

Višerezolucijsko modeliranje urbane zelene površine korištenjem LiDAR tehnologija

Filko, Vlatka

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:904577>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Sveučilište u Zadru
Odjel za geografiju
Sveučilišni diplomski studij
Primijenjena geografija

Vlatka Filko

**Višerezolucijsko modeliranje urbane zelene površine
korištenjem LiDAR tehnologija**

Diplomski rad

Zadar, 28. veljače 2024.

Sveučilište u Zadru
Odjel za geografiju
Sveučilišni diplomski studij
Primijenjena geografija

**Višerezolucijsko modeliranje urbane zelene površine
korištenjem LiDAR tehnologija**

Diplomski rad

Student/ica:

Vlatka Filko

Mentor/ica:

Izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg

Zadar, 28. veljače 2024.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Vlatka Filko**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Višerezolucijsko modeliranje urbane zelene površine korištenjem LiDAR tehnologija** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

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

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

Zadar, 28. veljače 2024.

Sadržaj

1.	Uvod	3
1.1.	Objekt, svrha i ciljevi istraživanja	4
1.2.	Hipoteze istraživanja	5
2.	Pregled prethodnih istraživanja	5
2.1.	Primjena, prednosti i nedostaci LiDAR tehnologije u šumarstvu te procjena točnosti korištenih tehnologija	5
2.2.	Važnost i uloga zelenih površina u urbanim prostorima	8
2.3.	Primjena višerezolucijskog modeliranja	9
3.	Područje istraživanja	10
4.	Teorijska osnova	11
4.1.	LiDAR tehnologija	11
4.1.1.	Zračni LiDAR	13
4.1.2.	Terestrički LiDAR	15
4.1.3.	GeoSLAM tehnologija	16
4.2.	Zelene površine u urbanim područjima	17
4.3.	Višerezolucijsko modeliranje	19
5.	Metodologija istraživanja	20
5.1.	Terensko prikupljanje podataka	20
5.1.1.	Prikupljanje kontrolnih i orijentacijskih točaka	20
5.1.2.	Prikupljanje podataka zračnim LiDAR-om	24
5.1.3.	Prikupljanje podataka terestričkim LiDAR-om	29
5.1.4.	Prikupljanje podataka GeoSLAM-om	32
5.2.	Obrada podataka	33
5.2.1.	Predobrada podataka prikupljenih zračnim LiDAR-om	34
5.2.2.	Obrada podataka prikupljenih zračnim LiDAR-om	37
5.2.3.	Obrada podataka prikupljenih terestričkim LiDAR-om	51
5.2.4.	Obrada podataka prikupljenih GeoSLAM-om	55
5.2.5.	Alati korišteni tijekom obrade podataka za validaciju modela	56
6.	Rezultati i rasprava	62
6.1.	Rezultati mezo razine istraživanja	62
6.1.1.	Cloud to Cloud Distance	66
6.1.2.	Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison	67
6.1.3.	LAS Dataset to Raster	69
6.1.4.	Relativna točnost LiDAR tehnologija	75
6.2.	Rezultati mikro razine istraživanja	77
7.	Zaključak	80
8.	Literatura i izvori	82

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Diplomski rad

VIŠEREZOLUCIJSKO MODELIRANJE URBANE ZELENE POVRŠINE KORIŠTENJEM LIDAR TEHNOLOGIJA

Vlatka Filko

Sažetak

Urbane zelene površine napredno se i pouzdano modeliraju korištenjem LiDAR tehnologija. Glavni pristupi pri proučavanju zelenih površina geoprostornim tehnologijama su *Area-Based* i *Tree-Centric* pristup koji se međusobno razlikuju u samom objektu istraživanja kao šumi u cjelini ili individualnim stablima. U ovom istraživanju, na mezo i mikro razini koristio se pristup individualnog stabla kako bi se usporedile LiDAR tehnologije i softveri za izdvajanje stabala. Područje istraživanja je urbana zelena površina na sjevero-zapadnom dijelu naselja Zadar, mjesnom odboru Novi Bokanjac. Tijekom zračnog laserskog skeniranja korištena je bespilotna letjelica DJI Matrice M300 RTK s Zenmuse L1 LiDAR-om. Terestričko lasersko skeniranje provedeno je s Faro Focus-om M70 te mobilno lasersko skeniranje s GeoSLAM-om ZEB REVO. Istraživanje je provedeno na dvije razine, mezo razini čiji je cilj bio usporedba dobivenih *ground* modela i izdvojenih stabala, dok je mikro razina bila usmjerena na izdvajanje i računanje promjera debla stabla. Utvrđeno je da korišteni UAV sustav ima pogrešku RTK pozicioniranja u izmjerenim kontrolnim točkama manju od 10 cm. Potvrđeno je da se terestričkim laserskim skenerom mogu izdvojiti stabla čiji je promjer debla veći od 10 centimetara, kao i da se pomoću UAV sustava djelomično mogu generirati informacije o promjeru krošnje pojedinačnog stabla. Softver Spatix potvrđen je kao optimalno softversko rješenje koje je sveobuhvatno u modeliranju, analizi, identifikaciji i izdvajanju stabala. Relativna pogreška terestričkog laserskog sustava manja je od 5%, dok je kod GeoSLAM-a veća od 5%.

Ključne riječi: urbana zelena površina, zračno lasersko skeniranje, GeoSLAM, terestričko lasersko skeniranje, Matrice M300 RTK, Zenmuse L1 LiDAR, LiDAR, višerezolucijsko modeliranje

Voditelj: Izv. prof. dr.sc. Ante Šiljeg

Povjerenstvo: doc. dr. sc. Ivan Marić, izv. prof. dr. sc. Ante Šiljeg, Mentor, dr. sc. Fran Domazetović, izv. prof. dr. sc. Denis Radoš

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zadar

Department of Geography

Graduation Thesis

MULTISCALE MODELING OF URBAN GREEN AREAS USING LIDAR TECHNOLOGIES

Vlatka Filko

Sažetak

Urban green areas are being advancedly and reliably modeled using LiDAR technologies. The main approaches in studying green spaces with geospatial technologies are the Area-Based and Tree-Centric approaches, which differ in the object of study, such as the forest as a whole or individual trees. In this study, an individual tree approach was used at the meso and micro levels to compare LiDAR technologies and tree extraction software. The research area is an urban green space in the northwest part of the city of Zadar, Novi Bokanjac. During airborne laser scanning, a DJI Matrice M300 RTK drone with Zenmuse L1 LiDAR was used. Terrestrial laser scanning was conducted with a Faro Focus M70 and mobile laser scanning with a GeoSLAM ZEB REVO. The research was conducted at two levels: the meso level aimed to compare the obtained ground models and extracted trees, while the micro level focused on tree extraction and diameter calculation. It was found that the UAV system had an RTK positioning error in measured control points of less than 10 cm. It was confirmed that tree extraction is possible with a terrestrial laser scanner for trees with a diameter greater than 10 centimeters, and partially possible with a UAV system to generate crown diameter information for individual trees. The Spatix software was confirmed as an optimal software solution that is comprehensive in modeling, analysis, identification, and tree extraction. The relative error of the terrestrial laser system is less than 5%, while with GeoSLAM it is greater than 5%.

Key words: urban green areas, aerial laser scanning, GeoSLAM, terrestrial laser scanning, Matrice M300 RTK, Zenmuse L1 LiDAR, LiDAR, multiscale modeling

Supervisor: Associate Professor Ante Šiljeg, PhD

Reviewers: Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Associate Professor Ante Šiljeg, PhD, Fran Domazetović, PhD, Associate Professor Denis Radoš, PhD

1. Uvod

Urbane zelene površine neizostanano su element urbanih sredina jer upotpunjuju urbani okoliš oblikujući karakter susjedstva i grada (Pauleit, 2003), stvarajući osjećaj pripadnosti prostoru za stanovnike određenog grada (Frumkin, 2003), pružajući fizičku, psihološku i opću zdravstvenu dobrobit stanovnicima urbanih prostora (Maas i dr., 2006) i održavanjem bioraznolikosti prirodnih staništa (Sadler i dr., 2010). Stanovništvu pružaju mogućnosti koje obogaćuju njihovu kvalitetu života, to jest njihova je kvaliteta života uvjetovana pristupom urbanim zelenim površinama (Bertram i Rehdanz, 2015), a definiraju se kao otvoreni, javni ili privatni prostor u urbanom okolišu, većinom prekriven vegetacijom te direktno ili indirektno dostupan urbanom stanovništvu (Šiljeg i dr., 2018; Zadar Nova, 2016).

Sve veći broj znanstvenika modelira urbane zelene površine i kvantificira njihove pozitivne učinke koristeći pritom različite metode (Maltamo i dr., 2014). Tradicionalne metode prikupljanja i obrade podataka o vegetaciji su vremenski i resursno zahtjevne (Bauwens i dr., 2016). S ciljem optimizacije i ubrzanja postupka posljednjih desetljeća, sve se više primjenjuju geoprostorne tehnologije. Iako postoje različite vrste senzora za prikupljanje podataka najznačajniji napredak u inventarizaciji vegetacije omogućen je razvojem LiDAR tehnologije (Maltamo i dr., 2014). Proučavanje zelenih površina pomoću LiDAR tehnologije, može se procijeniti sastav određene zelene površine, volumen, odnosno količina mase određene kulture na području te se mogu otkriti nametnici i bolesti koje pogađaju zelenu površinu (Maltamo i dr., 2014). LiDAR tehnologija koristi penetrirajući puls laserske zrake kako bi se izmjerilo vrijeme koje je potrebno da laserska zraka dođe do objekta istraživanja i vrati se do senzora te pomoću vremena računa udaljenost senzora od objekta istraživanja, što omogućuje precizno stvaranje trodimenzionalnih modela površine istraživanog objekta (Dong i Chen, 2018; McManamon, 2019). LiDAR tehnologija može se koristiti pri tlu, u zraku i u svemiru, stoga može biti terestrička, zračna i astronomska (Dong i Chen, 2018). Istaknuta prednost LiDAR-a je mogućnost snimanja terena tijekom noći, sve dok nema magle, dima, kiše ili visoke razine vlage u zraku (Dong i Chen, 2018). Osim snimanja terena u otežavajućim uvjetima, LiDAR-ski su podaci trodimenzionalni i zbog toga nisu geometrijski distorzirani tijekom izrade trodimenzionalnih modela (Dong i Chen, 2018). Laserski puls može prodirati kroz rupe u krošnji te je zbog toga moguće izraditi model strukture krošnje i reljefa ispod krošnji (Dong i Chen, 2018).

Sve šira uporaba geoprostornih tehnologija i rapidni razvoj softverskih rješenja omogućio je proučavanje UZP korištenjem različitih pristupa i razine detalja. U proučavanju

vegetacije postoje arealni (*Area-Based*) i pristup pojedinačnog stabla (*Tree-Centric/Individual Tree*). Arealni pristup usmjeren je na proučavanje, analiziranje te modeliranje šume kao cjeline (Kelley i dr., 2022). S druge strane, pristup pojedinačnog stabla usmjeren je na svako pojedinačno stablo na šumskoj površini (Kelley i dr., 2022). Pristup pojedinačnog stabla ističe se uvođenjem LiDAR tehnologije u šumarstvo jer LiDAR, zbog sposobnosti skeniranja detaljnih trodimenzionalnih oblika, revolucionira način na koji se stabla analiziraju i modeliraju (Kelley i dr., 2022). Razvoj LiDAR tehnologije omogućio je izradu centimetarskih modela lišća, grana, debla i tla pod zelenom površinom (Dalponte i Coomes, 2016). Glavna prednost pristupa pojedinačnog stabla je dobivanje izravnih, detaljnih podataka o visini stabla, strukturi i prostornoj distribuciji krošnje te mogućnost klasifikacije i izdvajanja stabala (Kelley i dr., 2022).

U istraživanju će se koristiti višerezolucijski pristup, koji se temelji na usporedbi LiDAR tehnologija različite razine detaljnosti (točnosti): aero (UAV), terestrički i mobilni. Višerezolucijski pristup (engl. *Multiscale Modeling*) se odnosi na istraživačke postupke koji su zasnovani na primjeni različitih geoprostornih tehnologija za proučavanje određenog procesa ili pojave unutar dvije ili više istraživačkih razina, različitog prostornog obuhvata i rezolucije (prostorna, ekonomska, spektralna i vremenska) (Domazetović, 2021). U ovom će se diplomskom radu koristiti jedna dimenzija višerezolucijskog modeliranja, prostorna rezolucija te će rad biti podijeljen na dvije razine istraživanja: mezo i mikro.

1.1. Objekt, svrha i ciljevi istraživanja

Objekt istraživanja jest primjena, **testiranje mogućnosti** LiDAR tehnologije u višerezolucijskom modeliranju zimzelene, urbane zelene površine na testnom području koje se nalazi u naselju Zadar.

Svrha istraživanja jest usporediti različite metode laserskog skeniranja da bi se istaknula njihova funkcionalnost, odnosno primjenjivost u različitim razinama istraživanja.

Ciljevi koji se žele postići diplomskim radom jesu:

1. Utvrditi **prednosti i nedostatke** primjene LiDAR tehnologija pri višerezolucijskom modeliranju guste, urbane, zimzelene zelene površine.
2. Odrediti **relativnu točnost ALS, TLS, GeoSLAM** tehnologija koje će se koristiti u istraživanju.
3. Odrediti **apsolutnu točnost ALS** tehnologije koja će se koristiti.
4. Usporediti **softverska rješenja** za klasifikaciju *ground* modela.

1.2. Hipoteze istraživanja

Postavljanjem ciljeva istraživanja, korištenjem LiDAR tehnologija, proučavanjem njihovih specifikacija i korištenih metodologija te proučavanjem prethodnih istraživanja, postavljene su sljedeće hipoteze:

H1 Ukupna pogreška RTK pozicioniranja UAV sustava (Matrice M300 RTK) na visini leta od 50 m u izmjerenim kontrolnim točkama bit će centimetarska (< 10 cm).

H2 Relativna pogreška terestričkih laserskih sustava na testiranim objektima (blok siporeksa) smještenim unutar područja istraživanja bit će manja od 5% (engl. percent error - PE).

H3 Relativna pogreška GeoSLAM sustava na testiranim objektima (blok siporeksa) smještenim unutar područja istraživanja bit će veća od 5% (engl. percent error - PE).

H4 Najveću vertikalnu točnost u procesu izrade rasterskog digitalnog modela reljefa (digital ground model) će postići softversko rješenje Spatix.

H5 TLS omogućuje kartiranje stabala promjera većih od 10 cm

H6 Pomoću korištenog UAV sustava moguće je generirati informacije o promjeru pojedinačnog stabla

2. Pregled prethodnih istraživanja

S obzirom na povezanost ovog diplomskog rada sa šumarstvom, odnosno primjenom LiDAR tehnologija u šumarstvu, proučena je literatura kompatibilna s navedenom tematikom. Osim primjene LiDAR tehnologija, proučena su znanstvena istraživanja povezana s važnošću zelenih površina u urbanim prostorima te višerezolucijskim modeliranjem. Proučeni radovi koji su se najviše koristili tijekom pisanja diplomskog rada mogu se podijeliti u tri kategorije:

- 2.1 Primjena, prednosti i nedostaci LiDAR tehnologije u šumarstvu te procjena točnosti korištenih tehnologija,
- 2.2 Važnost i uloga zelenih površina u urbanim prostorima i
- 2.3 Primjena višerezolucijskog modeliranja.

2.1. Primjena, prednosti i nedostaci LiDAR tehnologije u šumarstvu te procjena točnosti korištenih tehnologija

Liang i dr. (2022) prikazuju i ocjenjuju razvoj različitih metoda daljinskih istraživanja u šumarstvu te navode da su istraživanja o metodama daljinskih istraživanja trenutno

najzastupljenija u znanosti o šumarstvu. Razmatraju izazove, točnost, prednosti i nedostatke terestričkog laserskog skeniranja, mobilnog i zračnog laserskog skeniranja, UAV fotogrametrije, UAV radara, terestričke fotogrametrije te UAV hiperspektralnog skeniranja šuma. S obzirom na temu diplomskog rada i korištene tehnologije tijekom terenskog istraživanja, poglavlja o terestričkom laserskom skeniranju, zračnom i mobilnom laserskom skeniranju iscrpno i detaljno su proučena.

Jurjević i dr. (2021) procjenjuju različite metode daljinskih istraživanja: terestričko lasersko skeniranje, UAV fotogrametriju, zračno lasersko skeniranje i ručno lasersko skeniranje (Hand-Held Personal Laser Scanning) pri snimanju **nizinske listopadne šume** u Pokupskom. Cilj istraživanja bio je odrediti točnost pojedinih modela i mogućnost izrade digitalnog modela reljefa pri snimanju šumovitog područja koristeći podatke dobivene različitim instrumentima. Kako bi se ispitala točnost, korištene su *root mean square error* (RMSE), *mean error* (ME) i *standard deviation* (SD) vrijednosti. Kvalitetan digitalni model reljefa iznimno je važan u šumarstvu jer čini uporište za daljnje analize atributa krošnji i stabala. Stoga i mogućnost izdvajanja *ground* modela iz oblaka točaka dobivenog LiDAR tehnologijom ima ključnu ulogu u šumarstvu. Kao glavnu prednost LiDAR tehnologije u istraživanju šumskih površina ističu mogućnost penetriranja laserskih zraka kroz krošnju.

Puliti i dr. (2020) istraživali su područje prekriveno kalifornijskim borom pomoću UAV LiDAR skeniranja, LiDAR skeniranja iz helikoptera te fotogrametrije. Uz sve prednosti UAV LiDAR skeniranja, kao poteškoću ističu prikupljanja podataka u gustom, šumskom području zbog nemogućnosti, to jest poteškoća pri penetriranju laserske zrake kroz gusto šumsko područje.

Moudrý i dr. (2020) ispituju različite algoritme za izdvajanje *ground* modela iz podataka prikupljenih zračnom LiDAR tehnologijom. Na proučavanom području u sjeveroistočnoj Češkoj nalazi se nekoliko vrsta vegetacije, uključujući travu, hidrofilne biljke, stepu te šumu na nagnutom terenu s nekoliko udubljenja. S obzirom na veličinu područja od 450 ha, korišteno je LiDAR skeniranje iz zrakoplova. Uspoređeno je šest algoritama u nekoliko softvera (ArcGIS, Cloud Compare, Rapidlasso LAStool, Trimble Realworks i PDAL) pomoću kvalitativne i kvantitativne validacije. Uspoređeno je izdvajanje *ground* modela pomoću šest algoritama na

svakom od navedenih vegetacijskih pokrova i na značajnom nagibu terena. To do: za raspravu ih iskoristiti

Căţeanu i Ciubotaru (2020) istražuju točnost metoda interpolacije pri izradi ground modela pomoću podataka snimljenih zračnim LiDAR skeniranjem u gustoj šumi. Metode interpolacije koje su koristili su prirodni susjed, Delaunayeva traingulacija, višerazinski splajn, tankoslojni splajn i tankoslojni splajn s TIN-om. Kao dodatnu poteškoću pri interpolaciji i izdvajanju ground modela na šumskim područjima ističu čestu intenzivnu vertikalnu raščlanjenost područja.

Guimarães i dr., (2020) ističu prednosti zračnog laserskog skeniranja nad ostalim oblicima daljinskih istraživanja, posebice zbog visoke točnosti LiDAR podataka i mogućnosti penetriranja laserskog pulsa kroz krošnju do tla. Osim toga, istaknuta je bolja reprezentacija pojedinih stabala i krošnje, spram podataka dobivenih fotogrametrijom.

Balenović i dr. (2018) proučavaju točnost digitalnog modela reljefa različitih prostornih rezolucija pomoću podataka dobivenih zračnim laserskim skeniranjem i fotogrametrijom. Digitalni modeli reljefa validirani su s 22 *ground-truth* točke prikupljene RTK GPS-om. Kako bi se ispitala točnost, korištene su *root mean square error (RMSE)* i *mean error (ME)* vrijednosti koje za podatke dobivene zračnim laserskim skeniranjem iznose od 0.14 do 0.15 m i od 0.09 do 0.12 m.

Morsdorf i dr. (2017) pišu o izazovima koji prethode, pojavljuju se tijekom i nakon zračnog laserskog skeniranja šumske površine. Kao prednost zračnog laserskog skeniranja nad terestričkim ističu homogeniju, odnosno pravilniju distribuciju oblaka točaka, što rezultira točnijom procjenom visine krošnje.

Simpson i dr. (2017) proučavaju točnost digitalnog modela reljefa na kojemu se nalazi listopadna širokolisna šuma. Uspoređuju točnost dva modela koji su snimljeni u različitim razdobljima godine – prvi model s lišćem, a drugi nakon opadanja lišća sa stabala. Podatci snimljeni totalnom stanicom, njih 438, i ispravljeni koristeći Rinex podatke kako bi se ispravila apsolutna točnost, poslužili su kao referentni. Bolje rezultate, odnosno točniji digitalni model reljefa postigli su s podacima koji su snimljeni u razdoblju nakon opadanja lišća. Razlika u

root mean square error-u (RMSE) u dva modela iznosi 61 cm – RMSE (bez lišća) = 0,22 m i RMSE (s lišćem) = 0,83 m).

Maltamo i dr. (2014) u svojoj knjizi *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning* donose cjelokupan pregled korištenja zračne LiDAR tehnologije u šumarstvu uključujući povijesni razvoj, primjenu, mogućnosti, primjere validacije modela pomoću terestričkih laserskih skenera, metode segmentacije i klasifikacije stabala te, najvažnije za ovo istraživanje, prednosti i nedostatke zračnog LiDAR skeniranja u šumarstvu. Većina poglavlja ove knjige sadrže detaljan pregled i primjere iz prethodnih istraživanja kompatibilnih s proučavanjem primjene zračne LiDAR tehnologije pri skeniranju urbane zelene površine.

2.2. Važnost i uloga zelenih površina u urbanim prostorima

Li i dr. (2022) proučavaju metode prostorne optimizacije kako bi unaprijedili raspored urbanih zelenih površina. Naglašena je prostorna dimenzija urbanih zelenih površina, odnosno problemi prilikom alokacije i raspoređivanja urbanih zelenih površina uzrokovani nepravdom raspodjelom javnih prostora kojima upravlja vlast. Područje istraživanja nalazi se u kineskom gradu Xuzhou.

Zhou i Wang (2021) usmjerili su se na proučavanje urbanih zelenih površina iz morfološkog pristupa kako bi se unaprijedilo njihovo planiranje, očuvanje i obnavljanje. Ističu važnost urbanih prirodnih staništa održavanje dobrih prostornih odnosa takvog urbanog ekološkog okoliša. Naglašavaju kako su urbane zelene površine jedine prostorne cjeline s prirodnom biološkom aktivnošću i regenerativnim mehanizmom u urbanim ekosustavima te kako samim svojim postojanjem ublažavaju negativne učinke umjetnog urbanog okoliša. Napominju kako je urbana zelena površina (prostor) krovni pojam koji olakšava složenu klasifikaciju različitih oblika urbane zelene površine.

Jalkanen i dr. (2020) proučavaju problem pristupa, dostupnosti zelenim površinama u rastućim i sve zgusnutijim urbanim prostorima. Osmišljavaju novi pristup, odnosno korištenje sustavnog i prostornog prioritiziranja kako bi identificirali urbane zelene površine s najvećim

rekreacijskim potencijalom na temelju njihove vrste i dostupnosti stanovnicima urbanog prostora Helsinkija.

Ayala-Azcárraga i dr. (2019) ističu da je utjecaj urbanih zelenih površina u odnosu sa zdravljem i blagostanjem stanovnika često zanemarivan. Napominju da korištenje urbanih zelenih površina ovisi o njihovoj dostupnosti i kvaliteti i utvrđuju da je jednaka dostupnost zelenih površina svim stanovnicima urbanih područja jedna od glavnih sastavnica u izgradnji društveno održivih gradova.

Kabisch i dr. (2015) naglašavaju pozitivne učinke urbanih zelenih površina i ljudskog života kao: dobrobiti za fizičko i psihičko zdravlje, povećanje cijene nekretnina u blizini urbanih zelenih površina, poticanje društvene interakcije i integracije te okolišne dobrobiti poput hlađenja prostora stvaranjem sjene, smanjenjem buke, pročišćavanjem zraka i poticanjem bioraznolikosti.

Jenerette i dr. (2011) naglašavaju utjecaj ekosustava razvijenih na urbanim zelenim površinama na održivost gradova. Pritom ističu smanjenje onečišćenja zraka, održavanje bioraznolikosti, punjenje vodosnaga, regulacija klime, prevencija urbanih poplava, smanjenje buke te smanjivanje količine ugljikovog dioksida u atmosferi apsorpcijom čestica CO₂.

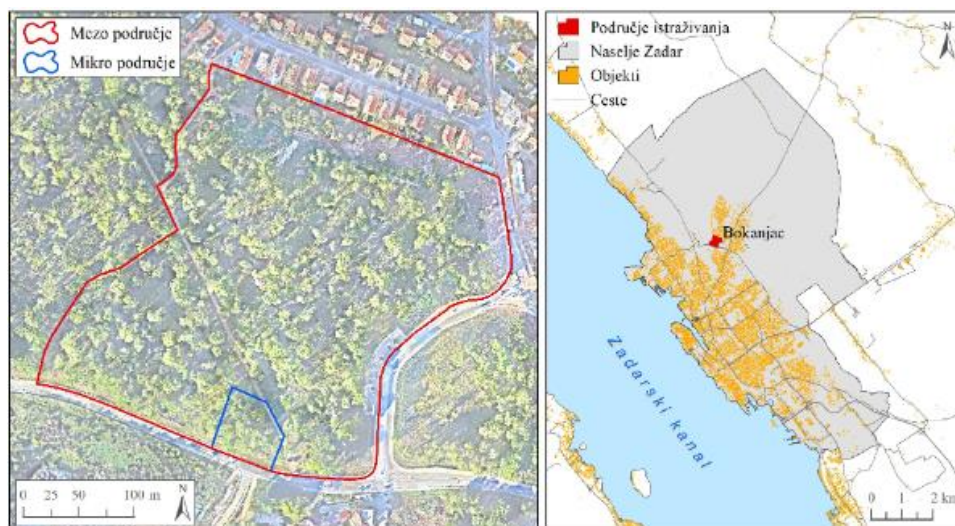
2.3. Primjena višerezolucijskog modeliranja

Modugno i dr. (2022) pomoću višerezolucijskog modeliranja u GIS-u izrađuju model kako bi saznali u kojim dijelovima Nepala i u kojem je dijelu godine pojava klizišta izglednija. Dimenzije prostorne rezolucije koje su koristili u svom istraživanju su vremenska i prostorna.

Ali i dr. (2020) u svom radu koriste višerezolucijsko modeliranje u GIS-u za energetske učinkovitosti građevina kako bi dobili cjelokupan model za analizu, planiranje i podršku donositeljima odluka. Ističu probleme koji se pojavljuju pri harmoniziranju nekoliko skupova različitih podataka.

3. Područje istraživanja

Područje istraživanja nalazi se na sjeverozapadnom dijelu naselja Zadar, u mjesnom odboru Novi Bokanjac (Slika 1). Na području istraživanja nalazi se iznimno gusta struktura zimzelene vegetacije što otežava izdvajanje stabala i predstavlja svojevrstan izazov pri izdvajanju *ground* modela. Područje je trenutno neuređena ploha sastavljena od nekoliko desetaka katastarskih čestica od kojih je dio u vlasništvu grada Zadra, a dio u privatnom vlasništvu. Područje istraživanja obuhvaća dvije razine istraživanja, mezo i mikro razinu. Mezo razina istraživanja određena je prikupljanjem kontrolnih i orijentacijskih točaka te snimanjem ALS-om, dok je mikro razina istraživanja uvjetovana je najmanjim područjem koje je snimano, odnosno stajalištima TLS-a i kretanjem s GeoSLAM-om.



Slika 1 Područje istraživanja (DGU, 2021./2022. - DOF)

Na području istraživanja nalaze se primorske četinjače koje imaju protuerozijsku, hidrološku i vodozaštitnu funkciju, međutim proizvode veliku količinu smole, naslage otpalih iglica i osušenih trava što pogoduje širenju požara (Panda i dr., 2021). Ovu zelenu površinu tvore alepski borovi, alohtona, invazivna vrsta koja ugrožava autohtonu vegetaciju. Primorske četinjače dubokim korijenskim sustavima pomažu pri stabilizaciji obalnih tala i sprječavanja erozije (Dorbić i Španjol, 2018). Osim stabilizacije tala, važne su zbog zaštite od vjetra, održavanja bioraznolikosti, smanjenja količine stakleničkih plinova, estetske i rekreacijske vrijednosti te kao sirovina za građevinarstvo (Dorbić i Španjol, 2018). Upravo rekreacijska i estetska funkcija područja istraživanja, odnosno izrada plana i programa uređenja područja istraživanja je središna aktivnost projekta „Dostupnost javnih usluga i zelenih površina za ranjive skupine (DORAS)“ Uređenje područja istraživanja predviđeno je u prostornom planu.

Cilj projekta DORAS je stvoriti prijedloge, rješenja i izraditi modele uređenja zelenih površina za ranjive skupine.



Slika 2 Dio područja istraživanja

4. Teorijska osnova

4.1. LiDAR tehnologija

Sve širom uporabom geoprostornih tehnologija u svakodnevici i rapidnim razvojem tehnologije, razvijaju se termini koji se smatraju istoznačnicama, iako to nisu. Jedan od primjera poistovjećivanja su pojmovi LASER i LiDAR, međusobno povezani akronimi koji označavaju različite tehnologije. Akronim LiDAR, sastavljen od riječi *Light Detection and Ranging*, označava tehnologiju daljinskog istraživanja koja pomoću penetrirajućeg pulsa laserske zrake mjeri udaljenost i stvara trodimenzionalan model površine istraživanog objekta ili prostora (Dong i Chen, 2018; McManamon, 2019). Tehnologija djeluje na način da senzor emitira lasersku zraku koja dopire do objekta, laserska se zraka zatim odbija se od objekt te se vraća do senzora (Dong i Chen, 2018; McManamon, 2019). Pomoću vremena koje je potrebno da laserska zraka dođe do objekta i vrati se do senzora računa se udaljenost senzora do objekta

(Dong i Chen, 2018; McManamon, 2019). Sustav LiDAR-a često je sastavljen od tri komponente: izvora laserske zrake, skenera te prijarnika (McManamon, 2019). U početku se LiDAR tehnologija, odnosno laserska zraka razvijala u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra, zatim u bliskom infracrvenom (engl. *near infrared*) i termalnom infracrvenom (engl. *thermal infrared*), dok se danas mnogi sustavi LiDAR tehnologije razvijaju u kratkovalnom infracrvenom (engl. *short-wave infrared*) dijelu elektromagnetskog spektra (McManamon, 2019). LiDAR tehnologija može koristiti lasere s pulsirajućim i kontinuiranim valovima (Dong i Chen, 2018). Pulsirajući laser odašilje energiju veoma kratkog trajanja i detektira domet pulsa na temelju primljenih signala, dok laseri s kontinuiranim valom detektiraju raspon na temelju fazne razlike između odaslanih i primljenih signala (Dong i Chen, 2018). Prilikom skeniranja Zemljine površine, češće se koriste pulsirajući laseri (Dong i Chen, 2018) te je takav oblik lasera korišten prilikom terenskih istraživanja za ovaj diplomski rad. Dong i Chen (2018) kao najkorisniju karakteristiku LiDAR tehnologije ističu mogućnost prodiranja zrake lasera kroz rupe u krošnji i mogućnost mjerenja strukture krošnje te reljefa ispod krošnje. Podatci dobiveni LiDAR tehnologijom najzahtjevniji su za obradu, međutim odlikuje ih visoka razina točnosti (Šiljeg, 2018; McManamon, 2019).

LiDAR tehnologija može biti terestička, zračna i astronomska (Dong i Chen, 2018; McManamon, 2019) te se u specifičnim istraživanjima može koristiti nekoliko oblika LiDAR tehnologija.

Nakon X, Y i Z koordinata, jedna od najvažnijih informacija za laserske guste oblake točaka je klasifikacija koja omogućuje daljnje kompleksne analize LiDAR podataka (Dong i Chen, 2018). U ovom će istraživanju gusti obak točaka biti klasificiran na nekoliko osnovnih klasa, od kojih je za mezo razinu istraživanja najvažnija klasa tlo (engl. *Ground*). Izdvajanje navedene klase iz gustog oblaka točaka pruža mogućnost izrade digitalnog modela reljefa ispod krošnje. U procesu obrade podataka, izdvajanje *ground* modela je često prvi i najvažniji korak pri klasificiranju gustog oblaka točaka (Dong i Chen, 2018). U Tablici 1 prikazane su najčešće klase koje se koriste pri klasifikaciji gustog oblaka točaka.

