integracija ovih komponenti omogućuje nastanak preciznih prostornih modela (Slika 2.1) (Baraba, 2020).



Slika 4.1 Integracija osnovnih komponenata LiDAR sustava (Baraba, 2020).

#### 4.1.1 Letjelica

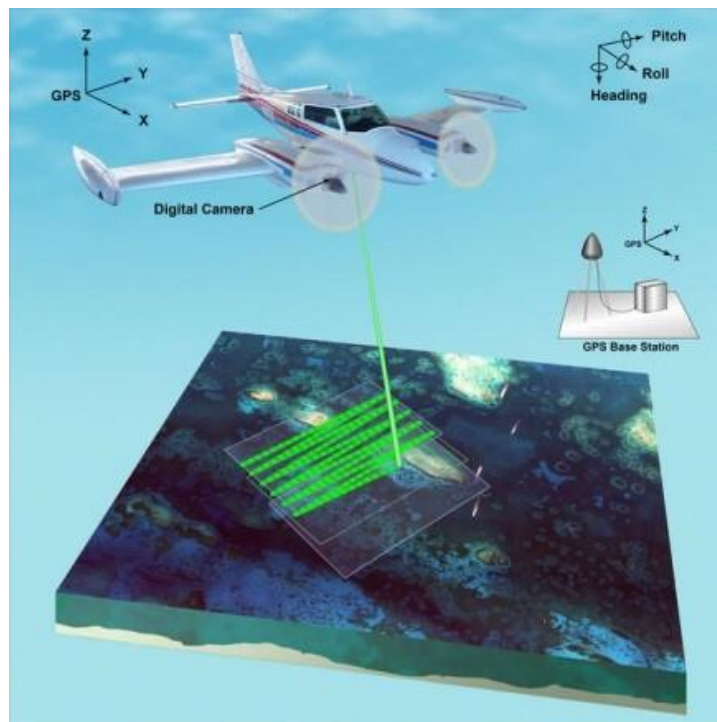
Letjelice su noseće platforme za LiDAR sustave i temeljno određuju mogućnosti snimanja — ovisno o visini, brzini i tipu letjelice dobivaju se različiti rezultati. LiDAR sustavi mogu biti montirani na različite letjelice, kao što su:

- bespilotne letjelice



Slika 4.2 Bespilotne letjelice kao LiDAR platforma (URL 10)

- avioni



Slika 4.4.3 Avion kao LiDAR platforma (URL 10)

- i helikopteri



Slika 4.4 Helikopter kao LiDAR platforma (URL 10)

Avioni i helikopteri spadaju među najčešće korištene i najučinkovitije platforme za prikupljanje LiDAR podataka na velikim i kontinuiranim područjima. Sustav se obično montira unutar letjelice, koja potom prelijeće definirano područje snimanja. Na taj se način može pokriti i do 50 km<sup>2</sup> na sat, uz istovremeno postizanje visoke razine točnosti podataka

koja zadovoljava potrebe zahtjevnih primjena. Osim za klasična topografska snimanja, zračne platforme pokazuju se iznimno pogodnima i za batimetrijska mjerenja u bistrim i plitkim vodama. Kombinacijom topografskog i batimetrijskog LiDAR sustava moguće je precizno kartirati obalna i priobalna područja (NOAA Coastal Services Center, 2012).

Bespilotne letjelice idealne su za male površine, istraživanja u nepristupačnim područjima i brzo mobiliziranje opreme. One kombiniraju visoku prostornu rezoluciju s nižim troškovima (Kovanič i dr., 2023).

#### 4.1.2 LiDAR skener

LiDAR skener se temelji na principu mjerenja vremena leta (engl. *Time of Flight – TOF*), pri čemu odašilje izuzetno velik broj impulsa laserske svjetlosti u sekundi. Reflektirani impulsi bilježe se kao niz preciznih točaka koje zajedno čine trodimenzionalni prikaz snimanog objekta ili površine. Na taj način moguće je dobiti detaljan 3D model prostora koji vjerno odražava njegove geometrijske značajke (URL 11).

Ovisno o visini leta i vidnom kutu skenera (engl. *Field of View – FOV*), moguće je tijekom jednog preleta izmjeriti pojas na terenu određene širine, odnosno snimiti jedan niz. Kako bi se osiguralo potpuno pokrivanje područja izmjere i ujednačenost podataka, letjelica prelijeće područje u više nizova s određenim preklopom (Lasić, 2008) (Slika 4.5).



Slika 4.5 Snimanje u nizovima (Lasić, 2008)

Primjenom ove tehnologije prikupljanje prostornih podataka značajno je unaprijeđeno, jer omogućuje prijelaz s dvodimenzionalnih prikaza na trodimenzionalne podatkovne skupove visoke točnosti i rezolucije. Na slici 4.6 prikazane su različite vrste LiDAR skenera koje se koriste ovisno o platformi i svrsi snimanja (URL 11).



Slika 4.6 Vrste LiDAR skenera (URL 11)

#### 4.1.3 Integrirani sustav GNSS-a s inercijalnim mjernim sustavom (GNSS/INS)

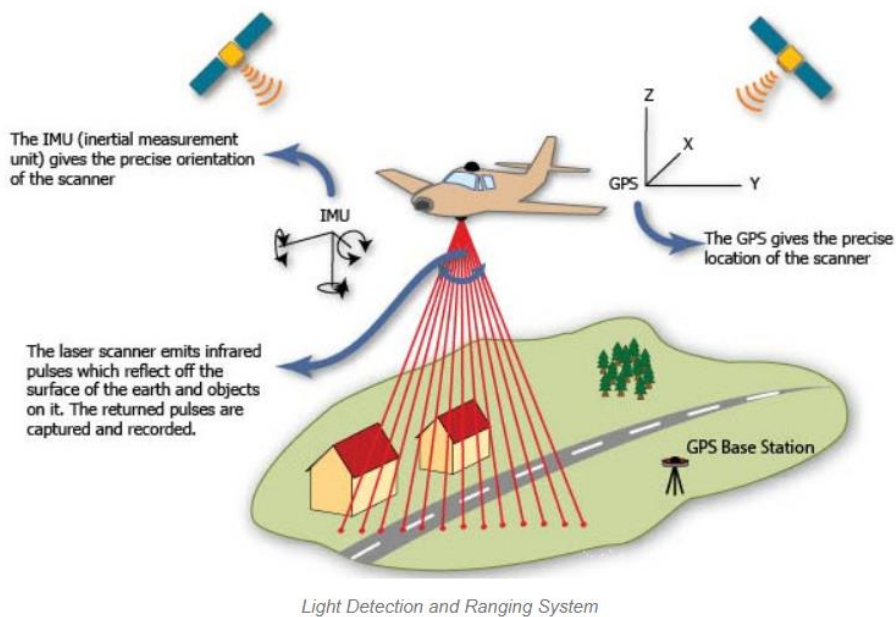
Integrirani sustav GNSS/INS, često nazivan i POS sustav (Position and Orientation System), sastoji se od GNSS (Global Navigation Satellite System) modula i INS (Inertial Navigation System) modula, pri čemu se hardverska jedinica INS-a naziva inercijalna mjerna jedinica – IMU. Sustav omogućuje određivanje položaja, brzine i orijentacije LiDAR senzora kombinacijom podataka GNSS-a i IMU-a. Njegova je uloga ključna za postizanje konačne točnosti LiDAR mjerenja jer se svakoj izmjerenoj točki dodjeljuju precizne koordinate u prostoru, što omogućuje njihovo pouzdano georeferenciranje. Na tržištu se izdvajaju tri vodeća rješenja POS sustava: gSpin serija tvrtke Geosun, softver POSpac tvrtke Trimble te sustavi koje razvija NovAtel. Ova rješenja prepoznata su po svojoj pouzdanosti i širokoj primjeni u zračnom LiDAR snimanju (Slika 4.7) (URL 11).



Slika 4.7 Primjer POS sustava (URL 11)

Na slici 4.8 prikazan je shematski prikaz funkcioniranja zračnog LiDAR sustava, koji objedinjuje GNSS, IMU i laserski skener. Ponavljanjem impulsa u vrlo kratkim razmacima (i do 150.000 impulsa u sekundi) nastaje gust oblak točaka, a integracija GNSS-a i IMU-a

omogućuje precizno gereferenciranje svake točke i izradu digitalnih modela visoke točnosti (URL 9).

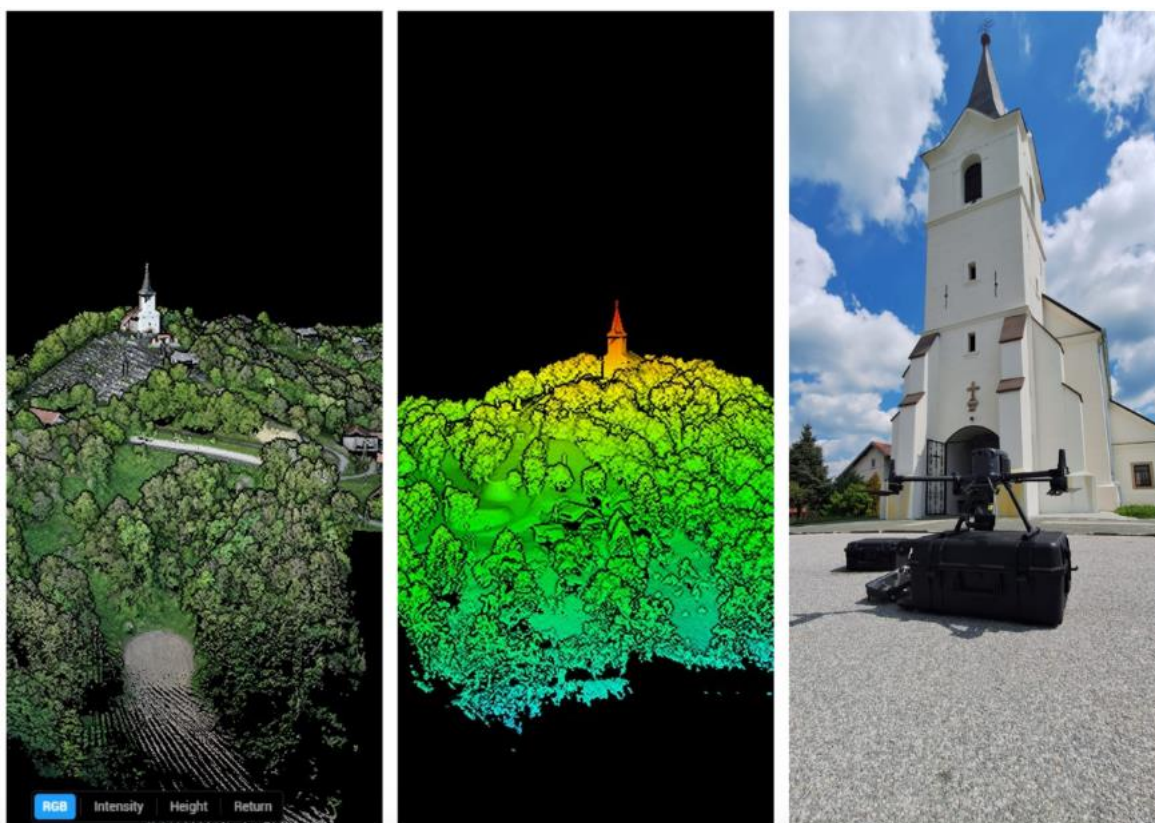


Slika 4.8 Shematski prikaz funkcioniranja zračnog LiDAR sustava (URL 9).

## 5. TOPOGRAFSKO 2D I 3D SNIMANJE DRONOM

U sklopu projekta SIGMATOPCRO provedena su topografska 2D i 3D snimanja dronom (Slika 5.1). Snimanje su obavili djelatnici Sveučilišta Sjever, Odjela za geodeziju i geomatiku na odabranim lokalitetima a podaci snimanja korišteni su u praktičnom dijelu ovoga diplomskog rada.

Topografija terena predstavlja jedan od ključnih faktora u razumijevanju i interpretaciji geoloških, geofizičkih i seizmoloških procesa. Posebno je to izraženo u područjima složene morfologije, gdje neravnomjernost terena može značajno utjecati na amplifikaciju seizmičkih valova, pojavnost klizišta kao i na prostorni raspored šteta nakon potresa (URL 12).



*Slika 5.1 Detalji sa topografsko 2D i 3D snimanje dronom lokacija SIGMATOPCRO projekta (URL 12)*

Razvoj suvremenih metoda dokumentiranja i analize prostornih podataka omogućio je primjenu različitih tehnologija u području geodezije, geoinformatike i kartografije. U izradi 3D modela kulturne baštine i drugih objekata ključnu ulogu imaju precizni mjerni instrumenti, specijalizirani softverski alati te standardizirani formati podataka.

Prikupljeni podaci čine podlogu za multidisciplinarnu analizu koje uključuju topografsku klasifikaciju i analizu nagiba terena, detekcija geomorfološki aktivnih područja (npr. područja podložna klizanju), interpretaciju prostorne distribucije oštećenja od potresa s obzirom na morfološke značajke gdje se kombinacijom fotogrametrijskih, geofizičkih i inženjersko-geoloških podataka želi razumjeti uloga topografije u mehanizmima prijenosa seizmičke energije.

