

Usporedba podataka dobivenih zračnim i terestričkim laserskim skeniranjem (LIDAR) pri izmjeri šuma

Perković, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry and Wood Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:260447>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-04**



Repository / Repozitorij:

[University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
ŠUMARSKI ODSJEK
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ
URBANO ŠUMARTSTVO, ZAŠTITA PRIRODE I OKOLIŠA

PETRA PERKOVIĆ

USPOREDBA PODATAKA DOBIVENIH ZRAČNIM I TERESTRIČKIM
LASERSKIM SKENIRANJEM (LIDAR) PRI IZMJERI ŠUMA

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
ŠUMARSKI ODSJEK

USPOREDBA PODATAKA DOBIVENIH ZRAČNIM I
TERESTRIČKIM LASERSKIM SKENIRANJEM (LIDAR) PRI
IZMJERI ŠUMA
DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij: Urbano šumarstvo, zaštita prirode i okoliša

Predmet: Analiza i valorizacija prostora

Ispitno povjerenstvo:

1. prof.dr.sc. Ante Seletković (Mentor)
2. izv. prof. dr. sc. Mario Ančić
3. doc. dr. sc. Jelena Kolić

Student: Petra Perković

JMBAG: 0068232863

Datum odobrenja teme: 26.04.2024.

Datum predaje rada: 20.06.2024.

Datum obrane rada: 12.07.2024.

DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov	Usporedba podataka dobivenih zračnim i terestričkim laserskim skeniranjem (lidar) pri izmjeri šuma
Title	Comparison of data obtained by aerial and terrestrial laser scanning in forest inventory
Autor	Petra Perković
Adresa autora	
Mjesto izrade	Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Prof.dr.sc. Ante Seletković
Komentor	
Godina objave	2024.
Opis obujma rada	Slike: 13 Tablice: 4 Grafikona: 8 Navod literature: 21 Broj stranica: 38
Ključne riječi	Lidar, TLS,ALS, izmjera šuma, daljinska istraživanja
Key words	Lidar, TLS,ALS, forest inventory,remote sensing
Sažetak	LiDAR (Light Detection and Ranging) je tehnika daljinskih istraživanja, odnosno potpuno automatiziran postupak prikupljanja vrlo preciznih 3D prostornih podataka koristeći laserski skener. Dva su tipa laserskog skeniranja; lasersko skeniranje iz zraka (ALS) i lasersko skeniranje sa zemlje (TLS). U ovom diplomskom prikazana je upotreba oba tipa laserskog skeniranja (ALS i TLS) za potrebe inventure šuma (izmjera sastojinskih parametara), na razini sastojine i na razini pojedinačnih stabala. Tako dobiveni podaci usporedili su se sa terenskim podacima (pokusne plohe) i to na području UŠP Zagreb,g.j. Vukomeričke gorice.

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB FŠDT 05 07
		Revizija: 2
		Datum: 29.04.2021.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

U Zagrebu, 2024. godine

vlastoručni potpis

Petra Perković

Zahvale

„Sve smo ti dali, tvoje je samo da učiš.”

Pa evo došlo je do tog da sam i naučila, kroz dugogodišnje školovanje, uz cijelu malu vojsku bliskih ljudi koji su me gurali kad sam trebala odgurnuti zrnca sumnje i „stisnuti” onaj zadnji dan.

Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Anti Seletkoviću na izdvojenom vremenu i pomoći pri izradi diplomskog rada i potrebnih snimki s terena.

Tata i mama, beskonačno hvala na svim usađenim vrijednostima, ljubavi i razumijevanju koje ste mi pružili.

Nika i Nikola, od K1C do G2H, prošli smo puno toga, drago mi je da sam baš s vama provela svoje studentske dane.

Sestrice, hvala što si moje studentske brige ublažavala onim slatkim srednjoškolskim.

Mojim Livanjkama, skupa smo gledale učeničke knjižice, svjedodžbe, a sada i diplomu- nadam se da ćemo nastaviti dijeliti i one uspjehe koji nam tek dolaze.

Knjižnica, kafić, kauč ili park, učilo se svugdje- hvala mojim curama s faksa, za zajedničke skripte, suze i smijeh, uljepšale ste ovo studiranje.

Brin, neizmjereno sam ti zahvalna za ljubav, podršku i more strpljenja.

Zahvaljujem i svim ostalim prijateljima, kolegama i obitelji, koji su obilježili moje studentske dane.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	8
2. LiDAR	10
2.1. Zračni laserski skener- Airborne Laser Scanning (ALS)	13
2.2. Terestrički laserski skener -Terrestrial laser scanning (TLS)	17
2.2.1. Ručni laserski skener - hand-held Personal Laser Scanning (H-PLS).....	18
3. CILJ ISTRAŽIVANJA.....	21
4. MATERIJALI I METODE.....	22
4.1. Terenska istraživanja	23
4.2. Princip rada i specifikacije FARO Focus M70 3D laserskog skenera korištenog za TLS	24
4.3. Princip rada i specifikacije Geoslam Zeb Horizon skenera korištenog za PLS.....	26
4.4. Uređaji korišteni za izvođenje ULS.....	28
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	30
5.1. Rezultati terenskih mjerenja.....	30
5.2. Rezultati terestričkog i ručnog laserskog skeniranja	32
5.4. Rezultati laserskog skeniranja iz zraka (besposadna letjelica).....	38
5.5. Usporedba rezultata.....	39
6. ZAKLJUČAK.....	41
7. LITERATURA	42

1. UVOD

Važnost daljinskih istraživanja i fotogrametrije za karakterizaciju šumskih ekosustava postaje prepoznatljiva zbog mnogih studija obrađenih u posljednjim desetljećima. Među tehnikama daljinskog istraživanja, lasersko skeniranje odigralo je ključnu ulogu u opisima vertikalne strukture šume, budući da laserske zrake prolaze kroz različite vertikalne slojeve i brojni povrati su registrirani su od strane senzora. (Crespo-Peremarch i drugi, 2020.)