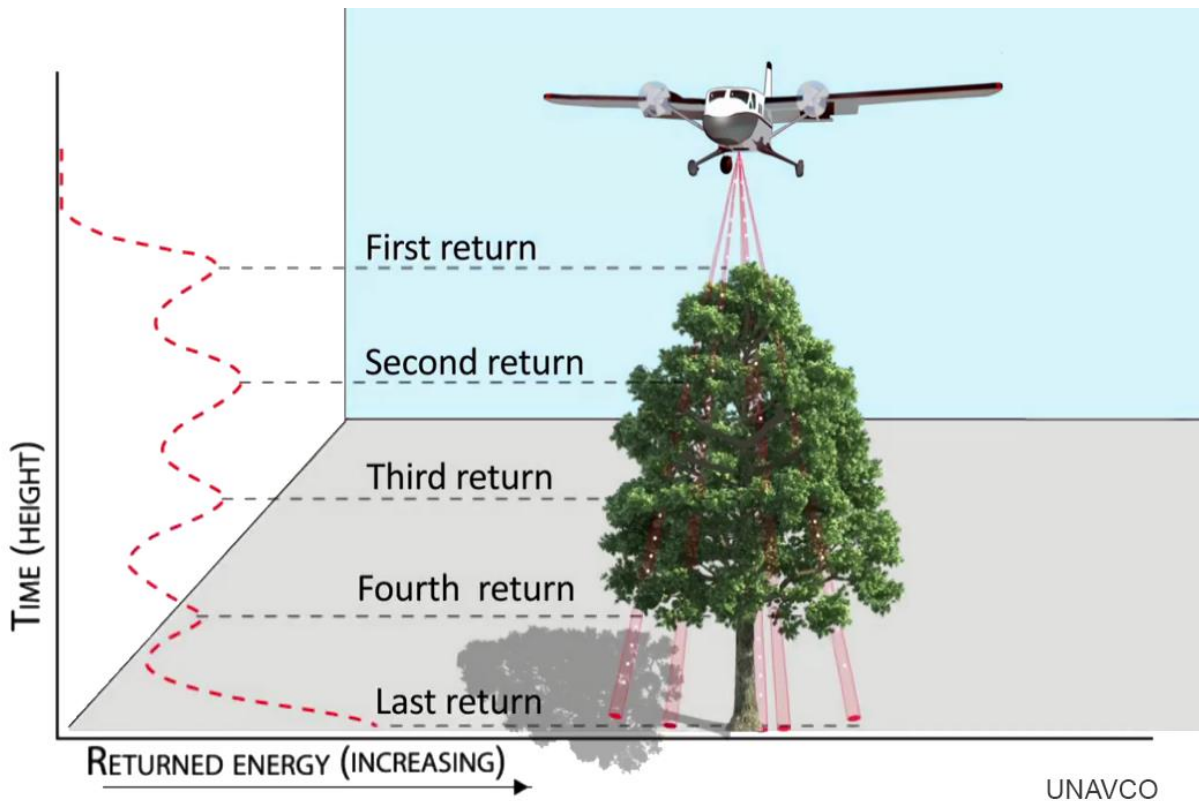
Tablica 1 Osnovne klase LiDAR gustog oblaka točaka (Dong i Chen, 2018)

ASPRS Standard Classes for Point Data Record Formats 6–10 in LAS 1.4	
Classification Value	Meaning
0	Created, never classified
1	Unclassified
2	Ground
3	Low vegetation
4	Medium vegetation
5	High vegetation
6	Building
7	Low point (noise)
8	Reserved
9	Water
10	Rail
11	Road surface
12	Reserved
13	Wire—guard (Shield)
14	Wire—conductor (Phase)
15	Transmission tower
16	Wire—structure connector (e.g., Insulator)
17	Bridge deck
18	High noise
19–63	Reserved
64–255	User definable

4.1.1. Zračni LiDAR

Postoji nekoliko sinonima za zračni LiDAR (engl. Airborne LiDAR), a jedan od najčešćih je zračno lasersko skeniranje (engl. Airborne Laser Scanning), dok se pojavljuju i sinonimi laserski radar (engl. Laser Radar) i (engl. Airborne Laser Swath Mapping) (Dong i Chen, 2018). Tek 1990-ih skeniranje reljefa zračnom LiDAR tehnologijom postaje moguće zbog razvoja globalnog sustava pozicioniranja visoke točnosti i inercijalnog mjernog sustava (Dong i Chen, 2018; Shan i Toth, 2018). U sustavima zračnog LiDAR-a koriste se laseri valne duljine od 1000 do 1600 nm. Tipičan sustav zračnog LiDAR-a sastoji se od laserskog skenera, inercijalnog mjernog sustava koji sustavu omogućava orijentaciju (yaw, pitch, roll) i sustava za pozicioniranje (Dong i Chen, 2018). Princip rada zračnog LiDAR-a je da se pozicija, visina i orijentacija bespilotne letjelice te skenera koji je montiran na njoj kontinuirano tijekom leta mjeri inercijalnim mjernim sustavom i sustavom za pozicioniranje koji je povezan s baznom stanicom na Zemlji (Shan i Toth, 2018). Istovremeno, gusti niz laserskih zraka prodire do

površine Zemlje te se odbija do prijamnika mjereći kut i udaljenost niza odbijenih laserskih zraka što kombinacijom ova dva sustava, rezultira određivanjem vrijednosti visine na poznatim pozicijama koje imaju izmjerene X, Y i Z koordinate (Shan i Toth, 2018). Takav gusti, trodimenzionalni oblak točaka s izmjerenim koordinatama omogućuje izradu digitalnih modela reljefa (Shan i Toth, 2018).



Slika 3 Prikaz povratnih signala laserske zrake (URL2)

Dio signala laserske zrake dolaskom do vrha krošnje se odbija i vraća do prijamnika ili je raspršen, a ostatak se probija kroz krošnju (Dong i Chen, 2018). Preostala energija se može reflektirati o krošnju, grane ili deblo na nižim visinama te se vratiti do prijamnika. Položaj i intenzitet reflektirane energije laserske zrake povezani su s vertikalnom i horizontalnom strukturom krošnje. Laserski podaci opisuju se kao revolucionarni jer mogu brzo i izravno pružiti informacije o vertikalnoj strukturi vegetacije te su pritom osjetljiviji na varijacije u vertikalnoj strukturi vegetacije od ostalih optičkih i radarskih tehnologija (Dong i Chen, 2018). Na Slici 3 prikazani su povratni signali laserske zrake te su grafički prikazani količina energije povratnog signala i vrijeme koje je potrebno svakom povratnom signalu laserske zrake pri povratku do prijamnika.

4.1.2. Terestrički LiDAR

Terestrički LiDAR namijenjen je za prikupljanje podataka sa Zemlje o objektima koji se nalaze u vidnom polju terestričkog laserskog skenera fiksiranog na određenom mjestu (Shan i Toth, 2018). Oni djeluju na način da mjere udaljenost te horizontalni i vertikalni kut između skenera i objekta istraživanja pomoću laserskih zraka (Krok i dr., 2020). Terestričko lasersko skeniranje provodi se sa stacionarnog položaja na određenim mjestima s tronošcem na koji je postavljen skener (Krok i dr., 2020). Tijekom rada, skener registrira sliku okoline rotirajući se oko svoje osi te određuje X, Y i Z koordinate milijuna mjerenih točaka koje čine oblak točaka (Krok i dr., 2020). Osim mjerenja koordinata točaka, terestrički laserski skeneri bilježe i intenzitet odbijenog signala, odnosno vrijednost energije povratne laserske zrake koja je reflektirana od objekta (Krok i dr., 2020). Točnost terestričkih laserskih skenera ovisi o uvjetima skeniranja, odnosno o konfiguraciji skeniranja, geometriji promatranih objekata te reflektivnosti promatranih objekata (Schmitz i dr., 2019).

Postoje dvije glavne skupine terestričkih laserskih skenera, pulsni ili ToF (Time of Flight) i skeneri s faznim pomakom (Krok i dr., 2020.). Skeneri s faznim pomakom bi trebali biti točniji nego pulsni skeneri, ali podaci dobiveni skenerima s faznim pomakom su često podložni interferencijama, šumom u podacima (Krok i dr. 2020.). Skeneri s faznim pomakom imaju manji raspon skeniranja od ToF skenera te je velika prednost ToF skenera mogućnost detektiranja višestrukih refleksija laserske zrake (Krok i dr. 2020.)

Terestrički laserski skeneri nemaju uniformnu udaljenost s koje skeniranje treba biti obavljeno te, za razliku od zračnih laserskih skenera, mogu uspješno prikupiti podatke o strmim područjima (Telling i dr., 2017). Kraća udaljenost od promatranih objekata, pojava ili procesa ubrzava izradu trodimenzionalnih modela visoke točnosti i rezolucije te omogućava skeniranje u zatvorenim i gusto naseljenim prostorima u kojima je mogućnost korištenja zračnog LiDAR-a ograničena (Telling i dr., 2017). Za razliku od zračnih LiDAR-a, terestrički LiDAR prikuplja podatke veće gustoće što omogućuje izradu detaljnijeg i točnijeg trodimenzionalnog modela (Telling i dr., 2017). Međutim, s obzirom na razinu detalja i veličinu područja istraživanja terestrički i zračni laserski skeneri imaju različitu primjenu. Stoga odabir optimalne metode laserskog skeniranja ovisi o području i svrsi istraživanja. No, terestrički i zračni laserski skener mogu se koristiti u istraživanjima kao međusobna nadopuna.

4.1.3. GeoSLAM tehnologija

GeoSLAM tehnologija oblik je prijenosnih sustava za prikupljanje podataka o Zemljinoj površini (engl. mobile mapping system). Većina MMS-ova oslanja se na LiDAR tehnologiju, a često u sebi sadrže i fotografske kamere kako bi, uz LiDAR podatke, bila prikupljena i informacija o bojama, RGB snimka promatranog područja (Nocerino i dr., 2017). MMS uređaji se mogu montirati na vozila kako bi se snimale velike površine, ali i na ruksake te prikolice ili ih promatrač može držati u ruci dok se podatci prikupljaju (Nocerino i dr., 2017).

Uređaj koji je korišten za ovo istraživanje je GeoSLAM ZEB REVO. Navedeni uređaj unaprijeđena je inačica uređaja ZEB1, komercijalne inačice ZEBdee 3D senzora koji je razvio Autonomous Systems Laboratory, CSIRO ICT Centar u Brisbaneu (Nocerino i dr., 2017).

Uređaj GeoSLAM ZEB-REVO sadrži infracrveni laserski skener (UTM-30LX) s IMU sustavom bez GNSS prijmnika i RGB kamere (Nocerino i dr., 2017; Sammartano i Spano, 2018). Laserski skener radi na već pojašnjenom principu vremena potrebnog da laserska zraka dođe do promatranog objekta i vrati se nazad do prijmnika. Laserski izvor skenira polukružno polje od 270°, tako da se koordinate snimljenih točaka računaju pomoću izmjerene udaljenosti i kutnog pomaka laserske zrake (Nocerino i dr., 2017). IMU sustav montiran je ispod laserskog skenera i sastoji se od žiroskopa i akcelerometra koji omogućuju mjerenje kutnih brzina i linearnih ubrzanja koja, kombinirana s laserskim podacima, omogućuju procjenu putanje senzora (Nocerino i dr., 2017). Dvodimenzionalni laserski profili usklađeni su pomoću trodimenzionalnog SLAM (engl. Simultaneous Localization and Mapping) pristupa koji procjenjuje šest stupnjeva slobode (6DoF) glave senzora i stvara trodimenzionalan oblak točaka (Nocerino i dr., 2017). Šest stupnjeva slobode podrazumijeva određen broj osi kroz koje se krutno tijelo može slobodno kretati trodimenzionalnim prostorom, odnosno međusobno neovisne parametre koji definiraju mehanički sustav (URL3). Tijelo se može kretati u tri dimenzije, po X, Y i Z osi, ali i promijeniti orijentaciju rotacijom između njih (URL3). Translacijski i rotacijski parametri čine šest stupnjeva slobode. Translacijski parametri označavaju kretanje po X, Y i Z osi: kretanje gore – dolje po Y osi (engl. heaving), kretanje naprijed nazad po X osi (engl. surging) te kretanje lijevo desno po Z osi (engl. swaying) (URL3). Rotacijski parametri označavaju kretanje između dvije osi: kretanje između X i Y osi (engl. pitch), kretanje između X i Z osi (engl. yaw) i kretanje između Z i Y osi (engl. roll) (URL3). Šest stupnjeva slobode prikazano je na Slici 4.



Slika 4 Šest stupnjeva slobode - 6DoF (URL4)

Prikupljanje podataka Geo SLAM tehnologijom počinje inicijalizacijom tijekom koje je uređaj postavljen horizontalno u mjestu kako bi se definirao lokalni koordinatni sustav (Nocerino i dr., 2017). Nakon inicijalizacije kreće prikupljanje podataka u području istraživanja (Nocerino i dr., 2017). Kako bi prikupljanje podataka bilo uspješno, početak i kraj putanje prikupljanja podataka mora završiti na istoj poziciji (Nocerino i dr., 2017).

4.2. Zelene površine u urbanim područjima

U sveprisutnom širenju urbanih područja, urbane zelene površine, kao jedan od ključnih elemenata održavanja kvalitete života stanovništva urbanih područja, postaju sve važnije pri urbanom planiranju (Šiljeg i dr., 2018). Postoje višestruke definicije koje opisuju što su urbane zelene površine. Za Bilgili i Gökyer (2012) su urbane zelene površine prirodni i polu-prirodni prostori koji su ljudskim utjecajem pretvoreni u urbani prostor. Baycan i dr. (2002) urbane zelene površine definiraju kao javne i privatne vanjske prostore u urbanim područjima primarno prekrivene vegetacijom koji potiču stanovništvo na aktivnu ili pasivnu rekreacijsku aktivnost ili imaju indirektan pozitivan utjecaj na urbani okoliš dostupan svim korisnicima. Urbana zelena površina definira se kao otvoreni, javni ili privatni prostor u urbanom okolišu, većinom prekriven vegetacijom te direktno ili indirektno dostupan urbanom stanovništvu (Zadar Nova, 2016.). Prema ANGSt (Accessible Natural Green Space Standard) klasifikaciji, zelene se površine mogu podijeliti na zelene i prirodne zelene površine (Šiljeg i dr., 2018). Nedostatak zelenih površina u urbanim područjima uzrokuje veću apsorpciju topline na asfaltranim

prostorima što rezultira povišenjem temperature, smanjenjem relativne vlažnosti zraka, promjenama u hidrološkom ciklusu, proširenjem toplinskih otoka, zagrijavanjem tla i modifikacijom provjetravanja (Pereira Junior i dr., 2023). Utjecaj urbanih zelenih površina širi se i na prostor koji se nalazi u njihovoj neposrednoj blizini. Taj se fenomen naziva efekt rashlađivanja urbanih zelenih površina (Aram i dr., 2019). Urbane zelene površine su kombinacija trave, drveća i vegetacije zbog kojih znatno utječu na površinsku temperaturu tla (Vargas-Hernández i dr., 2023) i u okolnim prostorima zbog navedenog efekta rashlađivanja. Osim navedenih posljedica, nedostatak harmonije čovjeka i urbanog okoliša zbog nedostatka urbanih zelenih površina, štetan je za zdravlje stanovništva, posebice zbog povećanja čestica ugljikovog dioksida (CO₂) u atmosferi (Bressane i dr., 2016). Kabisch i dr. (2015) ističu pozitivne učinke urbanih zelenih površina kao što je: dobrobit za fizičko i psihičko zdravlje stanovništva, ukrašavanje prostora, povećanje rekreacijskih mogućnosti i poboljšanje kvalitete života stanovništva. Urbane zelene površine utječu i na prosječno trajanje života, smanjenje kardiovaskularnih bolesti, kvalitetu sna i oporavak od bolesti (Pereira Junior i dr., 2023). Kao pozitivan učinak urbanih zelenih površina istaknuto je i smanjenje razine buke, stvaranje sjene za vozila i pješake te očuvanje staništa i bioraznolikosti (Kong i dr., 2010; Sandström i dr., 2006).

Prema Copernicus Corine Land Cover klasifikaciji, urbana zelena površina definira se kao područje prekriveno vegetacijom unutar ili djelomično obuhvaćeno urbanim prostorom. Taj je prostor namijenjen povećavanju zelenih površina unutar urbanih područja i većinom ima rekreativni ili ukrasni karakter te bi, u pravilu, trebao biti dostupan javnosti (URL1). Klasa urbanih zelenih površina može se primijeniti za: parkove unutar naselja bez ili s javnim pristupom, dekorativne vrtove, zelene površine dvoraca, botaničke i zoološke parkove unutar naselja ili u rubnom pojasu naselja, gradske trgove na kojima se nalazi zelenilo, unutarnje prostore gradskih blokova, groblja s vegetacijom unutar ili neposredno uz naselja, kao i područja prekrivena vegetacijom koja se potencijalno mogu koristiti u rekreacijske svrhe, čak i ako im to nije glavna namjena – poput šuma unutar urbanog prostora (URL1).

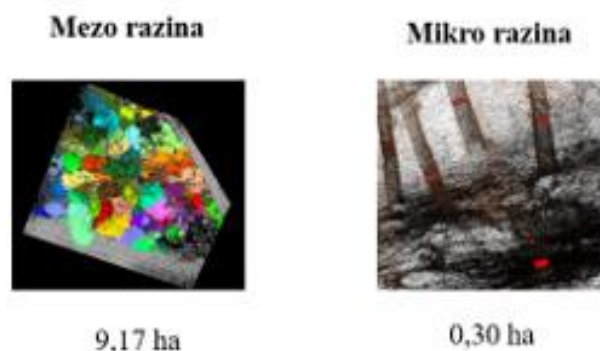
Pereira Junior i dr. (2023) urbane zelene površine klasificiraju u tri kategorije: urbane zelene površine dostupne javnosti, privatne urbane zelene površine i urbane zelene površine koje se nalaze uz prometnice. Vargas-Hernández i dr. (2023) navode da urbane zelene površine imaju različite oblike vanjskih prostora, parkova i vrtova i nabrajaju tipove urbanih zelenih površina ko formalne i neformalne zelene površine, prirodne zelene površine, prostore namijenjene djeci i sportska igrališta. Za Roy i dr. (2012) u urbane zelene površine mogu se ubrojiti javni parkovi,

rezervati, sportski tereni, potoci, obale rijeka i druga obalna područja, zelene staze, šetnice i staze, zajednički zajednički vrtovi, ulično drveće i grmlje, područja očuvanja prirode i manje konvencionalni prostori kao što su zeleni zidovi, zelene uličice i groblja. Kvaliteta urbanih zelenih površina mjeri se kriterijima kao što su infrastruktura, vegetacija, dostupnost, sigurnost i opremljenost (Vargas-Hernández i dr., 2023).

4.3. Višerezolucijsko modeliranje

Prema Domazetović (2021) višerezolucijsko modeliranje podrazumijeva istraživački pristup koji se zasniva na primjeni različitih geoprostornih tehnologija kako bi se proučio neki proces ili pojava unutar nekoliko istraživačkih razina, različitim prostornim obuhvatom i rezolucijama (prostornom, ekonomskom, spektalnom i vremenskom). Osnovu višerezolucijskog modeliranja urbanih zelenih površina čine geoprostorne tehnologije, skup tehnologija koje pružaju mogućnost modeliranja kompleksnih procesa i oblika različite razine detaljnosti ovisno o svrsi istraživanja (Šiljeg, 2013). Ranija istraživanja koja promatraju urbane zelene površine pomoću LiDAR tehnologija većinom obuhvaćaju jednu razinu istraživanja, primjerice dostupnost urbanim zelenim površinama, utjecaj urbanih zelenih površina na temperaturu, prostornu distribuciju urbanih zelenih površina, kvantifikaciju vegetacije u trodimenzionalnom prostoru i slično. S druge strane, višerezolucijsko modeliranje omogućuje sveobuhvatnije i sustavnije proučavanje različitih faktora i elemenata istraživanja prilikom kojeg se postiže maksimalna moguća razina detaljnosti istraživanja unutar svake pojedine istraživačke razine (Brasington i dr. 2012, Ferrer i dr. 2017, Domazetović, 2021). Domazetović (2021) u svojoj doktorskoj disertaciji koristi četiri razine višerezolucijskog modeliranja, makro, mezo, mikro i nano razinu istraživanja prilikom proučavanja erozije tla.

Izdvojene značajke višerezolucijskog modeliranja važne za ovo istraživanje su hijerarhijska struktura istraživanja, međusobna povezanost razina istraživanja, razvijanje primjenjivosti modela, validacija modela svake razine istraživanja te određivanje parametara za svaku od razina. U ovom će se diplomskom radu koristiti dvije razine istraživanja mezo i mikro razina istraživanja, unutar koji se koriste različite LiDAR tehnologije različite razine detaljnosti ovisne o razinama istraživanja.



Slika 5 Primjer višerezolucijskog modeliranja

5. Metodologija istraživanja

S obzirom na to da višerezolucijsko modeliranje podrazumijeva modeliranje na više razina, rad će biti podijeljen na dvije razine: mezo i mikro razinu. Mezo razina će porazumijevati izdvajanje *ground* modela te će se uspoređivati modeli dobiveni ALS-om, TLS-om i GeoSLAM-om, dok će mikro razina podrazumijevati izdvajanje pojedinih stabala i procjenu debljine debla stabala. Metodologija se generalno može podijeliti u dvije faze: terensko prikupljanje podataka i obrada podataka primjenom različitih softverskih rješenja i alata.

5.1. Terensko prikupljanje podataka

Terensko prikupljanje podatka može se podijeliti na četiri dijela:

1. Prikupljanje orijentacijskih i kontrolnih točaka,
2. Prikupljanje podataka zračnim laserskim skenerom,
3. Prikupljanje podataka terestričkim laserskim skenerom i
4. Prikupljanje podataka GeoSLAM-om.

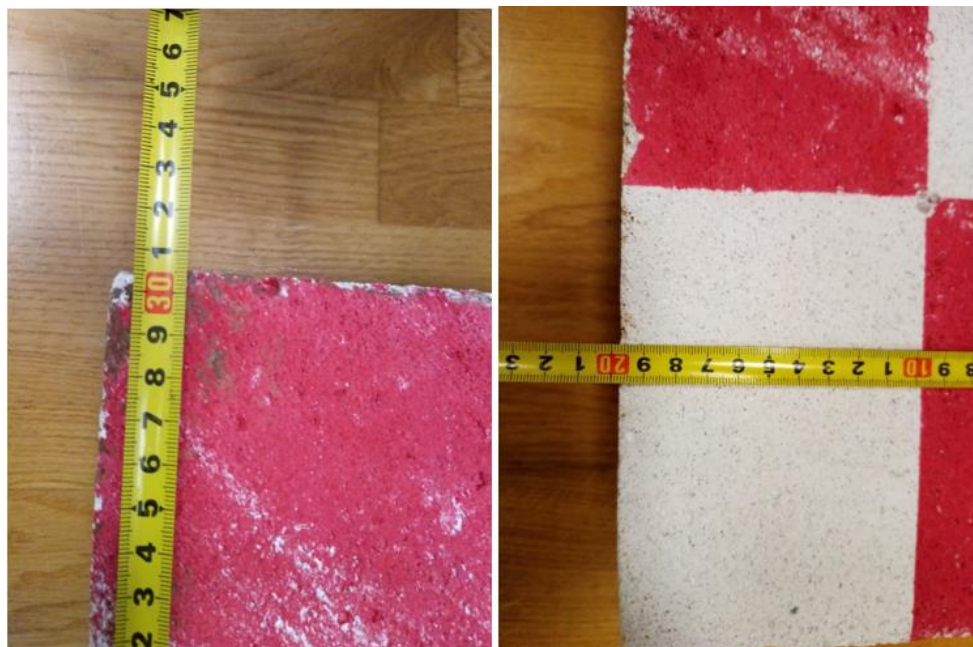
5.1.1. Prikupljanje kontrolnih i orijentacijskih točaka

Kontrolne i orijentacijske točke neizostavan su dio terenskih istraživanja zbog ključne uloge u određivanju položaja, kalibraciji, pozicioniranju, izradi digitalnih modela reljefa i površina, procjeni kvalitete i kontrole podataka te se mogu iskoristiti za korekciju pogrešaka korištenih sustava. Kontrolne točke u ovom se istraživanju koriste za ocjenjivanje točnosti gustog oblaka točaka ALS-a te za ocjenjivanje točnosti generiranih rasterskih modela iz tri LiDAR sustava. Orijetacijske točke upotrebljavaju se za orijentaciju i usklađivanje gustih oblaka točaka LiDAR sustava. Orijetacijske i kontrolne točke prikupljane su dva puta: 28. listopada 2022. godine i 19. svibnja 2023. godine.



Slika 6 Označavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka

Točke su označene crvenom bojom na bijelim siporeks blokovima kako bi se kontrastom razlikovale od podloge i kako bi ih bilo lakše detektirati tijekom obrade podataka. Orijentacijske točke prikupljane su Trimble R12i RTK geodetskim GNSS-om prikazanim na Slici 8, a način označavanja orijentacijskih i kontrolnih točaka na Slici 6. Siporeks blok korišten je za ocjenjivanje relativne točnosti svake od tehnologija. Stvarne dimenzije gornje plohe siporeks bloka su 19,75 x 30,45 cm. Površina gornje plohe siporeksa stoga iznosi 601,3875 cm.



Slika 7 Dimenzije siporeks bloka



Slika 8 Prikupljanje OT i KT s Trimble R12i RTK GNSS prijemnik

Tablica 2 Tehničke specifikacije Trimble 12i RTK GNSS prijemnik

Parametar	Vrijednost parametra
GNSS frekvencija	GPS: L1C, L1C/A, L2C, L2E, L5 GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS): L1C/A, L5 Galileo: E1, E5A, E5B, E5 AltBOC, E62 BeiDou: B1, B1C, B2, B2A, B2B, B3 QZSS: L1C/A, L1S, L1C, L2C, L5, L6
Točnost pozicioniranja (High-Precision Static) (mm)	Vertikalno: 3.5 + 0.4 ppm RMS; Horizontalno: 3 + 0.1 ppm RMS
Točnost pozicioniranja (Static and Fast Static) (mm)	Vertikalno: 5 + 0.5 ppm RMS; Horizontalno: 3 + 0.5 ppm RMS
Točnost pozicioniranja (RTK) (mm)	Vertikalno: 15 + 1 ppm RMS; Horizontalno: 8 + 1 ppm
Brzina ažuriranja pozicioniranja (Hz)	1, 2, 5, 10 and 20
Fizičke karakteristike (cm)	11,9 x 13,6
Težina (kg)	1,12
Raspon radne temperature (°)	-20 ° do 55 ° C

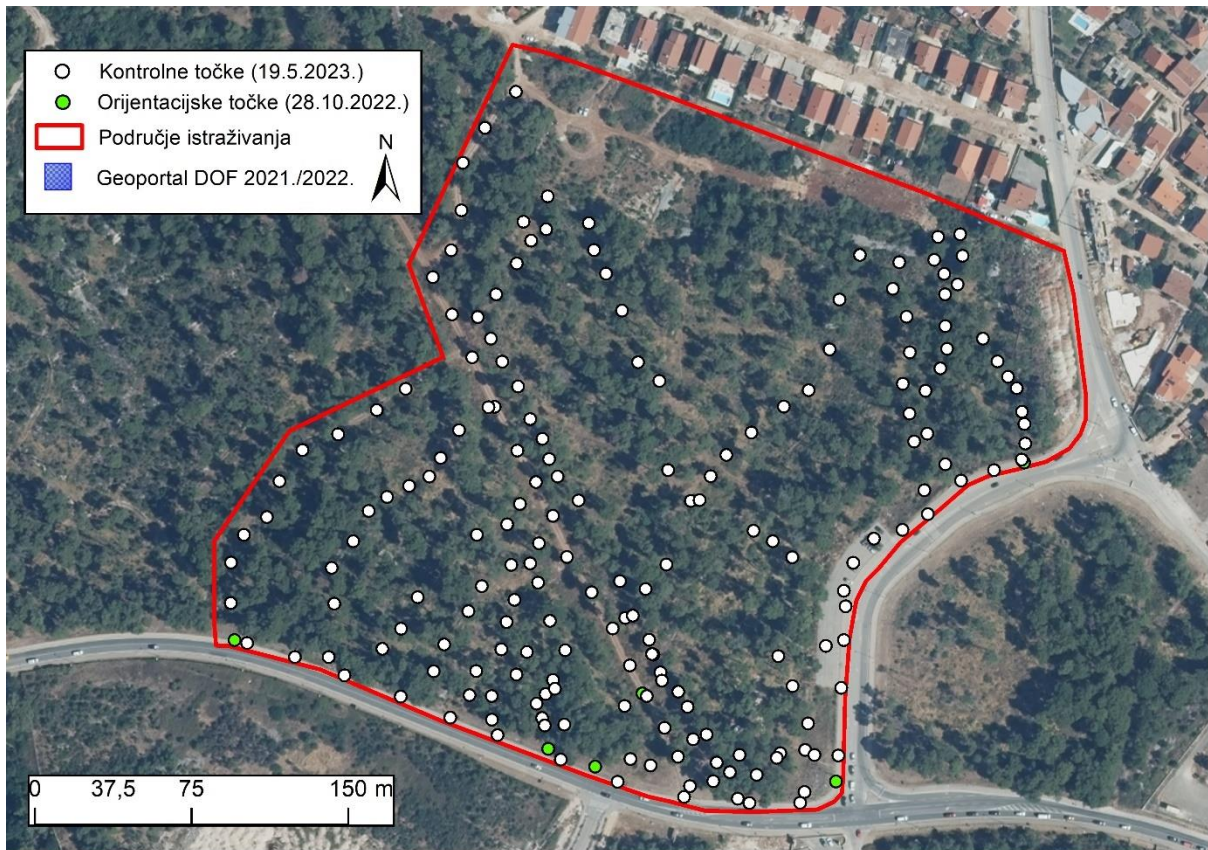
Izvor: (Trimble, 2021)

U listopadu 2022. godine prikupljeno je devet orijentacijskih točaka koje su poslužile za orijentaciju zračnog, terestričkog laserskog skenera i GeoSLAM-a.

Tablica 3 Koordinate prikupljenih orijentacijskih točaka u HTRS96 koordinatnom sustavu

Naziv	X (m)	Y (m)	Z (m)
OT1	4889562.717	398876.4423	67.15339
OT2	4889571.689	398854.1403	66.74006
OT3	4889562.714	398876.4502	67.14948
OT4	4889562.713	398876.4478	67.15498
OT5	4889571.676	398854.1405	66.74688
OT6	4889626.549	398704.7146	63.17612
OT7	4889597.361	398899.7089	67.61661
OT8	4889553.453	398991.8497	69.51386
OT9	4889704.724	399084.6508	71.95606

Kontrolne točke za validaciju podataka prikupljenih zračnim LiDAR-om prikupljene su 18. svibnja 2023. godine. Prikupljeno je 190 kontrolnih točaka, međutim signal je, zbog guste krošnje drveća, izgubljen pri prikupljanju četiri točake. Nadalje, sedam orijentacijskih točaka nisu prepoznate u gustom oblaku točaka ALS-a i stoga nisu korištene pri validaciji ground modela te je korišteno 179 točaka (Slika 9).



Slika 9 Orijehtacijske i kontrolne točke (DOF 2021./2022.)

5.1.2. Prikupljanje podataka zračnim LiDAR-om

Podatci su zračnim LiDAR-om, DJI Matrice M300 RTK i Zenmuse L1 LiDAR-om (Slika 10) prikupljeni 28. listopada 2022. godine od 15:36 do 16:44 sati.



Slika 10 DJI M300 RTK i Zenmuse L1 LiDAR (URL5)

Područje je snimljeno double grid misijom, sjever-jug i istok-zapad (Slika 11). Zbog gubitka signala je misija istok-zapad podijeljena na dvije podmisije zbog čega je cijelo područje snimljeno s tri misije. Signal sa bespilotnom letjelicom je izgubljen zbog visokih krošnji primorskih četinjača, veličine područja koje je snimano te visine leta.



Slika 11 Skica Double Grid misije (URL6)

Za sve tri misije odabrani su jednaki korisničko definirani parametri. Površina područja koje je snimljeno iznosi $275\,594\text{ m}^2$. *Point Cloud Density* ovisi o visini leta, preklapanjima, brzini leta i metodi snimanja (DJI Terra, 2023). Ključan je parametar izlaznih rezultata snimanja jer ovisi o zahtjevima samog projekta te će brzina leta i drugi parametri ovisiti o njemu. Ground Sampling Distance definira se kao udaljenost između središta dva susjedna piksela izmjerena na zemlji te niža vrijednost označava bolji rezultat, odnosno višu prostornu rezoluciju (DJI Terra, 2023). Visina leta, u ovom slučaju (engl. Above Ground Level) iznosila je 50 m, dok je za Target Surface to Takeoff Point odabrana je nula. Nula je zadana opcija, međutim taj se parametar može promijeniti ako postoji velika razlika u visini promatrane površine i točke polijetanja. Brzina polijetanja (engl. Takeoff Speed) iznosila je 10 m/s, a brzina leta 5,9 m/s. Bočni prijeklop (engl. Side Overlap) iznosio je 20%, dok je prednji prijeklop (engl. Front Overlap) iznosio 70%.