## **5.1 KORIŠTENI INSTRUMENTARIJ**

Za provedbu 2D i 3D topografskog snimanja korištena je profesionalna bespilotna letjelica DJI Matrice 350 RTK, u kombinaciji s EMLID Reach RS2 GNSS uređajem za preciznu RTK/PPK korekciju. Korišten je i LiDAR senzor DJI Zenmuse L2 koji omogućuje dodatnu preciznost modela.

### **5.1.1 Bespilotna letjelica: DJI Matrice 350 RTK**

Za potrebe ovog istraživanja korištena je DJI Matrice 350 RTK (Slika 5.2), bespilotna letjelica namijenjena profesionalnim zadacima u geodeziji, fotogrametriji i inspekcijama. Odlikuje se robusnom konstrukcijom i visokom otpornošću na vanjske utjecaje zahvaljujući IP55 certifikatu, što omogućuje rad i u nepovoljnim vremenskim uvjetima. Integrirani RTK sustav osigurava visoku pozicijsku preciznost, a podrška za PPK obradu dodatno povećava točnost georeferenciranih podataka. Letjelica koristi O3 Enterprise prijenosni sustav, koji omogućuje prijenos trokanalnog HD video signala na udaljenosti do 20 km, zadržavajući stabilnu vezu i u područjima s izraženim elektromagnetskim smetnjama. Osim toga, kompatibilna je s različitim senzorima i kamerama, što je čini prilagodljivom različitim projektnim zahtjevima. U ovom istraživanju letjelica je korištena u kombinaciji s GNSS prijemnikom za preciznu RTK/PPK korekciju, čime je postignuta visoka geolokacijska točnost dobivenih modela (URL 13).



Slika 5.2 Bepilotna letjelica DJI Matrice 350 RTK (URL 13)

Letjelica je programirana pomoću DJI Pilot softvera, s unaprijed definiranim misijama leta (grid pattern) koje osiguravaju odgovarajući preklap snimaka:

- Frontlap: 80%
- Sidelap: 70%
- Visina leta: 80–120 m (ovisno o lokaciji i reljefu)
- GSD (Ground Sample Distance): ~1.5–3 cm/piksel

Detaljan pregled tehničkih značajki bespilotne letjelice prikazan je u tablici 5.1, koja uključuje dimenzije, masu, trajanje leta, nosivost, podržane GNSS sustave te druge ključne parametre relevantne za provedbu istraživanja.

Tablica 5.1 Tehničke specifikacije DJI Matrice 350 RTK (URL 13)

Karakteristika	Vrijednost
<b>Dimenzije</b> (sklopljeno/otvoreno)	430 × 420 × 430 mm / 810 × 670 × 430 mm
<b>Masa (s dvije TB65 baterije)</b>	Masa (s dvije TB65 baterije)
<b>Maks. vrijeme leta</b>	do 55 minuta (bez tereta)
<b>Maksimalna nosivost</b>	2.7 kg
<b>GNSS sustavi</b>	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo
<b>RTK točnost (horiz./vert.)</b>	±1 cm + 1 ppm / ±1.5 cm + 1 ppm

Karakteristika	Vrijednost
Sustav prijenosa	O3 Enterprise (HD livestream do 20 km)
Zaštita (IP ocjena)	IP55
Operativni temperaturni raspon	-20 °C do +50 °C

### 5.1.2 GNSS referentna stanica: EMLID Reach RS2

Za potrebe preciznog pozicioniranja i georeferenciranja snimaka korišten je EMLID Reach RS2 (slika 5.3) kao GNSS referentna stanica, postavljena na stabilnu točku unutar ili u neposrednoj blizini područja snimanja. Tijekom leta dron je u stvarnom vremenu primao RTK korekcije putem komunikacije s baznom stanicom, dok su se istovremeno GNSS podaci pohranjivali za naknadnu PPK obradu.



Slika 5.3 GNSS referentna stanica EMLID Reach RS2 (URL 14)

Naknadna obrada provedena je pomoću softvera *Emlid Studio*, čime je dodatno poboljšana točnost pozicioniranja. Kombinacijom RTK i PPK metode postignuta je centimetarska preciznost, što je omogućilo izradu visokokvalitetnih digitalnih modela terena (DMT) i ortofoto karata, uz manju potrebu za velikim brojem GCP-ova. Za provjeru točnosti ipak su

korištene dodatne kontrolne točke na terenu. Detaljne tehničke specifikacije uređaja prikazane su u tablici 2.

Tablica 5.2 Specifikacije GNSS referentne stanice Emlid Reach RS2 (URL 14)

Karakteristika	Vrijednost
GNSS sustavi	GPS/QZSS L1C/A, L2C; GLONASS L1OF, L2OF; BeiDou B1I, B2I; Galileo E1-B/C, E5b
Poziciona preciznost	RTK: H: $\pm 7$ mm + 1 ppm, V: $\pm 14$ mm + 1 ppm
Maks. udaljenost od baze	Do 60 km (RTK), do 100 km (PPK)
Konvergencijsko vrijeme	~5 sekundi
Baterija	Autonomija do 22 h (logiranje), punjenje USB-C
Bežične veze	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0, LoRa domet do 8 km
Interna memorija	16 GB, podržan izvoz u RINEX formatu
Otpornost	IP67, radna $t^{\circ}$ $-20^{\circ}$ C do $+65^{\circ}$ C

### 5.1.3 LiDAR senzor: DJI Zenmuse L2

Za potrebe preciznog pozicioniranja i georeferenciranja prikupljenih podataka korišten je sustav DJI Zenmuse L2 (Slika 5.4), namijenjen profesionalnoj primjeni u kombinaciji s bespilotnim letjelicama.



Slika 5.4 LiDAR senzor DJI Zenmuse L2 (URL 15)

Ključne tehničke specifikacije senzora prikazane su u tablici 5.3, koje dokazuju preciznost i veliku pokrivenost prostora jednim letom. Horizontalna i vertikalna preciznost (5 cm, odnosno 4 cm), kao i maksimalni domet i sposobnost višestrukih povrata, ističu Zenmuse L2 kao odličan alat za preciznu LiDAR dokumentaciju (URL 15).

Tablica 5.3 Specifikacije LiDAR senzora DJI Zenmuse L2 (URL 15)

<b>Karakteristika</b>	<b>Vrijednost</b>
Horizontalna preciznost	5 cm
Vertikalna preciznost	4 cm
Maksimalna pokrivenost po letu	2,5 km <sup>2</sup>
Detekcijski domet	250 m (10 % refleksije) i 450 m (50 % refleksije)
Podržani broj povrata	do 5 povrata

## 6. OBRADA PODATAKA

Obrada podataka predstavlja ključnu fazu istraživanja jer omogućuje pretvaranje sirovih mjerenja u upotrebljive prostorne modele i vizualizacije. U ovom dijelu rada prikazani su postupci obrade podataka prikupljenih različitim metodama (UAV fotogrametrija, LiDAR, geofizička i geotehnička mjerenja), s ciljem dobivanja pouzdanih i točnih rezultata. Proces obuhvaća nekoliko koraka – od inicijalne pripreme i filtriranja sirovih podataka, preko izrade trodimenzionalnih modela, do njihove analize i vizualizacije u odgovarajućim softverskim okruženjima. Na taj način osigurava se interpretacija rezultata koja omogućuje daljnja istraživanja i primjenu u kartografskoj vizualizaciji.

### 6.1 OBRADA SIROVIH PODATAKA

Nakon provedenih terenskih mjerenja, svi podaci prikupljeni tijekom leta bespilotne letjelice DJI Matrice 350 RTK, opremljene LiDAR senzorom Zenmuse L2, zajedno s GNSS podacima prikupljenima pomoću bazne stanice EMLID Reach RS2, podvrgnuti su vise stupanjskoj obradi. Inicijalnu obradu sirovih podataka proveli su djelatnici Sveučilišta Sjever, Odjela za geodeziju i geomatiku na koji rade na projektu SIGMATOPCRO, koristeći specijalizirane softverske alate Emlid Studio i DJI Terra.

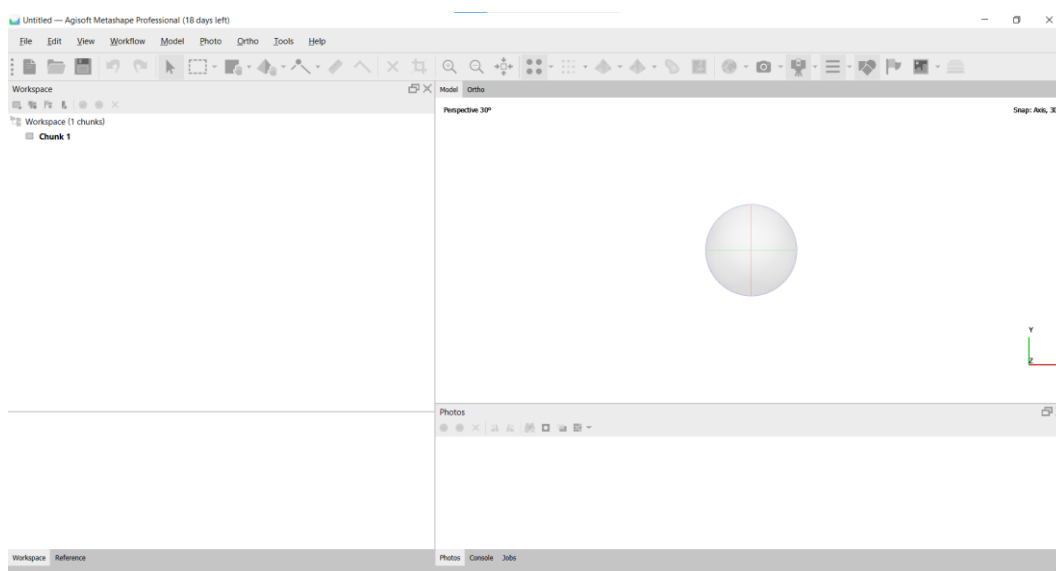
GNSS podaci prikupljeni pomoću EMLID Reach RS2 uređaja obrađeni su u programu Emlid Studio (verzija 1.9). Obrada je uključivala uvoz RINEX datoteka s uređaja i CORS mreže, post-procesiranje PPK metodom radi poboljšanja preciznosti trajektorije leta te izvoz korigiranih koordinata u CSV formatu kompatibilnom s DJI Terra softverom.

Obrada LiDAR i RGB podataka prikupljenih Zenmuse L2 senzorom provedena je u programu DJI Terra (Enterprise verzija). U ovom postupku izvršen je uvoz podataka leta (IMU, RTK, LiDAR, RGB) i pridruženih koordinata dobivenih u Emlid Studio okruženju, nakon čega je provedena sinkronizacija IMU i RTK podataka radi poboljšanja orijentacije i preciznog pozicioniranja točaka. Nadalje, generirani su oblak točaka u .las formatu te ortofoto karte u .tiff formatu.

Svi prostorni podaci prikupljeni tijekom ovog procesa obrađeni su i spremljeni u službenim koordinatnim sustavima Republike Hrvatske, HTRS96/TM i HVR571 (HRG2009), čime je osigurana njihova standardizacija i usklađenost s važećim geodetskim propisima.

## 6.2 SOFTVER KORIŠTEN ZA IZRADU 3D MODELA

Agisoft Metashape predstavlja specijalizirani softverski alat za fotogrametrijsku obradu snimaka, temeljen na metodama računalnog vida i višekutne 3D rekonstrukcije. Temelji se na metodama računalnog vida i naprednim algoritmima rekonstrukcije koji omogućuju dobivanje preciznih geometrijskih podataka iz niza dvodimenzionalnih fotografija. Zahvaljujući visokom stupnju automatizacije i mogućnosti integracije georeferenciranih podataka, Metashape se uspješno primjenjuje u različitim disciplinama, uključujući geodeziju, arheologiju, inženjersku geologiju, zaštitu kulturne baštine te prostorno planiranje. Softver je razvijen za profesionalnu primjenu, ali se odlikuje i intuitivnim grafičkim sučeljem koje korisnicima olakšava rad. Osim generiranja trodimenzionalnih modela visoke razine detalja, omogućuje i izradu digitalnih modela reljefa, ortofoto karata te izvođenje različitih analitičkih postupaka u prostornom okruženju. Metashape tako predstavlja svestrano rješenje koje povezuje visoku razinu preciznosti s fleksibilnošću primjene u različitim istraživačkim i stručnim područjima (URL 16). Slika 6.1 prikazuje korisničko sučelje Agisoft Metashapea.