Po definiciji Lindberg i dr. (2017.): „Daljinska detekcija je znanost i umjetnost dobivanja informacija o objektu, području ili pojavi analizom podataka dobivenih uređajem koji nije u kontaktu s predmetom, područjem ili pojavom koja se istražuje”.

Ono što čini daljinska istraživanja korisnim alatom u različitim znanostima (šumarstvu, geodeziji, ekologiji, meteorologiji i slično) je primarno generalni uvid u postojeću situaciju simultano na velikom području (ovisno o potrebi i alatima istraživanja, područje može biti i koncentrirano). Drugi bitan razlog je smanjen opseg terenskog rada te ujedno i isplativost. Nadalje, ovakvo istraživanje može rezultirati novim spektrom informacija. Infracrveni slojevi pružaju mnogo informacija o vegetaciji. Podaci daljinskog istraživanja koji promatraju te valne duljine mogu dati takve podatke koje inače ne bismo vidjeli vlastitim očima. Uz to, laserski podaci daju nam vrlo precizna mjerenja visine – u mnogim slučajevima točnija nego što se mogu ručno izmjeriti. Moguća je i pokrivenost udaljenih područja. Kada je senzor postavljen na avion ili satelit, slike se mogu dobiti bez obzira na to postoje li ceste ili pješačke staze kojima se putuje na to područje. Daljinska istraživanja imaju i karakteristiku objektivnosti; Podaci se prikupljaju bez početnog tumačenja ljudskom prosudbom i daju neobrađen, objektivan izvor digitalnih podataka. Analize – kao što je klasifikacija vegetacije ili procjena volumena drva – tada se mogu primijeniti na digitalne podatke na objektivan način. Digitalni podaci pogodni su za automatsku računalnu analizu. Finalno, dobivaju se slike koje se ponavljaju. Sve dok se koriste isti senzor i iste postavke, slike u određenom vremenskom razdoblju mogu se koristiti za promatranje krajolika kroz vrijeme, što se može smatrati drugom dimenzijom (vremenska dimenzija).

Kasno 1800-ih godina ljudi su pokušavali snimati fotografije iz balona na vrući zrak. Tehnologija fotografije iz zraka brzo se razvijala tijekom Prvog svjetskog rata. Nakon Prvog svjetskog rata, fotografije iz zraka počele su se koristiti za kartiranje šuma, primjerice, u Kanadi tijekom 1920-ih. Tek nakon Drugog svjetskog rata ova tehnika za šumarstvo doživljava pravi procvat. 1950-ih godina formirano je vladino povjerenstvo koje je promoviralo korištenje zračnih fotografija u šumarstvu. Čak i danas, ručna interpretacija zračnih fotografija dominantna je metoda daljinskog istraživanja u šumarstvu. Glavno sredstvo su ortofoto snimke, ali interpretacija se može izvršiti i pomoću različitih vrsta stereo-naočala. Od početka 2000-ih, zračne fotografije se

pribavljaju putem digitalnih kamera, što je rezultiralo povećanim pristupom fotografijama iz zraka u boji i fotografiji u infracrvenom spektru. Od sredine 2000-ih povećala se upotreba bespilotnih letjelica. Razvoju daljinskog snimanja bespilotnim letjelicama pridonio je i niz tehnoloških skokova: razvoj poboljšane baterijske tehnologije koja omogućuje upotrebu električnih motora, kao i malih navigacijskih sustava i digitalnih kamera.

Prvi vojni sateliti za daljinsko snimanje došli su 1960. godine, a 1972. godine lansiran je Landsat 1, prvi civilni satelit za snimanje resursa Zemlje. Landsat 1 imao je piksele veličine 80 x 80 m. Ova prostorna razlučivost poboljšana je senzorom Landsat TM, koji je došao 1982. godine i imao piksele veličine 30 x 30 m, te satelitom SPOT 1 koji je lansiran 1986. godine s pikselima veličine 10 x 10 m. Tijekom ranih 2000-ih podaci Landsat postali su dostupni besplatno, što je povećalo njihovu upotrebu. Tijekom 1990-ih postali su dostupni satelitski snimci s pikselima veličine 1 x 1 m, međutim, ovi sateliti često su bili operirani od strane komercijalnih aktera (podaci su koštali) i obično su pokrivali manje površine od satelita za snimanje resursa Zemlje kao što su Landsat. Sateliti često snimaju slike Zemlje, ali ograničenje fotografija poput onih koje podsjećaju na fotografije (tj. u boji ili infracrveno) iz svemira jest to što su često oblačne. Zbog toga postoji veliki interes za radar satelite, koji mogu bilježiti podatke kroz oblake. Ispitivanje različitih vrsta radarskih podataka za kartiranje šuma traje od 1990-ih; iako je potencijal velik, praktična primjena ove tehnologije još uvijek je ograničena. Sredinom 1990-ih razvio se i zračni laserski skeniranje. Ova tehnika uključuje laserske zrake poslone iz instrumenta (smještenog unutar zračne platforme poput aviona ili helikoptera), gdje se mjeri udaljenost od izvora laserskog zraka do tla ili krošnje (ili bilo kojeg objekta s kojeg se odbija laserski zrak). Rezultat je trodimenzionalni (3D) oblak točaka. Mjerenje je vrlo precizno, a važan faktor za razvoj zračnog laserskog skeniranja jest taj što se položaj i kretanje letjelice u zraku računa pomoću GPS-a i inercijalne navigacije. Mjerenje šuma pomoću zračnog lasera prvi puta je testirano u Leningradu krajem 1970-ih, a u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi sredinom 1980-ih. Instrument su koristili za mjerenje profila s letjelice (tj. lasersko profiliranje). Lasersko skeniranje prvi puta je počelo koristiti kao operativna metoda za inventar šuma u Norveškoj 2002. Godine (Lindberg i drugi, 2017.).

Brzi tehnološki razvoj u znanstvenom području daljinskog istraživanja ogleda se u značajnom porastu znanstvenog istraživanja i objavljivanja; međutim, tempo i razina primjene tehnologije „remote sensing“ u operativnim programima inventure i praćenja stadija šuma značajno varira ovisno o geografskoj regiji (Fassnacht i drugi, 2024.).