Slika 12 Misija sjever-jug prikazana na kontroloru bespilotne letjelice



Slika 13 Misija istok-zapad prikazana na kontroloru bespilotne letjelice

Kako bi se izbjegao gubitak signala prilikom snimanja urbane zelene površine, za drugu podmisiju istok-zapad odabrano stajalište koje se nalazilo na višekatnoj nedovršenoj zgradi prikazanoj na Slici 14.



Slika 14 Napuštena višekratna zgrada

Podaci su prikupljeni bespilotnom letjelicom DJI Matrice M300 i L1 senzorom. Osim prikupljenih LiDAR podataka, DJI Matrice M300 ima ugrađenu i RGB kameru od 23 megapiksela koja prikuplja fotogrametrijske podatke. Fotografije su u .jpg formatu i primarno služe za kolorizaciju gustog oblaka točaka prikupljenog L1 senzorom.

Tablica 4 Tehničke specifikacije bespilotne letjelice DJI M300 RTK

Parametar	Vrijednost parametra
Dimenzije (rasklopljeno) (mm)	810×670×430 (L×W×H)
Dimenzije (sklopljeno) (mm)	430×420×430 (L×W×H)
Broj baterija	2
Težina (s dvije TB60 baterije) (kg)	6,3 (s dvije TB60 baterije)
Maksimalni nosivost (s dvije TB60 baterije) (kg)	9
Točnost leta (Vision System)	Vertikalno: ±0.1 m; Horizontalno: ±0.3 m
Točnost leta (P-način s GPS-om)	Vertikalno: ±0.5 m; Horizontalno: ±1.5 m

Točnost leta (D-RTK , M300 RTK)	Vertikalno: ± 0.1 m; Horizontalno: ± 0.1 m
Maksimalna kutna brzina ($^{\circ}/s$)	Pitch: 300, Yaw: 100
Maksimalni kut nagiba ($^{\circ}$)	30
Maksimalna brzina uzlijetanja (m/s)	S mode: 6; P mode: 5
Maksimalna brzina vertikalnog slijetanja (m/s)	S mode: 5; P mode: 4
Maksimalna brzina slijetanja (m/s)	S mode: 7
Maksimalna brzina (m/s)	S mode: 23; P mode: 17
Maksimalna visina rada letjelice (m)	5000 (s 2110 propelerima) / 7000 (s 2195 propelerima)
Maksimalni otpor prema vjetru (m/s)	12
Maksimalno vrijeme leta (min)	55
GNSS	GPS + GLONASS + BeiDou + Galileo
Radna temperatura	-20 do 50
Baterija	
Model	TB60
Kapacitet (mAh)	5935
Napon (V)	52.8
Tip baterije	LiPo 12S
Energija (Wh)	274
Težina (kg)	1,35
Radna temperatura ($^{\circ}C$)	-20 do 50
Temperatura skladištenja ($^{\circ}C$)	22 do 30
Temperatura punjenja ($^{\circ}C$)	-20 do 40
Maksimalna snaga punjenja (V)	220
Daljinski upravljač	
Radna frekvencija (GHz)	2.4000-2.4835; 5.725-5.850
Maksimalna udaljenost odašiljanja (km)	NCC/FCC: 15; CE/MIC: 8; SRRC: 8
Napajanje (V)	12 V
Napon (max.) (V)	7,60
USB napajanje (V)	12V
Radna temperatura ($^{\circ}C$)	-20 do 50

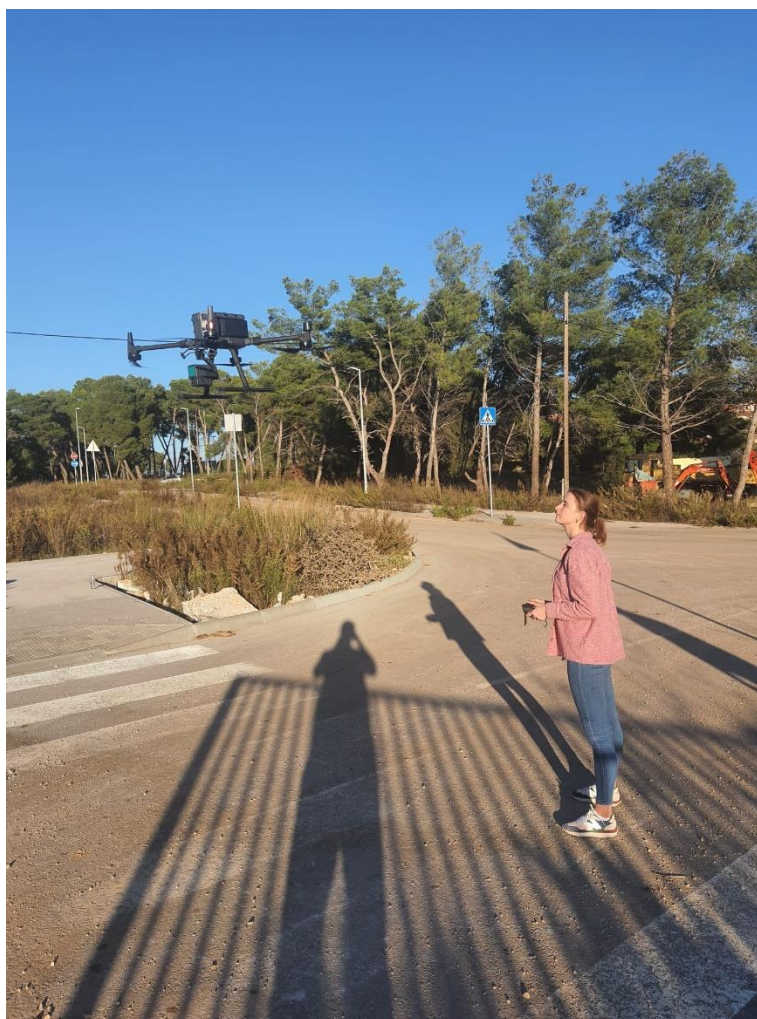
Izvor: (DJI, 2021)

Tablica 5 Specifikacije L1 LiDAR-a

Parametar	Vrijednost parametra
Dimenzije (rasklopljeno) (mm)	152×110×16
Težina (s dvije TB60 baterije) (g)	930±10
Snaga (W)	30 W do 60 W
Podržane bespilotne letjelice	Matrice 300 RTK
Radna temperatura ($^{\circ}C$)	-20 do 50
Temperatura skladištenja ($^{\circ}C$)	-20 do 60

Brzina prikupljanja podataka (točaka/s)	Single return: 240 000; Multiple return: 480 000
Sustavna pouzdanost (cm) na 50 m (RMS)	Horizontalna: 5 cm; Vertikalna: 10 cm
Pouzdanost dometa (cm) na 100 m (RMS)	3 cm
Maksimalan broj povratnih signala	3

Izvor: (DJI, 2021)



Slika 15 Prikupljanje podataka ALS-om 28. listopada 2022. godine

Kako bi se povećala točnost gustog oblaka točaka prikupljenih ALS-om, izvršena je naknadna obrada podataka pomoću korekcijskih podataka koji su preuzeti s web stranice <https://gnss.cropos.hr/default.aspx>.

5.1.3. Prikupljanje podataka terestričkim LiDAR-om

Prije samog terestričkog laserskog skeniranja Faro Focus-om M70, ploha je pregledana i odabrano je područje koje će biti skenirano (Slika 16).



Slika 16 Terestrički laserski skener Faro Focus (URL7)

Terestričko lasersko skeniranje odabrane plohe provedeno je 28. listopada 2022. godine. Snimanje je planirano i provedeno prateći šumarsku praksu snimanja šume s centralnim stajalištem i nekoliko cirkularnih stajališta na osnovnim stranama svijeta (Jurjević i dr., 2021). Odabrani uzorak skeniranja je stoga definiran s nekoliko stajališta na različitoj poziciji unutar odabrane plohe.



Slika 17 Terestičko lasersko skeniranje

Na Slici 17 prikazano je jedno od stajališta terestričkog laserskog skenera tijekom terenskog istraživanja. Plavi krug omeđuje bijele referentne sfere koje omogućuju povezivanje više oblaka točaka koji su skenirani na različitim stajališta kako bi se dobio jedan oblik točaka. Tijekom predobrade, potrebno je napraviti registraciju sfera kako bi se različiti skenovi spojili u jedan kontinuirani oblak točaka. Istovremeno s prikupljanjem LiDAR podataka, Faro Focus, terestrički laserski skener korišten tijekom terenskog istraživanja, prikuplja i fotografije područja što omogućuje kolorizaciju gustog oblaka točaka tijekom predobrade i obrade podataka. Površina skeniranog područja terestričkim laserskim skenerom iznosi 3013,27 m².

Tablica 6 Tehničke specifikacije terestričkog laserskog skenera Faro Focusa M70

Parametar	Vrijednost parametra
Brzina prikupljanja podataka (točaka/s)	Do 488 000
Pouzdanost prikupljanja podataka	± 3 mm
Maksimalan domet (m)	70
Minimalan domet (m)	0,6

Vertikalni kut snimanja (°)	300
Horizontalni kut snimanja (°)	360
Integrirana RGB kamera (MP)	Do 165 MP
Težina uređaja (kg)	4,2
Trajanje baterije (h)	4,5

Izvor: (Faro, 2020.)

5.1.4. Prikupljanje podataka GeoSLAM-om

Prikupljanje podataka GeoSLAM tehnologijom uključuje nekoliko osnovnih koraka: pripremu opreme koja podrazumijeva punjenje i kalibraciju. Zatim slijedi inicijalizacija i korisnik većinom kreće snimati na poznatoj poziciji koja je određena GPS-om. Inicijalna je pozicija iznimno važna za ispravan početak prikupljanja podataka.

Korisnik uređaja zatim prolazi područjem istraživanja pješice držeći GeoSLAM uređaj u ruci ili je montiran na ruksak, prikolicu, vozilo. Dok se korisnik kreće, uređaj koristi LiDAR tehnologiju kako bi prikupio trodimenzionalni gusti oblak točaka. Uz LiDAR, integracija IMU sustava omogućuje mjerenje akceleracije i rotacije uređaja što pomaže u dobivanju informacija o pokretu i orijentaciji uređaja. Te su informacije iznimno važne za pozicioniranje i obradu podataka. Tijekom prikupljanja podataka, korisnik hoda te mirnim i ujednačenim pokretom pokreće sustav. Bez obzira na korištenu metodu prikupljanja podataka, korisnik ili sustav trebaju pokriti cijelo područje istraživanja kako bi osigurali sveobuhvatnu pokrivenost podatcima. To može uključivati praćenje unaprijed određenih ruta ili gridova za ravnomjerno prikupljanje podataka. Prikupljanje podataka završava na istoj poziciji na kojoj je i započeto, ako je postignuta dovoljna razina detaljnosti podataka.



Slika 18 GeoSLAM ZEB Revo uređaj (URL8)

Tablica 7 Tehničke specifikacije uređaja ZEB REVO

Parametar	Vrijednost parametra
Doseg mjerenja (m)	Do 30
Pouzdanost prikupljanja podataka (cm)*	1-3 cm
Brzina prikupljanja podataka (točaka/s)	43000
Vidno polje (°)	270x360
Razina zaštite od vode i prašine:	IP64
Težina (kg)	1,05
Trajanje LiPo baterije (h)	4

* ovisi o okolišu

Izvor: (GeoSLAM, 2017)

5.2. Obrada podataka

Obrada podataka bit će podijeljena na obradu podataka svakog od senzora koji su korišteni prilikom prikupljanja podataka.

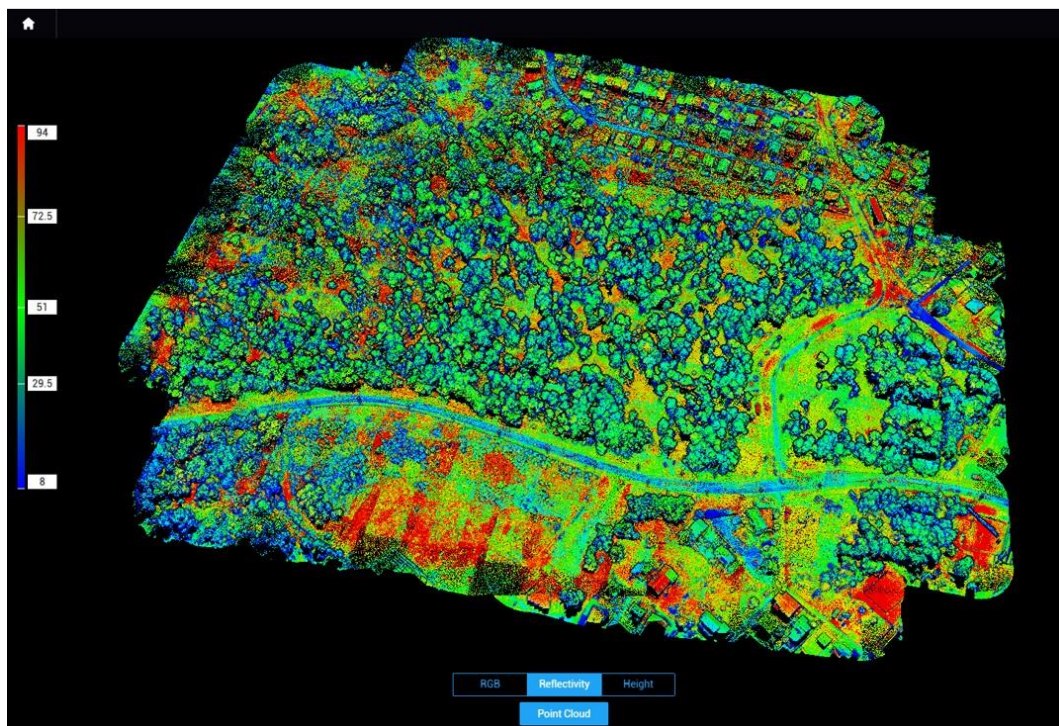
5.2.1. Predobrada podataka prikupljenih zračnim LiDAR-om

Za predobradu podataka prikupljenih zračnim L1 senzorom korišten je softver DJI Terra. Osim LiDAR podataka, za kolorizaciju gustog oblaka točaka korištene su fotografije prikupljene RGB kamerom koja je montirana na DJI Matrice M300. Zbog prikupljanja podataka na elipsoidu, tijekom obrade korištena je elipsoidna visina koja prikazuje koliko su točke na površini Zemlje udaljene od referentnog elipsoida. S obzirom da je elipsoid Zemlje matematički, geometrijski definiran oblik za razliku od geoida, on je korišten za računanje visine. Pomoćni podatci koji su korišteni su CLC – datoteka kalibracije LiDAR-a i kamere, CLI – datoteka kalibracije IMU-a LiDAR-a, CMI – datoteka kalibracije IMU-a kamere, LDR – sirovi LiDAR podatci, MNF – podatci kamere, RTK – RTK podatci glavne antene, RTL – RTK podatci o kompenzaciji kraka poluge, RTS – RTK podatci podređene antene, RTB – RTCM podatci bazne stanice i IMU – izvorni IMU podatci (DJI Terra, 2023).

Gustoća gustog oblaka točaka odabrana je prema postotku, odnosno odabrane su sve prikupljene točke za izradu modela. Prilikom predobrade podataka potrebno je odrediti tri parametra: *Point Cloud Effective Distance* koji označava udaljenost između LiDAR senzora i gustog oblaka točaka, koji je podešen na 100, *Optimize Point Cloud Accuracy* koji, ako je odabran, služi za bolje ujednačavanje podataka prikupljenih u različitim razdobljima kako bi se ostvarila viša točnost, preciznost i konzistentnost podataka te *Smooth Point Cloud* koji smanjuje debljinu gustog oblaka točaka, odnosno smanjuje šum i čini strukturu podataka jasnijom (DJI Terra, 2023). *Point Cloud Effective Distance* filtrira sve podatke koji se nalaze izvan određenog intervala i većinom se koristi kako bi se filtrirali pozadinski podatci pri snimanju bliskog predmeta ili pojave (DJI Terra, 2023). Na Slici 19 prikazan je kolorizirani gusti oblak točaka.

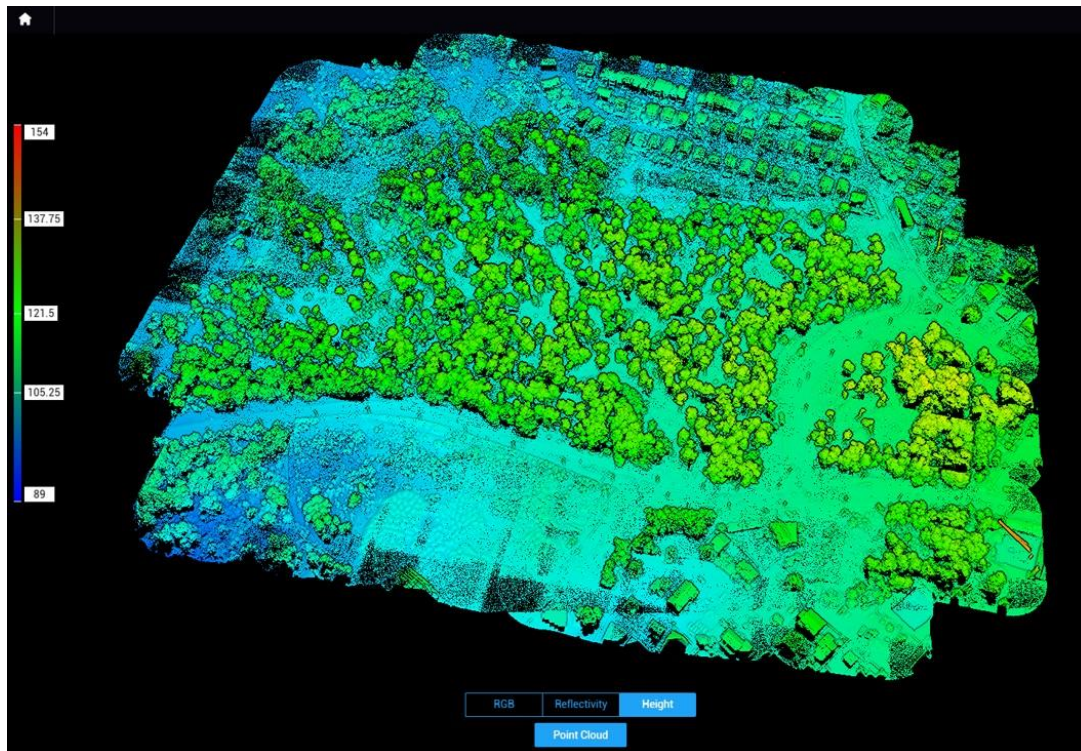


Slika 19 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra



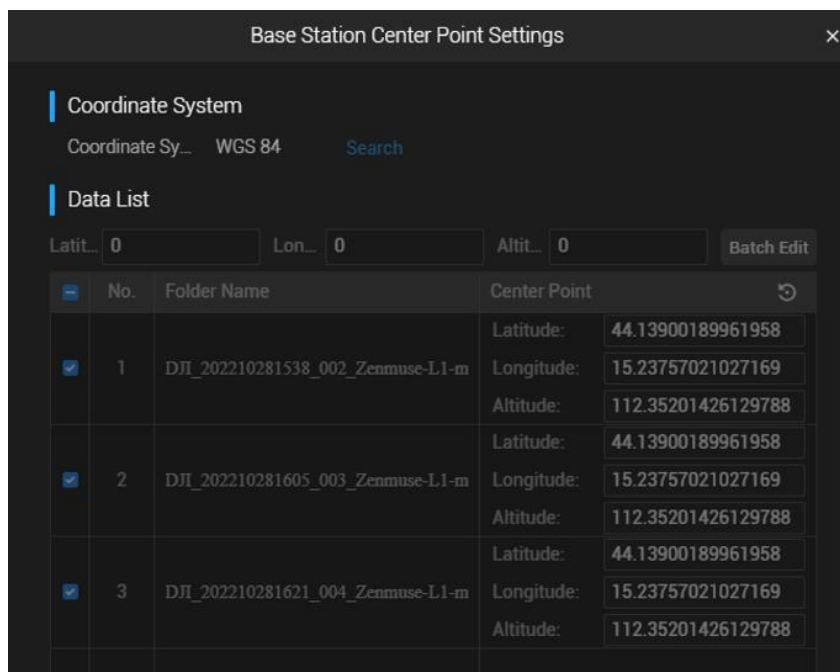
Slika 20 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra koji prikazuje reflektivnost podataka

Na Slici 20 prikazana je reflektivnost gustog oblaka točaka koja opisuje refleksiju pojedinog prikazanog objekta od 0 do 255 (DJI Terra, 2023). Vrijednosti od nula do 150 opisuju vrijednost refleksije od 0 do 100% u Lambertovom modelu refleksije (DJI Terra, 2023). Vrijednosti od 150 do 255 odnose se na vrijednosti koje se reflektiraju direktno nazad prema senzoru (DJI Terra, 2023).



Slika 21 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra koji prikazuje visinu podataka

Na Slici 21 prikazan je gusti oblak točaka koji prikazuje visinu podataka s pripadajućom skalom boja od plave koja prikazuje najniža područja do crvene koja prikazuje najviša područja. Osim podataka prikupljenih L1 senzorom, za korekciju podataka prikupljeni su RINEX podatci s virtualne bazne stanice. Ista je bazna stanica korištena za korekciju pokretnog GPS-a u predobradi podataka sve tri misije. Koordinate lokacije s koje je dron podignut su: 44,139 N 15,238 E na visini od 112,352 m na WGS84.



Slika 22 Odabrani podatci virtualne bazne stajice

Za validaciju, odnosno procjenu točnosti (engl. Accuracy Check) korišteno je 190 točaka prikupljenih GPS-om. Prikupljenim točkama zadani su atributi (asfalt, zemljani put, travanjak) ovisno o poziciji na kojoj su prikupljene. Na taj način omogućeno je ocjenjivanje ukupne točnosti te ocjenjivanje točnosti svake klase zasebno.

Undefined	Name	X/E	Y/N	Z/U	Undefined
1	Asfalt1	398997.156	4889644.86	113.429	
2	Asfalt2	399001.954	4889658.117	113.451	
3	Asfalt3	399012.046	4889669.627	113.533	
4	Asfalt4	399025.904	4889673.49	113.859	
5	Asfalt5	399038.096	4889680.765	114.113	
6	Asfalt6	399054.307	4889696.599	114.57	
7	Asfalt7	399070.244	4889701.331	114.668	
8	Asfalt8	399083.566	4889706.121	114.845	
9	Ts1	399085.446	4889713.799	113.573	
10	Ts2	399085.236	4889723.215	113.168	
11	Ts3	399084.153	4889729.092	112.742	

Slika 23 Prikaz dijela kontrolnih točaka u softveru DJI Terra

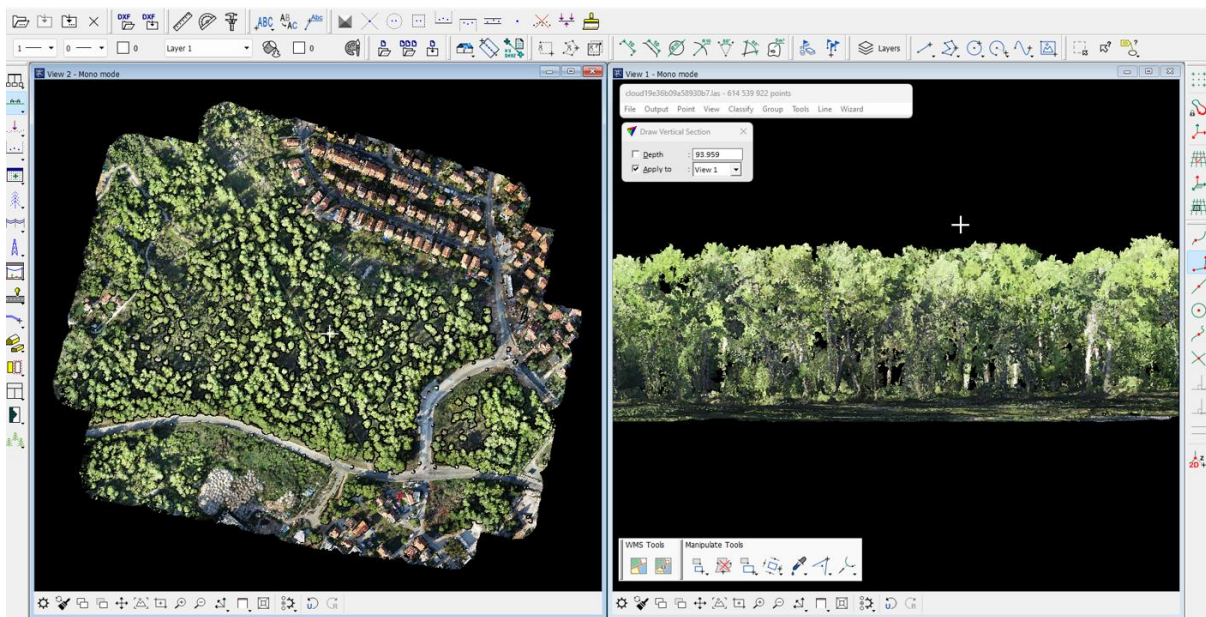
5.2.2. Obrada podataka prikupljenih zračnim LiDAR-om

Nakon završetka predobrade podataka i validacije gustog oblaka točaka uslijedila je obrada, to jest modeliranje i izdvajanje *ground* modela. Obrada podataka dobivenih ALS-om bila je

kompleksnija i dugotrajnija, sa znatno većim brojem korisničko-definiranih parametara u usporedbi s podacima dobivenim TLS-om ili GeoSLAM-om. Iz tog je razloga veći dio obrade podataka usmjeren na obradu gustog oblaka točaka ALS-a.

Bez obzira na svrhu istraživanja i prikupljanja podataka te završni model koji će biti izrađen, najvažniji korak obrade LiDAR podataka je izdvajanje *ground* modela (Moudrý i dr., 2020).

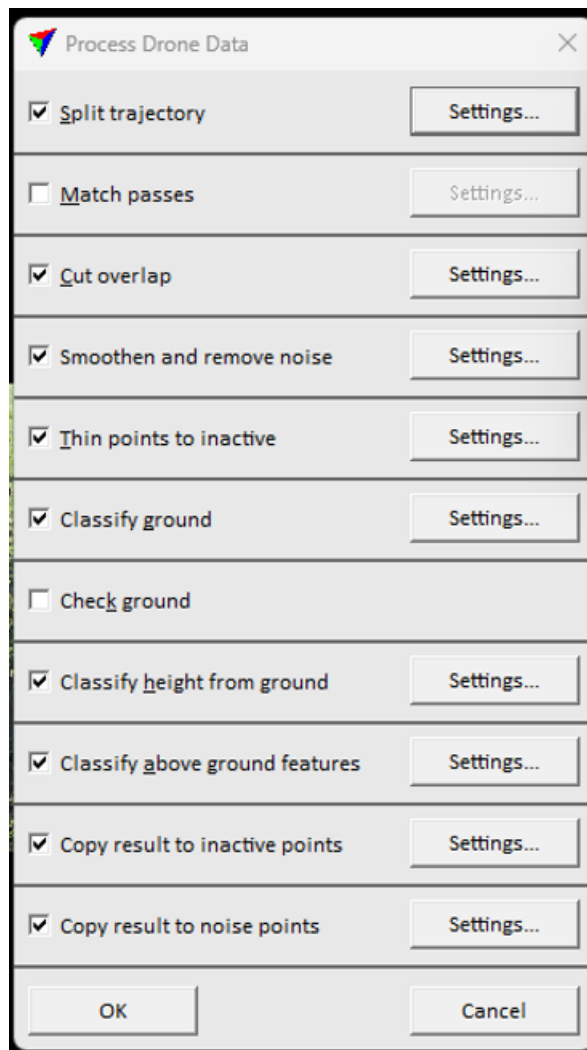
Softver Spatix korišten je kao primarni softver pri obradi podataka. Spatix je CAD softver tvrtke Terrasolid koji se primarno koristi za obradu LiDAR podataka, ali je u njemu moguće stvaranje i obrada vektorskih podataka (URL9). Gusti oblak točaka prikupljen u tri misije brojio je ukupno 614 539 922 točke koji je prikazan na Slici 24.



Slika 24 Gusti oblak točaka u softveru Spatix

S desne je strane opisan profil jednog dijela područja istraživanja te sama gustoća podataka. Ovaj je profil odabran zbog rubnog dijela misije u kojem je urbana zelena površina, odnosno šuma na njoj veoma gusta jer su stabla međusobno blizu, a krošnje guste s obiljem lisne površine.

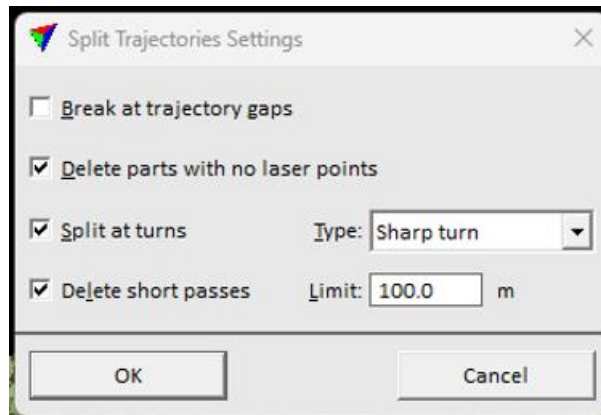
Tijekom obrade podataka, odabrani su i podešeni određeni korisničko-definirani parametri koji utječu na izlazne rezultate, odnosno točnost i preciznost modela. Mezo razina istraživanja temelji se na izdvajanju *ground* modela iz gustog oblaka točaka te je na taj način omogućena izrada digitalnog modela reljefa. Predobrađeni gusti oblak točaka unešen je u softver Spatix pomoću *Process Drone Data* alata.



Slika 25 Process Drone Data izbornik u softveru Spatix

Alat *Split Trajectory* razdvaja putanju koja prekriva cijelo područje istraživanja, odnosno gusti oblak točaka na profile prema načinu na koji su podatci prikupljeni (URL10). Računa prijeklop između navedenih profila i uklanja suvišne podatke na mjestima preklapanja profila (URL10). Na mjestima prijeklopa profila javlja se neusklađenost podataka po X, Y i Z osi što čini progreske na tim područjima velikima. Jedan od korisničko-definiranih parametara alata *Split Trajectory* je *Break at Trajectory Gaps* koji, ako je upaljen, dijeli putanju na dva dijela ako postoji vremenski razmak između dvije uzastopne putanje te prilikom obrade podataka nije bio uključen (URL10). Drugi korisničko-definirani parametar je *Delete Parts With no Laser Points*, koji je bio odabran, briše dijelove putanje na kojima nisu prikupljeni podatci (URL10). *Split at Turns* razdvaja putanju na mjestima gdje je senzor promijenio svoj smjer, napravio zaokret i može biti podešen na *Sharp Turn* ili *Smooth Curve* (URL10). Ako je odabran *Sharp Turn*, putanja, a samim tim i profil je odrezan točno na točki zaokreta što može dovesti do stvaranja manjih putanja, to jest prijelaznih segmenata koji naposljetku nisu iskoristivi pri obradi

podataka, dok *Smooth Curve* reže putanju u središtu krivulje zaokreta (URL10). Tijekom obrade podataka odabran je *Sharp Turn*. Posljednji korisničko definirani parametar alata *Split Trajectory* je *Delete Short Passes* koji, ako je uključen, automatski briše podatke o dijelovima putanje čija je duljina ispod zadanog ograničenja (URL10). Ovaj je korisničko-definirani parametar važan jer uklanja podatke u prijelaznim dijelovima koji su stvoreni ako je u prethodnom parametru odabran *Sharp Turn*. Delete Short Passes je uključen i podešen na 100 metara. Svi objašnjeni i podešeni parametri prikazani su na Slici 26.