Slika 6.1 Sučelje Agisoft Metashapea

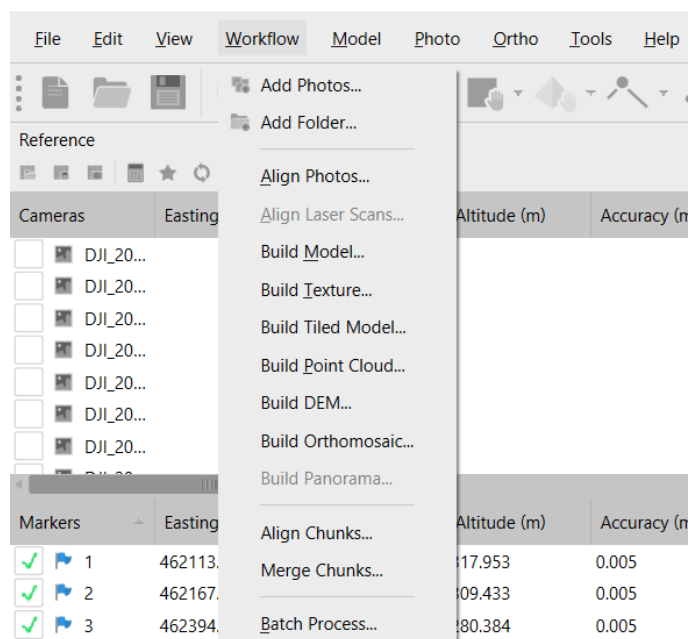
### 6.3 IZRADA 3D MODELA

Kako bi se moglo pristupiti izradi trodimenzionalnog modela, bilo je potrebno najprije pripremiti fotografski materijal prikupljen tijekom snimanja bespilotnom letjelicom. Sve snimke uvezene su u projekt unutar softvera Agisoft Metashape Professional, gdje se provodi njihova osnovna organizacija i kontrola. Premda svaka fotografija već sadrži geolokacijske zapise automatski zabilježene tijekom leta, za potrebe istraživanja bilo je važno osigurati dodatnu razinu preciznosti povezivanjem s terenski izmjerenim kontrolnim točkama.

Sam tijek rada u Metashapeu organiziran je u nekoliko osnovnih faza, među kojima su:

- uvoz i pregled fotografija,
- procjena njihove kvalitete i isključivanje nepouzdanih snimaka,
- definiranje referentnog koordinatnog sustava,
- uvoz i vezivanje kontrolnih točaka,
- provedba daljnjih postupaka obrade (poravnanje, gusti oblak, mreža, teksturiranje i izvođenje modela).

Na slici 6.2 prikazan je izbornik Workflow u programu Agisoft Metashape Professional, putem kojeg se odvija većina ključnih faza obrade. Upravo u ovom izborniku nalaze se naredbe za uvoz snimaka (*Add Photos*), njihovo poravnanje (*Align Photos*), generiranje gustog oblaka točaka (*Build Dense Cloud*), mreže (*Build Mesh*), tekstura (*Build Texture*), kreiranje *Tiled modela* (*Build Tiled Model*), digitalnog modela reljefa (*Build DEM*) te ortomozaika (*Build Orthomosaic*). Ovaj pregled jasno prikazuje logički slijed postupaka koje je potrebno provesti kako bi se iz ulaznih snimaka dobio trodimenzionalni, fotorealističan model i pripadajući kartografski proizvodi.



Slika 6.2 Izbornik Workflow u Agisoft Metashape softveru

### 6.3.1 Učitavanje i priprema snimaka

U početnoj fazi obrade uvezen je cjelokupni set od 556 snimki u JPG formatu, prikupljenih tijekom leta bespilotne letjelice. Budući da kvaliteta ulaznih podataka značajno utječe na konačne rezultate, provedena je kontrola svake pojedine fotografije. Softver raspolaze alatom za automatsku procjenu kvalitete snimaka, pri čemu je utvrđeno da sve fotografije zadovoljavaju minimalni prag od 0,5 te se mogu koristiti u daljnjim fazama obrade. Kako su snimke već sadržavale geolokacijske informacije u okviru referentnog sustava WGS84, isti je sustav definiran i u postavkama projekta kako bi se osigurala konzistentnost tijekom cijelog procesa.

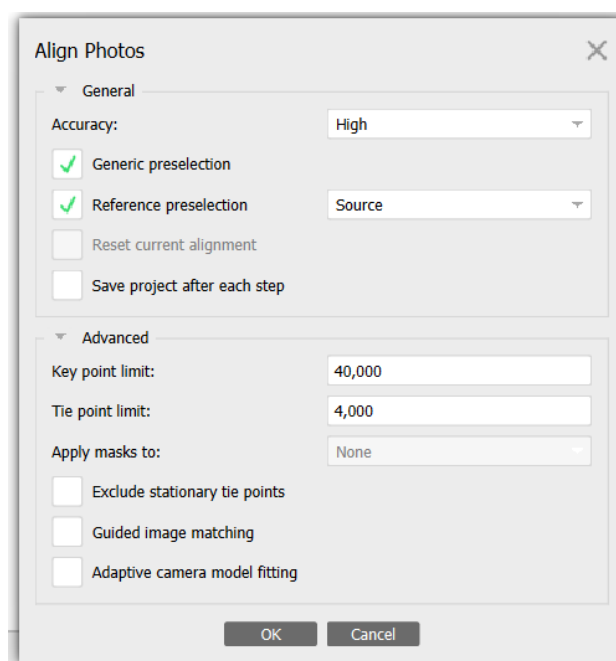
Na slici 6.3 prikazan je dio tablice s osnovnim informacijama o učitanim snimkama. U stupcu *Quality* vidljive su vrijednosti procjene kvalitete koje prelaze prag od 0.5, čime je potvrđena njihova prikladnost za nastavak obrade. Budući da tablica sadrži zapise za svih 556 fotografija i sadrži veći broj stupaca (npr. datum i vrijeme snimanja, model kamere, žarišnu duljinu i otvor blende), na slici je prikazan samo dio zapisa te nisu vidljivi svi stupci u cijelosti.

Label	Size	Aligned	Quality	Date & time	Make	Model	Focal length	F-stop
DJI_202505...	5280x3956	✓	0.848657	2025:05:12 10:5...	DJI	L2	12.29	F/2.8
DJI_202505...	5280x3956	✓	0.849403	2025:05:12 10:5...	DJI	L2	12.29	F/2.8
DJI_202505...	5280x3956	✓	0.853765	2025:05:12 10:5...	DJI	L2	12.29	F/2.8
DJI_202505...	5280x3956	✓	0.84965	2025:05:12 10:5...	DJI	L2	12.29	F/2.8
DJI_202505...	5280x3956	✓	0.855794	2025:05:12 10:5...	DJI	L2	12.29	F/2.8

Slika 6.3 Isječak tablice s učitanim snimkama i pripadajućim parametrima u programu Agisoft Metashape

### 6.3.2 Poravnanje snimaka

Nakon pripreme i provjere fotografija, uslijedila je faza poravnanja (*Align Photos*), kojom se određuju položaji kamera tijekom snimanja te formira inicijalni oblak točaka male gustoće. Ova faza ključna je za uspostavu geometrije projekta jer povezuje zajedničke značajke između fotografija i stvara osnovni trodimenzionalni prikaz. Za fazu poravnanja snimaka korišteni su parametri prikazani na slici 6.4. Odabrana je visoka razina točnosti (*Accuracy: High*), dok su opcije *Generic pre-selection* i *Reference pre-selection* bile uključene kako bi se ubrzao postupak i poboljšala stabilnost rezultata. U naprednim postavkama zadan je limit od 40.000 ključnih točaka (*Key point limit*) i 4.000 veznih točaka (*Tie point limit*), čime se postiže ravnoteža između gustoće podataka i vremena obrade.



Slika 6.4 Korištene postavke za poravnanje snimaka (*Align Photos*) u programu Agisoft Metashape

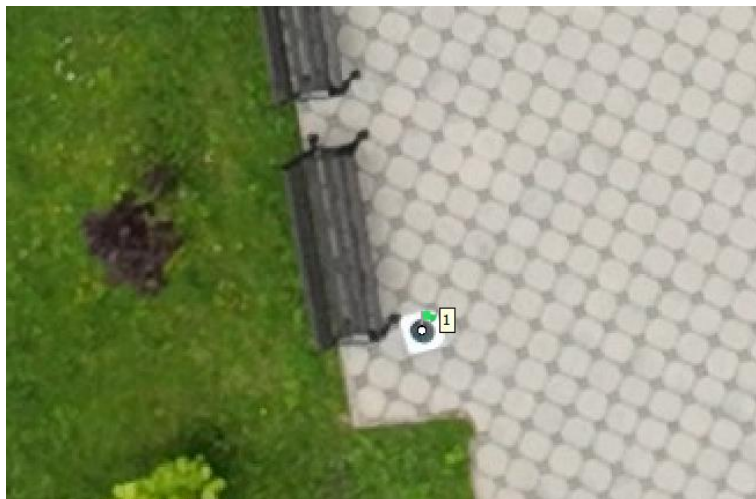
Na slici 6.5 prikazan je rezultat poravnanja, odnosno rijetki oblak točaka sa rekonstruiranim položajima kamera.



*Slika 6.5 Oblak točaka male gustoće nakon poravnanja*

U ovom postupku sve snimke uspješno su poravnate. Nakon inicijalnog poravnanja projekt je transformiran u službeni koordinatni sustav Republike Hrvatske HTRS96/TM, čime je osigurana konzistentnost s ostalim geodetskim podacima.

Radi povećanja položajne točnosti u projekt je uvezena tablica u .csv formatu koja je sadržavala koordinate kontrolnih točaka izmjerenih GNSS metodom. Budući da su njihove prostorne koordinate bile poznate, točke je bilo potrebno pronaći na fotografijama te ih ručno označiti markerima (Slika 6.6). Postupak se sastojao u tome da se na svakoj snimci na kojoj je bila vidljiva signalizacijska oznaka unese marker s odgovarajućim identifikacijskim brojem. Kako se iste oznake pojavljuju na više uzastopnih fotografija zbog preklapanja snimaka, bilo ih je potrebno dosljedno označiti na svakoj od njih.



*Slika 6.6 Postavljanje markera u programu Agisoft Metashape*

Na ovaj način geometrija projekta dodatno se stabilizira, a model se usklađuje s vanjskim koordinatama poznate točnosti. Time se smanjuje mogućnost sistematskih pogrešaka, poboljšava se apsolutna točnost modela i omogućuje njegova upotreba u službenom nacionalnom koordinatnom sustavu. Na slici 6.7 prikazan je raspored i numeracija kontrolnih točaka korištenih za vezivanje modela u službeni koordinatni sustav.

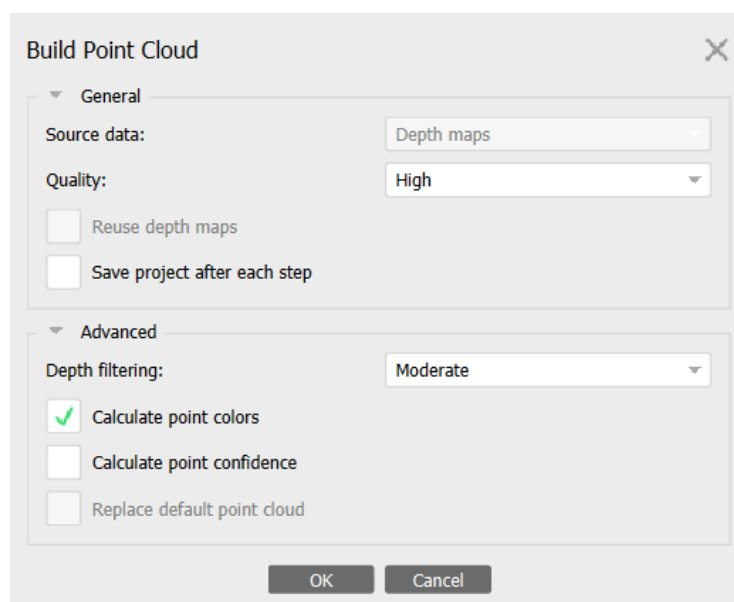


*Slika 6.7 Položaj i numeracija kontrolnih točaka (GCP) u projektu unutar programa Agisoft Metashape*

Nakon postavljanja svih markera, provedeno je ponovno poravnanje fotografija uz poništavanje ranijih parametara translacije i rotacije, čime je dobiven oblak točaka znatno veće preciznosti.

### 6.3.3 Gusti oblak točaka

Nakon faze poravnanja i određivanja položaja kamera, pristupilo se generiranju gustog oblaka točaka. Ova faza predstavlja detaljniju rekonstrukciju trodimenzionalne scene, pri čemu se izračunavaju dubinske karte (eng. *Depth maps*) i na njihovoj osnovi formira oblak s velikim brojem točaka. Za razliku od rijetkog oblaka, koji služi za inicijalno definiranje geometrije projekta, gusti oblak sadrži višestruko veći broj točaka te čini temelj za izradu mreže i drugih prostornih proizvoda. U verziji softvera korištenoj u ovom istraživanju opcija nosi naziv Build Point Cloud, iako se u praksi radi o postupku generiranja gustog oblaka točaka, što je u ranijim verzijama bilo označeno kao *Build Dense Cloud*. Na slici 6.8 prikazane su korištene postavke. Odabrana je visoka razina kvalitete (*Quality: High*) radi što preciznije geometrije, dok je filtriranje dubine podešeno na umjerenu razinu (*Depth filtering: Moderate*) kako bi se uklonile pogrešno rekonstruirane točke, a zadržali manji detalji. Aktivirana je i opcija *Calculate point colors*, kojom se svakoj točki pridružuje boja s fotografija, što rezultira realističnijim prikazom oblaka.