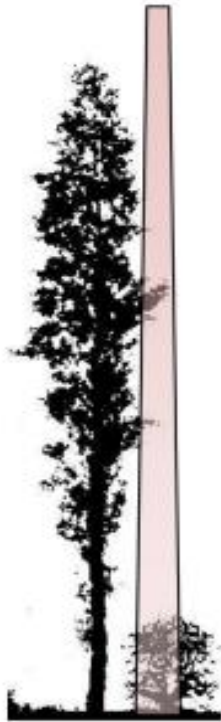
2. LiDAR

Lidar (Light Detection and Ranging) je aktivna tehnologija daljinskog snimanja koja uključuje emisiju laserskih impulsa iz instrumenta smještenog na platformi prema određenoj meti (npr. šuma). Ovdje se susreće s različitim površinama s kojima dolazi u dodir. Značajke dalje od senzora će presresti i reflektirati lasersku energiju natrag do senzora kasnije nego one koje su mu bliže.

Područje koje je osvijetljeno laserskim impulsom poznato je kao "lidar otisak". Veličina otiska određena je divergencijom laserskog snopa i visinom/udaljenošću od cilja lidar instrumenta. Bez obzira na to je li otisak velikih dimenzija na području desetaka metara s visine satelitskog senzora, desetak centimetara kao što se obično proizvodi s letjelicama ili nekoliko milimetara u slučaju laserskih skenera na tlu, principi ostaju isti. (Rosette i drugi, 2012.)

Interakcije laserskog impulsa s vegetacijom ovise o valnoj duljini emitiranog impulsa i njenim vrijednostima refleksije, transmisije i apsorpcije za svaki tip lišća, kore i podloge (npr. gola tla, otpad, snijeg itd.). Na valnim duljinama od 1064 nm (u blizini infracrvenog područja spektra i uobičajenima za mnoge Lidar sustave korištene za analizu vegetacije), vrijednosti refleksije i transmisije mogu biti svaka otprilike ~45%. Mjeri se vrijeme koje je potrebno za povrat odraza laserskog impulsa do senzora i, koristeći činjenicu da laserski impuls putuje brzinom svjetlosti, može se izračunati ukupna udaljenost koju je prešao između senzora i presretnutih površina. Udaljenost između altimetra i presretnutog objekta stoga je polovica te vrijednosti (Baltsavias, 1999.; Wehr i drugi, 1999.). Ovo omogućuje trodimenzionalnu reprodukciju reljefa Zemljine površine i nad njom (vegetacija, led, formacije oblaka, atmosferski aerosoli). (Rosette i drugi, 2012.)

Vrlo precizno mjerenje vremena nužno je za dobivanje detaljnih vertikalnih rezolucija. Vremenske jedinice Lidar-a obično se bilježe u nanosekundama (ns), pri čemu svaka nanosekunda odgovara približno 15 cm jednosmjerne udaljenosti između senzora i mete. Vrijeme se mjeri pomoću brojača vremenskog intervala, pokrenutog prilikom emisije impulsa i aktiviranog u određenoj točki na vodećem rubu vraćenog impulsa. Ova pozicija nije odmah očigledna i stoga je postavljena da se dogodi kada napon signala dosegne unaprijed određenu vrijednost praga. Strmina primljenog impulsa (vrijeme uzdizanja impulsa) ključni je doprinoseći faktor preciznosti raspona i ovisi o kombinaciji brojnih čimbenika poput valne duljine incidentne svjetlosti, reflektivnosti meta na toj valnoj duljini, prostorne distribucije laserske energije duž otiska i atmosferskog prigušenja (Baltsavias, 1999). Vrijeme uzdizanja ruba povratnog impulsa stoga je oblikovano snagom povratnog signala s najviših presretnutih površina unutar otiska. To će varirati ovisno o prirodi površine; ravni ledene površine proizvode oštre povratke s brzim uzdizanjem ruba, dok višeslojna, složena vegetacija stvara široke povratke (Harding i drugi, 1998; Ni-Meister i drugi, 2001).



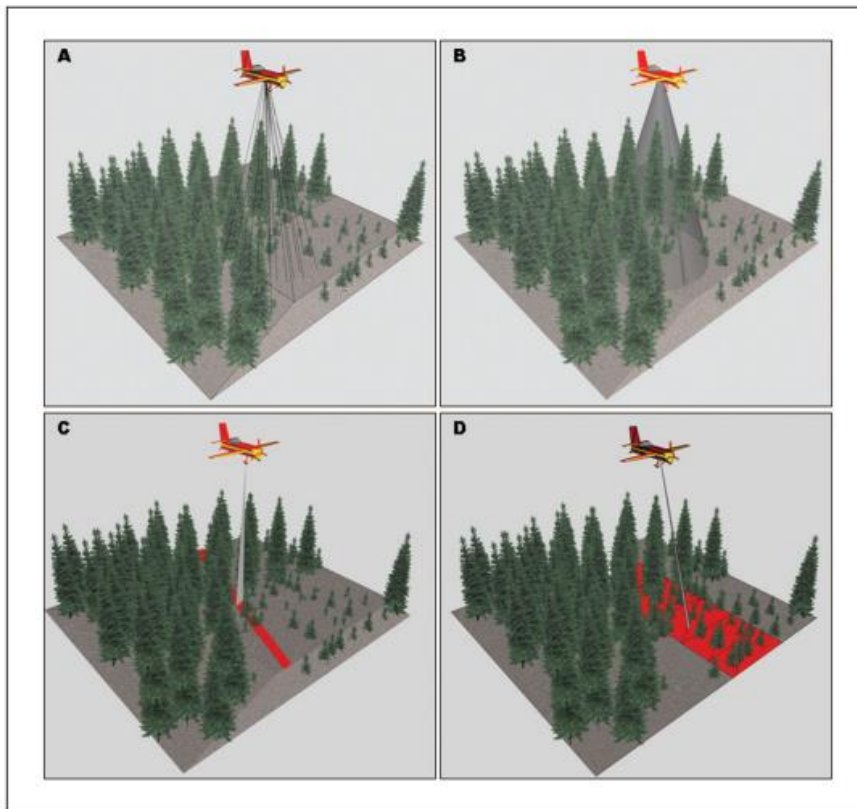
Slika 1.