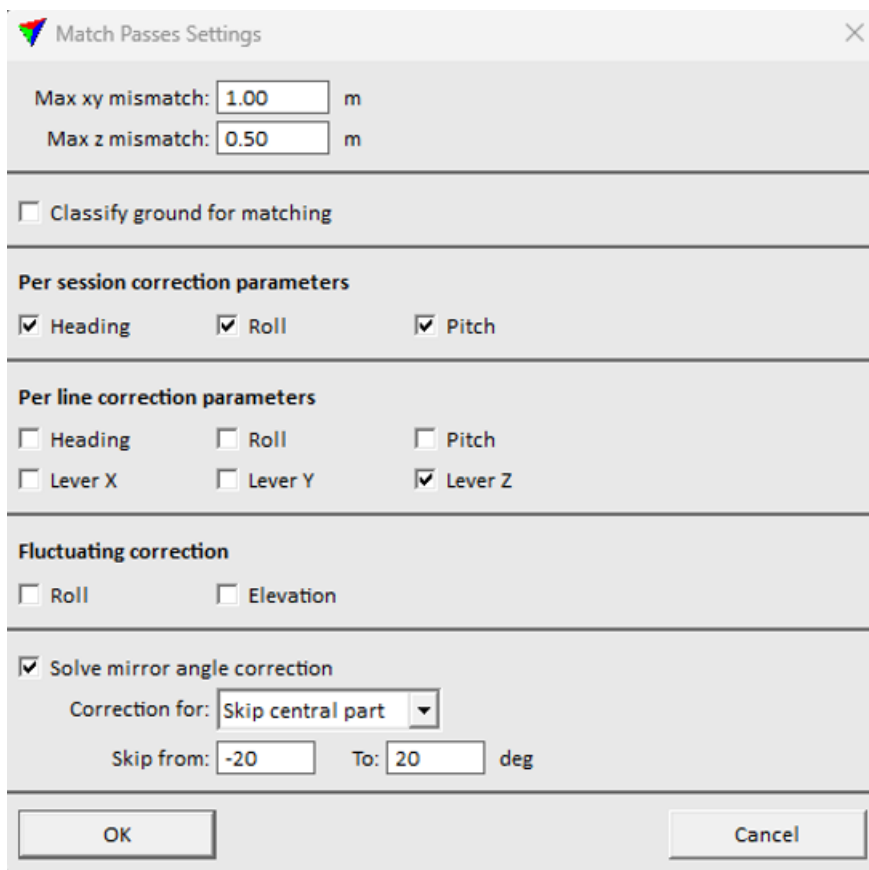


Slika 26 Korisničko-definirani parametri u postavci Split Trajectories

Sljedeći alat, *Match Passes* zahtjeva podešavanja šest korisničko-definiranih parametara. *Match Passes* smanjuje neusklađenosti između putanja leta koje se preklapaju pritom poboljšavajući internu točnost gustog oblaka točaka (URL10). Alat primjenjuje pristup podudaranja značajki, tražeći vezne linije među njima i smanjivanjuje nesrazmjer među podacima (URL10). Alat pohranjuje korištene vezne linije i izvješća iz procesa obrade podataka. Prvi od parametara je *Max XY Mismatch* koji procjenjuje maksimalnu razliku između putanja leta, to jest linija u horizontalnom pozicioniranju (URL10). Samo vezne linije kojima je međusobna udaljenost manja od odabrane udaljenosti će biti prihvaćene u automatskom traženju veznih linija (URL10). *Max Z Mismatch* procjenjuje maksimalnu razliku u vertikalnom pozicioniranju između putanja leta (URL10). Vezne linije do odabrane visine će biti uključene u automatskom traženju veznih linija. *Classify Ground for Matching*, ako je omogućen, izdvaja referentne *ground*, referentne točke i koristi ih za izdvajanje veznih linija te pomaže u smanjivanju ekstremnih, izvanrednih rezultata (URL10). *Per Session Correction Parameters* primjenjuje sustavno ispravljanje odabranih parametara koja je optimizirana za svaku od misija leta (URL10). Korigiraju se *heading*, *roll* i *pitch* te je većina podataka unaprijeđena već na temelju ove korekcije. *Per Line Correction Parameters*, ako je omogućen, primjenjuje sustavno ispravljanje odabranih parametara optimiziranih za svaku od putanja leta, to jest linija i glavna

je korekcija vertikalna, odnosno Z (URL10). Navedeni parametri su ključni ako na području istraživanja postoji vegetacija. *Fluctuating Correction* primjenjuje korekciju za određene parametre koji se mijenjaju tijekom vremena, fluktuirajuće korekcije i pomaci (URL11). Primjerice, osim sustavne korekcije, korigiraju se lokalna odstupanja koja se mogu dogoditi zbog gubitka GPS signala i ovaj ih parametar korigira. Ako kontrolne točke ne mogu biti korištene za korekciju, parametar izračunava prosječnu poziciju vezne linije koja odgovara prosjeku pozicije između laserskih podatkovnih traka (URL11). U slučaju da takvo rješenje pruža procjenu pozicijske točnosti, te se procjene koriste kao težinski koeficijenti za izračun prosječne pozicije (URL11). Drugim riječima, alat interpolira vrijednosti pomoću težinskih faktora koji su određeni procjenom točnosti putanje. Na taj način, podatci koji imaju nižu točnost su više korigirani, a podatci kojima je točnost viša su manje korigirani (URL11). Korekcija je prikazana kao korekcijska krivulja koja se mijenja jer se izrađuje računanjem korekcije za svaku od veznih linija kao interpolacija vrijednosti dvaju uzastopnih linija (URL11). Korisnik određuje koliko će krivulja biti uglačana, odnosno kako će podatci biti korigirani (URL11). Izgladivanje krivulje korekcije uključuje procjene točnosti za položaje putanje (URL11). Veće vrijednosti korekcija primjenjuju se za pozicije gdje je procjena točnosti lošija (URL11). Faktor određuje koliko brze i česte mogu biti promjene korekcijske krivulje i ako je manji, rezultat je glatkija krivulja koja se koristi ako postoje odstupanja i neujednačenost između veznih linija (URL11). Ako se ne primijeni izgladivanje, svaka vezna linija u potpunosti utječe na konačne vrijednosti korekcije (URL11). Ovo se preporučuje za provjeru veznih linija i pronalaženje pogrešnih veznih linija (URL11). Izgladivanje se ne preporuča koristiti ako su vrijednosti korekcije izračunate na temelju točnih veznih točaka prikupljenih iz kontrolnih točaka na tlu za koje su poznate točne vrijednosti X, Y i Z koordinata (URL11). Tijekom obrade, ovaj je parametar bio isključen.

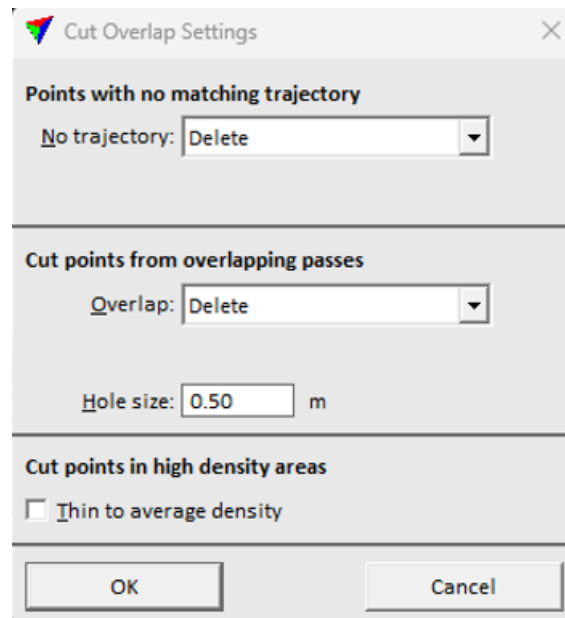
Sljedeći parametar *Solve Mirror Angle Correction* podešava podatke ovisno o kutu skenera (URL10). Tijekom obrade, odabrana je *Skip Central Part* korekcija i stupnjevi kuta u kojima korekcija neće biti izvršena (URL10). Odabrani parametri prikazani su na Slici 26 te su stupnjevi od -20 do 20 odabrani za izostanak *Solve Mirror Angle Correction*.



Slika 27 Odabrani korisničko-definirani parametri u postavci Match Passes

Cut Overlap alat uklanja podatke koji se preklapaju između dvije putanje leta i rezultira isfiltriranim podacima jedne od putanja leta na svakoj XY lokaciji (URL10). Proces uklanja točke koje su bliže rubovima putanje leta jer su te točke udaljenije od senzora i veći je kut skeniranja, a nastoji zadržati točke koje su u središnjim dijelovima putanje leta, odnosno bliže senzoru i kut skeniranja je bliži okomitom (URL10). Na taj se način uklanjaju podatci kojima je pozicija najmanje točna zbog navedenih razloga. Osim toga, smanjuje se količina podataka koja olakšava daljnji proces obrade podataka (URL10). Parametar *Points With no Matching Trajectory* određuje što će se dogoditi s točkama koje se ne mogu dodijeliti niti jednoj od putanja (URL10). Zadana je opcija *Delete* koja je i odabrana prilikom obrade podataka, međutim te se točke mogu i zadržati s opcijom *Keep* ili klasificirati u drugu klasu s opcijom *Classify*. *Cut Points from Overlapping Classes* određuje što će se dogoditi s točkama koje se međusobno preklapaju (URL10). Takve, dvostruke točke mogu se, kao i na prethodnom parametru, zadržati, reklasificirati ili obrisati te je tijekom obrade ponovno odabrana opcija *Delete*. Parametar *Hole Size* označava maksimalnu veličinu područja bez točaka koja se može stvoriti brisanjem podataka koji se preklapaju (URL10). Ako je područje veće od određene vrijednosti, točke s udaljenije putanje leta se zadržavaju kako bi se popunilo to područje.

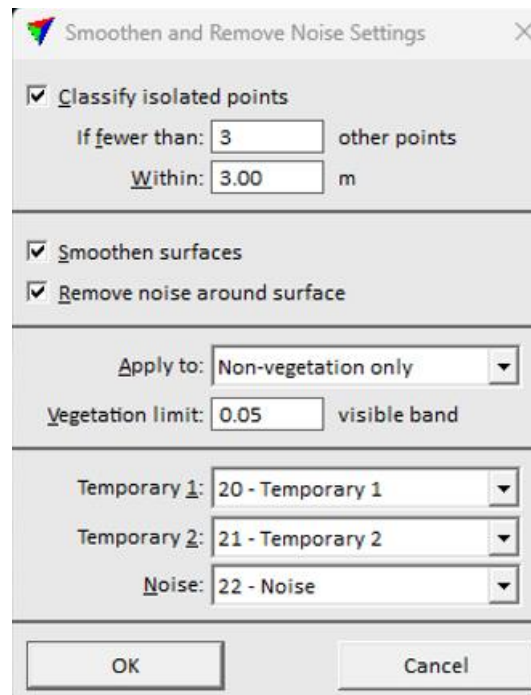
Maksimalna veličina područja bez prikupljenih točaka je određena na 0,5 metara, što se može vidjeti na Slici 28. Ako je parametar *Cut Points in High Density Areas* omogućen, područja s iznimnom gustoćom podataka se prorjeđuju kako bi se ujednačila gustoća podataka na cijelom području metodom *Thin Points* (URL10). Ova metoda smanjuje gustoću točaka uklanjanjem točaka koje su blizu ili unutar ćelije grida određene veličine (URL10).



Slika 28 Alat Cut Overlap i podešeni korisničko-definirani parametri

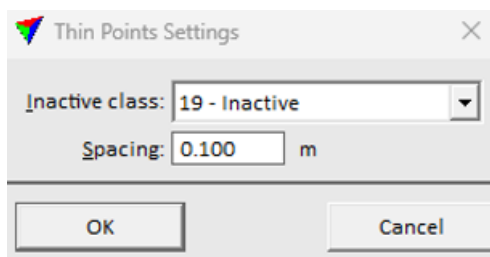
Alat *Smoothen and Remove Noise* uglađuje površinu i klasificira sve točke koje se nalaze ispod i iznad vrijednosti površine kao buku, smetnju u podacima (URL10). Na taj način eliminira se šum iz gustog oblaka točaka te čini podatke i površine vizualno atraktivnijima (URL10). S obzirom na to da su uz LiDAR podatke prikupljene i RGB fotografije područja, one su iskorištene u ovom alatu. Fotografije se koriste za informaciju o vrijednostima određene boje koja se dodjeljuje točkama, LiDAR podacima kako bi se prepoznala vegetacija. Uglačavanje podataka se onda koristi samo za klase koje nisu klasificirane kao vegetacija. Ako je parametar *Smooth Surfaces* omogućen, proces uglačavanja primjenjuje se na točkama koje su prepoznate kao površina (URL10). *Remove Noise around Surface* uklanja točke koje imaju rubne vrijednosti oko površine kako bi se uklonili šumovi u podacima (URL10). Parametrom *Apply to:* određuje se na kojim će se klasama provesti uglačavanje podataka te je tijekom obrade podataka odabrana postavka *Non-vegetation only*, čime se klasa vegetacije isključuje iz procesa uglačavanja. *Vegetation Limit* postavljen je na 0,05, što je i zadana vrijednost. Parametar koristi vegetacijski indeks kako bi se odvojile točke u područjima bez vegetacije od područja s vegetacijom. Vegetacijski indeks koji se koristi je *Visual Band Difference Model* jer se dostupni podatci nalaze samo u RGB, odnosno vidljivom dijelu spektra i računa se po formuli $VBD =$

$\frac{(2G-R-B)}{(2G+R+B)}$. Vrijednosti vegetacijskog indeksa protežu se u intervalu od -1 do 1, a parametrom je odabran prag. Sve vrijednosti koje se nalaze ispod praga su klasificirane kao klase koje nisu vegetacija, dok su vrijednosti iznad praga klasificirane kao vegetacija. *Temporary 1* i *Temporary 2* dvije su klase koje se koriste privremeno tijekom obrade podataka, a *Noise* klasa koja izdvaja rubne podatke ako je parametar *Remove Noise around Surface* omogućen. Odabrani parametri tijekom obrade podataka mogu se vidjeti na Slici 29.



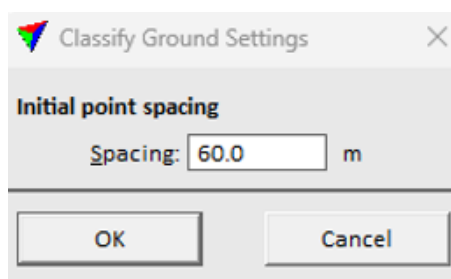
Slika 29 Odabrani parametri u alatu Smoothen and Remove Noise

Alat *Thin Points to Inactive* reducira gustoću gustog oblaka točaka na način da određene točke klasificira kao neaktivne (URL10). Ovaj se alat koristi za ubrzanje obrade podataka tijekom procesuiranja velikih gustih oblaka točaka. Svi daljnji koraci u obradi podataka će koristiti samo točke koje su klasificirane kao aktivne. Rezultat klasifikacije je prorijeđen gusti oblak točaka čiji je model slabiji od modela koji bi bio izrađen koristeći sve točke (URL10). Stoga je bit ovog parametra optimizacija vremena tijekom obrade velikih gustih oblaka točaka. Za *Inactive Class* je odabrana klasa 19, a *Spacing* je definiran kao udaljenost između točaka koje su zadržane kao aktivne (URL10). Alat *Thin Point to Inactive* prikazan je na Slici 30.



Slika 30 Alat *Thin Points to Inactive* i odabrani parametri

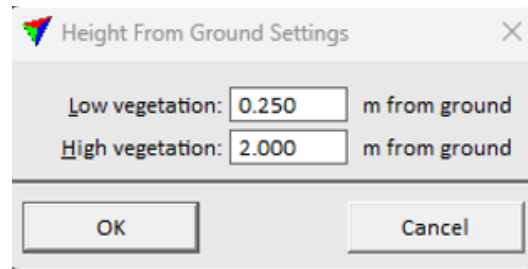
Alat *Classify Ground* uklanja dodatne rubne točke i klasificira tlo na način da su najniže aktivne točke klasificirane kao *ground* (URL10). Cilj je glatka površina tla koja nije predstavljena s prevelikim brojem točaka (URL10). Neki od tipičnih nedostataka automatske klasifikacije tla su niske točke koje postaju točke tla i remete daljnju klasifikaciju terena u ovom području te mostovi koji se često klasificiraju kao zemljani, ali ne pripadaju prirodnoj površini tla (URL10). Parametar *Initial Point Spacing* jedini je parametar koji je potrebno postaviti u alatu *Classify Ground*. *Initial Point Spacing* je udaljenost između inicijalnih točaka koje su klasificirane kao tlo (URL10). Parametar određuje veličinu područja unutar kojeg je najniža točka klasificirana kao točka tla te se iz inicijalnih točaka stvara privremena triangulacijska nepravilna mreža (TIN) (URL10). Zatim iteracije procesa klasifikacije proglašuju TIN dodavanjem sve većeg broja točki u *Ground* klasu (URL10). Svaka iteracija, to jest proglašivanje TIN-a čini model točnijim (URL12). Naprednija obrada podataka u TerraScan softverima omogućuje i odabiranje kuta iteracije, kuta reljefa i udaljenosti iteracije koji određuju koliko određena točka mora biti blizu ravnini trokuta u TIN-u da bi bila klasificirana kao *Ground* (URL12). Ovaj je način optimalan za klasificiranje *Ground* klase u podacima koji su prikupljeni zračnim laserskim skenerom te ako je snimano tlo zemljano, bez asfalta (URL12). Kako bi klasifikacija svih klasa bila uspješna, od presudne je važnosti kvaliteta *Ground modela*. Sučelje alata prikazano je na Slici 31.



Slika 31 Alat *Classify Ground* i *Initial Point Spacing* parametar

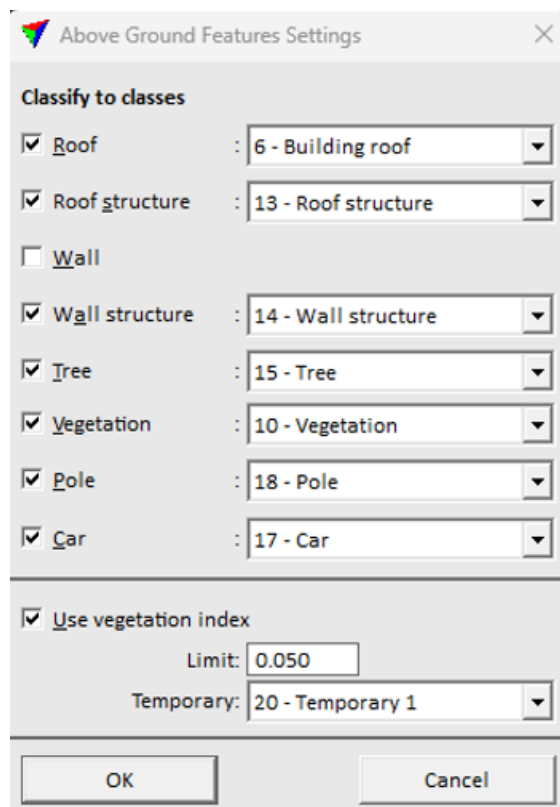
Alat *Classify Height from Ground* klasificira točke iznad tla u tri vegetacijske klase: klasu 3 kao nisku vegetaciju (0.25 m iznad tla), klasu 4 kao srednje-visoku vegetaciju (0.25 – 2 m iznad

tla) te klasu 5 kao visoku vegetaciju (više od 2 m iznad tla) (URL10). Limiti za visinu vegetacije jedini su korisničko-definirani parametar u alatu *Height from Ground* i prikazani su na Slici 32.



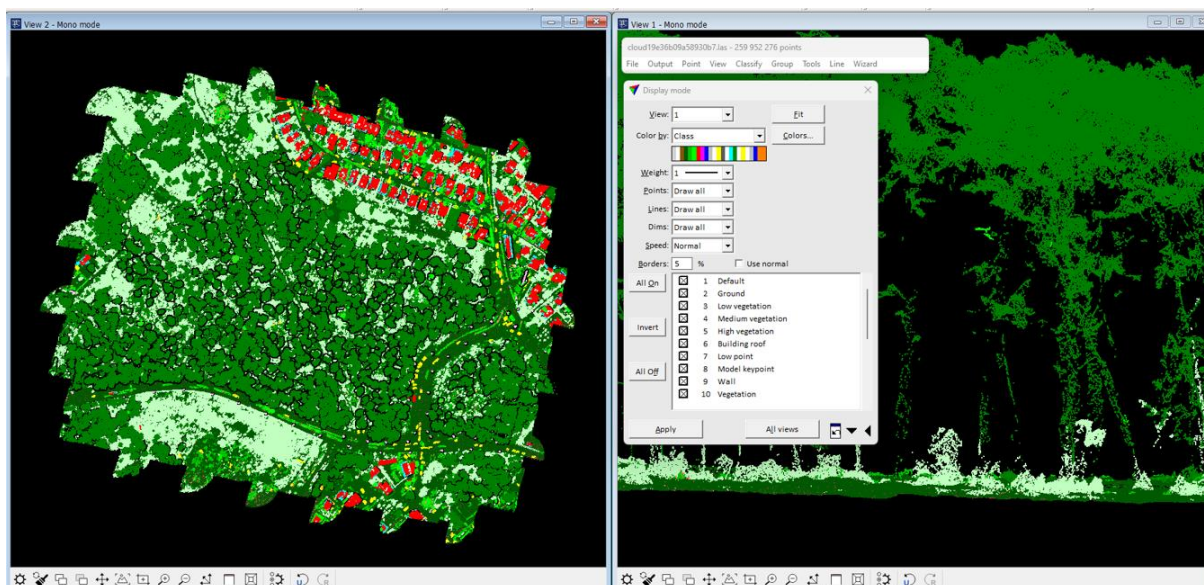
Slika 32 Alat Height from Ground i korisničko-definirani parametri

Alat *Classify Above Ground Features* klasificira točke u klasu 4 i klasu 5 sve do osam objektnih klasa (URL10). Ovaj korak podrazumijeva segmentaciju gustog oblaka točaka (URL10). Korisnik može odabrati objektnu klasu ovisno o projektu i području istraživanja. Ovaj se alat oslanja na rezultate alata *Classify Height from Ground* i jedino je omogućen ako je *Classify Height from Ground* upaljen (URL10). Klasifikacija će biti uspješnija ako su vegetacijski indeksi izračunati i ako su RGB vrijednosti za svaku pojedinu točku poznate (URL10). Klase koje mogu biti odabrane su: krovovi, struktura krovova, zidovi, struktura zidova, drveće, vegetacija, stupovi i automobili. Kao *Roof* su klasificirane točke koje su horizontalne ili nakošene bez točaka koje predstavljaju tlo ispod njih (URL10). Klasa *Roof Structure* su točke koje čine manje objekte na krovu poput dimnjaka, antena, vanjskih jedinica klimatizacije i slično (URL10). Klasu *Wall* predstavljaju vertikalne točke klasificirane kao zid, a *Wall Structure* manji objekti na zidovima poput balkona (URL10). Ako je klasa *Tree* odabrana, kao drveće će biti klasificirane komplekse skupine točaka s većom vrijednosti visine i većom horizontalnom površinom (URL10). *Vegetation* klasu većinom čine točke koje ne pripadaju niti jednoj drugoj klasi (URL10.) No s obzirom da se tijekom klasifikacije koriste i vegetacijski indeksi, točke koje predstavljaju klasu *Vegetation* nisu nasumično odabrane, nego, u ovom istraživanju, moraju imati veću vrijednost od 0,05 što je razvidno na Slici 25. U klasu *Pole* smješteni su većinom stupovi, ulične lampe, prometni znakovi i slično (URL10). Automobili i ostala vozila klasificirana su kao *Car* (URL10). Uz alat *Smoother and Remove Noise*, i ovaj alat koristi vegetacijski indeks za klasifikaciju točaka na isti, već objašnjeni način. Postavljeni parametri nalaze se na Slici 33.



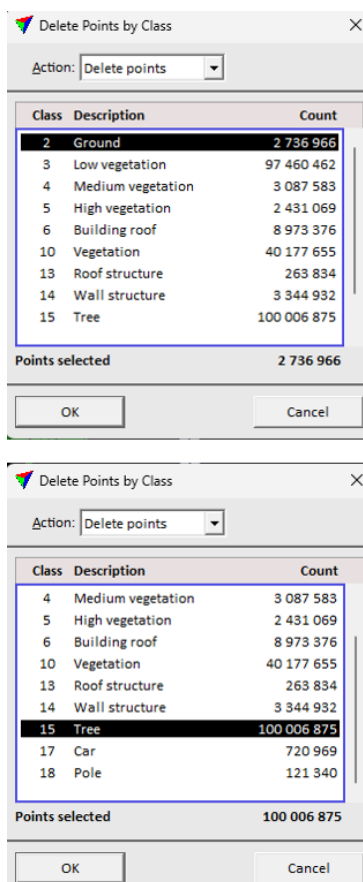
Slika 33 Classify Above Ground Features i postavljeni parametri

Alat klasificira grupe na temelju *By Best Match* rutine na temelju provjera vjerojatnosti da određena grupa predstavlja objekt koji spada u jednu od prethodno navedenih klasa (URL13). Dva alata, koja tijekom obrade podataka nisu iskorištena, su *Copy Result to Inactive Points* i *Copy Result to Noise Points* (URL10). Oba alata kopiraju atribut klase najbliže aktivne točke koja se nalazi blizu neaktivne, odnosno one koja je prepoznata kao šum i dodjeljuju joj navedeni atribut (URL10).



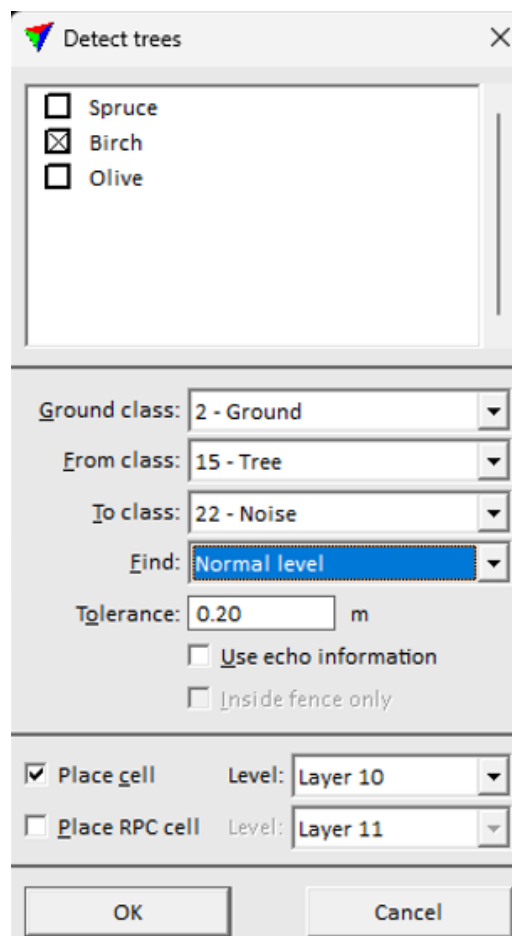
Slika 34 Klasificirani gusti oblak točaka

Broj točaka i odabrane klase mogu se vidjeti na Slici 34. Gusti oblak točaka klasificiran je i podijeljen u 11 klasa: *Ground*, *Low Vegetation*, *Medium Vegetation*, *High Vegetation*, *Building Roof*, *Vegetation*, *Roof Structure*, *Wall Structure*, *Tree*, *Pole* i *Car*. Broj točaka koje predstavljaju pojedinu klasu mogu se vidjeti na Slici 35.



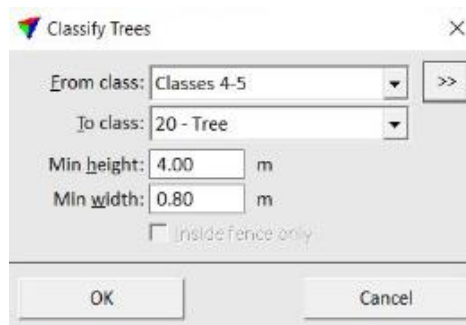
Slika 35 Broj točaka koji predstavlja svaku pojedinu klasu

Klasa koja predstavlja stabla, odvojena je od klasa vegetacije i čini više od trećine ukupnog broja točaka. Postoje dva načina izdvajanja od ostalih klasa. Izdvajanje stabala moguće je izvesti alatom *Detect Trees* u softveru Spatix na temelju oblika laserskih točaka koje su definirane oblikom stabla (URL14). Alat može izdvojiti stabla s izrazito različitim oblicima krošnji poput vrlo tankih oblika crnogoričnih stabala i veoma bujnih okruglih oblika listopadnih stabala (URL14). Parametri koje je potrebno postaviti su vrsta stabla koje se nalazi na promatranom području, *Ground class* kao klasa koja predstavlja tlo, *From Class* ili osnovna klasa u kojoj se nalaze stabla te *To class* kao klasa do koje se stabla mogu detektirati (URL14). *Tolerance* je pozicijska točnost gustog oblaka točaka, a *Find* označava procjenu koliko je stabala već detektirano i daje mogućnost odabira *More trees*, *Normal level* i *Fewer Trees*. *Use Echo Information*, ako je omogućen, koristi informaciju po povratnim signalima pri detekciji stabala (URL14). *Place Cells* postavlja ćelije na detektirana stabla, a *Place RPC (Rich Photorealistic Content) Cells* radi na isti način, ali RPC ćelije sadrže informaciju o teksturi određene točke (URL14). Parametri koji su odabrani prikazani su na Slici 36.



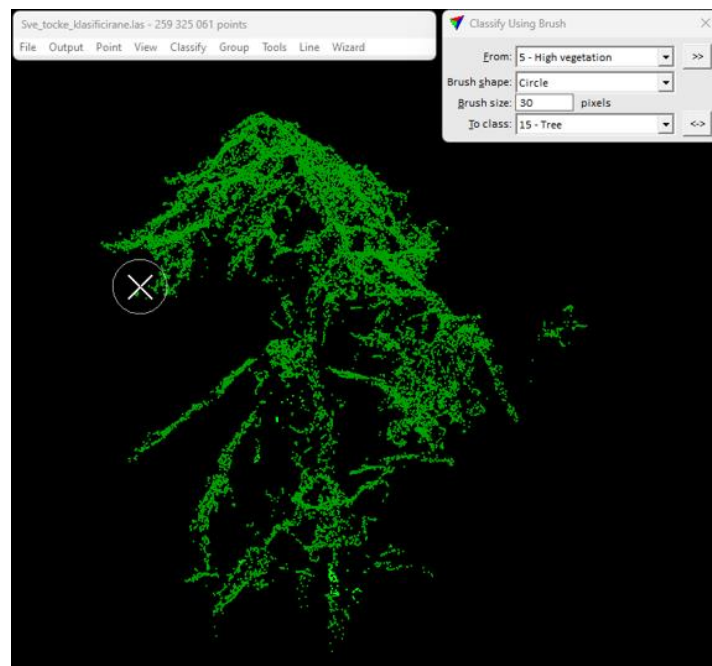
Slika 36 Alat Detect Trees i odabrani korisničko-definirani parametri

Drugi način klasificiranja stabala moguće je napraviti alatom *Trees Routine* koji klasificira grupe točaka koje predstavljaju vrhove krošnje (URL15). Preporučeno je klasificirati točke koje se nalaze iznad tla u zasebnu klasu kako bi se olakšalo izdvajanje točaka koje predstavljaju stabla (URL15). Parametar *From Class* označava izvornu klasu iz koje želimo izdvojiti točke koje čine krošnju, a u parametru *To Class* odabire se klasa koja predstavlja stabla (URL15). Parametrom *Min Height* odabire se minimalna visina iznad tla na kojoj se točka mora nalaziti kako bi se mogla klasificirati kao stablo, dok je *Min Width* minimalna širina grupe točaka koje se mogu klasificirati kao stablo (URL15). Primjer *Trees Routine* alata prikazan je na Slici 37.



Slika 37 Alat Trees Routine (URL15)

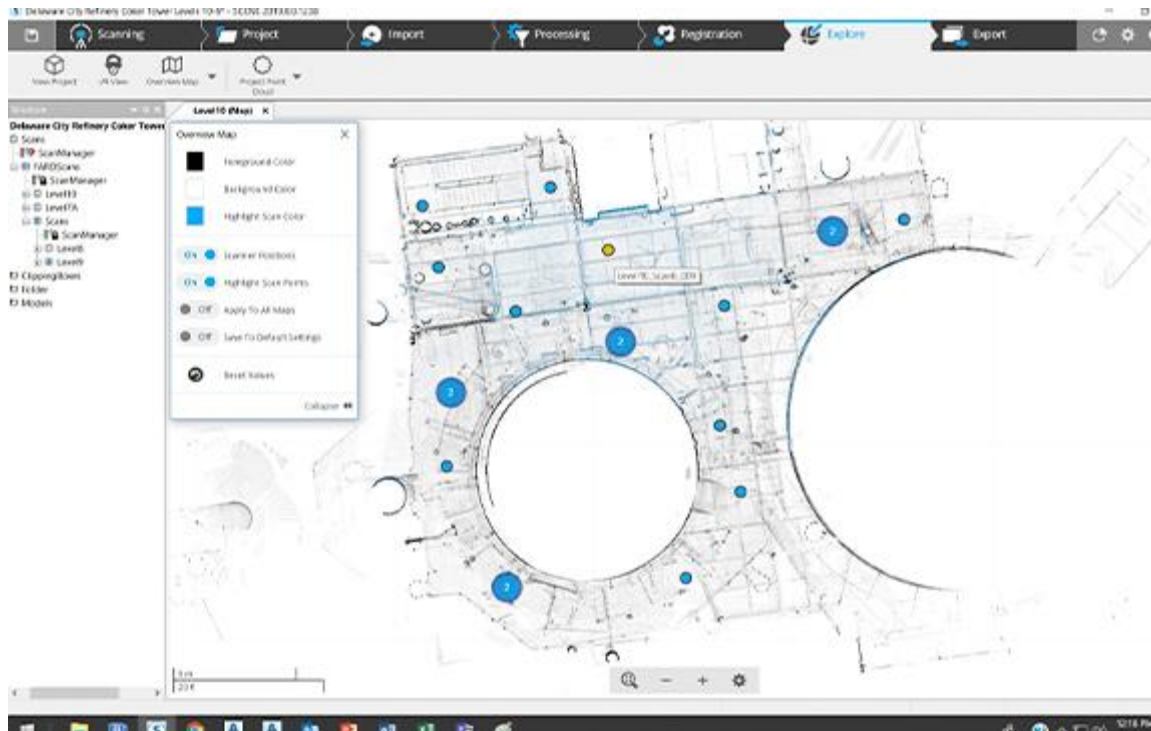
Rezultati koji su dobiveni automatskim izdvajanjem i detekcijom stabala mogu se ručno poboljšati koristeći alat *Classify Using Brush*. Alatom se jedna klasa prelaskom kursora reklasificira u drugu klasu. Korištenje alata prikazano je na Slici 38 tijekom koje su točke visoke vegetacije reklasificirane u stabla.