Slika 6.8 Postavke korištene za izradu gustog oblaka točaka (*Build Point Cloud*) u programu Agisoft Metashape

Na slici 6.9 prikazan je rezultat postupka *Build Point Cloud*, odnosno generirani gusti oblak točaka visoke razine detaljnosti. Jasno je vidljivo da oblak sadrži višestruko veći broj točaka (oko 400 milijuna točaka) u odnosu na rijetki oblak (oko 500 000 točaka) dobiven u fazi poravnanja, čime se postiže puno vjerniji prikaz objekta i njegove okoline. Ovaj oblak čini osnovu za daljnje modeliranje mreže (*Mesh*) i izradu teksturiranog 3D modela.

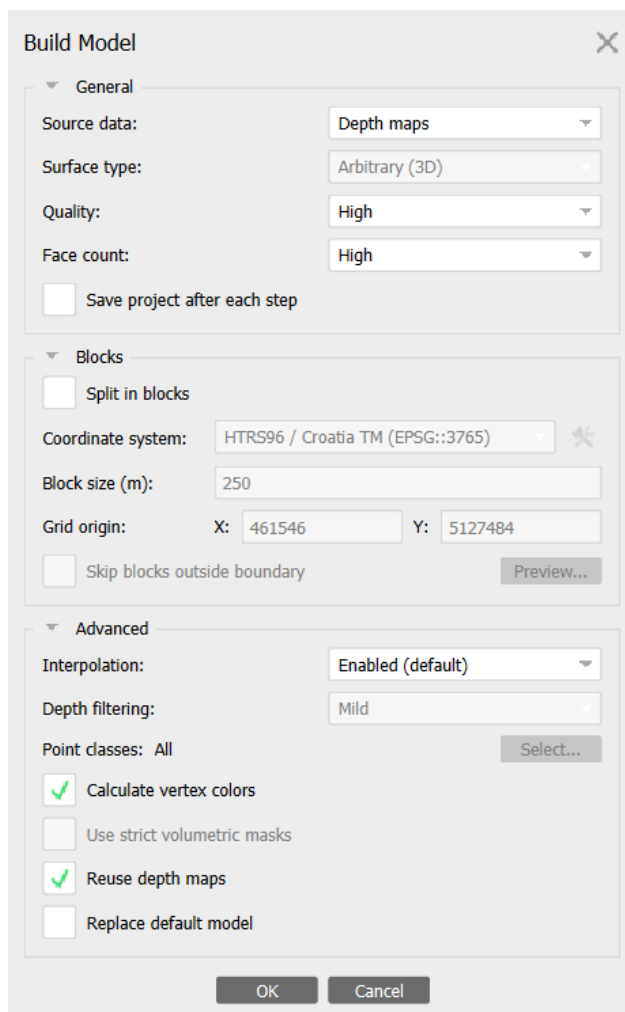


Slika 6.9 Gusti oblak točaka izrađen u programu Agisoft Metashape

#### 6.3.4 Izrada mreže

Generiranjem gustog oblaka točaka stvorena je podloga za izradu mreže (*Mesh*), površinskog modela koji opisuje geometriju objekata i terena. Mreža se sastoji od poligona, čije međusobno povezivanje omogućuje kontinuirani prikaz prostora u tri dimenzije. Takav model ključan je za vizualizaciju, ali i za sve daljnje postupke analize i teksturiranja.

Za izradu mreže korišten je alat *Build Model*. Kao izvor podataka (*Source data*) odabran je skup dubinskih karata (*Depth maps*), dok je tip površine definiran kao *Arbitrary (3D)*, što je preporučljivo kod kompleksnih geometrija. Parametar kvalitete postavljen je na High, uz maksimalan broj od 8,2 milijuna poligona (*Face count*), čime je osigurana visoka razina detalja uz prihvatljivo trajanje obrade (Slika 6.10).



Slika 6.10 Parametri korišteni za izradu mreže (Build Mesh) u programu Agisoft Metashape

Dobiveni model jasno prikazuje strukturu objekata na istraživanom području te omogućuje prepoznavanje i manjih elemenata. Time se dobiva realističan geometrijski okvir na koji se može nadograditi tekstura, čime će model poprimiti fotorealistična obilježja (Slika 6.11).



*Slika 6.11 Odabrani parametri za generiranje 3D modela u Metashapeu*

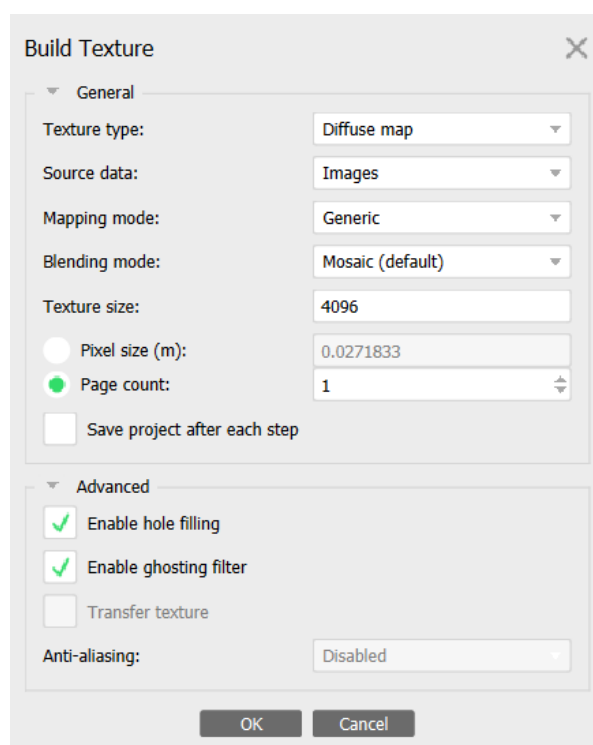
Radi bolje preglednosti, na slici 6.12 prikazan je 3D model crkve izbliza.



*Slika 6.12 Približeni prikaz dijela 3D modela*

Kako bi mrežni model poprimio fotorealističan izgled, primijenjena je naredba *Build Texture*. Kao tip teksture odabran je *Diffuse map*, pri čemu se informacija o boji prenosi s fotografija na površinu modela. Izvor podataka (*Source data*) postavljen je na *Images*, dok je za način mapiranja odabran *Generic*. Ova opcija omogućuje univerzalno mapiranje koje nije ovisno o specifičnim UV koordinatama, već generira optimalnu distribuciju tekstura na cijelu površinu. Način spajanja (*Blending mode*) zadan je kao *Mosaic (default)*, čime se kombiniraju podaci iz više fotografija kako bi se uklonile vidljive granice među njima. Dimenzija teksture postavljena je na 4096 px, što predstavlja kompromis između razine detalja i duljine trajanja obrade.

U naprednim postavkama aktivirane su opcije *Enable hole filling* i *Enable ghosting filter*. Prva popunjava praznine koje bi se mogle pojaviti na modelu, dok druga smanjuje pojavu tzv. „ghosting“ efekta, koji nastaje kada se na različitim fotografijama pojave pomični objekti ili tanke strukture (Slika 6.13).



Slika 6.13 Postavke korištene za izradu teksture (*Build Texture*) u programu Agisoft Metashape

Primjenom ovih parametara dobiven je model s realističnom teksturom koja vjerno prikazuje vizualne značajke objekta i okoliša (Slika 6.14). Time je mreža, koja prethodno prikazuje

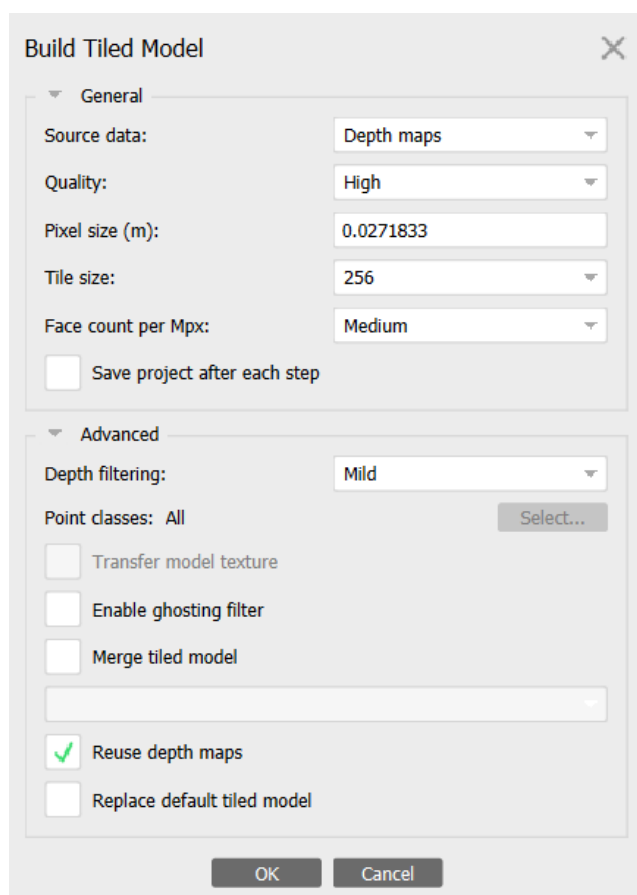
samo geometriju, obogaćena slikovnim informacijama te postaje pogodna za vizualizaciju i daljnje kartografske prikaze.



Slika 6.14 Rezultat izrade teksturiranog 3D modela u programu Agisoft Metashape

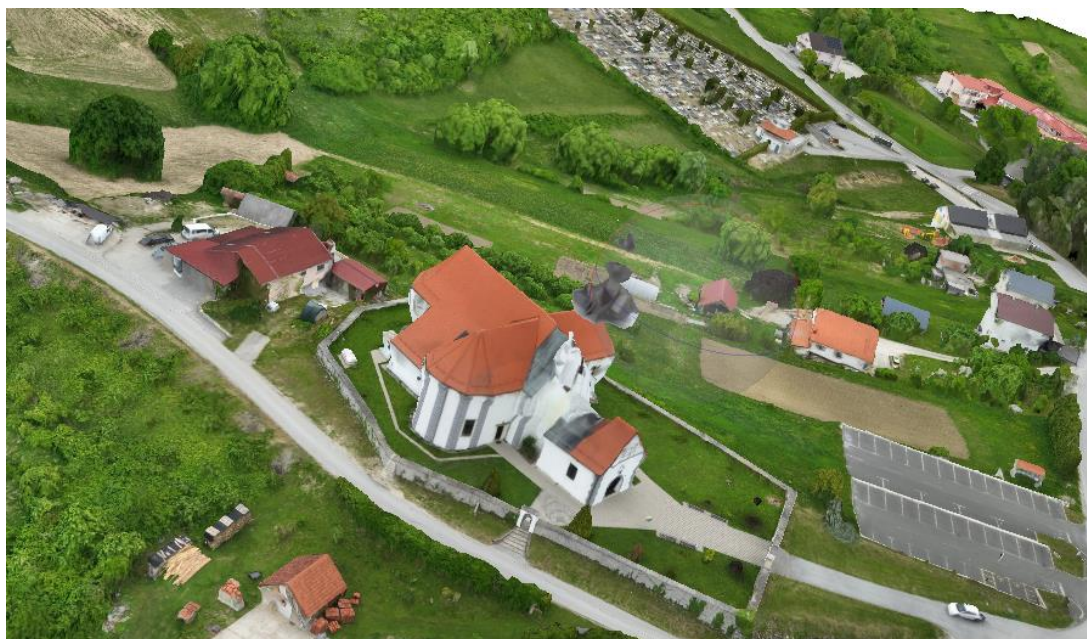
Kako bi se omogućila vizualizacija trodimenzionalnog modela u visokoj rezoluciji i olakšalo upravljanje velikim skupovima podataka, izrađen je *Tiled model*. Za njegovu izradu korištena je naredba *Build Tiled Model*, pri čemu je kao izvor podataka (*Source data*) odabran skup dubinskih karata (*Depth maps*). Kvaliteta je postavljena na *High*, čime se postiže visoka razina detalja, dok je veličina pločica (*Tile size*) definirana na 256 piksela. Parametar *Face count per Mpx* postavljen je na *Medium*, čime se postiže ravnoteža između gustoće mreže i trajanja obrade.

U naprednim postavkama primijenjeno je blago filtriranje dubine (*Depth filtering: Mild*), kako bi se uklonile pogrešne točke, ali uz očuvanje manjih detalja. Dodatno je uključena opcija *Reuse depth maps*, koja omogućuje ponovno korištenje već generiranih dubinskih karata i time značajno skraćuje vrijeme obrade (Slika 6.15).



Slika 6.15 Parametri korišteni za izradu Tiled modela (*Build Tiled Model*) u programu Agisoft Metashape

Dobiveni *Tiled model* (Slika 6.16) omogućuje detaljan i glatko pregledan prikaz modela u visokoj rezoluciji, čak i kod vrlo velikih skupova podataka. U usporedbi s klasičnim mrežnim modelom (*Mesh*), ovakav pristup je pogodniji za vizualizaciju složenih scena jer se podaci učitavaju segmentirano, što smanjuje opterećenje računalnih resursa i olakšava interaktivni rad.