Prikaz presretanja lišća, kore ili zemljane površine od strane emitiranog laserskog impulsa. Na svakoj površini nešto energije se reflektira, prenosi (u slučaju lišća) ili apsorbira. (preuzeto 17.1.2024.; izvor: Rosette i drugi, 2012.)

Položaj svakog povratnog signala u poznatom koordinatnom sustavu postiže se preciznim kinematskim pozicioniranjem pomoću diferencijalnog GPS-a i orijentacijskih parametara pomoću inercijalnog mjernog uređaja (IMU). IMU bilježi orijentacijske parametre instrumentalne platforme kao što su kutevi nagiba, valjanja i gibanja. Stoga, GPS pruža koordinate izvora laserskog impulsa, a IMU pokazuje smjer impulsa. S precizno izmjerenim i vremenski označenim podacima o rasponu, može se izračunati položaj povratnog signala. (Rosette i drugi, 2012.)

LiDAR sustavi mogu se klasificirati kao sustavi s diskretnim (Discrete system) povratom ili punovalnim (Full waveform system), te ih dodatno karakterizirati prema tome jesu li profilni sustavi (tj. bilježe samo duž uskog presjeka) ili sustavi za skeniranje (tj. bilježe šire područje) (Lefsky i drugi, 2002). LiDAR sustavi s uzorkovanjem pune valne duljine obično imaju grublju prostornu razlučivost (tj. veliki otisak: od 10 m do 100 m), kombiniranu s finom i potpuno digitaliziranom vertikalnom prostornom razlučivošću, rezultirajući potpunim submetarskim vertikalnim profilima. LiDAR sustavi s uzorkovanjem pune valne duljine obično su profilni sustavi i najčešće se koriste u istraživačke svrhe. (Wulder i drugi, 2008.)

Sustavi LiDAR-a s diskretnim povratom (s malom veličinom otiska od 0,1 m do 2 m) obično bilježe samo 1 do 5 povratnih signala po laserskom otisku (Lim i drugi, 2003.) i optimizirani su za dobivanje visokopreciznih visina terenske površine u podmetarskom rasponu (Blair i drugi, 1999., Schenk i drugi, 2001.). Ovi sustavi koriste se posebno za različite primjene, uključujući topografsko kartiranje, istraživanje prava prolaza elektroenergetskih vodova, inženjering te karakterizaciju prirodnih resursa (Lefsky i drugi, 2002.). LiDAR sustavi s diskretnim povratom za skeniranje stvaraju oblak točaka, pri čemu niže točke predstavljaju tlo, a više točke predstavljaju krošnje. Jedan od prvih koraka u obradi LiDAR podataka uključuje razdvajanje udaraca na tlo od onih koji nisu na tlu (tj. krošnje) - funkciju koju često obavljaju pružatelji LiDAR podataka pomoću softvera poput TerraScana, LP360, ili vlastitog vlasničkog softvera pružatelja podataka. (Wulder i drugi, 2008.)



Slika 2.

LiDAR sustavi mogu se klasificirati kao (A) sustavi s diskretnim povratom ili (B) punovalni sustavi. Nadalje, neki LiDAR sustavi su profilni sustavi (C), što znači da prikupljaju podatke duž uskog pojasa, ili su sustavi za skeniranje (D), što znači da laser pomiče s strane na stranu dok platforma (npr. zrakoplov) napreduje i bilježi podatke preko šireg pojasa. (preuzeto 18.1.2024.; izvor: Wulder i drugi, 2008.)

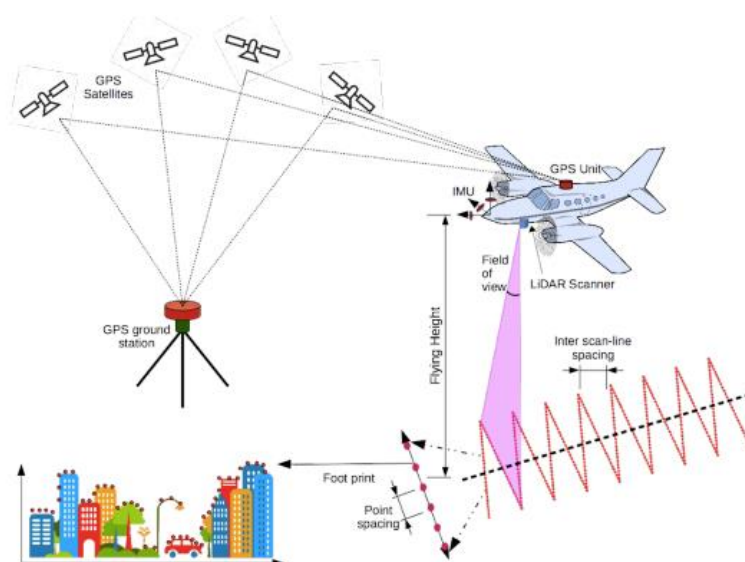
2.1. Zračni laserski skener- Airborne Laser Scanning (ALS)

Korištenje podataka o laserskom skeniranju iz zraka u šumskim primjenama privuklo je sve veći interes tijekom posljednjeg desetljeća. Danas se smatra da lidar pruža ekonomičnu i preciznu procjenu vertikalne i horizontalne strukture šumskih područja te je stoga valjana alternativa ili dopuna trenutačnim terenskim metodama inventarizacije (Wulder i dr., 2008). Vertikalna lokacija točaka često se prijavljuje s preciznošću od 1 ns (~15 cm), dok se očekuje da će točnost horizontalne geolokacije biti u rasponu od 20-30 cm.

Većina zračnih LiDAR sustava sastoji se od LiDAR senzora, GPS prijarnika, inercijalnog mjernog uređaja (IMU), računala na letjelici i uređaja za pohranu podataka.