Slika 38 Reklasifikacija alatom Classify Using Brush

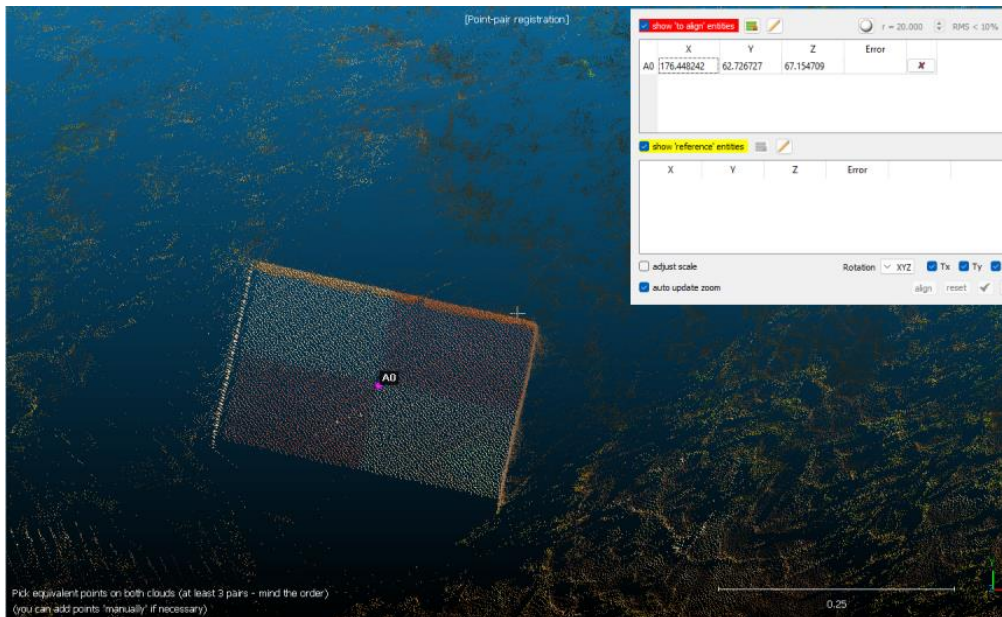
5.2.3. Obrada podataka prikupljenih terestričkim LiDAR-om

Podatci su predobrađeni u softveru Faro Scene, specijaliziranom softveru za obradu LiDAR podataka prikupljenih Faro uređajima, uključujući Faro Focus. Faro Scene razvila je tvrtka Faro Technologies i ima široku primjenu, primjerice u geodetskim mjerenjima, promatranjima i skeniranjima postojeće infrastrukture, arhitekturi i slično. Nakon preliminarnе obrade slijedi proces registracije i tada će gusti oblaci točaka koji su prikupljeni na različitim stajalištima terestričkog laserskog skenera biti spojeni pomoću sfera koje su korištene tijekom prikupljanja podataka. Domazetović (2021) je u svojoj disertaciji naveo kako je proces obrade podataka u softveru Faro Scene sastavljen je od šest osnovnih koraka: 1. izrade projekta, 2. obrade pojedinačnih laserskih skenova, 3. registracije laserskih skenova, 4. dodavanje koordinata referentnim sferama, 5. izrade konačnog oblaka točaka i 6. eksportiranja oblaka točaka. Tijekom prvog koraka, stvoren je novi FaroSCENE projekt u koji su dodani prikupljeni TLS skenovi. Svaki od skenova je, tijekom drugog koraka, obrađen prema odabranim postavkama. Drugim riječima, izrađen je gusti oblak točaka i tekstura iz svakog skena uz korištenje filtera za automatsko uklanjanje tamnih točaka (engl. Dark Scan Point filter) i točaka koje znatno odstupaju od okolnih točaka (engl. Stray Point filter) (Domazetović, 2021; Faro, 2019). Osim spomenutih, korišten je filter za automatsko prepoznavanje rubova i uklanjanje pogrešaka koje se nalaze uz njih (engl. Edge Artifact Filter) (Domazetović, 2021; Faro, 2019). U ovom je koraku podešeno automatsko prepoznavanje meta koje su reprezentirane standardnim sferama. Nakon što su obrađeni pojedinačni laserski skenovi, uslijedila je registracija laserskih skenova čiji je cilj međusobno poravnanje pojedinačnih laserskih skenova u jedinstveni gusti oblak točaka (Domazetović, 2021; Faro, 2019). Registracija skenova najvažniji je korak obrade TLS podataka jer o točnosti ovog koraka ovisi točnost konačnih izrađenih modela (Domazetović, 2021; Dong i dr, 2020). Korištena je automatska registracija prema zadanim postavkama te su tijekom registracije uklonjeni svi objekti koji su pogrešno automatski klasificirani kao sfere. Skenovi su zatim automatski registrirani i izrađen je jedinstveni gusti oblak točaka. U sljedećem je koraku moguće dodati geodetske koordinate registriranom gustom oblaku točaka, međutim u ovom je istraživanju proces georeferenciranja odrađen u softveru Cloud Compare. Korak podrazumijeva i automatsko balansiranje boje teksture prikupljenih točaka (engl. apply color balancing), uklanjanje dupliciranih točaka (engl. eliminate duplicate points) i ujednačavanje završnog oblaka točaka (engl. homogenize points density) (Domazetović, 2021; Faro, 2019). Posljednji je korak izvoz gustog oblaka točaka koji se, zatim, može daljnje obraditi u drugim softverima.



Slika 39 Faro Scene Software (URL16)

Nakon predobrade podataka, podatci su obrađeni u softveru Cloud Compare. Cloud Compare koristi se za vizualizaciju, obradu i analizu podataka u obliku trodimenzionalnog gustog oblaka točaka (URL17). Softver Cloud Compare je besplatan te dostupan i otvoren za korištenje prema svima koji ga žele koristiti. Podatci prikupljeni terestričkim laserskim skenerom prikupljeni su u lokalnom koordinatnom sustavu te se stoga moraju georeferencirati. Kako bi se gusti oblaci točaka terestričkog laserskog skenera (TLS) i zračnog laserskog skenera međusobno uskladili, korišten je alat *Align*. Odabrane su tri točke koje su se koristile za usklađivanje gustih oblaka točaka prikupljenih terestričkim laserskim skenerom i njihov je izled prikazan na Slici 40.



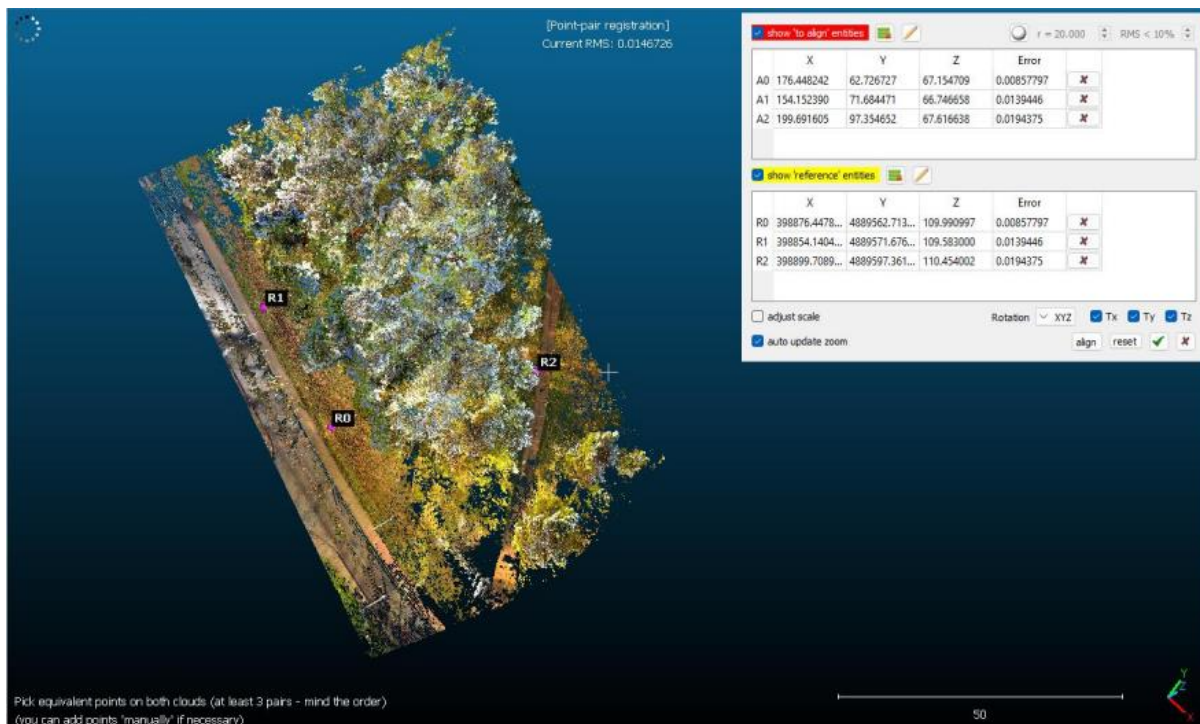
Slika 40 Orijetnacijska točka na gustom oblaku točaka TLS-a u softveru Cloud Compare

Gusti oblak točaka TLS-a je koloriziran i zbog toga je središte orijentacijske točke uočljivije. Iz tog razloga je njihovo označavanje lakše i preciznije što omogućuje generiranje točnijeg modela. Osim kolorizacije, na Slici 40 razvidna je velika gustoća točaka i na samim orijentacijskim točkama što također pridonosi lakšem i preciznijem označavanju orijentacijskih točaka.

Tablica 8 Orijetnacijske točke za georeferenciranje TLS-a i GeoSLAM-a

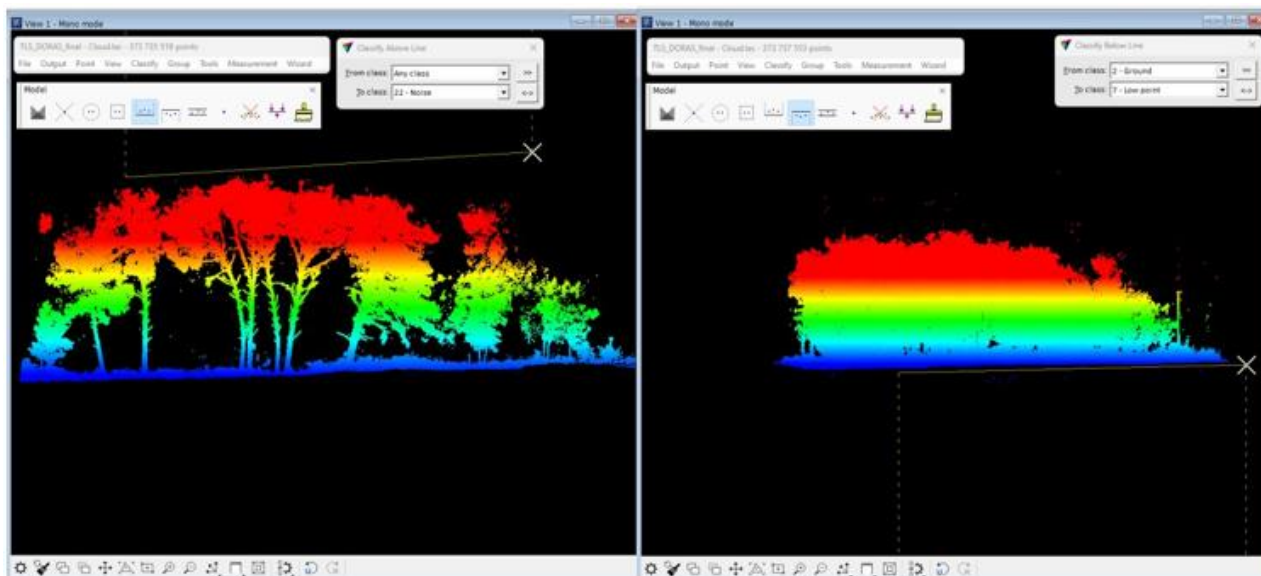
Name	Code	Northing	Easting	Elevation	Undulacija
Cesta 1	R0	4889562,713	398876,448	109,981	-42,836
Cesta 2	R1	4889571,676	398854,141	109,853	-42,836
Put	R2	4889597,361	398899,709	110,454	-42,837

Orijentacijske točke korištene za georeferenciranje, odnosno usklađivanje TLS-a navedene su u Tablici 3. Gusti oblak točaka i tri orijentacijske točke pomoću koji je odrađeno usklađivanje alatom *Align* prikazani su na Slici 41. Točke prikazane na slici ispod su kolorizirane, što znači da posjeduju informaciju o intenzitetu RGB vrijednosti u njima.



Slika 41 Gusti oblak točaka prikupljen TLS-om i tri orijentacijske točke u softveru Cloud Compare

Nakon što je prikaz iz koloriziranog promijenjen u skalu vrijednosti visine, u gustom oblaku točaka prikupljenog TLS-om primijećeni su artefakti koji su kasnije filtrirani u softveru Spatix. Alati koji su korišteni za filtriranje artefakata su *Classify Above Line* i *Classify Below Line*. Artefakti su se nalazili ispod tla i iznad krošnji stabala. Tim su alatima artefakti premješteni u klasu *Noise* i više se nisu koristili tijekom modeliranja. Alati su prikazani na Slici 42.



Slika 42 Classify Above i Classify Below Line u softveru Spatix

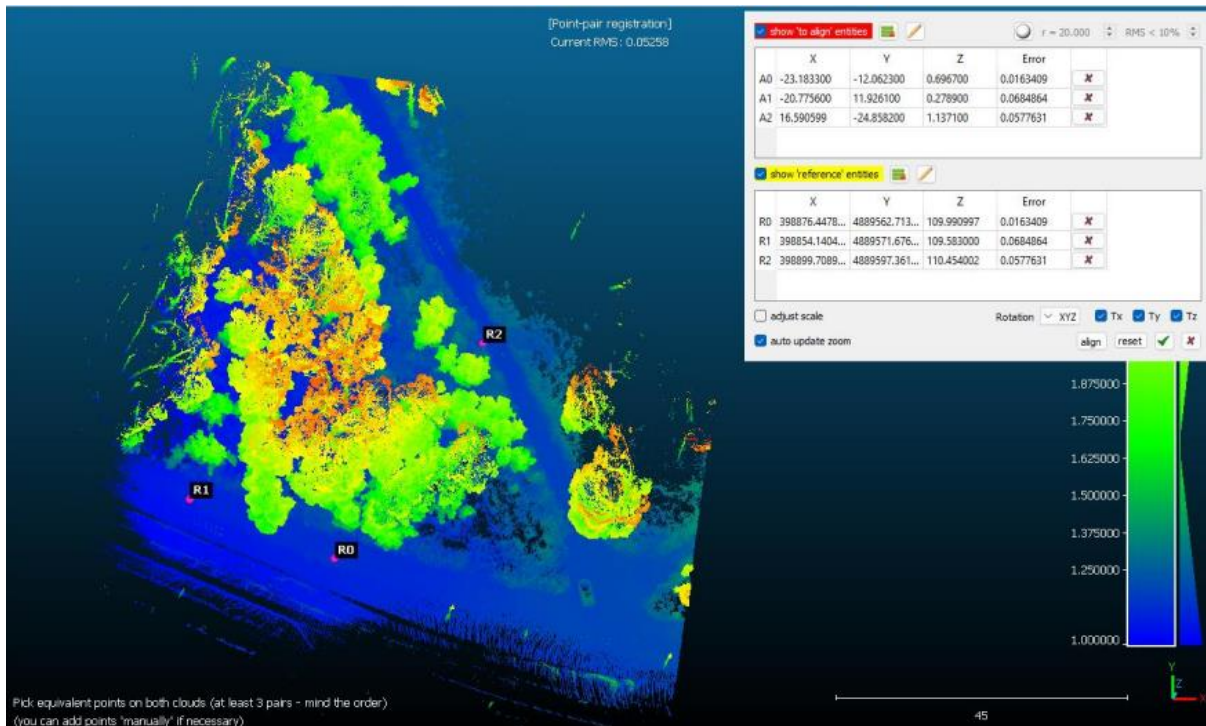
5.2.4. Obrada podataka prikupljenih GeoSLAM-om

Podatci prikupljeni GeoSLAM-om ZEB Revo (Slika 42) predobrađeni su u softveru GeoSLAM Connect, specijaliziranom softveru za obradu podataka koji su prikupljeni GeoSLAM uređajima (GeoSLAM, 2023). Proces obrade u GeoSLAM Connect softveru iznimno je automatiziran i njegova je glavna prednost postojanje alata koji su namijenjeni isključivo podacima prikupljenih SLAM algoritmom (GeoSLAM, 2023). Pet je osnovnih koraka obrade u softveru GeoSLAM Connect (GeoSLAM, 2023). Prvi korak je izrada novog projekta i odabir tijekom rada (engl. workflow) (GeoSLAM, 2023). U drugom se koraku odabiru podatci koji će se obrađivati (GeoSLAM, 2023). Trećim korakom obuhvaćeno je nekoliko korisnički definiranih parametara: 1. odabir okoliša koji je skeniran, 2. definiranje razmaka između točaka, 3. odabiranje uglačavanja i filtriranja te 4. definiranje oblika izlaznog rezultata (GeoSLAM, 2023). Specifičnost obrade GeoSLAM podataka je odabir okoliša, odnosno odabir područja i/ili oblika putanje kojom su podatci prikupljeni. Postoji nekoliko oblika okoliša koje je moguće odabrati: zatvoreni prostor (engl. confined), šuma (engl. forest), unutarnji prostor (engl. indoor), otvorena petlja (engl. open loop), standardni (engl. default), tunel (engl. tunnel), UAV i vozilo (engl. vehicle) (GeoSLAM, 2023). Oblici okoliša koje je moguće odabrati ne opisuju skenirani okoliš, već uvjete u kojima su podatci prikupljeni. Primjerice, može se pojaviti zabuna između zatvorenog i unutarnjeg prostora, ali uvjeti u kojima su podatci prikupljeni znatno se razlikuju. Zatvoreni prostor podrazumijeva skućeni prostor u kojoj će skener biti izložen površinama koje se nalaze maksimalno 1,5 metar od putanje skenera (GeoSLAM, 2023). Unutarnji je prostor ravan sa svih strana senzora i maksimalan domet rijetko prelazi 30 m (GeoSLAM, 2023). Nakon odabira okoliša, potrebno je odabrati razmak između točaka i opciju uglačavanja i filtriranja podataka (GeoSLAM, 2023). Procesi uglačavanja i filtriranja veoma su automatizirani i jedino što korisnik može odabrati je hoće li ili neće uključiti te opcije. U četvrtom se koraku podatci izvoze u .laz obliku, međutim moguće je odabrati i druge formate (GeoSLAM, 2023). Peti korak uključuje samu vizualizaciju izrađenog gustog oblaka točaka (GeoSLAM, 2023).

Podatci su u GeoSLAM Connectu pripremljeni i izvezeni, a zatim je približno cjelokupan proces obrade odrađen u softveru Cloud Compare. Gusti oblak točaka, nakon što je izvezen iz GeoSLAM Connecta, nije koloriziran niti georeferenciran.

Proces obrade podataka u softveru Cloud Compare započeo je georeferenciranjem gustog oblaka točaka. Iste tri točke korištene za georeferenciranje podataka prikupljenih TLS-om, navedene u Tablici 3, iskorištene su za georeferenciranje GeoSLAM podataka.

Georeferenciranje i usklađivanje podataka odrađeno je alatom *Align* koji je prethodno objašnjen. S obzirom na to da podatci prikupljeni GeoSLAM-om nisu kolorizirani, označavanje orijentacijskih točaka bilo je teže nego kod podataka prikupljenih TLS-om. Iz tog razloga, ali i zbog manje gustoće prikupljenih podataka je točnost modela niža. Završni model prikazan je na Slici 43, a skala boja i model odnose se na vrijednosti visine u točkama.



Slika 43 Gusti oblak točaka prikupljen GeoSLAM-om i tri orijentacijske točke

5.2.5. Alati korišteni tijekom obrade podataka za validaciju modela

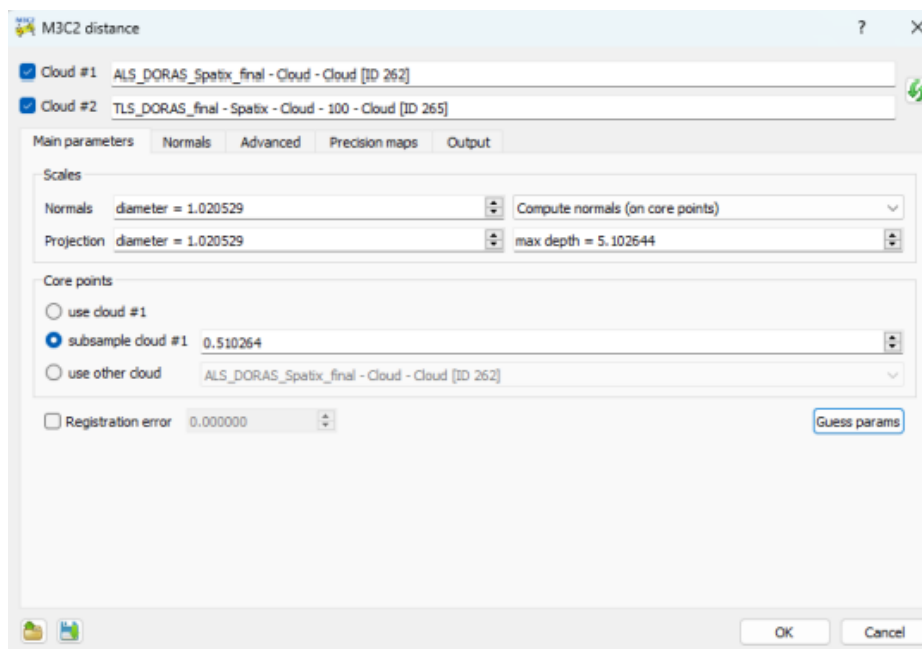
5.2.5.1. Cloud to Cloud Distance

Alat C2C ili *Cloud to Cloud Distance* koristi se za analizu, vizualizaciju i procjenu točnosti dva oblaka točaka koji su usklađeni (URL18). Izlazni rezultat alata C2C je STD, standardna devijacija koja reprezentira varijabilnost u podacima te raširenost pogrešaka po usklađenim oblacima točaka. Standardna se devijacija može interpretirati pri procjeni ujednačenosti podataka što znači da manja vrijednost standardne devijacije ukazuje na to da su pogreške u modelu ujednačene i konzistentne, dok viša vrijednost ukazuje na veću varijabilnost i disperziranost podataka. Niža vrijednost označuje ujednačenije usklađivanje podataka promatranog i referentnog gustog oblaka točaka. Kao referentan podatak koristio se gusti oblak točaka TLS-a koji ima najvišu točnost, odnosno najmanju pogrešku kao što je prikazano na Slici 43. Osim standardne devijacije, izlazni rezultat alata C2C je i usklađeni model dva skupa

podataka sa skalom koja kvantificira pogreške u modelu. Na taj je način dostupna i prostorna distribucija pogrešaka u modelu te omogućena interpretacija prostorne distribucije pogreške.

5.2.5.2. Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison

Drugi alat koji je korišten prilikom uspoređivanja gustih oblaka točaka je M3C2, *Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison* alat. Alat M3C3 koristi se za detekciju promjene i vizualiziranje promjene između dva gusta oblaka točaka koji su snimljeni u različito vrijeme (URL19). Tijekom korištenja alata M3C2 potrebno je postaviti nekoliko glavnih, korisničko-definiranih parametara kako bi se dobio izlazni rezultat. Na Slici 44 prikazan je izbornik alata M2C2 i *Main Parameters*.

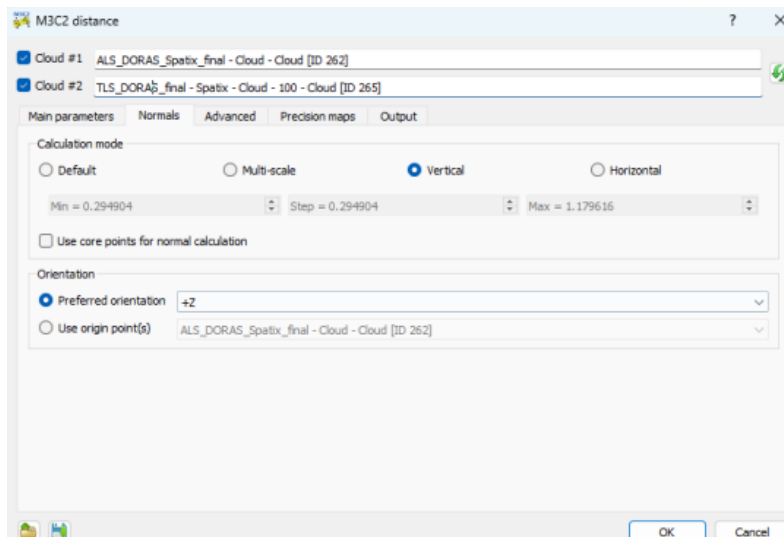


Slika 44 Alat M2C2 i Main Parameters u softveru Cloud Compare

Kao *Cloud #1* i *Cloud #2* odabiru se dva oblaka točaka na kojima se želi provesti detekcija promjene. Sljedeći parametri su *Normals Scales* i *Projection Scales*. *Normals Scales* je promjer sfere oko svake točke koja je izvojena i koristi se za izračun (URL19). Sfera se koristi za orijentaciju cilindra unutar kojega će se tražiti istovjetne točke u drugom gustom oblaku točaka (URL19). *Projection Scale* je promjer iznad navedenog cilindra, dok je *Max Depth* visina cilindra u oba smjera (URL19). *Scales* parametri ključni su jer definiraju veličine uzoraka koji se koriste tijekom analize. Postavljanjem *Scales* parametara, zapravo se definira prag udaljenosti istovjetnih točaka u dva oblaka točaka. Točke koje se nalaze unutar praga udaljenosti bit će promatrane u analizi, dok točke izvan neće biti uzete u obzir tijekom analize. Na Slici 45 *Normal* i *Projection Scales* postavljeni su na 1,02 metra i zbog toga će algoritam uzeti u obzir sve točke unutar radijusa od 1,02 metra prilikom traženja istovjetne točke u

drugom gustom oblaku točaka. Parametrom *Max depth* od 5,1 metra određena je visina, odnosno dubina cilindra unutar kojega se traži istovjetna točka u drugom gustom oblaku točaka. Alat koristi CANUPO algoritam kako bi se izmjere provele samo na određenim točkama i na taj način smanjili vrijeme potrebno za dobivanje izlaznih rezultata (URL19). Iz tog razloga se smanjuju uzorci, odnosno biraju *Core points*, a udaljenost između njih definirana je prehodno određenim parametrom *Scales*.

Drugi set parametara potrebno je odabrati u izborniku *Normals* koji su prikazani na Slici 45. *Normals* ili normalni su vektori koji su okomiti na površine objekata ili obilježja koje predstavljaju točke gustih oblaka točaka (URL19). Vektori pružaju informacije o orijentaciji ili smjeru površina svake točke u gustom oblaku točaka (URL19). Normali daju informaciju o usmjerenju površine koja je promatrana, a u alatu M3C2 se koriste za usporedbu istovjetnih točaka u dva gusta oblaka točaka.



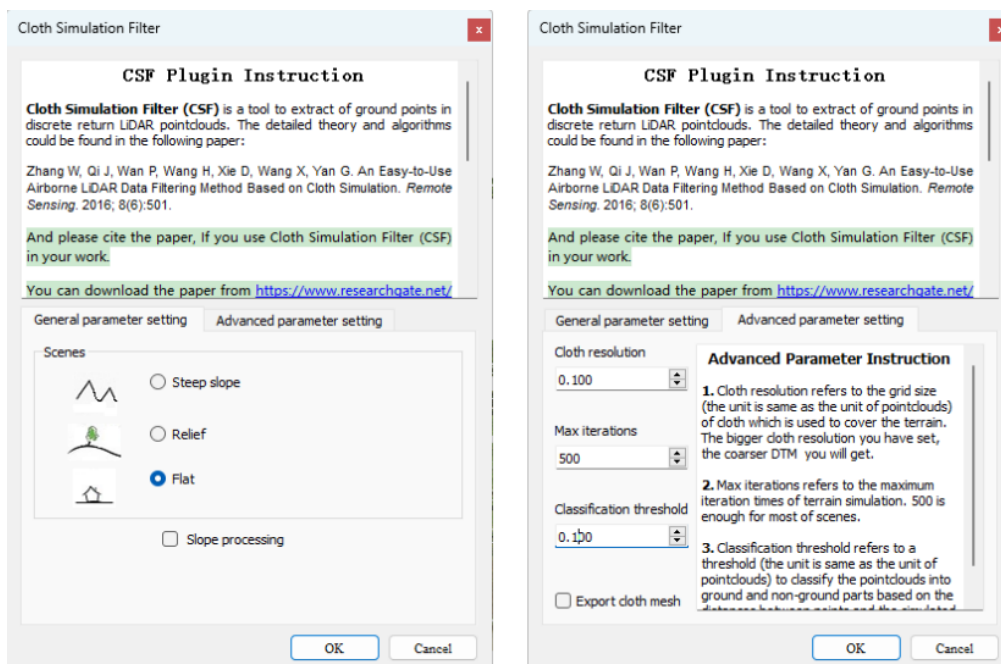
Slika 45 Alat M3C2 i Normals parametri u softveru Cloud Compare

Parametri koje je potrebno podesiti su *Calculation mode* i *Orientation*. Pomoću *Calculation mode* parametra odabire se metoda koja se koristi za izračun normala te je moguće odabrati *Default*, *Multi-scale*, *Vertical* i *Horizontal*. *Calculation mode* utječe na točnost i stabilnost normala. Ako se odabere parametar *Default* normalni se izračunavaju prema parametrima koji su definirani u *Main parameters*. Odabirom *Multi-scale* se za svaku od odabranih točaka normalni računaju na nekoliko razina i koristi se ona koja je najviše ravna. *Vertical*, koji je prilikom obrade odabran, koristi se samo za izračun normala koji su okomiti, a *Horizontal* ograničava normale u Z ravnini i u obzir uzima samo XY vrijednosti. Prikazani parametri na Slici 44 i Slici 45 korišteni su pri usporedbi TLS i GeoSLAM gustih oblaka točaka, dok su drugačiji parametri korišteni tijekom usporedbe TLS-a i ALS-a.

Preferred orientation omogućava preferiranu orijentaciju normala te je moguće odabrati $Z+$ $Z-$ i *None*. Parametar utječe na orijentaciju normala u odnosu na referentnu orijentaciju. Kao izlazni rezultat, odabrane su informacije o standardnoj devijaciji i gustoća gustog oblaka točaka u projekcijskom mjerilu. Izlazni rezultat, vizualizacija koja je dobivena prikazuje razlike između gustih oblaka točaka te vrijednosti bliže nuli predstavljaju bolje slaganje gustih oblaka točaka. Kako bi rezultati alata bili vjerodostojni potrebno je razumjeti referentnu razinu, odnosno *ground* model, gdje će negativne vrijednosti biti ispod razine, a pozitivne iznad razine tla te to ovisi o prethodnoj validaciji digitalnog modela reljefa.

5.2.5.3. Cloth Simulation Filter

Cloth Simulation Filter koristi se za izdvajanje *ground* modela u gustim oblacima točaka od ostalih točaka (Zhang i dr., 2016). Algoritam radi na način da se originalni gusti oblak točaka okrene naopako, a zatim se na obrnutu površinu odozgo spusti „tkanina“, odnosno *cloth* (Zhang i dr., 2016). Analizom interakcija između navedene tkanine i odgovarajućih LiDAR točaka, konačni oblik tkanine može se odrediti i koristiti kao osnova za klasifikaciju izvornih točaka na *ground* i ostale točke (Zhang i dr., 2016). Potrebno je odrediti nekoliko korisničko-definiranih parametara prilikom korištenja alata koji je su prikazani na Slici 46.



Slika 46 Cloth Simulation Filter i podešeni korisničko-definirani parametri

U *General parameters* potrebno je postaviti oblik terena područja istraživanja te je prilikom odabira korisničko-definiranih parametara postavljen na *Flat* zbog zaravnjenih površina na području istraživanja. Tri parametra, *Cloth resolution*, *Max iterations* i *Classification threshold* čine *Advanced Parameters*. *Cloth Resolution* odnosi se na prostornu rezoluciju „tkanine“ koja

će se koristiti i što je vrijednost veća, digitalni model reljefa će biti grublji (URL19). Ovaj je parametar podešen na 10 centimetara. *Max iterations* odnosi se na maksimalni broj ponavljanja simulacije terena (URL20) i podešen je na 500 što je dovoljno za većinu područja. *Classification threshold* odnosi se na klasifikaciju gustog oblaka točaka na *ground* i ostale dijelove na temelju udaljenosti između točaka i simuliranog *ground* modela (URL20). Parametar je postavljen na 10 centimetara. Isti su parametri korišteni za sva tri *ground* modela.