Slika 6.16 Rezultat izrade Tiled modela u programu Agisoft Metashape

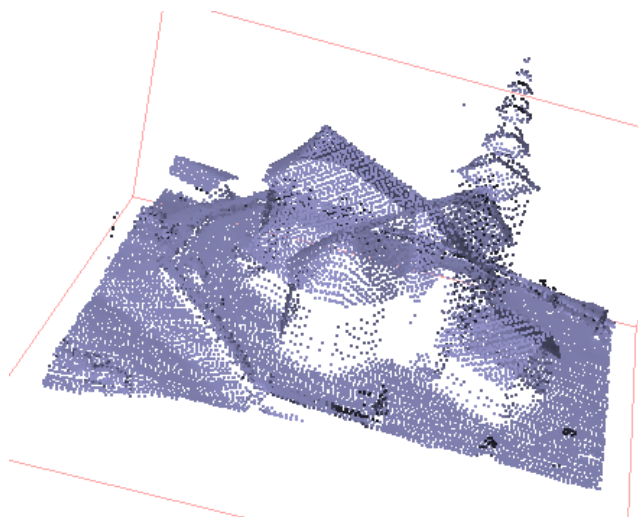
### 6.3.5 Ortomozaik

Jedan od završnih produkata obrade u programu Agisoft Metashape je ortomozaik, tj. georeferencirana ortofoto karta izrađena projekcijom fotografija na model. Za razliku od pojedinačnih snimaka, ortomozaik predstavlja kontinuiranu sliku visoke rezolucije u kojoj su uklonjene geometrijske deformacije, čime se omogućuje precizno mjerenje i kartografska analiza. U procesu izrade korištena je naredba *Build Orthomosaic*. Kao referentni sustav definiran je službeni koordinatni sustav Republike Hrvatske HTRS96/TM (EPSG:3765), čime je osigurana usklađenost s ostalim geodetskim podacima. Površina projekcije (*Surface*) postavljena je na *Model*, dok je za način spajanja fotografija korišten *Mosaic (default)*. Aktivirana je opcija *Enable hole filling*, kojom se popunjavaju praznine nastale pri projekciji. Dobiveni ortomozaik (Slika 6.17) pruža detaljan i vizualno konzistentan prikaz istraživanog područja, a zahvaljujući georeferenciranosti može se koristiti u daljnjim GIS analizama i kartografskim prikazima.



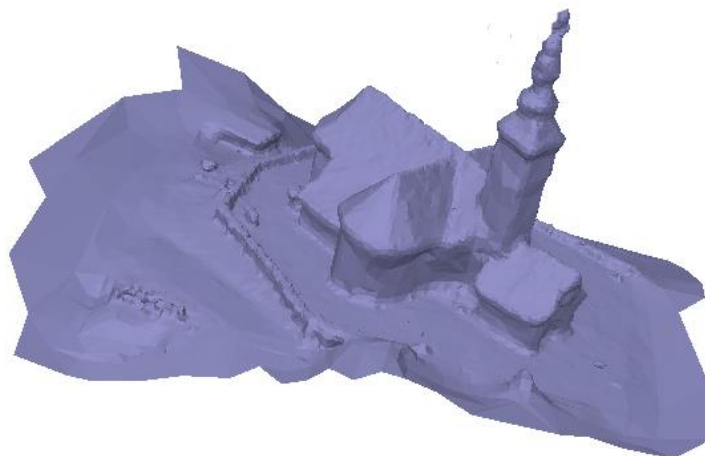
*Slika 6.17 Rezultat izrade ortomozaika u programu Agisoft Metashape*

Osim UAV podataka, korišteni su i LiDAR podaci koje su ustupili djelatnici Sveučilišta Sjever, Odjela za geodeziju i geomatiku, kao suradnici na projektu SIGMATOPCRO. Podaci su dostavljeni u obliku oblaka točaka (.las), što je omogućilo jednostavan uvoz u softver i brzu izradu modela. S obzirom na to da su LiDAR podaci obuhvaćali šire područje od samog objekta, bilo je potrebno izdvojiti dio koji obuhvaća crkvu i njezinu neposrednu okolinu (Slika 6.18). Dobiveni subset podataka poslužio je kao osnova za daljnje analize i usporedbe.



*Slika 6.18 Prikaz oblaka točaka crkve nakon uklanjanja okolnog područja*

Na temelju LiDAR oblaka točaka izrađen je trodimenzionalni model crkve (Slika 6.19) korištenjem naredbe *Build Model*. Model je bez boje, budući da LiDAR skener ne registrira RGB vrijednosti, već samo geometrijske informacije o udaljenosti točaka. Iako model nema fotorealističan prikaz, njegova prednost je visoka geometrijska preciznost i točno definirana struktura objekta. Upravo zbog toga takav model predstavlja pouzdanu osnovu za daljnje obrade.



Slika 6.19 3D model crkve izrađen iz LiDAR podataka

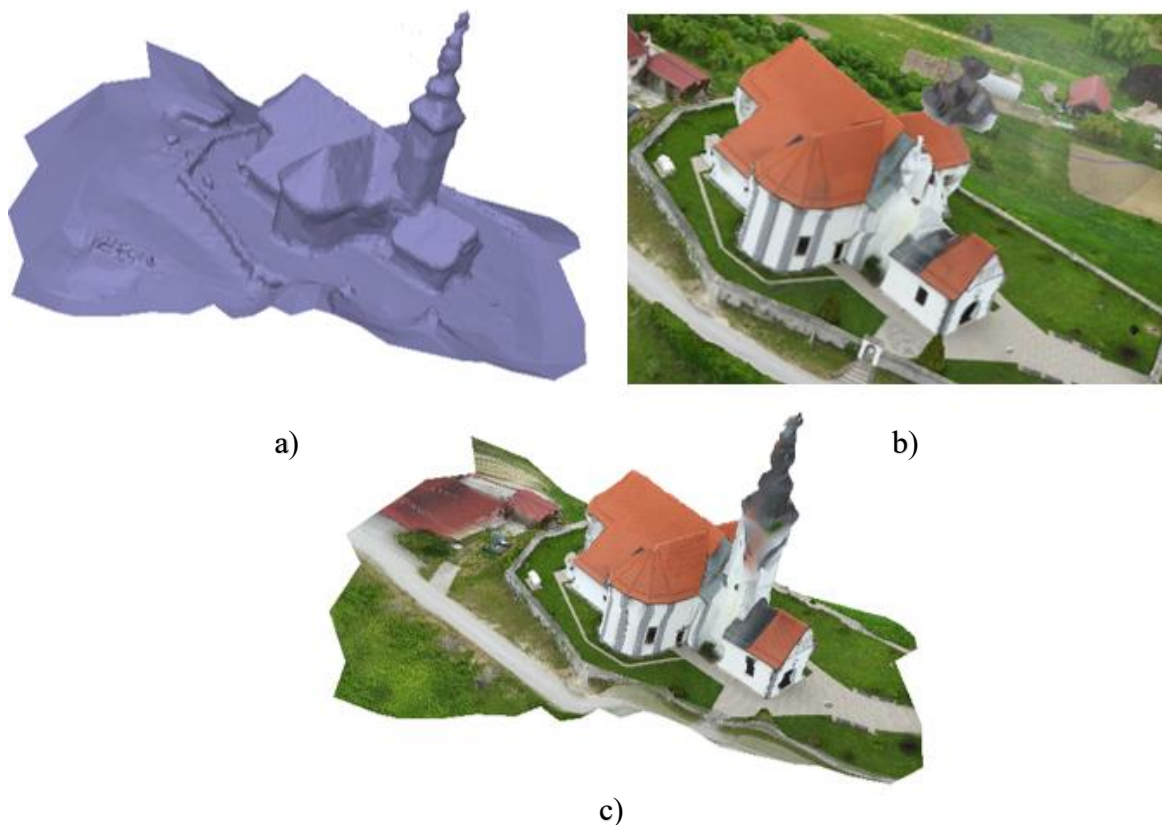
Radi postizanja fotorealističnog prikaza, na generirani model primijenjena je naredba *Build Texture*, pri čemu su korištene UAV fotografije. Na taj je način izrađen kombinirani model koji u svojoj geometriji koristi preciznost LiDAR podataka, dok vizualni izgled i teksture potječu od UAV snimaka (Slika 6.20). Takav model spaja prednosti obje tehnologije – geometrijsku točnost i vizualnu interpretaciju.



Slika 6.20 Kombinirani model – LiDAR geometrija s UAV teksturama

## 7. ANALIZA I VIZUALIZACIJA REZULTATA

Krajnji rezultat obrade podataka su 3D modeli crkve Pohođenja Blažene Djevice Marije, izrađeni na temelju LiDAR podataka te snimaka dobivenih bespilotnom letjelicom. Kombinacijom oba izvora postignut je model koji spaja geometrijsku preciznost laserskog skeniranja i vizualnu informativnost UAV snimanja. Na slici 7.1 prikazana su sva tri modela.



*Slika 7.1 Usporedba izrađenih 3D modela crkve: a) model iz LiDAR podataka, b) model iz UAV podataka, c) kombinirani model (LiDAR geometrija i UAV tekstura)*

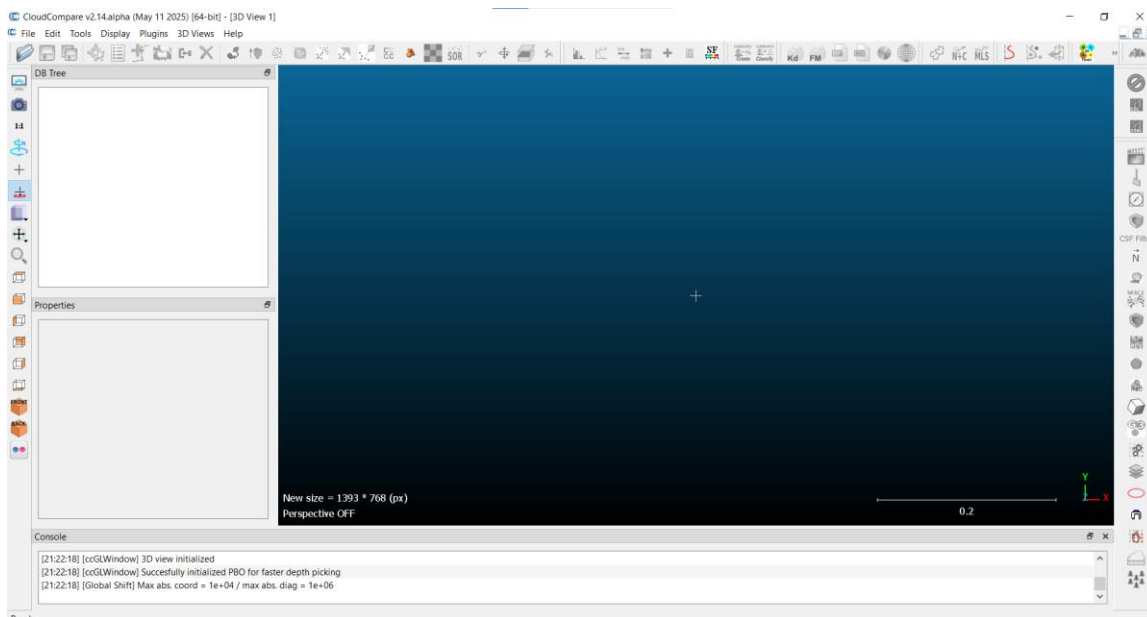
LiDAR podaci omogućili su izradu modela visoke geometrijske točnosti, no budući da skener ne bilježi RGB vrijednosti, model nema boju. Suprotno tome, UAV podaci rezultirali su modelom s realističnom teksturom, ali s određenim odstupanjima u geometriji, osobito na vertikalnim plohama i u područjima sa slabijim preklopom snimaka. Kombinirani model, izrađen tako da koristi LiDAR geometriju i UAV teksturu, daje najcjelovitiji prikaz objekta. Takav model u isto vrijeme omogućuje pouzdane analize dimenzija i volumena zahvaljujući preciznoj geometriji, dok vizualni prikaz fasada i krovišta olakšava interpretaciju i prezentaciju rezultata. Time se jasno uočava prednost integracije različitih metoda snimanja, jer se njihovi nedostaci međusobno nadopunjuju.

Važno je napomenuti da podaci nisu prikupljeni vlastitim terenskim mjerenjem, već su ih ustupili suradnici sa Sveučilišta Sjever, Odjela za geodeziju i geomatiku, u okviru projekta SIGMATOPCRO. Iako su podaci vrijedni za izradu i testiranje metoda, određena ograničenja proizlaze iz samog načina snimanja. Naime, UAV snimci izvedeni su uglavnom pod kutom od  $90^\circ$ , što otežava potpunu rekonstrukciju pročelja i bočnih strana objekta. Za ovakve objekte poželjno je kombinirati vertikalne i kose snimke (npr. pod kutom od  $45^\circ$ ), kako bi se fasade bolje obuhvatile. Unatoč tome, dostupni podaci pokazali su se korisnima za provedbu analize i usporedbu LiDAR i UAV modela.