LiDAR sustav šalje laserski zrak na zrcalo i projektira ga prema dolje s letjelice. Zrakoplov leti iznad područja istraživanja, a zraka skrenira s jedne strane na drugu, mjereći između 20000 do 150000 točaka u sekundi. Kada laserska zraka pogodi objekt, reflektira se natrag na zrcalo. Mjeri se vremenski interval između trenutka kada puls napušta zračnu platformu i njegovog povratka senzoru LiDAR. Nakon završetka LiDAR misije, podaci se naknadno obrađuju, a LiDAR mjerenja vremenskog intervala od slanja pulsa do primitka povratnog pulsa pretvaraju se u udaljenost i korigiraju prema GPS prijarniku na letjelici, IMU-u i GPS stanicama na tlu. GPS točno određuje položaj zrakoplova u smislu geografske širine, dužine i nadmorske visine, koje se nazivaju x, y i z koordinate. LiDAR senzor prikuplja ogromnu količinu podataka, a jedno istraživanje može lako generirati milijarde točaka, ukupno nekoliko terabajta (TB).

IMU se koristi za određivanje položaja letjelice dok senzor obavlja mjerenja. Ti se podaci bilježe u stupnjevima s izuzetno visokom točnošću u sva tri smjera kao nagib, nagnjanje i gibanje - vertikalno i horizontalno kretanje zrakoplova u letu. Iz tih dviju skupina podataka izračunava se geometrija izlaska laserskih zraka u odnosu na koordinate površine Zemlje s vrlo visokom točnošću.



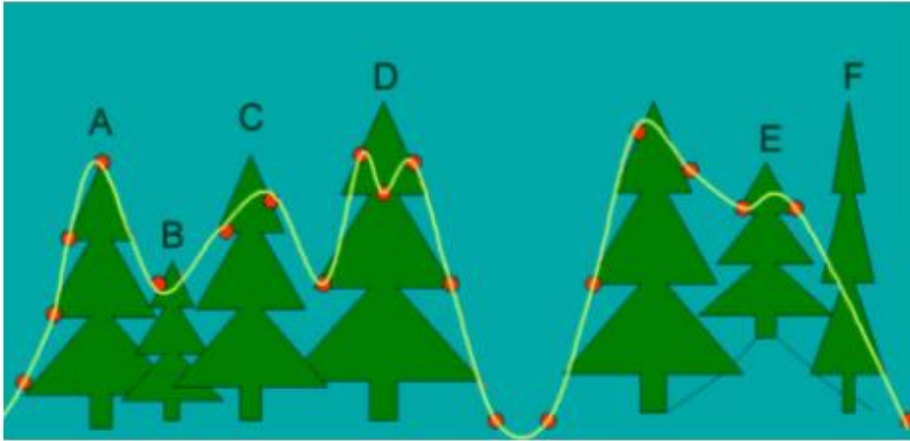
Slika 3.

Prikupljanje podataka ALS-om, crvene točke prikazuju LiDAR podatke na objektima s terena (preuzeto 26.1.2024.; izvor Lohani i Ghosh, 2017.)

Početni LiDAR podaci mogu se dodatno poboljšati naknadnom obradom, neki od koje mogu biti automatizirani, a neki su ručni. Daljnja obrada koristi višestruke signale povratka iz svakog laserskog impulsa. Evaluiranjem vremenskih razlika između višestrukih signala povratka, sustav za naknadnu obradu može razlikovati između zgrada i drugih struktura, vegetacije i površine tla. Ovaj postupak koristi se za uklanjanje površinskih obilježja i proizvodnju digitalnog modela terena (DTM) i drugih poboljšanih produkata podataka (Katiyar, 2019.)

Također je moguće provesti selektivnu ekstrakciju značajki, primjerice, uklanjanje drveća i druge vegetacije kako bi se zadržale samo zgrade. Zračni lidarski sustavi pružaju relativno gustu pokrivenost s otiskom veličine u rasponu desetaka centimetara. Međutim, često se izvještava o tome da ti sustavi podcjenjuju visinu krošnje zbog raspodjele i gustoće točaka, što proizlazi iz određene penetracije signala kroz krošnju, a ta penetracija varira ovisno o vrsti drveća (Næsset, 2004). Općenito, to podcjenjivanje je manje izraženo kod drvenastih vrsta s konusnim oblikom poput smreke ili duglazije (*Pseudotsuga menziesi*) nego kod vrsta s kuglastim oblikom poput mnogih listopadnih vrsta ili čak i običnog bora (*Pinus sylvestris L.*).

Četinjače obično tvore kompaktnije oblike s manjom penetracijom energije kroz krošnju u usporedbi s listopadnim vrstama. Dakle, često se dobivaju energetski povratci iz vanjskih slojeva krošnje. Međutim, stupanj penetracije konačno je povezan s kombinacijom čimbenika poput gustoće uzorkovanja, divergencije zrake i kut skeniranja (Suárez i dr., 2005).



Slika 4.

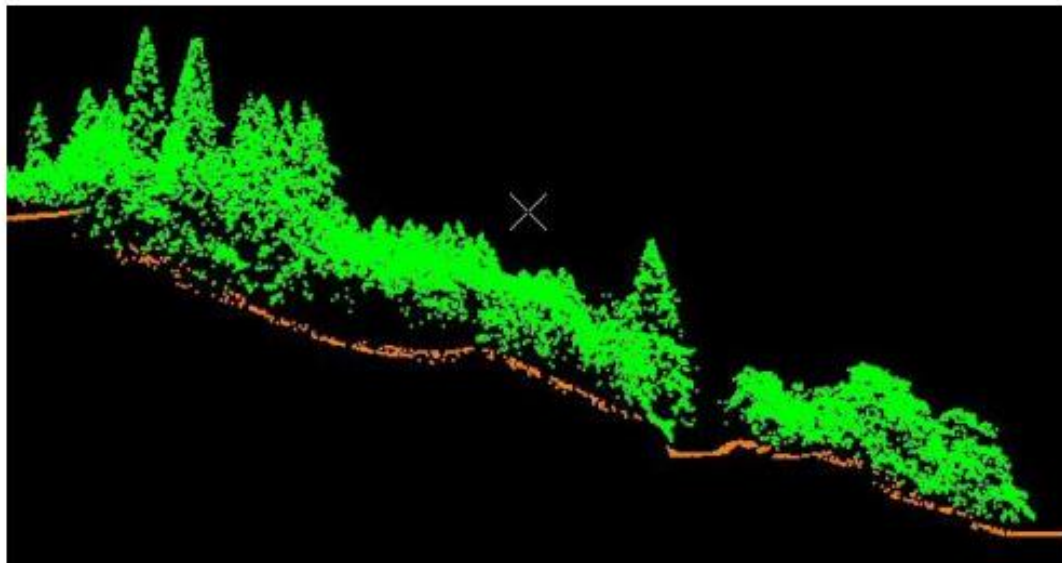
Mogući scenariji presretanja oblaka točaka lidara krošnjom šume. (preuzeto 19.1.2024.; Izvor: Suárez i dr., 2005.)