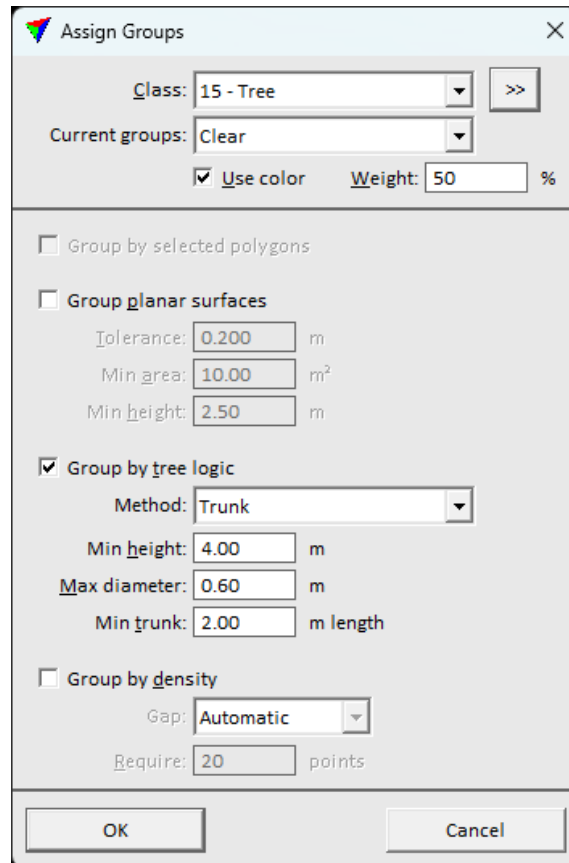
5.2.5.4. LAS Dataset to Raster

LAS podatci su pretvoreni u raster u softveru ArcMap alatom *LAS Dataset to Raster*. Kao *Value Field* odabran je *Elevation* jer će ćelije dobivenog piksela imati vrijednost visine. Odabrana metoda interpolacije je *Nearest Neighbor* i *Natural Neighbor*. Odabrana prostorna rezolucija iznosila je 5 cm.

5.2.5.5. Assign Groups i Compute Distances

U softveru Spatix izdvojena su stabla od klase koja reprezentira tlo u podacima dobivenim TLS-om, međutim kako bi se tehnologije mogle usporediti, bilo je potrebno smanjiti područje istraživanja jer stajalištima TLS-a i kretanjem GeoSLAM-om nije obuhvaćenom cjelokupno područje obuhvaćeno ALS-om. Zbog toga je područje smanjeno prema mezo i mikro razini istraživanja.

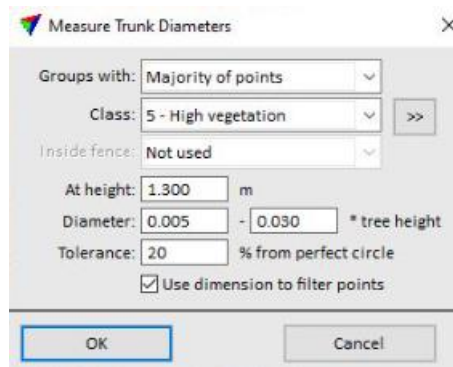
Stabla su odvojena pomoću alata *Assign Groups* u softveru Spatix, a visina stabala izračunata alatom *Compute Distances*. Alatom *Assign Groups* točke koje predstavljaju određeno stablo grupirane su i izdvojene od ostalih stabala (URL21), dok je *Compute Distances* korišten prije kako bi se dobila visina točaka koje predstavljaju stabla (URL21). Parametar *Group by tree logic* korišten je prilikom izračuna te je odabrana metoda grupiranja *Trunk* koja grupira točke na temelju debla vidljivih u gustom oblaku točaka (URL21). Metoda je prikladna za iznimno guste oblake točaka prikupljene ALS-om, TLS-om i GeoSLAM-om, dok se metoda *Highest point* koristi većinom samo za podatke dobivene ALS-om (URL21). *Min height* je minimalna visina grupe iznad tla, dok je *Max diameters* maksimalan promjer debla stabla (URL21). *Min trunk* predstavlja minimalnu duljinu debla, a ostali parametri nisu korišteni tijekom izračuna (URL21).



Slika 47 Alat *Assign Groups* u softveru Spatix te korišteni korisničko-definirani parametri

5.2.5.6. Create Tree Cells i Measure Trunk Diameters

Mikro razina istraživanja obuhvatila je izdvajanje stabala te procjenu debljine stabala TLS i GeoSLAM tehnologijom. Mikro razina područja određena je kretanjem s GeoSLAM-om. Obrada podataka odrađena je u softveru Spatix pomoću *Trees toolboxa*. *Trees toolbox* koristi se za stvaranje, pomicanje, modificiranje i mjerenje obujma debla stabala (URL22). Rezultati su postignuti alatima *Create Tree Cells* i *Measure Trunk Diameters*. Alat *Measure Trunk Diameters* mjeri promjer debla stabala na temelju kružnih elemenata na deblima otkrivenim u gustom oblaku točaka (URL23). Mjerenje promjera debla najpouzdanije je u vrlo gustim oblacima točaka prikupljenih pomoću TLS-a ili mobilnog sustava skenera poput GeoSLAM-a (URL23).



Slika 48 Alat Measure Trunk Diameters u softveru Spatix (URL23)

Na Slici 48 nalazi se primjer korisničko-definiranih parametara koji se mogu odabrati korištenjem alata. U *Groups with* bira se broj točaka koji će se uzeti u obzir prilikom izračunavanja promjera debla (URL23). *Class* predstavlja klasu u kojoj se nalazi većina debela stabala (URL23). *At height* omogućuje odabir visine na kojoj će se izmjeriti promjer stabala i tijekom obrade je podešen na 1,30 m. *Diameter* se koristi prilikom izrade formule za računanje promjera stabala (URL23). *Tolerance* određuje koliko se promjer debla može razlikovati od kružnog oblika (URL23).

6. Rezultati i rasprava

6.1. Rezultati mezo razine istraživanja

Proces obrade podataka dobivenih zračnim laserskim skenerom rezultirao je izradom digitalnog modela reljefa pomoću *ground* modela koji je izdvojen od ostalih klasa. Gustoća gustog oblaka točaka (engl. Point Cloud Density) iznosila je 479 točaka na m^2 , dok je Ground Sampling Distance iznosio 1,36 cm. Nakon postavljenih parametara i obrade, značajno je smanjen broj točaka u gustom oblaku točaka sa 614 539 922 na 259 952 176 točaka. Moudry i dr. (2019) za validaciju modela na području od 450 ha koriste 1439 točke, dok je za validaciju modela mezo razine istraživanja od 9,17 ha korišteno 179 točaka. Nakon predobrade podataka napravljena je ukupna i validacija prema klasi pomoću tri indikatora, MAE – srednja apsolutna pogreška, STD – standardna devijacija i RMSE – srednja kvadratna pogreška.

Tablica 9 Ukupna i validacija prema klasi gustog oblaka točaka (u metrima)

Indikator	LULC (Land Use Land Cover) klasa			
	Sve točke	Asfalt	Zemljani put	Travnjaci
Broj točaka	190	23	20	147
MAE (m)	0.0683	0.0964	0.0941	0.0605
STD (m)	0.0845	0.0160	0.0488	0.0737
RMSE (m)	0.0846	0.0977	0.0966	0.0806

Indikatori koji su izračunati su *Mean Absolute Error*, *Standard Deviation* i *Root Mean Square Error* za sve točke te nakon toga za svaku klasu posebno. Najviše prikupljenih točaka spada pod klasu travnjaci jer se na najvećem dijelu područja istraživanja nalaze travnjaci pod krošnjama stabala. Područje istraživanja omeđeno je asfaltom, a kroz područje prolazi i zemljani put.

MAE ili srednja apsolutna pogreška označava procjenu koliko je određena vrijednost blizu stvarnoj vrijednosti (Rogers i dr., 2020). Često se koristi kao za ocjenu točnosti modela ili određenog sustava predviđanja, a niže vrijednosti ukazuju na višu točnost pri modeliranju (Rogers i dr., 2020). MAE se računa po formuli:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}.$$

Standardna devijacija ili STD je mjera varijabilnosti podataka (Bui i Glennie, 2023). Više vrijednosti označavaju veću varijabilnost, to jest rezultati određenog modela su šire raspršeni oko srednje ili očekivane vrijednosti (Bui i Glennie, 2023). Ako je standardna devijacija visoka, model čine podatci koji su široko raspršeni i manje dosljedni, dok niska standardna devijacija označava manju varijabilnost i veću dosljednost podataka. STD se računa po formuli:

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Srednja kvadratna pogreška ili RMSE mjeri prosječnu razliku između stvarnih i procijenjenih vrijednosti modela (Liu i dr., 2015). S obzirom na to da ovaj indikator grešku uvijek prikazuje u pozitivnim vrijednostima jer se radi o kvadratnom korijenu, olakšana je interpretacija pogreške. RMSE je osjetljiv na ekstremne vrijednosti jer se razlika između stvarnih i procijenjenih vrijednosti kvadrira te omogućuje procjenu koliko je model varijabilan, udaljen od točnih vrijednosti (Liu i dr., 2015). Veći RMSE ukazuje na manju točnost u modelu, dok manju RMSE obrnuto (Liu i dr., 2015). RMSE se računa po formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Svi statistički indikatori za validaciju modela pokazuju manju vrijednost pogreške od 10 centimetara. Podatci, usprkos poteškoćama poput gustoće krošanja i vegetacije, imaju malu varijabilnost i približni su stvarnim vrijednostima. Čak i u područjima u kojima su krošnje iznimno guste je pogreška veoma mala. Statistika koja je izračunata u softveru DJI Terra nakon završetka obrade podataka prikazana je na Tablici 10.

Tablica 10 Statistika izračunata u softveru DJI Terra

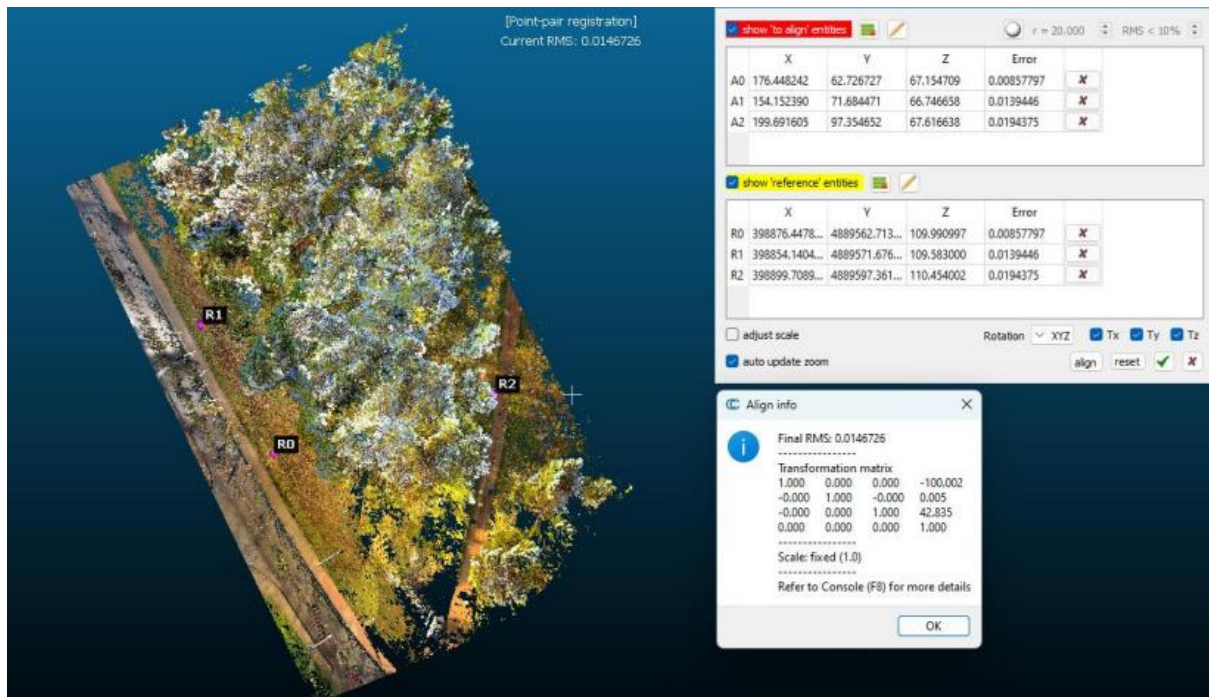
Average Altitude Difference	Min Altitude Difference	Max Altitude Difference	Average Absolute Value of Altitude Difference	Root Mean Square	Standard Deviation
0.001685	-0.135815	0.240425	0.069167	0.085170	0.085388

Srednja kvadratna pogreška i standardna devijacija izračunate su koristeći sve orijentacijske i kontrolne točke koje su bile prikupljene. Srednja kvadratna pogreška označava kvadratnu razliku između procijenjenih i referentnih vrijednosti, što znači da dobiveni rezultati odstupaju do 8,5 cm od referentnih vrijednosti. Standardna devijacija od 8,5 cm predstavlja vrijednost koliko rezultati variraju, odnosno odstupaju od srednje vrijednosti. Vrijednosti su većinom grupirane oko srednje vrijednosti, to jest dosljedni su i područje je homogeno bez velikih odstupanja u rezultatima. S obzirom na gustoću krošanja stabala, veličinu područja istraživanja i primjenu, ovi su rezultati iznimno zadovoljavajući. Statistički indikatori kao što je i ranije navedeno ponovno pokazuju centimetarsku točnost pri modeliranju. U istraživanju Moudryja i dr. (2019) srednja kvadratna pogreška varira između 15 i 21 centimetra te višu pogrešku pripisuju strmom terenu, vegetacijom koja se nalazi na padinama i u jarcima te iznimno gustom vegetacijom. Međutim, vegetacija je i na području ovog istraživanja iznimno gusta, a model pouzdaniji. Ravno područje, odnosno nedostatak nagiba pogoduje pouzdanosti modela jer je u takvom području i Moudryja i dr. (2019) model najpouzdaniji. Vjerojatno bi *oblique* misija, naspram korištene *double-grid* misije dala bolje rezultate. Krošnje i bočni dijelovi stabala bili bi snimljeni iz više kutova što bi povećalo gustoću gustog oblaka točaka, te bi zbog toga, osim krošnje, i debla stabala bilo lakše izdvojiti.

Mezo razina istraživanja uključivala je i usporedbe *ground* modela koji su dobiveni trima različitim tehnologijama, ALS-om, TLS-om i GeoSLAM-om.

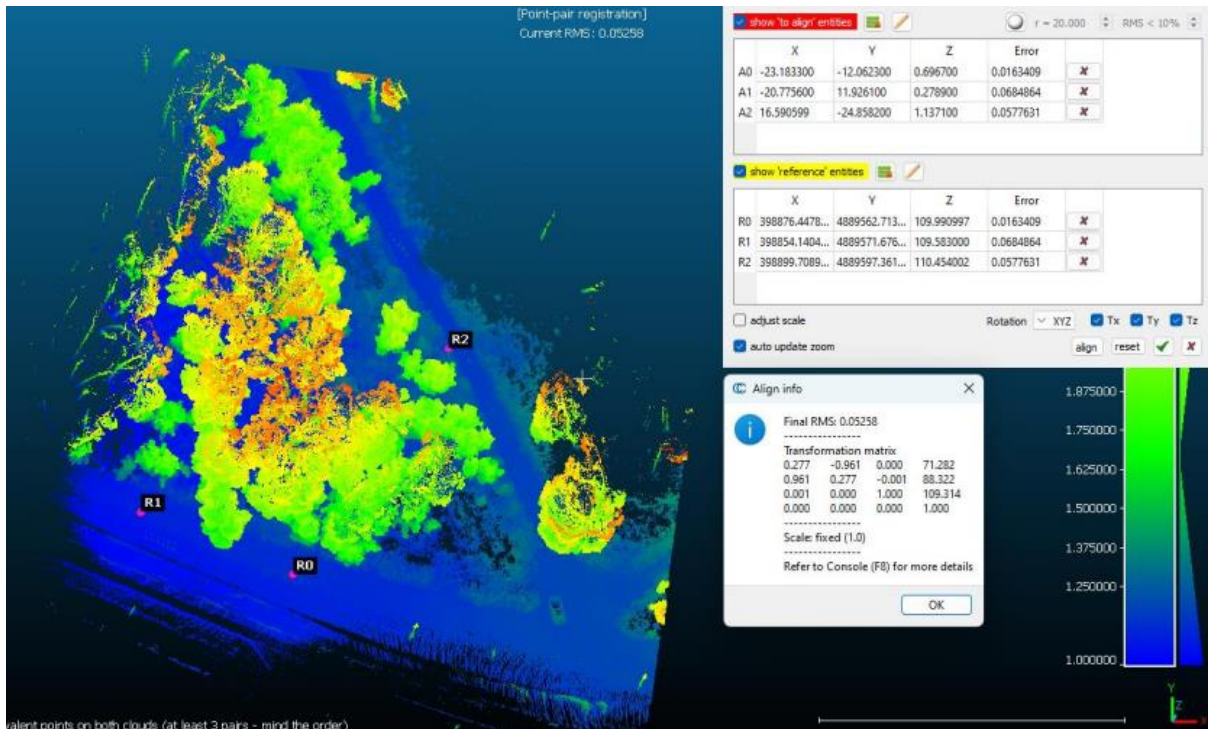
Nakon što su podatci TLS-a obrađeni, dobivena je srednja kvadratna pogreška modela koja je prikazana na Slici 48. RMSE iznosi 1,47 centimetara i ovaj je rezultat postignut velikom

gustoćom uzorkovanja i koloriziranim podacima koji su pomogli pri označavanju kontrolnih točaka. Dobiveni rezultati odstupaju za 1,47 centimetara od referentnih vrijednosti, odnosno onih koje su prikupljene GPS-om.



Slika 49 Model i srednja kvadratna pogreška TLS-a

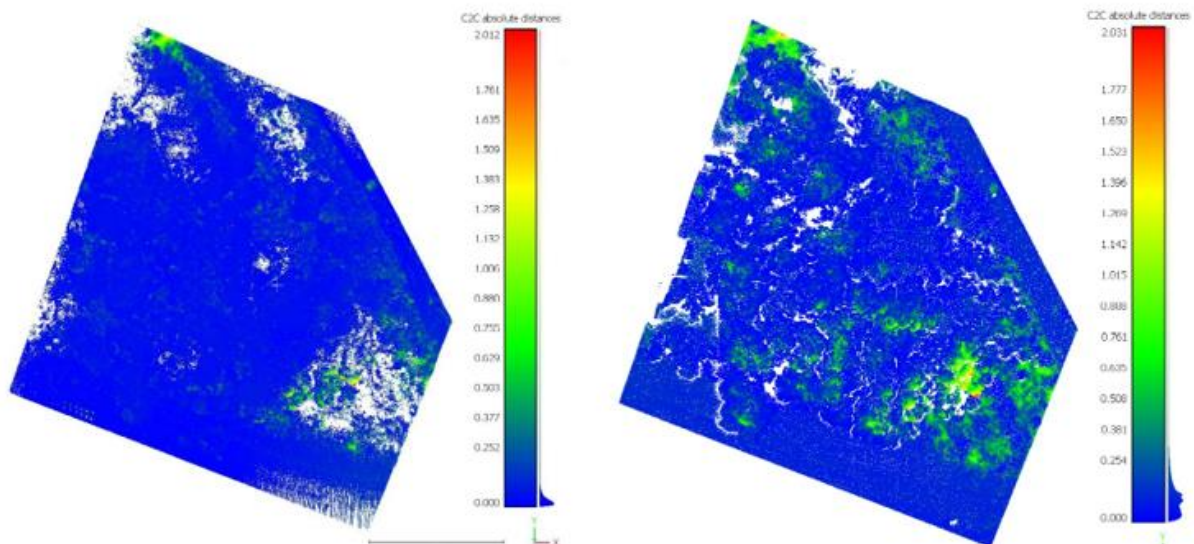
Srednja kvadratna pogreška GeoSLAM podataka iznosi 5,23 centimetra. GeoSLAM podatci nisu kolorizirani i detektiranje kontrolnih točaka je teže nego na podacima dobivenih TLS-om te je stoga i točnost manja. Srednja kvadratna pogreška prikazana je na Slici 50.



Slika 50 GeoSLAM model i srednja kvadratna pogreška

6.1.1. Cloud to Cloud Distance

Standardna devijacija ALS-a u usporedbi s TLS-om iznosila je 13,4 cm, dok je standardna devijacija GeoSLAM-a u usporebi s TLS-om iznosila 6,7 cm. Oba su modela prikazana na Slici 51.



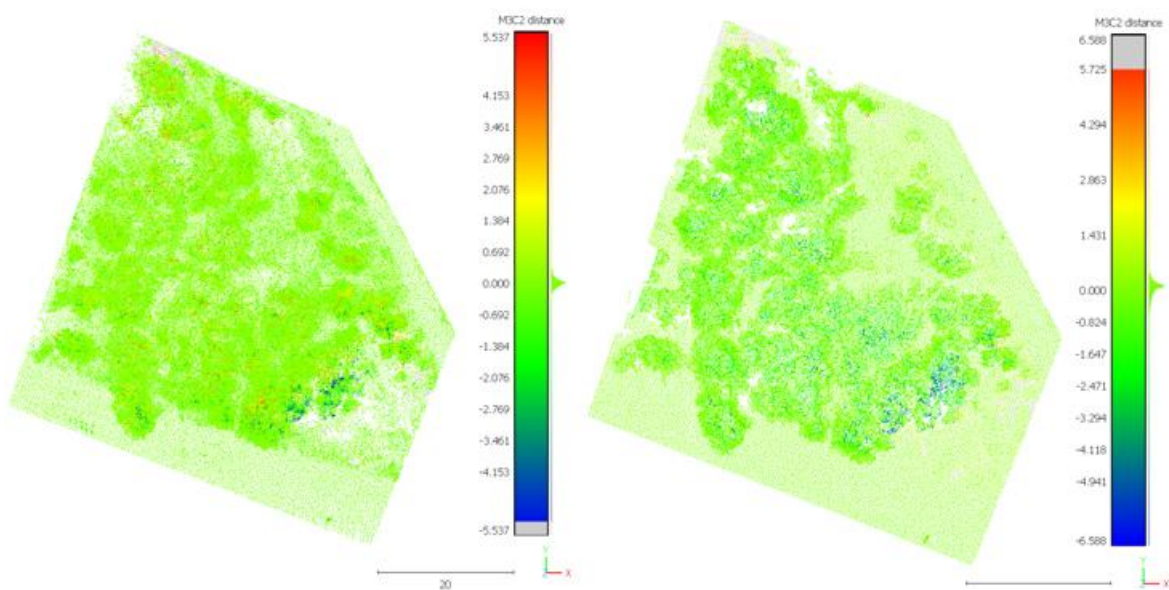
Slika 51 C2C modeli (lijevo GeoSLAM, desno ALS)

Slika 51 prikazuje usklađene modele koji prikazuju usklađenost gustih oblaka točaka kako bi se slagali s referentnim oblakom točaka. Svaka od točaka u gustom oblaku točaka je

promijenjena kako bi se smanjile razlike između dva gusta oblaka točaka. Apsolutna udaljenost, prikazana na skali, predstavlja udaljenost između točaka, odnosno razliku ili pogrešku nakon usklađivanja podataka. Te udaljenosti pokazuju koliko je svaka točka u procijenjenom oblaku morala biti pomaknuta da bi se postiglo poravnanje s referentnim oblakom točaka. Apsolutna udaljenost je euklidska udaljenost između točaka u procijenjenom i referentnom oblaku točaka (URL19). Kad bi apsolutna udaljenost bila jednaka nuli, dva gusta oblaka točaka bi bila savršeno usklađena. Drugim riječima, ako postoji pogreška, postoji i udaljenost između dva oblaka točaka. Ako promotrimo Sliku 51, vidjet ćemo da su na lijevom, GeoSLAM modelu udaljenosti veoma niske, većina područja je obojana tamnoplavo do plavo što označava gotovo minimalnu udaljenost između dva oblaka točaka. Pogreške se većinom javljaju u područjima gustih krošnji, dok se malen broj značajnijih pogrešaka nalazi na samim vrhovima krošnji. Na desnom, ALS modelu greške su više i šire raširene, međutim slično kao na GeoSLAM modelu su najveće na vrhovima krošnji.

6.1.2. Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison

Skala na Slici 52 predstavlja udaljenost između istovjetnih točaka u gustim oblacima točaka.

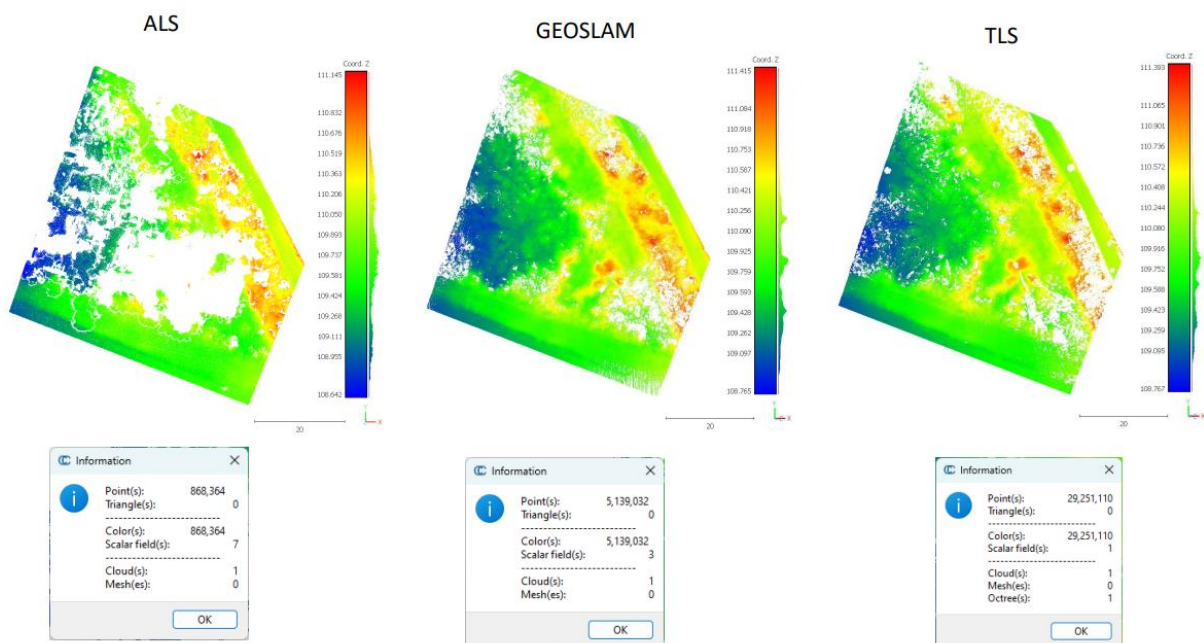


Slika 52 M3C2 modeli (lijevo GeoSLAM, desno ALS)

Standardna devijacija dobivena alatom M3C2 može se interpretirati kao mjera raspršenosti ili varijabilnosti udaljenosti između određenih točaka u dva gusta oblaka točaka. Prikazuje koliko vrijednosti odstupaju od srednje vrijednosti. Niže vrijednosti, bliže nuli označavaju točnije i preciznije rezultate jer su točke okupljene oko srednje vrijednosti udaljenosti. Više vrijednosti bi označavale veću varijabilnost u poklapanju gustih oblaka točaka što je često uzrokovano

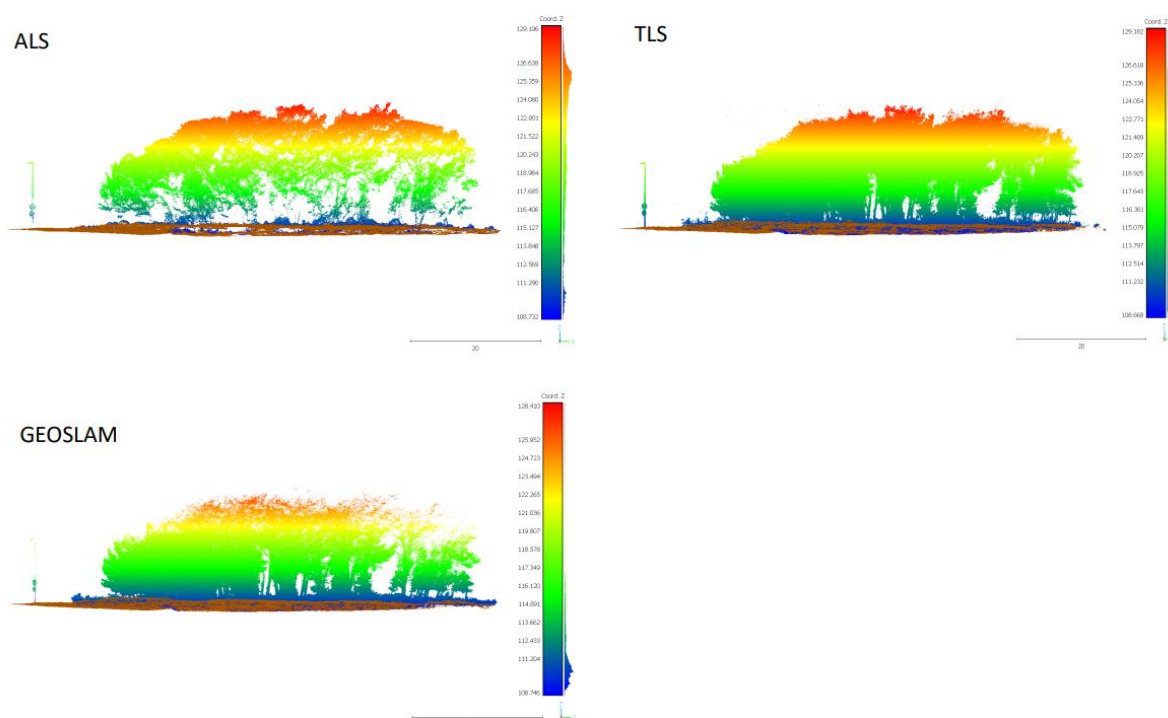
pogreškama u registraciji točaka. Standardna devijacija gustog oblaka točaka iznosi 6,9 cm, dok ALS-a iznosi 8,2 cm što čini ALS iznimno točnim. Kao što je razvidno na fotografiji, najveće se pogreške u oba modela pojavljuju na visokim krošnjama. U nižim dijelovima su udaljenosti između gustih oblaka točaka veoma male, približne nuli. Na jugoistočni dijelovima modela pojavljuju se i negativne udaljenosti, što znači da se točke nalaze ispod površine koja predstavlja tlo.

Model sastavljen od najviše točaka, njih 29 251 110 je TLS koji prikazuje najveću pokrivenost i u dijelovima gdje su stabla najgušća, što se može pripisati načinu na koji TLS prikuplja podatke. GeoSLAM model sastavljen je od 5 139 032 točaka i cijelo je područje iznimno prekriveno točkama, ali također manje u dijelovima gdje se nalaze guste krošnje stabala.



Slika 53 ALS, TLS i GeoSLAM ground modeli

Razlike između najniže i najviše točke između tri tehnologije su decimetarske, osim razlike u najnižoj točki GeoSLAM-a i TLS-a koja je centimetarska. *Ground* model sastavljen od ALS podataka broji najmanje točaka te postoje određene praznine u modelu što je uvjetovano gustoćom krošnji i snimanjem iz zraka. Područje koje je prikazano uvjetovano je najmanjim područjem koje je snimano, odnosno stajalištima TLS-a i kretanjem s GeoSLAM-om. Stoga prednosti ALS-a, koji efikasno snima veća područja od prikazanog, ne dolaze do izražaja. TLS i GeoSLAM prikazuju mogućnost skeniranja i izrade detaljnih modela u gustim šumskim područjima. S obzirom na specifikacije, prednosti i nedostatke tri tehnologije, modeli su iznimno uspješni. Na Slici 53 prikazana su tri modela površina koje su prikazane na području istraživanja.