Nakon što su izrađeni pojedinačni i kombinirani modeli, pristupilo se njihovoj detaljnoj analizi. Cilj je bio usporediti geometrijsku preciznost i vizualnu kvalitetu modela izrađenih iz LiDAR i UAV podataka te ispitati prednosti i ograničenja njihove kombinacije. Analize su provedene u softveru CloudCompare i drugim alatima, a obuhvaćale su mjerenja dimenzija, izračun površina i volumena, izradu presjeka te usporedbe koordinata karakterističnih točaka.

## 7.1 SOFTVER KORIŠTEN ZA ANALIZE

Za provedbu analiza korišten je softver CloudCompare. To je besplatan softver otvorenog koda, posebno razvijen za obradu i usporedbu 3D točkastih oblaka i trokutastih mreža. Njegova prednost leži u učinkovitosti i sposobnosti rada s vrlo velikim skupovima podataka — može rukovati s više milijuna, čak i stotinama milijuna točaka bez gubitka performansi. Originalno je razvijen za potrebe detekcije promjena između gustih oblaka točaka (npr. skeniranja objekata ili terena), a s vremenom se razvio u sveobuhvatan alat za naprednu obradu 3D podataka. Temelji se na visoko optimiziranoj strukturi octree, koja omogućuje brzo pretraživanje i efikasnu obradu podataka (URL 17). Na slici 5.4 prikazano je korisničko sučelje softvera CloudCompare, koje se sastoji od glavnog 3D prikaza, hijerarhijskog pregleda učitanih podataka (DB Tree) te skupa alata raspoređenih u alatnim trakama. Ovakav raspored omogućuje istovremeni pregled, obradu i analizu oblaka točaka i mreža, uz jednostavan pristup svim ključnim funkcijama softvera.



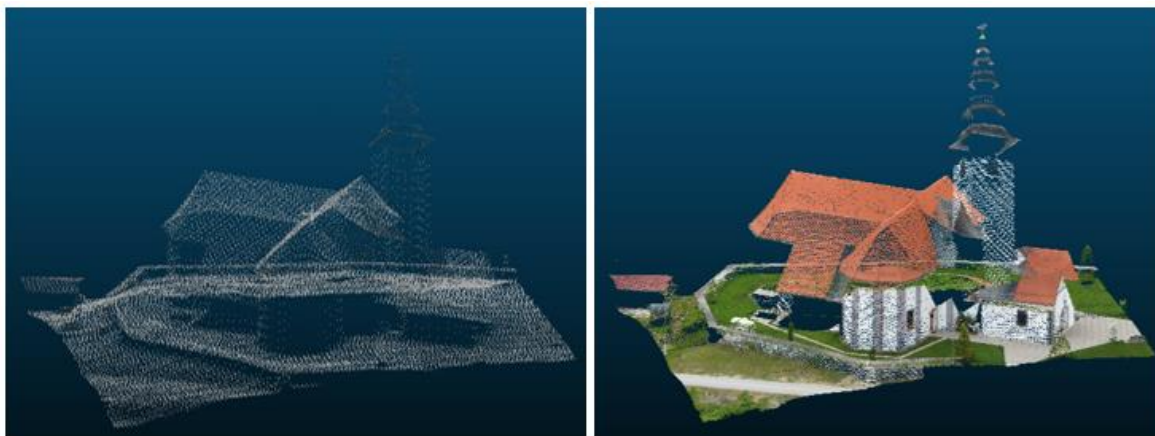
Slika 7.2 Sučelje softvera CloudCompare

Glavne mogućnosti softvera uključuju:

- Registraciju (npr. ICP algoritam), usporedbu oblaka-točaka i oblaka-mreža, segmentaciju, statističku analizu, filtre za gustoću, zakrivljenost i geometrijske karakteristike,
- Rad s neograničenom količinom skalarnih polja, omogućujući analizu vrijednosti poput boja, visine, gustoće s vizualizacijom gradijentom,
- Intuitivnu interaktivnu manipulaciju — omogućuje označavanje, segmentaciju pomoću 2D polilinja, translaciju, rotaciju, mjerenje udaljenosti i kuta — sve u realnom vremenu (URL 17).

## 7.2 ANALIZA I USPOREDBA NA LiDAR I UAV OBLAKU TOČAKA

U nastavku je provedena analiza i usporedba na LiDAR i UAV oblaku točaka. Oba skupa podataka uvezena su u softver CloudCompare te su prethodno prilagođena za daljnju obradu. Kako bi se osigurala međusobna usporedivost, oblaci su izrezani na isto područje koje obuhvaća crkvu i njezinu neposrednu okolinu. Za izrezivanje je korištena naredba *Crop*, pri čemu su unaprijed definirane vrijednosti centra i širine obuhvata. Na ovaj način uklonjeni su dijelovi izvan područja interesa, a u daljnjoj obradi zadržan je samo dio koji se odnosi na objekt istraživanja. Na slici 7.3 prikazani su izrezani oblaci točaka, LiDAR i UAV, koji su poslužili kao početna osnova za analize.



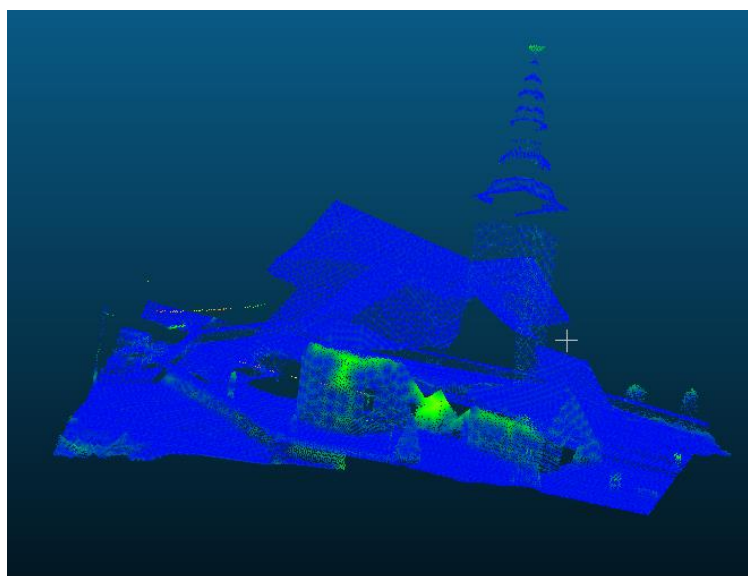
Slika 7.3 Izrezani oblaci točkaka: LiDAR podaci (lijevo), UAV podaci (desno)

Važno je napomenuti da se izračun ne odnosi isključivo na samu crkvu, već na čitavo područje koje je obuhvaćeno prilikom izrezivanja oblaka točkaka. Ipak, budući da je za oba izvora podataka korišteno identično područje, rezultati se mogu pouzdano usporediti. Unutar istog područja obrade LiDAR oblak sadrži 30 283 točkaka, dok UAV oblak sadrži 397 507 točkaka. Budući da je obuhvat identičan, broj točkaka odražava razliku u gustoći uzorka: LiDAR  $\approx 14,5$  pts/m<sup>2</sup>, UAV  $\approx 190,1$  pts/m<sup>2</sup>. Veća UAV gustoća olakšava vizualnu interpretaciju detalja, dok LiDAR i pri manjoj gustoći ostaje referentan u pogledu geometrije.

Na temelju oba seta podataka korištenjem naredbe *Tools*  $\rightarrow$  *Volume*  $\rightarrow$  *Compute 2.5D volume* izračunati su ukupni volumen i maksimalna visina modela, pri čemu se jasno uočavaju razlike između dvaju izvora podataka. Ukupan volumen iz LiDAR podataka iznosi približno 669,227 m<sup>3</sup>, dok je raspon visina između 312,600 m i 349,130 m, što odgovara visini crkvenog tornja od 36,53 m. Ukupan volumen iz UAV podataka iznosi približno 668,363 m<sup>3</sup>, dok je raspon visina između 312,740 m i 349,566 m, što odgovara visini crkvenog tornja od 36,83 m. Razlika u procjeni maksimalne visine tornja između LiDAR i UAV podataka iznosi oko 30 cm, što na ukupnu visinu od približno 37 m predstavlja odstupanje manje od 1%. Ono proizlazi iz specifičnih uvjeta fotogrametrijskog snimanja, pri čemu je kut snimanja bio pretežito vertikaln, a preklop ograničen. Ipak, odstupanje je unutar prihvatljivih granica te omogućuje da rezultati LiDAR i UAV podataka budu usporedivi i relevantni.

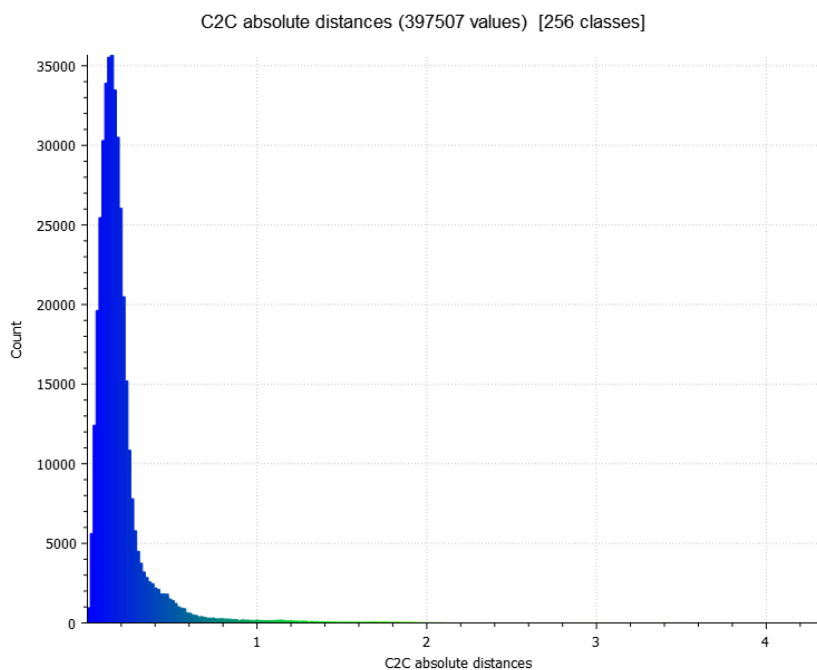
Za usporedbu dvaju oblaka točaka korištena je i metoda Cloud/Cloud Dist. U ovom postupku LiDAR oblak postavljen je kao referentni, dok je UAV oblak korišten kao usporedni. Analiza se temelji na računanju udaljenosti svake točke usporednog oblaka do najbliže točke u referentnom oblaku, a rezultati se pohranjuju u obliku scalar fielda. Na taj način omogućeno je vizualno i numeričko sagledavanje odstupanja između dvaju podataka.

Na slici 7.4 prikazan je rezultat analize u obliku obojenog oblaka točaka. Raspon boja (od plave prema crvenoj) označava veličinu odstupanja, pri čemu plava predstavlja gotovo potpuno podudaranje, a zelena i žuta ukazuju na veće razlike. Uočiti je da se većina odstupanja kreće unutar nekoliko centimetara, dok su veća neslaganja prisutna na rubnim dijelovima krovišta i pročelja.



*Slika 7.4 Cloud/Cloud Dist analiza odstupanja LiDAR i UAV oblaka točaka*

Distribucija odstupanja detaljnije je prikazana histogramom na slici 7.5. Iz njega je vidljivo da se najveći broj točaka nalazi u rasponu manjem od 10 cm, dok tek manji dio odstupa više. Takva distribucija potvrđuje visok stupanj podudarnosti između LiDAR i UAV podataka.



Slika 7.5 Histogram distribucije odstupanja (Cloud/Cloud Dist analiza)

Na temelju izvezenih podataka iz histograma provedena je kvantitativna analiza odstupanja između LiDAR i UAV oblaka točaka. Dobiveni statistički pokazatelji prikazani su u tablici 7.1.

Tablica 7.1 Statistički pokazatelji odstupanja između LiDAR i UAV oblaka točaka (Cloud/Cloud Dist analiza)

Statistički pokazatelj	Vrijednost [m]
Srednja vrijednost (Average)	0,19
Medijan	0,15
Minimalna vrijednost	0,0009
Maksimalna vrijednost	4,37
Standardna devijacija	0,18

Rezultati pokazuju da je srednja vrijednost odstupanja iznosila približno 0,19 m, dok je medijan iznosio oko 0,15 m. Ovakav odnos upućuje na to da većina točaka odstupa manje od 20 cm, ali da postoje pojedinačne točke s većim razlikama koje povećavaju prosjek.