- a. Laser pogodi stvarni vrh krošnje,
- b. Male stabljike blizu većih susjeda zanemaruju se,
- c. Najvjerojatnija situacija: povratni signali lasera ne pogađaju stvarni vrh stabla,
- d. Jedan od impulsa presreće se na nižoj visini zbog penetracije krošnje, pogrešno sugerirajući dva vrha stabla,
- e. Stabla na humku mogu dobiti veću visinu u odsutnosti dobrog modela površine tla ispod,
- f. U situaciji rijetke gustoće povratka, neka stabla se mogu potpuno zanemariti.

Unatoč uobičajenom shvaćanju, lidar ne stvara tomografske slike i, stoga, ne mogu se smatrati 3D prikazima u strogome smislu. Šupljine u pokrovu krošnje i propusnost kroz lišće omogućit će vraćanje laserske energije s tla. Kao i kod podataka punovalnog oblika, ključni korak za izračunavanje metrika visine vegetacije jest razlikovanje između točaka koje se vraćaju s površine tla i onih koje se vraćaju s površina koje nisu tlo. Budući da će prodor laserske energije lidara kroz krošnju šuma varirati s strukturom šume, gustoćom i kutom skeniranja lasera, posljednji povrat emitiranog lasera možda neće nužno doći s površine tla. Stoga je potrebno sredstvo za filtriranje točaka kako bi se razlikovali oni povratci koji dosežu tlo od onih koji se presreću na različitim visinama unutar krošnje (Rosette i drugi, 2012. prema Kraus & Pfeiffer, 1998; Zhang i dr., 2003.).

Prema Rosette (2012.), upotreba zračnih lidarskih podataka u šumarstvu prvotno se usredotočila na izradu dvaju kartografskih proizvoda: Digitalnih modela terena (Digital Terrain Model) i digitalnih modela površine (Digital Surface Model), koji se koriste za opisivanje podložnog terena, odnosno vrhova šumskih površina, u slučaju DSM-a. Ovi proizvodi koriste se za generiranje modela visine krošnje (Canopy Height Model), koji zatim pružaju precizne procjene važnih šumskih parametara poput visina krošnje, volumena stabla te vertikalne strukture šumske krošnje. Procjena visine

krošnje izvodi se oduzimanjem vrijednosti golog tla (DTM) od sloja krošnje (DSM).
Točna procjena CHM-a ovisna je o preciznoj aproksimaciji površine tla ispod nje.



Slika 5.

Raspodjela i struktura vegetacije prikazane su klasifikacijom oblaka točaka zračnog LiDAR-a
Lokacija: Škotsko visočje, Velika Britanija (preuzeto 26.1.2024.; Izvor: Rosette i dr. 2012.)

2.2. Terestrički laserski skener -Terrestrial laser scanning (TLS)

Terestričko lasersko skeniranje (TLS) pokazalo se kao učinkovita tehnika za dobivanje detaljnih informacija o atributima drva u uzorcima šuma tijekom posljednja dva desetljeća. U usporedbi s ALS-om, podaci oblaka točaka dobiveni iz TLS-a dovoljno su gusto raspoređeni da omoguće određivanje prostorne distribucije drveća i izvlačenje gotovo cjelokupne geometrije svakog pojedinog stabla s visokom preciznošću (Chen i drugi, 2019.).

Male i prenosive terestričke lidarske sustave moguće je postaviti na statički stalak ili ih prevoziti na pokretnom vozilu, što znači da ih je lako ponijeti na teren. GPS mjerenja također omogućuju geolociranje tih skeniranja. Za razliku od perspektive gledanja odozgo koju pružaju satelitski i zračni senzori, terestrički lidar omogućuje jasan pogled na deblo, krošnju i površinu tla.

Ovo mjerenje relativno male površine unutar dosega skenera može se smatrati repliciranjem mjerenja polja, no dodatno pruža razumijevanje konteksta koje ne bi bilo moguće iz terenskih podataka. Pristup s gledanjem prema gore često dovodi do poteškoća u otkrivanju vrhova stabala, no omogućuje prikaz npr. debljine stabala, teksturu s površine tla i prizemnog rašća s detaljima koji ne mogu biti prikazani korištenjem „airborne“ instrumenata.

Ovaj pristup uzrokuje da se u bilo kojem skeniranju detektira samo strana debla koja je okrenuta prema skeneru, a također zaklanja pogled na stabla koja su iza onih bližih instrumentu. Često je potrebna kombinacija nekoliko skeniranja kako bi se akumuliralo dovoljno informacija za analizu scene unutar uzorka. Niska vegetacija i gusta razgranatost mogu utjecati na kvalitetu podataka, pa su u nekim studijama uklonjeni prije skeniranja lokacije. Ova poteškoća posebno je važna kod stabala najbližih skeneru jer uzrokuju najviše okluzije. Mogućnost rekonstrukcije geometrije stabala pomoću terestričkog laserskog skeniranja je jedinstvena i neusporediva s drugim metodama. Dok za potrebe inventarizacije šuma sposobnost detekcije površine tla, visine iznad tla duž debla stabla i određivanja veličine debla omogućuje direktno mjerenje promjera na prsnoj visini, što je jedan od najvažnijih operativnih parametara koje šumari prikupljaju na terenu (Rosette i dr., 2012.).