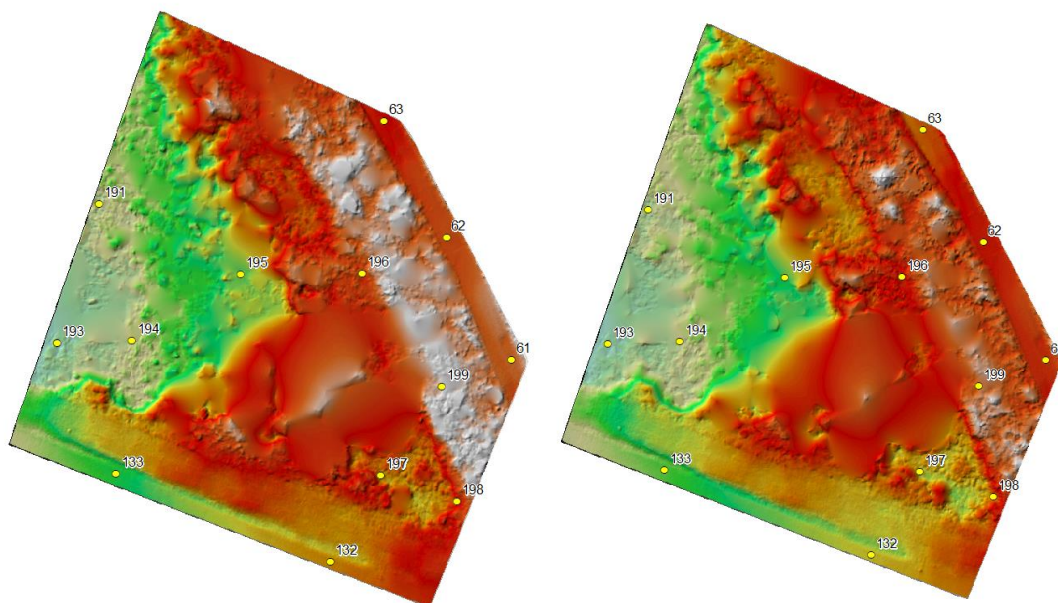


Slika 54 ALS, TLS i GeoSLAM modeli

Naočigled vidljiva razlika između TLS-a i GeoSLAM-a je što TLS bolje skenira u visini nego GeoSLAM. Jurjević i dr. (2021) u svom radu također ističu da je pogreška GeoSLAM modela veća kod vrhova krošnji stabala koja su viša od 15-20 metara, što se može istaknuti kao glavni nedostatak GeoSLAM tehnologije. Štoviše, u takvim je područjima i velika razlika između ALS i GeoSLAM modela. Nedostatke GeoSLAM-a, bi u fuziji s ALS-om, nadomjestio ALS te bi kombinirani model vjerojatno dao optimalne rezultate. Uz dodatno filtriranje podataka TLS-a, dobivaju se iznimno dobri rezultati u modeliranju. Razlike između najviših i najnižih točaka ponovno su decimetarske.

6.1.3. LAS Dataset to Raster

Vizualno, na područjima gdje su krošnje bile izrazito guste, nedostajale su točke koje reprezentiraju tlo te je na tim područjima izvršena interpolacija. Međutim, na oba modela su ta područja iznimno mutna i previše uglačena.

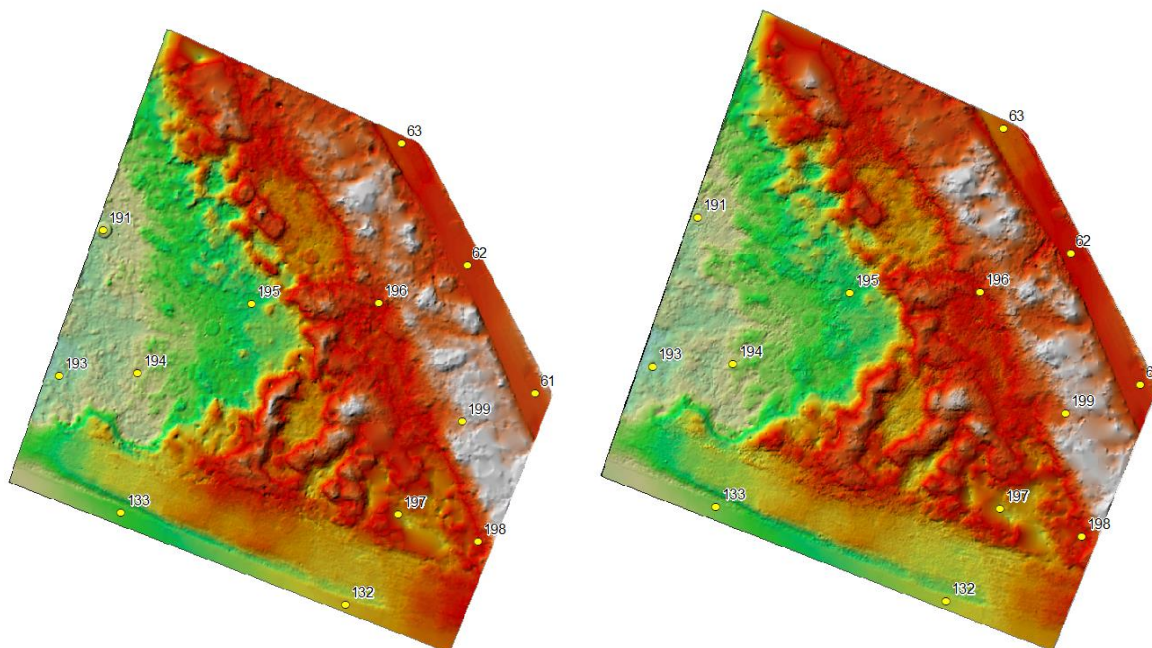


Slika 55 Ground model ALS-a obrađen u softveru Spatix (lijevo) i Cloud Compare (desno)
 Pogreška je najveća u točki 198 jer na tom području je krošnja izrazito gusta i teže je odvajanje tla od ostalih točaka. Na točki 198 i 61 u oba modela je pogreška decimetarska, a na ostalim točkama centimetarska.

Tablica 11 Statistika ALS Ground modela

Software	Spatix	Cloud Compare
Count	13	13
Minimum	-0,114	-0,111
Maximum	0,137	0,129
Sum	-0,245	-0,203
Mean	-0,019	-0,016
STD	0,069	0,070

Odabrano je 13 točaka koje će se koristiti za validaciju ALS ground modela. Važno je za napomenuti da je gusti oblak točaka u softveru Cloud Compare prorijeđen te minimalan razmak između točaka iznosi 5 mm. Izvojene su vrijednosti unutar trinaest točaka i uspoređene s vrijednostima točaka prikupljenih RTK GPS-om te je kod modela dobivenog u softveru Spatix dobivena vrijednost od 6,92 cm, dok kod modela dobivenog u softveru Cloud Compare, standardna devijacija od 7,06 cm. Nadalje, minimalne vrijednosti i vrijednosti pogreške imaju negativan predznak, što znači da su često točke niže od referentnih vrijednosti.



Slika 56 Ground model TLS-a obrađen u softveru Spatix (lijevo) i Cloud Compare (desno)

Ground model dobiven TLS-om ima grublju teksturu od modela dobivenog ALS-om. Područja koja su na ALS *ground* modelu previše ugačena, na TLS-u nisu zbog gustoće prikupljanja podataka i mogućnosti prodiranja kroz grane i guste krošnje koje se nalaze bliže tlu. Decimetarske pogreške nalaze se na točkama 191, 194, 197 i 198 jer su na tom području krošnje najgušće i na tim je područjima najteže odvojiti tlo od preostalih točaka. Na ostalim su točkama pogreške centimetarske te niti jedna od točaka ne nalazi se ispod tla, odnosno pogreška nema negativan predznak.

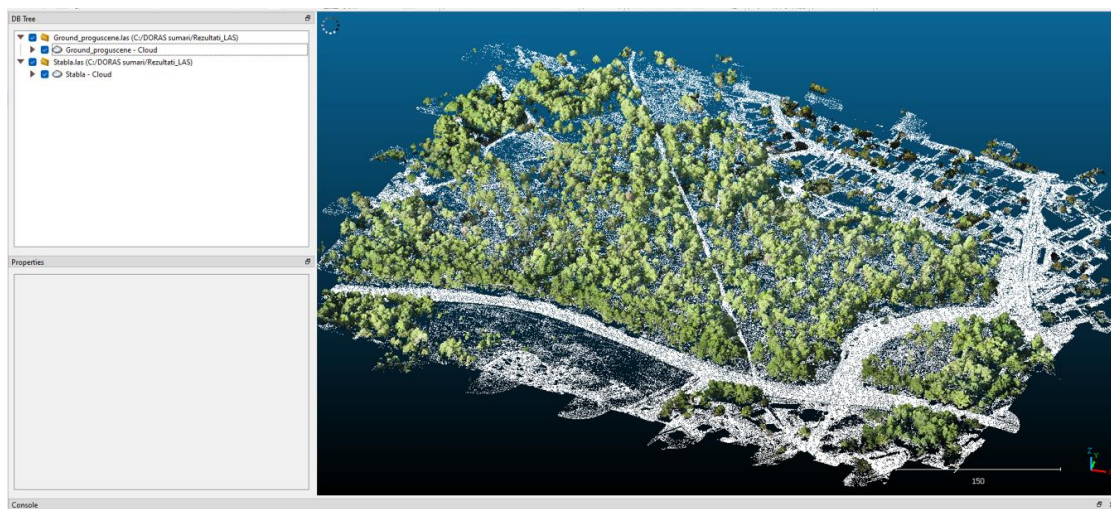
Tablica 12 Statistika TLS Ground modela

Software	Spatix	Cloud Compare
Count	13	13
Minimum	0,000003	0,000003
Maximum	0,323	0,358
Sum	1,379	1,668
Mean	0,106	0,128
STD	0,108	0,109

Kao i kod validacije ALS-a, odabrano je 13 točaka koje će se koristiti za validaciju TLS ground modela. Gusti oblak točaka u softveru Cloud Compare prorijeđen je te minimalan razmak između točaka iznosi 5 mm. Izvojene su vrijednosti unutar trinaest točaka i uspoređene s vrijednostima točaka prikupljenih RTK GPS-om te je kod modela dobivenog u softveru Spatix

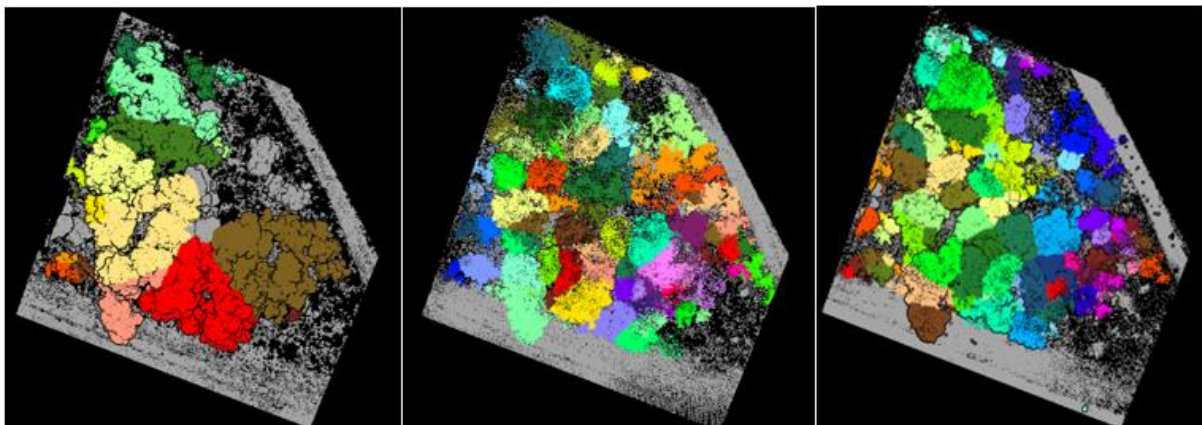
dobivena vrijednost od 10,8 cm, dok je u softveru Cloud Compare dobivena vrijednost od 10,9 cm. Standardna devijacija viša je kod TLS-a nego kod ALS-a zbog nekoliko vrijednosti pogreške koje su decimetarske i pritom označavaju vrijednosti značajno više od ostalih. Zbog toga je varijabilnost pogreške viša kod modela TLS-a. Valja istaknuti kako je područje koje je modelirano iznimno ravno te bi razlika između modela bila veća kad bi odabrano područje istraživanja bilo više vertikalno raščlanjeno.

Važno je za napomenuti da, nakon što se stabla međusobno grupiraju, moguće je, u softveru Spatix, dodatno progustiti točke koje predstavljaju tlo. Na Slici 57 mogu se vidjeti izdvojeni gusti oblaci točaka stabala i tla.



Slika 57 Izdvojene klase stabala i tla prikazane u softveru Cloud Compare

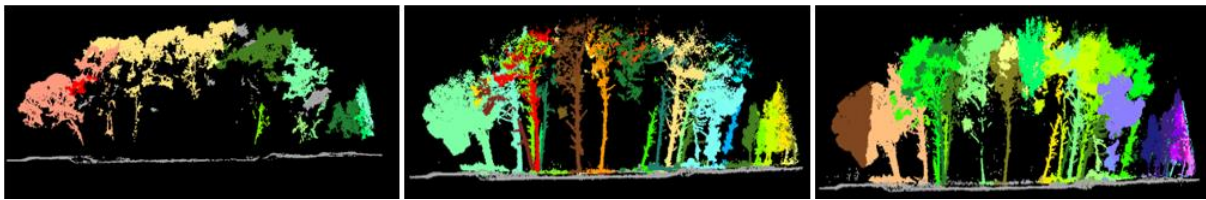
Isti su korisničko definirani parametri korišteni za izdvajanje stabala ALS-a, TLS-a i GeoSLAM-a te su rezultati prikazani na Slici 58.



Slika 58 Izdvojena stabla ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a alatom Assign Groups

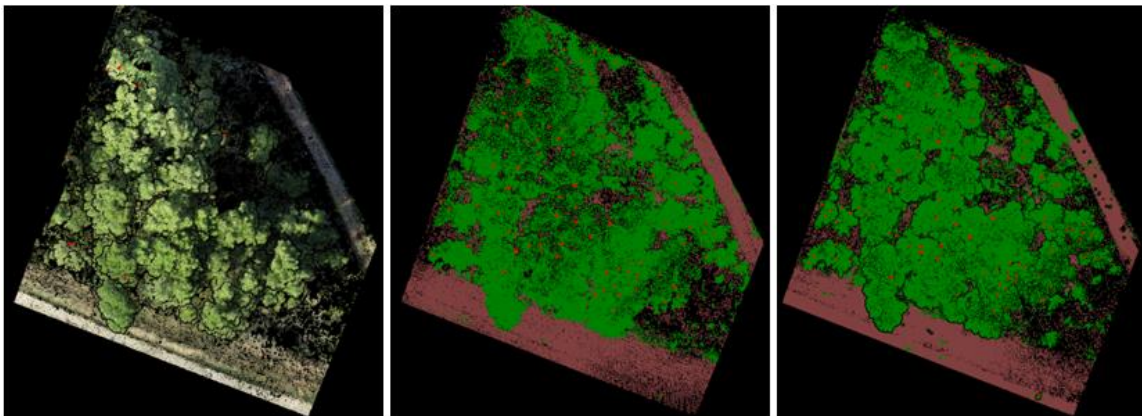
Stabla su najlošije izdvojena, odnosno grupirana su na lijevom, modelu ALS-a jer su točke na vrhovima krošnji najgušće, dok su kod modela u sredini i desnog modela točke najgušće pri

nižim dijelovima krošnje. Tijekom obrade, odabrana je metoda grupiranja prema deblu čije su točke gušće na TLS-u i GeoSLAM-u, a rijetke na ALS-u. Zbog male gustoće, točke koje predstavljaju deblo na ALS-u nisu prepoznate te su točke koje predstavljaju krošnju drugog stabla, pridodane grupi čije je deblo prepoznato. Stoga je na modelu ALS-a prepoznato samo nekoliko stabala. Zhou i dr. (2020) ističu da je metoda segmentacije stabala usmjerena na segmentaciju krošnje koja, zbog nedostatka informacija o deblu, dovodi do nezadovoljavajuće segmentacije i grupiranja više krošnji u jednu. Stabla su na GeoSLAM-u izdvojena bolje nego na TLS-u jer su oblici krošnji pravilniji te se rjeđe događa grupiranje iste krošnje u dva stabla. Najviše je stabala izdvojeno na modelu TLS-a. Profili su prikazani na Slici 59.



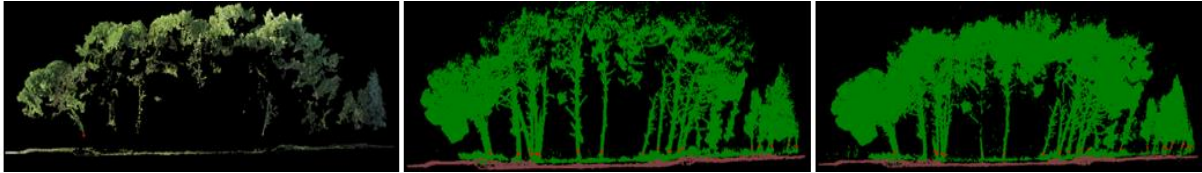
Slika 59 Profili izdvojenih stabala ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a

Razvidno je da su na gustom oblaku točaka TLS-a određene krošnje grupirane kao dva stabla, dok je nekoliko krošnji na modelu ALS-a grupirano kao jedno stablo. Model GeoSLAM-a uspješniji je jer su greške pri izdvajanju i grupiranju vizualno manje, a krošnje pravilnije.



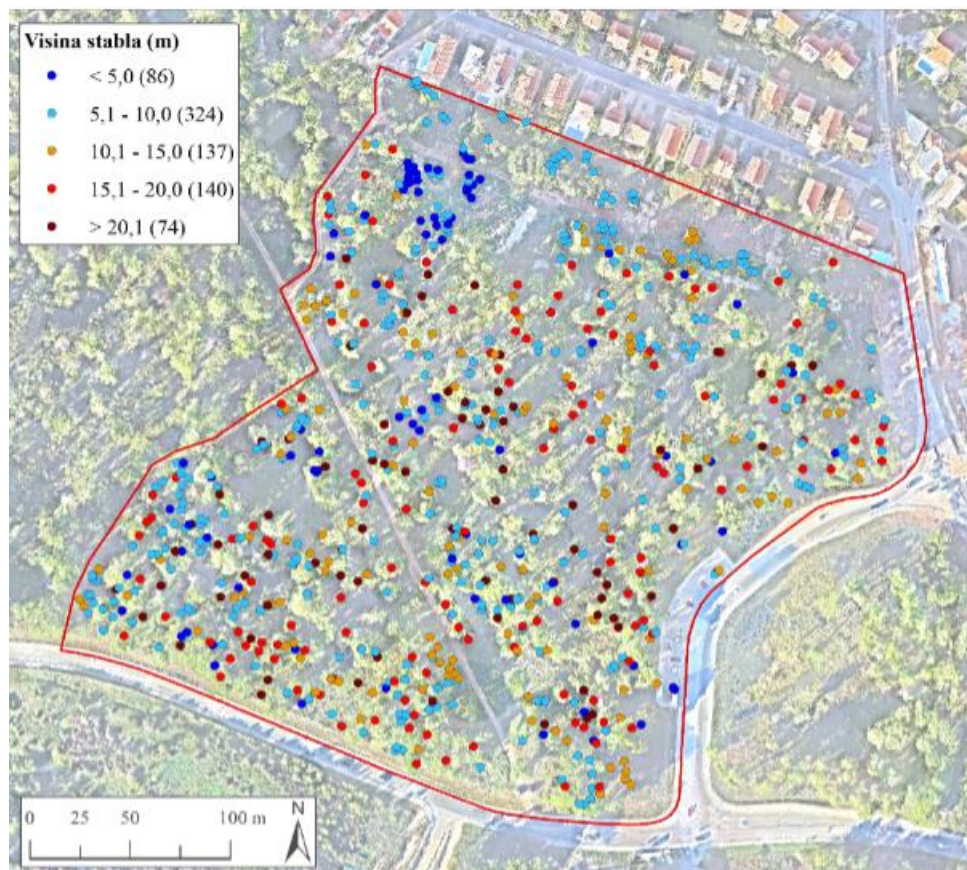
Slika 60 Crvene točke kao izdvojena stabla na ALS-u, GeoSLAM-u i TLS-u

Samo je nekoliko stabala izdvojeno na modelu ALS-a jer debla nisu vidljiva, a stabla su grupirana i izdvojena prema deblima. Na modelu TLS-a izdvojeno je najviše stabala, a neka su ista su stabla izdvojena nekoliko puta. Stabla su najpravilnije izdvojena na GeoSLAM-u što je jasnije prema crvenim oznakama na deblima vidljivim na Slici 60.



Slika 61 Profili izdvojenih stabala ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a

Na odabranom profilu ALS-a izdvojeno je samo jedno stablo. Na modelu GeoSLAM-a su stabla izdvojena pravilno, dok su na modelu TLS-a neka od stabala izdvojena dva puta, međutim krošnje su punije nego kod GeoSLAM-a jer kao što je već navedeno, GeoSLAM tehnologija je lošija pri skeniranju visokih krošnji stabala. S obzirom na to da je cilj mezo razine istraživanja bio izdvojiti stabla, GeoSLAM tehnologija predstavlja optimalno rješenje za izdvajanje stabala.



Slika 62 Visina stabala izračunata pomoću alata *Compute Distance*

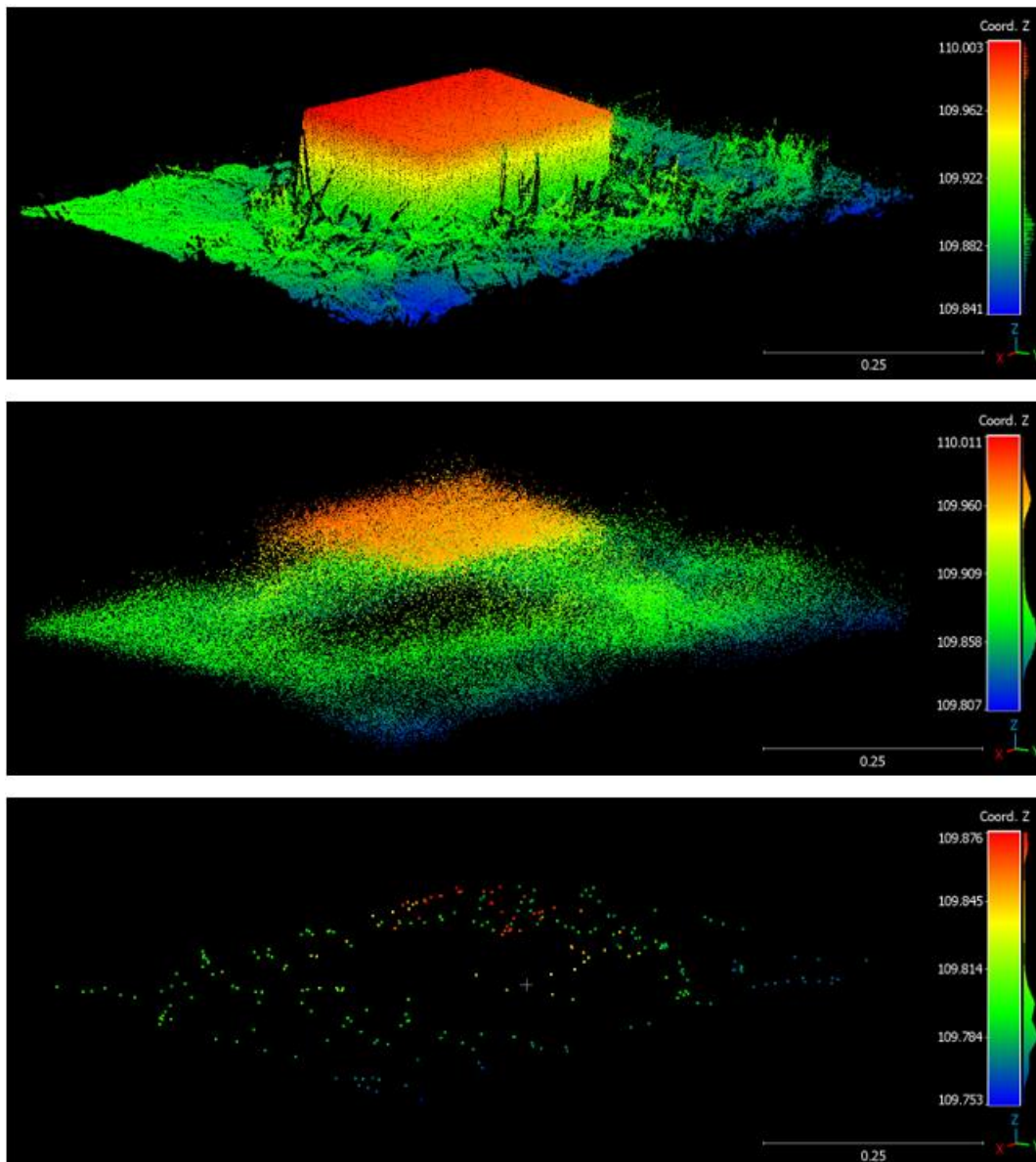
Stabla kojima je visina izračunata klasificirana su u pet razreda prikazanih na Slici 62. Stabla su izdvojena i visina im je izračunata pomoću gustog oblaka točaka dobivenog ALS-om. Najviše je stabala u razredu između 5 i 10 metara visine, a najmanje je najviših stabala koja su viša od 20 metara. Ukupno je izdvojeno 761 stablo na površini od 9,17 ha.

6.1.4. Relativna točnost LiDAR tehnologija

Kako bi se mogla usporediti relativna točnost svake od tehnologija, uspoređena je površina siporeks bloka na kojemu se nalazila orijentacijska točka. Stvarne dimenzije fizičkog modela siporeks bloka, koji je već prikazan u radu, iznosila je 601,3875 cm² te je izmjerena površina i izračunata postotna pogreška modela dobivena trima tehnologijama, ALS-om, TLS-om i GeoSLAM-om. Najmanju vrijednost postotne pogreške ima terestrički laserski skener koji aproksimira siporeks blok s najvećim brojem točaka. Površine modela i postotne pogreške nalaze se u Tablici 13. Blok siporeksa modeliran TLS-om ima najmanju postotnu pogrešku, odnosno površina modela je najpribližnija fizičkom modelu. Model dobiven GeoSLAM-om ima veliku vrijednost postotne pogreške jer je model predimenzioniran. TLS, čija se frekvencija laserskog pulsa nalazi u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra, omogućuje pouzdanije, gušće i točnije skeniranje objekata poput bloka siporeksa. S druge strane, sporije skeniranje, brže kretanje prostorom istraživanja, veće pogreške u relativnoj lokalizaciji te manja gustoća točaka dovode do veće relativne pogreške u GeoSLAM modelima. Iz tog su razloga manji objekti, poput bloka siporeksa, uspješnije i pouzdanije modelirani TLS-om. ALS ima veoma nisku relativnu točnost jer je objekt aproksimiran sa samo 260 točaka. ALS se kreće brže i na većoj visini u usporedbi s TLS-om i GeoSLAM-om te je stoga i relativna točnost niža. Rezultati su prikazani u Tablici 13, a modeli bloka siporeksa na Slici 63.

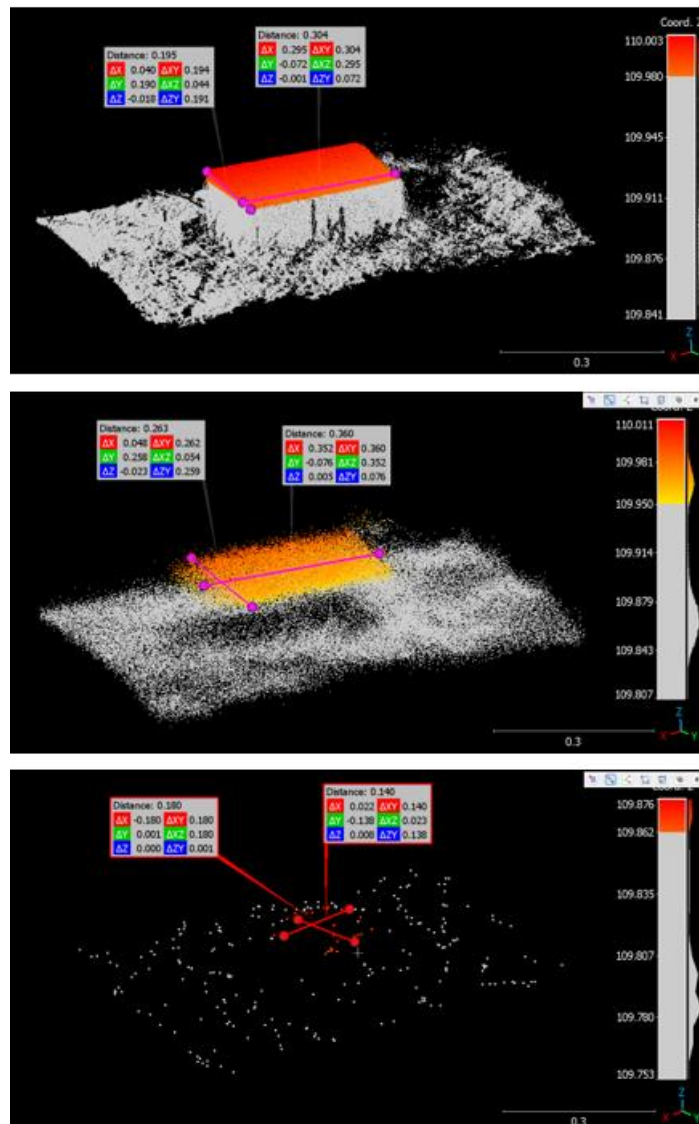
Tablica 13 Usporedba površine bloka siporeksa

	Broj točaka	Površina (cm²)	PE (%)
Fizički model		601,3875	
TLS	93597	592,8	1,428
GeoSLAM	79631	946,8	36,482
ALS	260	252	58,097



Slika 63 Modeli bloka siporeksa (TLS, GeoSLAM, ALS)

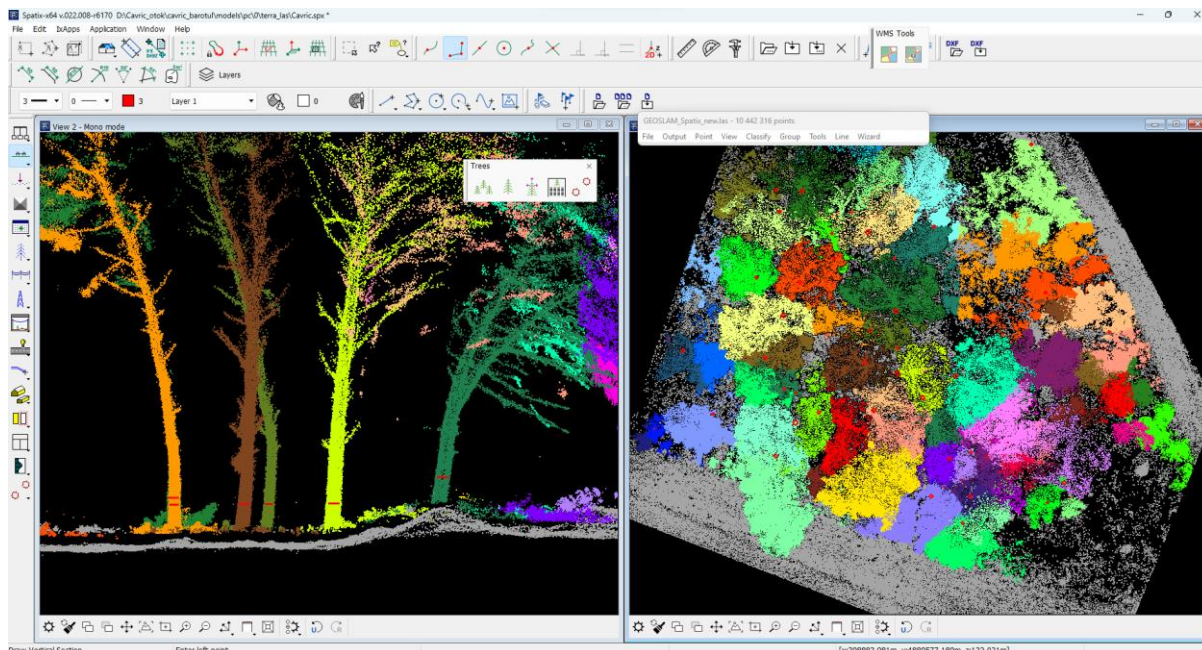
Na Slici 64 prikazane su širina i duljina bloka siporeksa modelirana pomoću tri objašnjene tehnologije. Kao što je već navedeno, duljina i širina, a stoga i površina je najpouzdanija na modelu TLS-a. Širina i dužina su, kao i površina, veće na modelu GeoSLAM-a nego na fizičkom modelu. Samu geometriju ALS-a bilo je izazovno izdvojiti od okolnog oblaka točaka, međutim točke koje aproksimiraju gornju plohu siporeksa određene su pomoću visine točaka. Iako ALS ima visoku asolutnu točnost, relativna je točnost ALS-a niska i površina modela iznimno mala.