Najmanja zabilježena odstupanja bila su reda veličine milimetara ( $\approx 0,0009$  m), dok su najveća odstupanja dosegala do 4,37 m. Ekstremne vrijednosti odstupanja nisu

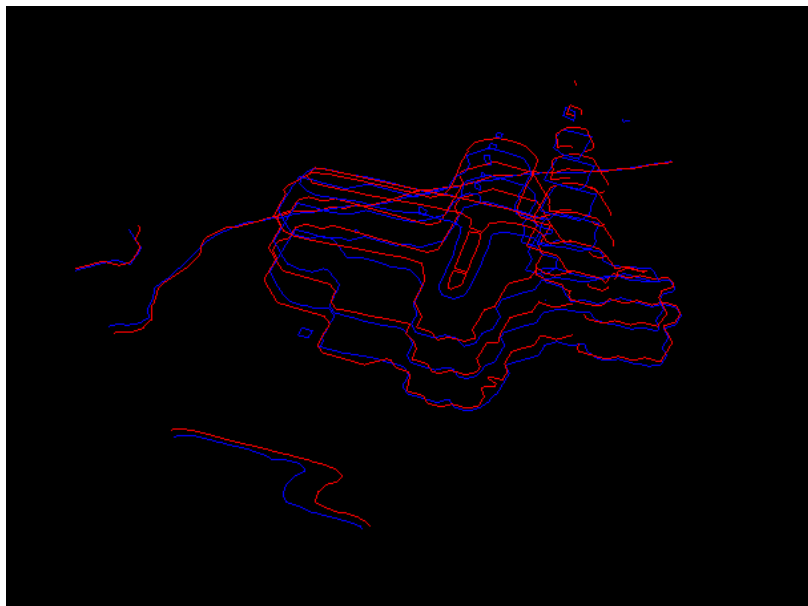
reprezentativne za većinu modela, nego se javljaju lokalno na složenijim dijelovima objekta, poput tornja i krova, te na rubovima oblaka. Ova odstupanja proizlaze iz nedovoljnog preklapanja UAV snimaka te različite refleksije površina kod LiDAR skeniranja. Standardna devijacija iznosila je oko 0,18 m, što potvrđuje da se većina odstupanja grupira unutar raspona od  $\pm 20$  cm.

Analiza potvrđuje da se LiDAR i UAV podaci u velikoj mjeri podudaraju, pri čemu UAV metoda pokazuje veće oscilacije u odnosu na LiDAR, što je očekivano zbog snimanja pod kutom od  $90^\circ$  i manjeg preklopa snimaka. Unatoč tim ograničenjima, rezultati pokazuju da je UAV dovoljno pouzdan za vizualnu nadopunu LiDAR podataka, dok LiDAR ostaje precizniji u geometrijskoj definiciji objekta.

Kako bi se dodatno usporedila geometrijska obilježja LiDAR i UAV podataka, iz oblaka točaka generirane su konture (izohipse). U softveru CloudCompare korištena je naredba *Rasterize*, pri čemu je odabrana opcija *Contour plot*. Dobivene konture potom su izvezene u DXF formatu i učitane u AutoCAD, gdje je omogućena njihova detaljnija vizualizacija i usporedba. Na slici 7.6 prikazane su konture u tlocrtu, dok je na slici 7.7 dan izometrijski prikaz istih podataka. Za bolju preglednost, LiDAR podaci prikazani su plavom bojom, a UAV podaci crvenom.



Slika 7.6 Konture LiDAR i UAV podataka u tlocrtu



*Slika 7.7 Izometrijski prikaz kontura LiDAR i UAV podataka*

Iz usporedbe kontura može se uočiti da se osnovni gabariti crkve u oba izvora podataka dobro podudaraju, što potvrđuje njihovu usporedivost. Najveća odstupanja javljaju se na krovu i uz bočne zidove, gdje UAV podaci pokazuju nešto nepravilnije obrise, dok LiDAR daje stabilniju i ujednačeniju geometriju. Ovi rezultati potvrđuju da LiDAR ima prednost u geometrijskoj pouzdanosti, dok UAV podaci pridonose detaljnijoj vizualnoj interpretaciji.

Može se zaključiti da oba izvora daju gotovo podudarne rezultate, što potvrđuje njihovu međusobnu kompatibilnost. Razlike se javljaju na složenijim površinama, gdje UAV podaci pokazuju nepravilnosti, ali i dalje osiguravaju dovoljno dobru razinu detalja za vizualizaciju.

### **7.2.1 Sažetak i diskusija provedenih analiza**

Kako bi rezultati bili pregledni i usporedivi, u tablici 7.2 dan je sažet prikaz svih provedenih analiza s ključnim pokazateljima za LiDAR i UAV podatke te njihovu kombinaciju, a nakon nje slijedi kratka diskusija o njihovoj pouzdanosti i ograničenjima.

Tablica 7.2 Pregled provedenih analiza i ključnih pokazatelja

Analiza	LiDAR	UAV podaci	Kombinacija (LiDAR + UAV)	Komentar
Broj točaka (pts/m <sup>2</sup> )	30 283 (≈14,5 pts/m <sup>2</sup> )	397 507 (≈190 pts/m <sup>2</sup> )	–	UAV znatno gušći, ali LiDAR stabilniji u geometriji
Volumen	669 227 m <sup>3</sup>	668 363 m <sup>3</sup>	–	Razlika < 0,2 % – rezultati gotovo identični
Maksimalna visina	36,53 m	36,83 m	–	Odstupanje ≈ 30 cm (manje od 1 %)
Cloud/Cloud Dist srednja pogreška	0,19 m	–	–	Najveća odstupanja do 4,37 m, lokalno na složenim dijelovima
Konture (AutoCAD)	Stabilni, ujednačeni oblici	Nešto nepravilniji oblici	Dobar preklap	Razlike vidljive na krovu i bočnim zidovima

Dobiveni rezultati pokazuju da odstupanja između LiDAR i UAV podataka najvećim dijelom ne prelaze 20 cm, što u kontekstu vizualizacije i prezentacije kulturne baštine predstavlja zadovoljavajuću točnost. Prema Remondinu (2011), integracija fotogrametrije i laserskog skeniranja upravo se temelji na tome da LiDAR osigurava geometrijsku pouzdanost, dok UAV podaci dopunjuju vizualne detalje i teksture potrebne za realističan prikaz. Takva kombinacija metoda omogućuje cjelovit pristup dokumentiranju objekata.

Odstupanja reda veličine 20 cm ne predstavljaju značajno ograničenje u svrhu kartografske vizualizacije i opće interpretacije kulturnih objekata. Međutim, ako bi se isti podaci koristili za potrebe restauracijskih radova ili arhitektonskih rekonstrukcija, tražila bi se viša razina preciznosti. Yastikli (2007) naglašava da fotogrametrija i TLS mogu davati vrlo različite

rezultate ovisno o svrsi, te da je za detaljne restauratorske zadatke nužno postići pogreške reda milimetara.

Kada je riječ o UAV snimanju, ključno je naglasiti da je u ovome slučaju snimanje izvedeno gotovo isključivo pod vertikalnim kutom, što je ograničilo kvalitetu rekonstrukcije pročelja i krovnih ploha. Smaczyński i Horbiński (2021) ističu da je za složenije objekte, poput crkava, nužno planirati i kose snimke (npr. pod kutom od 45°), kao i osigurati dovoljan uzdužni i poprečni preklop. U situaciji kada bi preklop bio još manji od korištenog, može se pretpostaviti da bi odstupanja bila izraženija, posebice na vertikalnim površinama i u detaljima krovišta. Iz priloženih UAV snimaka nije bilo moguće dobiti kvalitetan 3D model jer su snimke izvedene linijski, dok je za potpunu trodimenzionalnu rekonstrukciju nužno koristiti i poprečno (cross-hatch) snimanje.

S druge strane, i LiDAR metoda ima svoja ograničenja. NOAA Coastal Services Center (2012) upozorava da LiDAR podaci mogu sadržavati šum i “rupe” zbog reflektivnosti materijala, a RGB informacije uobičajeno nisu dostupne, što ograničava vizualnu interpretaciju modela. Upravo zato UAV teksture imaju važnu nadopunjujuću ulogu.

Može se zaključiti da odstupanja od približno 20 cm, iako relativno mala, imaju različitu težinu ovisno o kontekstu primjene. Za potrebe kartografske vizualizacije i popularizacije baštine ovakva točnost se pokazuje dovoljnim rješenjem, dok bi za restauratorske radove bila nužna detaljnija terenska mjerenja ili kombinacija s dodatnim TLS kampanjama. Time se potvrđuje da izbor metode i kvaliteta ulaznih podataka moraju uvijek biti prilagođeni krajnjoj svrsi istraživanja i dokumentacije.

## ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazan je postupak izrade i analize trodimenzionalnih modela sakralnih objekata na primjeru crkve Pohođenja Blažene Djevice Marije u Donjoj Višnjici. Podaci su prikupljeni u okviru projekta SIGMATOPCRO te su uključivali oblak točaka dobiven LiDAR snimanjem i UAV podatke prikupljene fotogrametrijom. Primjenom specijaliziranih softverskih alata (Agisoft Metashape, CloudCompare, AutoCAD) izrađeni su 3D modeli, provedene usporedbe i napravljene osnovne kvantitativne analize.

Rezultati pokazuju da svaka metoda ima svoje prednosti i ograničenja. LiDAR podaci osigurali su veću geometrijsku točnost i stabilnost modela, osobito kod zidova i osnovnih gabarita objekta. UAV podaci, s druge strane, omogućili su detaljniju vizualizaciju i realističan prikaz površina zahvaljujući teksturiranju, ali su pokazali osjetljivost na uvjete snimanja i preklap fotografija. Kombinacijom LiDAR geometrije i UAV tekstura dobiven je najcjelovitiji rezultat – model koji spaja pouzdanost geometrije i vizualnu informativnost.

Analize provedene na oblacima točaka i 3D modelima potvrdile su njihovu međusobnu usporedivost. Izračun volumena i visina pokazao je vrlo male razlike između LiDAR i UAV podataka (odstupanja manja od 1% u visini tornja), dok je metoda Cloud/Cloud Dist dala dodatni uvid u prostorna odstupanja, pri čemu je većina točaka imala razlike unutar nekoliko centimetara. Generiranje kontura i njihova usporedba također su ukazali na podudarnost osnovnih gabarita objekta, uz lokalna odstupanja na složenijim dijelovima krovišta i okolnog terena.

Važan aspekt rada jest i činjenica da podaci nisu prikupljeni vlastitim terenskim mjerenjem, već su ustupljeni od suradnika na projektu sa Sveučilišta Sjever. To je donijelo određena ograničenja u pogledu kvalitete snimanja (pretežito vertikalni kut UAV snimaka i manji preklap), no ipak je omogućilo provedbu usporedne analize i testiranje metodologije.

Zaključno, može se reći da kombinacija LiDAR i UAV podataka predstavlja učinkovit pristup dokumentaciji i vizualizaciji kulturne baštine. LiDAR osigurava visoku razinu geometrijske preciznosti, dok UAV metoda nadopunjuje vizualni aspekt modela. Dobivena iskustva i rezultati mogu doprinijeti daljnjem razvoju metoda 3D dokumentacije te njihovoj primjeni u očuvanju kulturne baštine.

## LITERATURA

- Baraba, S. (2020): Primjena LiDAR sustava za potrebe projektiranja željezničkih pruga. *Željeznice* 21, 19(2), 31–36, <https://hrcak.srce.hr/file/377428>
- Dimitrijević, M., i dr. (1981.): Osnovna geološka karta 1:100 000, Tumač za list Varaždin (L 33-69), Savezni geološki zavod, Beograd, <https://www.hgi-cgs.hr/wp-content/uploads/2020/07/Varazdin.pdf>
- Ergun, B. i dr. (2023), Level of detail (LoD) geometric analysis of relief mapping employing 3D modeling via UAV images in cultural heritage studies. *Heritage Science*, 11, Article 194., <https://www.nature.com/articles/s40494-023-01041-z>
- Frančula, N. (2004): Digitalna kartografija. Interna skripta, Geodetski fakultet, Zagreb
- Frangeš, S. (2020): Materijali s predavanja Kartografija, interna skripta, Geodetski fakultet, Zagreb
- Horbiński, T., i Smaczyński, M. (2023). Interactive Thematic Map as a Means of Documenting and Visualizing Information about Cultural Heritage Objects. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(7), 257, <https://www.mdpi.com/2220-9964/12/7/257>
- Kovanič, L. i dr. (2023): Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV, *Applied Sciences*, 13(11), 6732, [https://www.researchgate.net/publication/371231886\\_Review\\_of\\_Photogrammetric\\_and\\_Lidar\\_Applications\\_of\\_UAV](https://www.researchgate.net/publication/371231886_Review_of_Photogrammetric_and_Lidar_Applications_of_UAV)
- Lasić, Z. (2008): Primjena laserskih uređaja, str. 35–40, [http://www2.geof.unizg.hr/~zlastic/Primjena\\_laserskih\\_uredaja.pdf](http://www2.geof.unizg.hr/~zlastic/Primjena_laserskih_uredaja.pdf)
- Marić, I., Šiljeg, A., Domazetović, F. (2019): Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine – primjer utvrde Fortica na otoku Pagu. *Geodetski glasnik*, 50, 19-44, [https://glasnik.suggsbih.ba/glasnik/50/documents/GG50\\_Maric\\_Siljeg\\_Domazetovic.pdf](https://glasnik.suggsbih.ba/glasnik/50/documents/GG50_Maric_Siljeg_Domazetovic.pdf)
- National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Services Center. (2012), Lidar 101: An introduction to lidar technology, data, and applications. NOAA Coastal Services Center, <https://coast.noaa.gov/data/digitalcoast/pdf/lidar-101.pdf>

- Niccolucci, F. i Felicetti, A. (2024): Digital twins in heritage science: A vision for the future, <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/12/3978>
- Remondino, F. (2011): Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing, 3(6), 1104–1138, <https://www.mdpi.com/2072-4292/3/6/1104>
- Robinson H. i dr. (1995): Elements of Cartography, Wiley, New York, <https://ia802902.us.archive.org/13/items/in.ernet.dli.2015.120010/2015.120010.Elements-Of-Cartography.pdf>
- Smaczyński, M., i Horbiński, T. (2021): Creating 3D Model of the Existing Historical Topographic Object Based on Low-Level Aerial Imagery. KN Journal of Cartography and Geographic Information, 71, 33–43, <https://link.springer.com/article/10.1007/s42489-020-00061-0>
- Storeide, M. S. i dr. (2023): Standardization of digitized heritage: A review of implementations of 3D in cultural heritage. npj Heritage Science, 11, Article 249, <https://www.nature.com/articles/s40494-023-01079-z>
- Tutek, T. (2022): 3D skeniranje i 3D modeliranje „Adamićevih svjedoka“, Pomorski i povijesni muzej Hrvatskog primorja Rijeka, <https://hrcak.srce.hr/file/438179>
- Yastikli, N. (2007): Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. Journal of Cultural Heritage <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.003>

## POPIS URL-ova

URL 1: International Chartographic Association, <https://icaci.org/mission/> (2.7.2025.)