Tri pristupa prikupljanju podataka su zabilježena u terestričkim laserskim skeniranjima temeljenim na terenu: single-scan, multi-scan i multi-single-scan. Single-scan (SS) način koristi laserski skener koji je postavljen u središte uzorka kako bi dobilo jedno potpuno polje gledišta (npr., $360^{\circ} \times 310^{\circ}$) skeniranja podataka oblaka točaka ciljeva u okolini. Multi-scan (MS) način obično se primjenjuje postavljanjem skenera unutar i izvan uzorka kako bi se dobili detaljniji podaci oblaka točaka o ciljevima u uzorku. Način multi-single-scan (MSS) kombinira single-scan način na više skenirajućih mjesta za provođenje promatranja uzorka. Sva tri pristupa skeniranju

mogu se koristiti za prikupljanje podataka oblaka točaka visoke kvalitete. Međutim, single-scan način ima ozbiljne probleme s okluzijom, a multi-scan način je dugotrajan, ali pruža najbolje skupove podataka.

U praksi, TLS instrument treba stati u uzorak za skeniranje kako bi dobio podatke oblaka točaka, što značajno ograničava pokretljivost u prikupljanju podataka. Za istraživanje uzoraka velikih razmjera, ova metodologija zahtijeva puno vremena i više čitanja kako bi se izgradili dovoljno bogati oblaci točaka za opisivanje šumske okoline. Iako su istraženi algoritmi za poboljšanje preciznosti i točnosti oblaka točaka TLS-a, još uvijek postoje algoritmi i metode koje zahtijevaju daljnje poboljšanje, poput izdvajanja šumskih atributa iz TLS podataka i protokola za akviziciju podataka. Ti nedostaci koji se ne mogu eliminirati i dalje ograničavaju učinkovitost i točnost izdvajanja šumskih atributa. Korištenje pokretnog laserskog skenera (MLS) smanjilo bi nedostatke, posebno u pogledu zakrivenosti (okluzije) i pokretljivosti (Chen i drugi, 2019.).

2.2.1. Ručni laserski skener - hand-held Personal Laser Scanning (H-PLS)

Prvi Personal Laser Scanning (PLS) sustavi bili su veliki po veličini i teški (30+ kg) (Balenović i drugi, 2020. Prema Kukko i drugi, 2012, Hyyppa i dr. 2013, Liang i dr. 2014). Tijekom posljednjih godina, brzi napredak u miniaturizaciji senzora rezultirao je razvojem laganih i visoko mobilnih ručnih PLS (H-PLS) sustava. Daljnji napredak u H-PLS sustavima postignut je zamjenom Global Navigation Satellite System-a (GNSS) algoritmom Simultano Lokaliziranje i Mapiranje (SLAM). SLAM algoritam obrađuje IMU i laserske podatke kako bi locirao skener u nepoznatom okruženju i registrirao cijeli oblak točaka, čime su H-PLS sustavi prikladni za upotrebu u šumi gdje je signal GNSS-a često ometan. Konkretno, koncept tehnologije temelji se na sposobnosti postavljanja robota na nepoznatu lokaciju u nepoznatom okruženju, a zatim ga zadužuje izgradnjom karte koristeći isključivo relativna opažanja okoline. Značajka SLAM tehnologije leži u njezinoj sposobnosti korištenja ove karte istovremeno za navigaciju i lokalizaciju, čime se omogućava autonomnost robota u njegovim operacijama. Zasad se koristi u istraživanjima odrona, kartiranju urbanih struktura i rudnika te planiranju javnog prijevoza (Chen i drugi, 2019.).

Pojava i dostupnost H-PLS sustava u posljednjim godinama rezultirala je početnim istraživanjem mogućnosti njegove primjene u inventarizaciji šuma, prvenstveno za procjenu osnovnih atributa stabala (npr. položaj debla, promjer na prsnoj visini, visina stabla itd.). Iako je do sada proveden ograničen broj studija, stečeno znanje može pomoći usmjeriti daljnja istraživanja i konačno uključiti H-PLS u praksu šumarstva (Balenović i drugi, 2020.).

U usporedbi s PLS-om visokih performansi u smislu veličine, težine i senzorskih karakteristika, H-PLS sustavi obično se sastoje od jeftinih LiDAR senzora niske cijene i IMU sustava niske preciznosti s mikroelektričnim mehaničkim sustavima (MEMS) koji olakšavaju ručno korištenje. GNSS prijamnik obično nije integriran u takve sustave. Unatoč sposobnosti takvih senzora da prikupe veliku količinu podataka, rezultirajući podaci i dalje su značajno niže kvalitete u usporedbi s podacima prikupljenim suvremenim TLS-om. Naime, u usporedbi s TLS podacima, H-PLS podaci imaju značajno manju gustoću točaka, preciznost u rasponu i kutnu rezoluciju, dok je divergencija snopa i rezultirajući otisak značajno veći. Primjerice, deklarirana točnost VLP-16 LIDAR senzora proizvođača je ± 3 cm u „tipičnim“ uvjetima, dok je divergencija snopa 3 mrad, što rezultira otiskom od 7.5 cm u rasponu od 25 m. TLS laserski snop ima 10–20 puta veću rezoluciju od H-PLS-a.

Budući da H-PLS sustavi obično nemaju GNSS prijamnik za pružanje apsolutnog pozicioniranja, oblaci točaka H-PLS-a obično se proizvode u lokalnom koordinatnom okviru, koji se zatim može georeferencirati, odnosno rotirati i translirati u globalni geografski koordinatni sustav tijekom postprocesiranja. Svi podaci točaka TLS-a i H-PLS-a obično se georeferenciraju pomoću precizno izmjerene značajke koja se lako detektira u oblaku točaka, poput sfera poznatog promjera i položaja (geografskih koordinata). Da bi se precizno georeferencirao skeniranje, barem tri sfere moraju se postaviti na područje skeniranja, a položaji sfere moraju se izmjeriti s visokom točnošću pomoću totalne stanice ili GNSS prijarnika. Ovaj korak je nužan prilikom analize višeslojnih ili viševremenskih podataka u, primjerice, procjeni rasta, iako neki od H-PLS sustava pružaju načine za (stvarno vrijeme) usklađivanje skeniranja temeljeno na postojećem oblaku točaka/karti. (Balenović i dr. 2020.)