Slika 64 Širina i duljina blokova siporeksa (TLS, GeoSLAM, ALS)

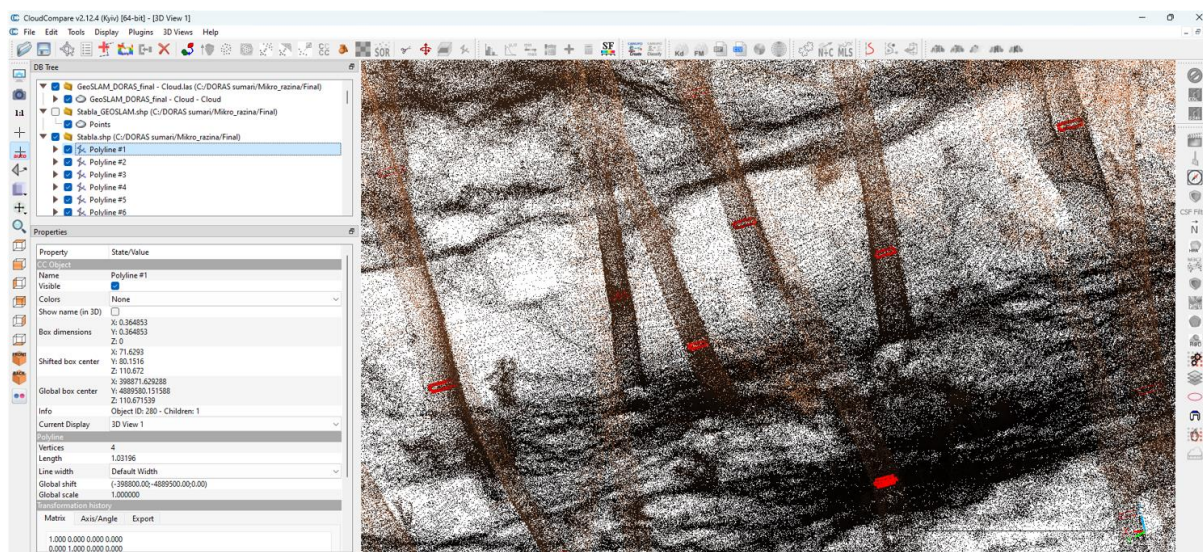
6.2. Rezultati mikro razine istraživanja

Prikazane crvene točke na Slici 65 prikazuju centroid stabla čije su krošnje različito obojane kako bi se naglasila njihova odvojenost. Izdvojeno je 83 stabla te 83 debla stabala.



Slika 65 Izdvajanje stabala GeoSLAM-a u softveru Spatix

Promjer najdebljeg debla iznosio je 48 centimetara. Rezultat izdvajanja stabala je zatim u softveru Cloud Compare uspoređen s GeoSLAM podacima.

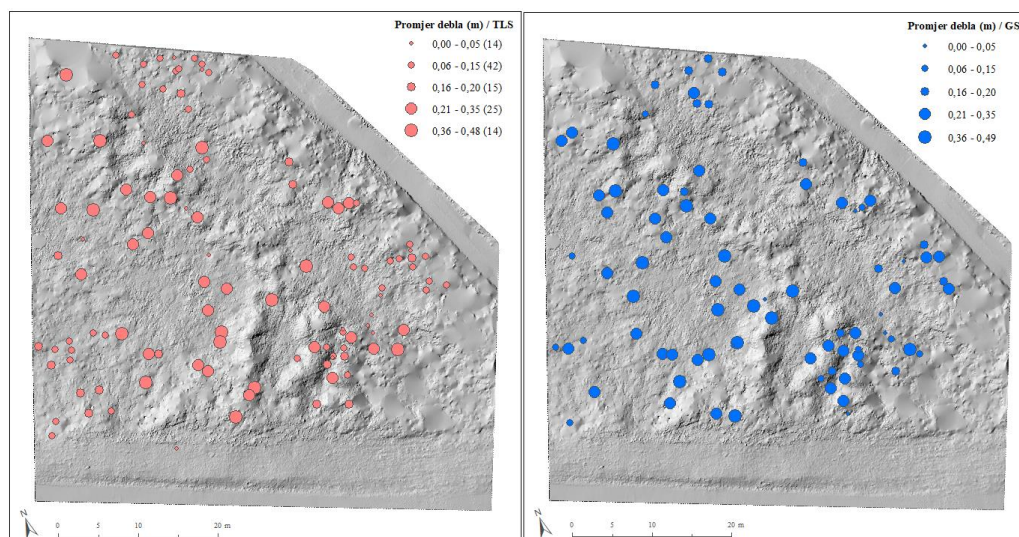


Slika 66 Stabla i promjer debla stabala u softveru Cloud Compare

Vizualizacija rezultata prikazana je na Slici 66. Svaki promjer stabla zasebni je *polyline* te njegove *Box dimensions* prikazuju promjer stabala. Promjer svakog od stabala bit će uključen u izlazni rezultat prikazan na Slici 67.

	FID	Shape *	x	y	z	a	b	c
▶	0	Point ZM	398871,586	4889580,407	109,401	16,945	11,5	0,36
	1	Point ZM	398869,85	4889573,09	110,068	10,339	12,2	0,31
	2	Point ZM	398874,733	4889580,394	109,524	16,478	8,9	0
	3	Point ZM	398867,618	4889594,122	109,382	17,821	12,8	0,36
	4	Point ZM	398874,57	4889585,316	109,536	17,944	9,2	0,37
	5	Point ZM	398875,382	4889580,587	109,481	17,278	10,2	0,44
	6	Point ZM	398875,662	4889588,711	109,474	16,89	12,1	0,33
	7	Point ZM	398863,918	4889585,993	109,176	16,225	11,3	0,31
	8	Point ZM	398875,269	4889598,972	110,071	16,463	13,2	0,45
	9	Point ZM	398872,008	4889572,007	110,116	13,726	14,9	0,41
	10	Point ZM	398865,455	4889603,929	109,271	14,991	13,8	0,35
	11	Point ZM	398865,137	4889590,483	109,312	17,191	11,7	0,43
	12	Point ZM	398878,91	4889584,146	109,508	16,919	11,2	0,39
	13	Point ZM	398878	4889586,79	109,503	17,655	10	0,28
	14	Point ZM	398865,66	4889601,536	109,442	16,688	11,8	0,36
	15	Point ZM	398870,006	4889580,279	109,335	16,249	15,5	0,33
	16	Point ZM	398875,615	4889600,682	109,831	6,057	7,6	0,19
	17	Point ZM	398871,051	4889598,711	109,446	16,151	12	0,26
	18	Point ZM	398871,567	4889596,098	109,298	13,625	10,3	0,29

Slika 67 Dio atributne tablice dobiven nakon Measure trunk diameter alata u sofveru ArcMap
Atributna tablica dobivena je pomoću alata *Output Tree Cells* te vrijednost **a** označava visinu stabla, vrijednost **b** širinu krošnje, a vrijednost **c** promjer debla stabla koji je dobiven alatom *Measure Trunk Diameters* (URL24). TLS-om je izdvojeno i izračunata vrijednost visine za 112 stabala, GeoSLAM-om za 84 stabla i UAV-om za 27 stabala.



Slika 68 Promjer debla stabala dobiven TLS-om i GeoSLAM-om

Na Slici 68 prikazana su debla koja su izmjerena na gustom oblaku točaka dobivenog TLS-om i GeoSLAM-om. Razredi su debla stabala klasificirani u jednolikih 5 razreda. Promjer najdebljeg stabla dobivenog TLS-om je 48 cm, dok je na GeoSLAM-u 49 cm. Na rubnim

dijelovima područja debla su većinom tanja, a u središnjim su dijelovima deblja. Na području od 0,30 ha izdvojena su 84 debla na modelu GeoSLAM-a i 112 stabala na modelu TLS-a. Kod GeoSLAM-a dominira četvrti razred od 21 do 35 cm debljine, dok kod TLS-a dominira drugi razred od 6 do 15 cm debljine.

7. Zaključak

U radu su testirane tri različite LiDAR tehnologije na mezo i mikro razini za izdvajanje stabala te izdvajanje debla stabala. Kako bi stabla mogla biti izdvojena od tla, bilo je potrebno izdvojiti *ground* model od ostalih točaka koje reprezentiraju stabla. Izvršena je validacija te usporedba svake od tehnologija pri izradi *ground* modela. Uspoređena su i izdvojena stabla te istaknute prednosti i nedostaci svake od tehnologija. Prema izvedenim rezultatima u nastavku su potvrđene ili opovrgnute postavljene hipoteze istraživanja.

- **H1** Ukupna pogreška RTK pozicioniranja UAV sustava (Matrice M300 RTK) na visini leta od 50 m u izmjerenim kontrolnim točkama bit će centimetarska (< 10 cm).

H1 je **potvrđena** jer svi statistički indikatori, srednja kvadratna pogreška, standardna devijacija te srednja apsolutna pogreška za validaciju modela gustog oblaka točaka prkupljenog zračnim laserskim skenerom pokazuju manju vrijednost pogreške od 10 centimetara. Prema specifikacijama, Matrice M300 RTK trebao bi postizati točnost od 5-10 centimetara, međutim s obzirom na to da je skenirana urbana zelena površina s iznimno gustom i visokom vegetacijom koja može utjecati na točnost pozicioniranja, dobiveni rezultati iznimno su zadovoljavajući. Na točnost *ground* modela utjecala je gustoća vegetacije, dok je nagib zanemariv zbog zaravnjenog područja istraživanja. Zbog iznimno guste vegetacije, bolji bi rezultati bili dobiveni korištenjem *oblique* misije i s tri povratna signala umjesto jednog.

- **H2** Relativna pogreška terestričkih laserskih sustava na testiranim objektima (blok siporeksa) smještenim unutar područja istraživanja bit će manja od 5% (engl. percent error - PE).

H2 je **potvrđena**. Relativna, odnosno postotna pogreška terestričkog laserskog sustava iznosi manje od 5%. Terestrički laserski sustavi, čija se frekvencija laserskog pulsa nalazi u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra, omogućuje pouzdano skeniranje malih objekata poput bloka siporeksa.

- **H3** Relativna pogreška GeoSLAM sustava na testiranim objektima (blok siporeksa) smještenim unutar područja istraživanja bit će veća od 5% (engl. percent error - PE).

H3 je potvrđena. Relativna pogreška GeoSLAM sustava veća je od 5%. Brže kretanje prostorom i manja frekvencija skeniranja utječu na manju gustoća podataka što dovodi do veće relativne pogreške. U usporedbi s fizičkim modelom, GeoSLAM model bloka siporeksa je predimenzioniran.

- **H4** Najveću vertikalnu točnost u procesu izrade rasterskog digitalnog modela reljefa (digital ground model) će postići softversko rješenje Spatix.

H4 je djelomično potvrđena.

Digitalni *ground* modeli izrađeni u softveru Spatix točniji su od modela izrađenih u softveru Cloud Compare, međutim model izrađen pomoću podataka dobivenih terestričkim laserskim skenerom točniji je za 1 milimetar od modela izrađenog u softveru Cloud Compare. Model dobiven zračnim laserskim skenerom i obrađen u softveru Spatix točniji je za 1,4 milimetar od modela izrađenog u softveru Cloud Compare. Iako je razlika u modeliranju digitalnih *ground* modela između dva softvera mala, softver Spatix pokazao se kao sveobuhvatniji u modeliranju i izdvajanju stabala. Napredne mogućnosti koje softver pruža omogućuju efikasno obrađivanje LiDAR podataka, pouzdano modeliranje, kvalitetnu analizu i identifikaciju stabala koje omogućuju bolje razumijevanje urbanih zelenih površina.

- **H5** TLS omogućuje kartiranje stabala promjera većih od 10 cm.

H5 je potvrđena.

Terestričkim laserskim skenerom moguće je izdvajanje stabala čiji je promjer debla veći od 10 centimetara. Štoviše, najviše je izdvojenih stabala čiji se promjer nalazi u razredu od 6 do 15 centimetara. Pomoću podataka dobivenih terestričkim laserskim skenerom, izdvojeno je najviše debla stabala i izračunat njihov promjer u usporedbi s GeoSLAM-om i ALS-om.

- **H6** Pomoću korištenog UAV sustava moguće je generirati informacije o promjeru pojedinačnog stabla

H6 je djelomično potvrđena.

Pomoću korištenog UAV sustava moguće je generirati informacije o promjeru krošnje pojedinačnog stabla, međutim teže za deblo stabla. U usporedbi s terestričkim laserskim skenerom i GeoSLAM-om, pomoću UAV-a je dobiveno najmanje informacija o pojedinačnim stablima jer je najmanji broj stabala izdvojen te su stabla većinom grupirana. Korištenjem *oblique* misije umjesto *double-grid* stabla bi bila snimljena iz više kutova, dok je kod *double-grid* misijom skeniran prvenstveno vrh krošnje. Vrh krošnje naglašen je i zbog korištenja samo jednog povratnog (engl. first return) signala. Ukoliko bi se koristilo više povratnih signala,

dobilo bi se više podataka o deblu stabla i strukturi krošnje, što bi pouspjelo generiranje informacija o promjeru krošnje pojedinačnog stabla.

8. Literatura i izvori

1. Ali, U., Shamsi, M. H., Bohacek, M., Purcell, K., Hoare, C., Mangina, E., i O'Donnell, J. (2020). A data-driven approach for multi-scale GIS-based building energy modeling for analysis, planning and support decision making. *Applied Energy*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115834>
2. Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., i Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4), e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
3. Araújo, Q. dos S., i Jesus, E. dos S. (2023). BIBLIOGRAPHIC RESEARCH ON THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF URBAN GREEN AREAS AND THEIR INFLUENCE ON THE POPULATION'S QUALITY OF LIFE. *REVISTA FOCO*, 16(1), e762. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n1-058>
4. Ayala-Azcárraga, C., Diaz, D., i Zambrano, L. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*, 189, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04.005>
5. Balenović, I., Gašparović, M., Simic Milas, A., Berta, A. i Seletković, A. (2018). Accuracy Assessment of Digital Terrain Models of Lowland Pedunculate Oak Forests Derived from Airborne Laser Scanning and Photogrammetry. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 39 (1), 117-128. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/193559>
6. Bauwens, S., Bartholomeus, H., Calders, K., i Lejeune, P. (2016). Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. *Forests*, 7(12), 127. <https://doi.org/10.3390/f7060127>
7. Baycan, Tuzin & Leeuwen, Eveline S. & Rodenburg, Caroline. (2002). Development and management of green spaces in European cities: a comparative analysis.
8. Bertram, C., & Rehdanz, K. (2015). The role of urban green space for human well-being. *Ecological Economics*, 120, 139–152. doi:10.1016/j.ecolecon.2015.10.013
9. Bilgili, C. B., i Gökyer, E. (2012). Urban Green Space System Planning. U M. Ozyavuz (Ur.), *Landscape Planning* (str. 107–122). InTech. <https://doi.org/10.5772/2761>
10. Brasington, J., Vericat, D., i Rychkov, I. (2012). Modeling river bed morphology,

- roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. *Water Resources Research*, 48(11)
11. Bressane, A., Mochizuki, P. S., Roveda, J. A. F., i Salvador, N. N. B. (2016). SUPPORT SYSTEM FOR MANAGEMENT OF GREEN SPACES IN PERMANENT PRESERVATION OF URBAN WATER BODIES. *Ciência Florestal*, 26(3), 957–969. <https://doi.org/10.5902/1980509824224>
 12. Bui, L. K., i Glennie, C. L. (2023). Estimation of lidar-based gridded DEM uncertainty with varying terrain roughness and point density. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 7, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100028>
 13. Căţeanu, M., i Ciubotaru, A. (2020). Accuracy of ground surface interpolation from airborne laser scanning (ALS) data in dense forest cover. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/ijgi9040224>
 14. Dalponte, M., i Coomes, D. A. (2016). Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(10), 1236–1245. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12575>
 15. DJI Terra. (2023). *User Manual v3.7*.
 16. Domazetović, F. (2021) VIŠEREZOLUCIJSKO MODELIRANJE EROZIJE TLA KORIŠTENJEM GEOPROSTORNIH TEHNOLOGIJA. Doktorska disertacija. Poslijediplomski sveučilišni studij: Jadran - Poveznica među kontinentima, Sveučilište u Zadru. Zadar.
 17. Dong, P., i Chen, Q. (2018). *LiDAR Remote Sensing and Applications*.
 18. Dong, Z., Liang, F., Yang, B., Xu, Y., Zang, Y., Li, J., Wang, Y., Dai, W., Fan, H., Hyypä, J., i Stilla, U. (2020). Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 327–342. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013>
 19. Dorbić, B., i Španjol, Ž. (2018). BOROVI (PINUS SP.) U HORTIKULTURI I ŠUMARSTVU NA KRŠU. *POLJOPRIVREDA I ŠUMARSTVO NA KRŠU MEDITERANSKO-SUBMEDITERANSKOG ISTOČNOJADRANSKOG PODRUČJA – STANJE I PERSPEKTIVE*. <https://doi.org/10.5644/PI2018.176.09>
 20. Faro (2019b). Faro Focus laser scanner user manual, <https://faro.app.box.com/s/8xtj92jnpu011i8crn2qyh1bd6d3s0mo/file/571591226811>
 21. Ferrer, V., Gómez-Gutiérrez, A., Nadal-Romero, E., Errea, P., i Alonso, E. (2017). A

- multiscale approach to assess geomorphological processes in a semiarid badland area (Ebro Depression, Spain) (No. ART-2017-101130).
22. Frumkin, H. (2003). Healthy Places: Exploring the evidence. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1451–1456. doi:10.2105/ajph.93.9.1451
 23. GeoSLAM (2017). GeoSLAM ZEB REVO User Guide v3.0.0. <https://download.geoslam.com/docs/zeb-revo/ZEB-REVO%20User%20Guide%20V3.0.0.pdf>
 24. GeoSLAM (2023). GeoSLAM Connect Software Guide 2.3. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/11/GeoSLAM_Connect_Software_Guide_2.3.pdf
 25. Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., i Sousa, J. J. (2020). Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: A review focusing on the data, processing and potentialities. U *Remote Sensing* (Sv. 12, Izdanje 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>
 26. Jalkanen, J., Fabritius, H., Vierikko, K., Moilanen, A., i Toivonen, T. (2020). Analyzing fair access to urban green areas using multimodal accessibility measures and spatial prioritization. *Applied Geography*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102320>
 27. Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Stefanov, W. L., i Martin, C. A. (2011). Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA. U *Ecological Applications* (Sv. 21, Izdanje 7). <http://www.milliontreesla.org/i>
 28. Kabisch, N., Qureshi, S., i Haase, D. (2015). Human-environment interactions in urban green spaces - A systematic review of contemporary issues and prospects for future research. U *Environmental Impact Assessment Review* (Sv. 50, str. 25–34). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.08.007>
 29. Kelley, J., Trofymow, J. A., i Bone, C. (2022). Combining Area-Based and Individual Tree Metrics for Improving Merchantable and Non-Merchantable Wood Volume Estimates in Coastal Douglas-Fir Forests. *Remote Sensing*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/rs14092204>
 30. Kong, F., Yin, H., Nakagoshi, N., i Zong, Y. (2010). Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 95(1–2), 16–27.

<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.11.001>

31. Krok, G., Kraszewski, B., i Stereńczak, K. (2020). Application of terrestrial laser scanning in forest inventory – an overview of selected issues. *Forest Research Papers*, 81(4), 175–194. <https://doi.org/10.2478/frp-2020-0021>
32. Li, X., Li, X., i Ma, X. (2022). Spatial optimization for urban green space (UGS) planning support using a heuristic approach. *Applied Geography*, 138, 102622. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102622>
33. Liu, X. H., Hu, H., i Hu, P. (2015). Accuracy assessment of LiDAR-derived digital elevation models based on approximation theory. *Remote Sensing*, 7(6), 7062–7079. <https://doi.org/10.3390/rs70607062>
- Maas, J. (2006). Green Space, urbanity, and Health: How Strong is the relation? *Journal of Epidemiology & Community Health*, 60(7), 587–592. doi:10.1136/jech.2005.043125
34. Maltamo, M., Naesset, E., i Vauhkonen, J. (2014). *Managing Forest Ecosystems Forestry Applications of Airborne Laser Scanning Concepts and Case Studies* (Sv. 27). <http://www.springer.com/series/6247>
35. McManamon, P. (2019). LiDAR technologies and systems. U *SPIE Press* (SPIE). SPIE Press.
36. Modugno, S., Johnson, S. C. M., Borrelli, P., Alam, E., Bezak, N., i Balzter, H. (2022). Analysis of human exposure to landslides with a GIS multiscale approach. *Natural Hazards*, 112(1), 387–412. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05186-7>
37. Morsdorf, F., Eck, C., Zraggen, C., Imbach, B., Schneider, F. D., i Kükenbrink, D. (2017). UAV-based LiDAR acquisition for the derivation of high-resolution forest and ground information. *Leading Edge*, 36(7), 566–570. <https://doi.org/10.1190/tle36070566.1>
38. Moudrý, V., Klápště, P., Fogl, M., Gdulová, K., Barták, V., i Urban, R. (2020). Assessment of LiDAR ground filtering algorithms for determining ground surface of non-natural terrain overgrown with forest and steppe vegetation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107047>
39. Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., i Rodríguez-González, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 10332, 103320I.

<https://doi.org/10.1117/12.2270761>

40. Panda, L., Šiljeg, A., Marić, I., Domazetović, F., Šiljeg, S. i Milošević, R. (2021). Usporedba GEOBIA klasifikacijskih algoritama na temelju Worldview-3 snimaka u izdvajanju šuma primorskih četinjača. *Šumarski list*, 145 (11-12), 535-544.
<https://doi.org/10.31298/sl.145.11-12.3>
41. Pauleit, S. (2003). Urban Street Tree Plantings: Identifying the Key Requirements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, 156, 43-50.
42. <https://doi.org/10.1680/muen.2003.156.1.43>
43. Pereira Junior, A., De Souza, M. B., De Souza, G. B., Ferreira, N. de L., Moreira, V. de S.,
44. Puliti, S., Dash, J. P., Watt, M. S., Breidenbach, J., i Pearse, G. D. (2020). A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *Forestry*, 93(1), 150–162.
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpz057>
45. Rogers, S. R., Manning, I., i Livingstone, W. (2020). Comparing the Spatial Accuracy of Digital Surface Models from Four Unoccupied Aerial Systems: Photogrammetry Versus LiDAR. *Remote Sensing*, 12(17), 2806. <https://doi.org/10.3390/rs12172806>
46. Roy, S., Byrne, J., i Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry i Urban Greening*, 11(4), 351–363.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>
47. Sadler, J., Bates, A., Hale, J., & James, P. (2010). Bringing cities alive: The importance of urban green spaces for people and Biodiversity. *Urban Ecology*, 230–260. doi:10.1017/cbo9780511778483.011
48. Sammartano, G., i Spanò, A. (2018). Point clouds by slam-based mobile mapping systems: Accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–339.
<https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7>
49. Sandström, U. G., Angelstam, P., i Mikusiński, G. (2006). Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. *Landscape and Urban Planning*, 77(1–2), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.01.004>
50. Schmitz, B., Holst, C., Medic, T., Lichti, D., i Kuhlmann, H. (2019). How to Efficiently Determine the Range Precision of 3D Terrestrial Laser Scanners. *Sensors*,

- 19(6), 1466. <https://doi.org/10.3390/s19061466>
51. Shan, J., i Toth, C. K. (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning* (Second Edition). Taylor i Francis.
52. Šiljeg A. (2013). DIGITALNI MODEL RELJEFA U ANALIZI GEOMORFOMETRIJSKIH PARAMETARA – PRIMJER PP VRANSKO JEZERO
Doktorska disertacija. Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.
53. Šiljeg, A., Nikolić, G., Marić, I., i Šiljeg, S. (2018). Analiza dostupnosti urbanih zelenih površina u naselju Zadar, Hrvatska. *Šumarski list*, 142(9–10), 496–497. <https://doi.org/10.31298/sl.142.9-10.4>
54. Simpson, J. E., Smith, T. E. L., i Wooster, M. J. (2017). Assessment of errors caused by forest vegetation structure in airborne LiDAR-derived DTMs. *Remote Sensing*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/rs9111101>
55. Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., i Glennie, C. (2017). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning. *Earth-Science Reviews*, 169, 35–68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>
56. Vargas-Hernández, J. G., Pallagst, K., i Zdunek-Wielgołaska, J. (2023). Urban Green Spaces as a Component of an Ecosystem. U *Sustainable Development and Environmental Stewardship* (str. 165–198). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28885-2_8
57. Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne lidar data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. doi:10.3390/rs8060501
58. Zhou, Y., Wang, L., Jiang, K., Xue, L., An, F., Chen, B., & Yun, T. (2020). Individual tree crown segmentation based on aerial image using superpixel and topological features. *Journal of applied remote sensing*, 14(2), 022210-022210.

Izvori

URL1 (<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html/index-clc-141.html>) (1.6.2023.)

URL2 (https://opentopography.org/lidar_basics) (1.6.2023.)

URL3 (<https://www.techopedia.com/definition/12702/six-degrees-of-freedom-6dof>) (5.6.2023.)

- URL4 (https://en.wikipedia.org/wiki/Six_degrees_of_freedom) (5.6.2023.)
- URL5 (<https://geoprema.com/products/survey-equipment/drones-unmanned-aerial-vehicles-and-systems/dji-m300-rtk-matrice-300-rtk-zenmuse-l1-lidar-payload/>) (5.6.2023.)
- URL6 (<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115001884706-Double-Grid-Mission-Settings-Android-PIX4Dcapture>) (10.6.2023.)
- URL7 (<https://www.sepltd.com/shop/product/faro-focus-core-laser-scanner/>) (5.6.2023.)
- URL8 (<https://www.laserinst.com/zeb-revo/>) (15.11.2023.)
- URL9 (<https://spatix.com/#!>) (10.11.2023.)
- URL10 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/drone-project-process-data.html?anchor=splittrj>) (12.11.2023.)
- URL11 (<https://terrasolid.com/guides/tmatch/fluctuating-corrections-tie-lines.html>) (12.11.2023.)
- URL12 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/crground.html>) (13.11.2023.)
- URL13 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/crbybestmatch.html>) (13.11.2023.)
- URL14 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/mwdetecttrees.html>) (13.11.2023.)
- URL15 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/crtrees.html>) (13.11.2023.)
- URL16 (<https://www.cansel.ca/store/cansel/en/>) (14.11.2023.)
- URL17 (<https://www.danielgm.net/cc/>) (14.11.2023.)
- URL18 (https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Cloud-to-Cloud_Distance) (19.11.2023.)
- URL19 ([https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/M3C2_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/M3C2_(plugin))) (19.11.2023.)
- URL20 ([https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF_(plugin))) (19.11.2023.)
- URL21 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/mwassignroups.html>) (20.11.2023.)
- URL22 (<https://www.terrasolid.com/guides/tscan/tboxtrees.html>) (20.11.2023.)
- URL23 (<https://www.terrasolid.com/guides/tscan/measure-trunk-diameters.html>) (20.11.2023.)
- URL24 (<https://terrasolid.com/guides/tscan/output-tree-cells.html>) (20.11.2023.)

Popis grafičkih priloga

Slika 1 Područje istraživanja (DGU, 2021./2022. - DOF)	10
Slika 2 Dio područja istraživanja	11
Slika 3 Prikaz povratnih signala laserske zrake (URL2).....	14
Slika 4 Šest stupnjeva slobode - 6DoF (URL4)	17

Slika 5 Primjer višerezolucijskog modeliranja.....	20
Slika 6 Označavanje orijentacijskih i kontrolnih točaka	21
Slika 7 Dimenzije siporeks bloka.....	21
Slika 8 Prikupljanje OT i KT s Trimble R12i RTK GNSS prijemnik	22
Slika 9 Orijetacijske i kontrolne točke (DOF 2021./2022.)	24
Slika 10 DJI M300 RTK i Zenmuse L1 LiDAR (URL5)	24
Slika 11 Skica Double Grid misije (URL6)	25
Slika 12 Misija sjever-jug prikazana na kontroloru bespilotne letjelice	26
Slika 13 Misija istok-zapad prikazana na kontroloru bespilotne letjelice.....	26
Slika 14 Napuštena višekratna zgrada.....	27
Slika 15 Prikupljanje podataka ALS-om 28. listopada 2022. godine	29
Slika 16 Terestrički lasersi skener Faro Focus (URL7)	30
Slika 17 Terestičko lasersko skeniranje	31
Slika 18 GeoSLAM ZEB Revo uređaj (URL8)	33
Slika 19 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra	35
Slika 20 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra koji prikazuje reflektivnost podataka	35
Slika 21 Gusti oblak točaka u softveru DJI Terra koji prikazuje visinu podataka.....	36
Slika 22 Odabrani podatci virtualne bazne staice	37
Slika 23 Prikaz dijela kontrolnih točaka u softveru DJI Terra.....	37
Slika 24 Gusti oblak točaka u softveru Spatix	38
Slika 25 Process Drone Data izbornik u softveru Spatix	39
Slika 26 Korisničko-definirani parametri u postavci Split Trajectories.....	40
Slika 27 Odabrani korisničko-definirani parametri u postavci Match Passes.....	42
Slika 28 Alat Cut Overlap i podešeni korisničko-definirani parametri.....	43
Slika 29 Odabrani parametri u alatu Smoothen and Remove Noise	44
Slika 30 Alat <i>Thin Points to Inactive</i> i odabrani parametri.....	45
Slika 31 Alat Classify Ground i Initial Point Spacing parametar	45
Slika 32 Alat Heigth from Ground i korisničko-definirani parametri.....	46
Slika 33 Classify Above Ground Features i postavljeni parametri	47
Slika 34 Klasificirani gusti oblak točaka.....	48
Slika 35 Broj točaka koji predstavlja svaku pojedinu klasu.....	48
Slika 36 Alat Detect Trees i odabrani korisničko-definirani parametri	49
Slika 37 Alat Trees Routine (URL15).....	50

Slika 38 Reklasifikacija alatom Classify Using Brush.....	50
Slika 39 Faro Scene Software (URL16).....	52
Slika 40 Orijetnacijska točka na gustom oblaku točaka TLS-a u softveru Cloud Compare	53
Slika 41 Gusti oblak točaka prikupljen TLS-om i tri orijentacijske točke u softveru Cloud Compare	54
Slika 42 Classify Above i Classify Below Line u softveru Spatix.....	54
Slika 43 Gusti oblak točaka prikupljen GeoSLAM-om i tri orijentacijske točke	56
Slika 44 Alat M2C3 i Main Parameters u softveru Cloud Compare.....	57
Slika 45 Alat M3C2 i Normals parametri u softveru Cloud Compare.....	58
Slika 46 Cloth Simulation Filter i podešeni korisničko-definirani parametri	59
Slika 47 Alat <i>Assign Groups</i> u softveru Spatix te korišteni korisničko-definirani parametri..	61
Slika 48 Alat Measure Trunk Diameters u softveru Spatix (URL23).....	62
Slika 49 Model i srednja kvadratna pogreška TLS-a	65
Slika 50 GeoSLAM model i srednja kvadratna pogreška	66
Slika 51 C2C modeli (lijevo GeoSLAM, desno ALS).....	66
Slika 52 M3C2 modeli (lijevo GeoSLAM, desno ALS).....	67
Slika 53 ALS, TLS i GeoSLAM ground modeli.....	68
Slika 54 ALS, TLS i GeoSLAM modeli	69
Slika 55 Ground model ALS-a obrađen u softveru Spatix (lijevo) i Cloud Compare (desno)	70
Slika 56 Ground model TLS-a obrađen u softveru Spatix (lijevo) i Cloud Compare (desno).	71
Slika 57 Izdvojene klase stabala i tla prikazane u softveru Cloud Compare	72
Slika 58 Izdvojena stabla ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a alatom Assign Groups.....	72
Slika 59 Profili izdvojenih stabala ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a.....	73
Slika 60 Crvene točke kao izdvojena stabla na ALS-u, GeoSLAM-u i TLS-u	73
Slika 61 Profili izdvojenih stabala ALS-a, GeoSLAM-a i TLS-a.....	74
Slika 62 Visina stabala izračunata pomoću alata <i>Compute Distance</i>	74
Slika 63 Modeli bloka siporeksa (TLS, GeoSLAM, ALS)	76
Slika 64 Širina i duljina blokova siporeksa (TLS, GeoSLAM, ALS).....	77
Slika 65 Izdvajanje stabala GeoSLAM-a u softveru Spatix.....	78
Slika 66 Stabla i promjer debla stabala u softveru Cloud Compare.....	78
Slika 67 Dio atributne tablice dobiven nakon Measure trunk diameter alata u softveru ArcMap	79
Slika 68 Promjer debla stabala dobiven TLS-om i GeoSLAM-om	79

Popis tabličnih prikaza

Tablica 1 Osnovne klase LiDAR gustog oblaka točaka (Dong i Chen, 2018.).....	13
Tablica 2 Tehničke specifikacije Trimble 12i RTK GNSS prijemnik	22
Tablica 3 Koordinate prikupljenih orijentacijskih točaka u HTRS96 koordinatnom sustavu .	23
Tablica 4 Tehničke specifikacije bespilotne letjelice DJI M300 RTK	27
Tablica 5 Specifikacije L1 LiDAR-a	28
Tablica 6 Tehničke specifikacije terestričkog laserskog skenera Faro Focusa M70	31
Tablica 7 Tehničke specifikacije uređaja ZEB REVO.....	33
Tablica 8 Orijetacijske točke za georeferenciranje TLS-a i GeoSLAM-a	53
Tablica 9 Ukupna i validacija prema klasi gustog oblaka točaka (u metrima)	63
Tablica 10 Statistika izračunata u softveru DJI Terra	64
Tablica 11 Statistika ALS Ground modela	70
Tablica 12 Statistika TLS Ground modela	71
Tablica 13 Usporedba površine bloka siporeksa.....	75