URL 2: CyArk, <https://www.cyark.org/> (2.7.2025.)

URL 3: CyArk, <https://en.wikipedia.org/wiki/CyArk> (2.7.2025.)

URL 4: Ministarstvo kulture i medija Republike Hrvatske, Primjeri 3D dokumentacije graditeljske baštine oštećene u potresu, <https://min-kulture.gov.hr/primjeri-3d-dokumentacije-graditeljske-bastine-ostecene-u-potresu/25638> (5.7.2025.)

URL 5: SIGMATOPCRO – Amplifikacija seizmičkoga gibanja tla uzrokovana topografskim efektima u Sjevernoj Hrvatskoj, <https://sigmatopcro.wordpress.com/> (12.7.2025.)

URL 6: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Donja\\_Vi%C5%A1njica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Donja_Vi%C5%A1njica) (12.7.2025.)

URL 7: DVD Višnjica, <https://www.dvdvisnjica.hr/o-visnjici> (12.7.2025.)

URL 8: Snimanje lidarom, <https://geo-info.hr/snimanje-lidarom/> (15.7.2025.)

URL 9: All You Know About LIDAR Systems and Applications, <https://www.elprocus.com/lidar-light-detection-and-ranging-working-application/> (15.7.2025.)

URL 10: LiDAR sustavi i 3D skeneri (1), <https://www.tehnomehanik.com/blog/lidar-sustavi-i-3d-skeneri-1/> (15.7.2025.)

URL 11: LiDAR sustavi i 3D skeneri (2), <https://www.tehnomehanik.com/blog/lidar-sustavi-i-3d-skeneri-2/> (15.7.2025.)

URL 12: Topografsko 2D i 3D snimanje dronom, <https://sigmatopcro.wordpress.com/2025/06/12/topografsko-2d-i-3d-snimanje-dronom/> (15.7.2025.)

URL 13: DJI Matrice 350 RTK, <https://sync.ba/product/dji-matrice-350-rtk/> (20.7.2025.)

URL 14: EMLID Reach RS2, <https://www.3dxr.co.uk/sensors-c5/gps-gnss-c89/emlid-reach-c452/emlid-reach-rs2-multi-band-rtk-gnss-receiver-p3372> (20.7.2025.)

URL 15: DJI Zenmuse L2, <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2> (20.7.2025.)

URL 16: Agisoft Metashape User Manual, [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_6\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf) (28.8.2025.)

URL 17: CloudCompare, <https://www.cloudcompare.org/> (28.8.2025.)

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 LoD razine (Ergun, B. i dr., 2023) .....	5
Slika 2.2 3D model područja Tre Cime di Lavaredo (Remondino, 2011) .....	7
Slika 2.3 3D modeli podzemnih etruščanskih grobnica u Italiji (Remondino, 2011) .....	7
Slika 2.4 3D model foruma u Pompejima (Remondino, 2011) .....	8
Slika 2.5 3D model piramide El Castillo, Chichén Itzá (URL 2) .....	9
Slika 2.6 3D printani Adamićevi svjedoci (Tutek, 2022) .....	10
Slika 2.7 Fizički model utvrde Fortice (Marić i dr., 2019) .....	11
Slika 2.8 Primjeri 3D dokumentacije graditeljske baštine oštećene u potresu (URL 4) .....	12
Slika 3.1 Logotip projekta SIGMATOPCRO (URL 5) .....	13
Slika 3.2 Panoramski pogled na naselje Donja Višnjica (URL 7) .....	14
Slika 3.3 Župna crkva Pohodaenja Blažene Djevice Marije u Donjoj Višnjici (URL 7) .....	15
Slika 3.4 Terenska istraživanja u Donjoj Višnjici – geofizička i geotehnička mjerenja u sklopu projekta SIGMATOPCRO .....	16
Slika 3.5 Lokacija snimanja i trajektorija leta – Donja Višnjica .....	17
Slika 4.1 Integracija osnovnih komponenata LiDAR sustava (Baraba, 2020) .....	20
Slika 4.2 Bepilotne letjelice kao LiDAR platforma (URL 10) .....	20
Slika 4.4.3 Avion kao LiDAR platforma (URL 10) .....	21
Slika 4.4 Helikopter kao LiDAR platforma (URL 10) .....	21
Slika 4.5 Snimanje u nizovima (Lasić, 2008) .....	22
Slika 4.6 Vrste LiDAR skenera (URL 11) .....	23
Slika 4.7 Primjer POS sustava (URL 11) .....	23
Slika 4.8 Shematski prikaz funkcioniranja zračnog LiDAR sustava (URL 9) .....	24
Slika 5.1 Detalji sa topografsko 2D i 3D snimanje dronom lokacija SIGMATOPCRO projekta (URL 12) .....	25
Slika 5.2 Bepilotna letjelica DJI Matrice 350 RTK (URL 13) .....	27
Slika 5.3 GNSS referentna stanica EMLID Reach RS2 (URL 14) .....	28
Slika 5.4 LiDAR senzor DJI Zenmuse L2 (URL 15) .....	29
Slika 6.1 Sučelje Agisoft Metashape .....	32
Slika 6.2 Izbornik Workflow u Agisoft Metashape softveru .....	34
Slika 6.3 Isječak tablice s učitanim snimkama i pripadajućim parametrima u programu Agisoft Metashape .....	35
Slika 6.4 Korištene postavke za poravnanje snimaka (Align Photos) u programu Agisoft Metashape .....	35

Slika 6.5 Oblak točaka male gustoće nakon poravnanja .....	36
Slika 6.6 Postavljanje markera u programu Agisoft Metashape .....	37
Slika 6.7 Položaj i numeracija kontrolnih točaka (GCP) u projektu unutar programa Agisoft Metashape .....	37
Slika 6.8 Postavke korištene za izradu gustog oblaka točaka (Build Point Cloud) u programu Agisoft Metashape .....	38
Slika 6.9 Gusti oblak točaka izrađen u programu Agisoft Metashape .....	39
Slika 6.10 Parametri korišteni za izradu mreže (Build Mesh) u programu Agisoft Metashape .....	40
Slika 6.11 Odabrani parametri za generiranje 3D modela u Metashapeu .....	41
Slika 6.12 Približeni prikaz dijela 3D modela .....	41
Slika 6.13 Postavke korištene za izradu teksture (Build Texture) u programu Agisoft Metashape .....	42
Slika 6.14 Rezultat izrade teksturiranog 3D modela u programu Agisoft Metashape .....	43
Slika 6.15 Parametri korišteni za izradu Tiled modela (Build Tiled Model) u programu Agisoft Metashape .....	44
Slika 6.16 Rezultat izrade Tiled modela u programu Agisoft Metashape .....	45
Slika 6.17 Rezultat izrade ortomozaika u programu Agisoft Metashape .....	46
Slika 6.18 Prikaz oblaka točaka crkve nakon uklanjanja okolnog područja .....	46
Slika 6.19 3D model crkve izrađen iz LiDAR podataka .....	47
Slika 6.20 Kombinirani model – LiDAR geometrija s UAV teksturama .....	47
Slika 7.1 Usporedba izrađenih 3D modela crkve: a) model iz LiDAR podataka, b) model iz UAV podataka, c) kombinirani model (LiDAR geometrija i UAV tekstura) .....	48
Slika 7.2 Sučelje softvera CloudCompare .....	50
Slika 7.3 Izrezani oblaci točaka: LiDAR podaci (lijevo), UAV podaci (desno) .....	51
Slika 7.4 Cloud/Cloud Dist analiza odstupanja LiDAR i UAV oblaka točaka .....	52
Slika 7.5 Histogram distribucije odstupanja (Cloud/Cloud Dist analiza) .....	53
Slika 7.6 Konture LiDAR i UAV podataka u tlocrtu .....	54
Slika 7.7 Izometrijski prikaz kontura LiDAR i UAV podataka .....	55

**POPIS TABLICA**

Tablica 5.1 Tehničke specifikacije DJI Matrice 350 RTK (URL 13) .....	27
Tablica 5.2 Specifikacije GNSS referentne stanice Emlid Reach RS2 (URL 14) .....	29
Tablica 5.3 Specifikacije LiDAR senzora DJI Zenmuse L2 (URL 15).....	30
Tablica 7.1 Statistički pokazatelji odstupanja između LiDAR i UAV oblaka točaka (Cloud/Cloud Dist analiza).....	53
Tablica 7.2 Pregled provedenih analiza i ključnih pokazatelja .....	56

## ŽIVOTOPIS

**Petra Prlić**

Državljanstvo: hrvatsko Datum rođenja: 01/03/2001

E-adresa: [petraprlic3@gmail.com](mailto:petraprlic3@gmail.com)**RADNO ISKUSTVO****Multisoft – Zagreb, Hrvatska**

Mjesto: Zagreb | Zemlja: Hrvatska

**Studentski posao u geodeziji**

[ 01/10/2023 – 15/07/2024 ]

- rad s GIS (Smallworld) i CAD alatima
- unos mreže za optički internet u geoinformacijski susta

**Skica - Arhitektonski studio – Grude, Bosna i Hercegovina**

Mjesto: Grude | Zemlja: Bosna i Hercegovina

**Asistent u arhitektonskom i građevinskom uredu**

[ 05/08/2024 – 20/09/2024 ]

- Sudjelovala u izradi glavnih i idejnih projekata
- Pomagala pri izradi tlocrta, nacрта i interijera
- Obavljala administrativne i tehničke zadatke

**Hrvatski telekom – Zagreb**

Mjesto: Zagreb

**Studentski posao u geodeziji**

[ 01/11/2024 – Trenutačno ]

- Obrada i analiza prostornih podataka
- Rad s GIS i AutoCAD alatima
- Podrška u planiranju i održavanju mrežne infrastrukture

**OBRAZOVANJE I OSPOBLJAVANJE****Diplomski studij - Geoinformatika***Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu* [ 2023 – Trenutačno ]Mjesto: Zagreb | Zemlja: Hrvatska | Internetska stranica: <https://www.geof.unizg.hr/>**Preddiplomski studij - Geodezija i geoinformatika***Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu* [ 2019 – 2023 ]Mjesto: Zagreb | Zemlja: Hrvatska | Internetska stranica: <https://www.geof.unizg.hr/>**Opća gimnazija***Gimnazija dr. Mate Ujevića* [ 2015 – 2019 ]Mjesto: Imotski | Zemlja: Hrvatska | Internetska stranica: <http://gimnazija-mujevica-im.skole.hr/>

## VJEŠTINE

---

AutoCad (Computer Aided Design Software) / QGIS (program za vizualizaciju, uređivanje i analizu geodataka) / SQL/NoSQL Databases / SKETCHUP / Osnove programiranja (Python, Java, AutoLISP) / MS Office (Word Excel PowerPoint)

## JEZIČNE VJEŠTINE

---

**Materinski jezik/jezici:** hrvatski

**Drugi jezici:**

**engleski**

SLUŠANJE C1 ČITANJE C1 PISANJE C1

GOVORNA PRODUKCIJA C1 GOVORNA INTERAKCIJA C1

**njemački**

SLUŠANJE B1 ČITANJE B1 PISANJE B1

GOVORNA PRODUKCIJA B1 GOVORNA INTERAKCIJA B1

*Razine: A1 i A2: temeljni korisnik; B1 i B2: samostalni korisnik; C1 i C2: iskusni korisnik*

## VOZAČKA DOZVOLA

---

**Vozačka dozvola:** B