Među raznim promatranim pojedinačnim atributima stabala, ekstrakcija i procjena promjera na prsnoj visini (DBH) korištenjem H-PLS podataka (oblak točaka) privukla je pažnju u gotovo svim prethodnim istraživanjima. Također su pridane pažnje detekciji stabala (TD) i ekstrakciji položaja stabala (TP), praćeno procjenom visine stabala (H) te procjenom vremena/radne učinkovitosti (EFF). Ispitivane su i druge značajke (varijable), kao što su visina osnovne krošnje (CBH) i radijusi projekcije krošnje (CPAR), kao i različite putanje skeniranja hodanjem pomoću H-PLS za procjenu pojedinačnih atributa stabala.

Općenito, prikupljanje podataka pomoću H-PLS instrumenata obično obuhvaća sljedeće glavne korake:

1. Inicijalizacija IMU-a - za uspostavu lokalnog koordinatnog sustava
2. Skeniranje - operator hoda, a prikupljeni podaci pohranjuju se u stvarnom vremenu na tvrdi disk podatkovnog loggera povezanog s skenerima putem kabela

3. Mjerenje položaja sfera - pomoću totalne stanice ili GNSS prijavnika. Ovaj korak je potreban samo ako su potrebni georeferencirani podaci

4. Obrada oblaka točaka - prijenos podataka i automatska registracija pomoću SLAM algoritma korištenjem pratećeg softvera, georeferenciranje registriranog oblaka točaka te konačno ekstrakcija varijabli od interesa (npr. položaj stabala, DBH, visina stabala itd.) korištenjem odgovarajućeg softvera.

Prikupljanje podataka u inventarizaciji šuma pomoću H-PLS sustava obično se izvodi tako da operator hoda duž planirane staze skeniranja unutar istraživanog područja (npr. uzorci). Staza hodanja mora se pažljivo planirati jer izravno utječe na performanse SLAM algoritma, te stoga na kvalitetu prikupljenih podataka (gustoća i kvaliteta oblaka točaka) i točnost procjena pojedinačnih stabala. Prvi čimbenik koji treba uzeti u obzir prilikom planiranja staze hodanja su uvjeti u šumi, slično kao i kod svih mobilnih sustava. Kod H-PLS-a posebna pažnja mora se posvetiti rasponu laserskog instrumenta. Osim toga, vrijeme akvizicije i troškovi također su važni faktori za učinkovito istraživanje.

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj ovog diplomskog rada je prikazati upotrebu zračnog (ALS) i terestričkog laserskog skeniranja (TLS), kao i ručnog laserskog skenera (PLS) za potrebe inventure šuma (izmjera sastojinskih parametara), te usporedba s terenskim podacima (pokusne plohe). Prikazat će se način prikupljanja podataka svim navedenim metodama i usporedba s terenski prikupljenim podacima.

4. MATERIJALI I METODE

Istraživanje je provedeno na području UŠP Zagreb, šumarija Velika Gorica, gospodarska jedinica Vukomeričke gorice odjel/odsjek 47a.

Gospodarska jedinica Vukomeričke gorice rasprostire se u središnjem dijelu pobrđa Vukomeričke gorice, te se proteže u smjeru sjeverozapad – jugoistok i sastoji se od niza većih i manjih kompleksa.

Nalazi se na blagim i umjereno strmim obroncima Vukomeričkih gorica s nadmorskom visinom od 132 – 256 metara. U gospodarskoj jedinici nalazimo različite ekspozicije od kojih je sjeveroistočna najčešća, potom sjeverozapadna, a nešto manje zastupljena sjeverna.

Tla koja su zastupljena u gospodarskoj jedinici:

- Distrično smeđe tlo (distrični kambisol)
- Ilimerizirano ili lesivirano tlo (luvisol)
- Pseudoglej obronačni

Šumske zajednice ove jedinice pripadaju sljedećim vegetacijskim jedinicama fitocenološkog sustava:

- Šuma hrasta lužnjaka i običnog graba (*Carpino betuli-Quercetum roboris* „*typicum*“ Rauš 1973) - 6,5%
- Šuma crne joha i drhtavog šaša (*Carici brizoides-Alnetum glutinosae* Horvat 1938) - 16,2 %
- Ilirska šuma hrasta kitnjaka i običnog graba (*Epimedio-Carpinetum betuli* Horvat 1938/ Borhidi 1963) - 77,3%.

Za potrebe ovog diplomskog rada prikazani su podaci sa jedne terenske plohe unutar gospodarske jedinice Vukomeričke gorice, odjel/odsjek 47a.

Odsjek 47a starosti 81 godine, uređajni razred Bukva iz sjemena, površine 19,34 ha, III boniteta, sklop potpun, obrast 0,96, tip tla distrično smeđe tlo, kiselo-smeđe, ekspozicija Z-SZ, nagib od 5-20, nadmorska visina 162-200 metara, fitocenoza Šuma kitnjaka i običnog graba s bukvom.

4.1. Terenska istraživanja

U opisanoj gospodarskoj jedinici postavljene su terenske plohe kružnog oblika radijusa 15 m.

Za označena središta ploha, precizno su na terenu određene koordinate uz pomoć RTK GNSS Trimble uređaja, kako bi se središte plohe na terenu točno podudaralo sa središtem plohe pri interpretaciji snimaka, tj. kako bi mogli uspoređivati parametre izmjerene različitim metodama za ista stabla.

Na svakoj plohi su brojkom označena sva stabla, njihove udaljenosti i kutevi u odnosu na središte plohe, određene vrste drveća, svakom stablu izmjerena su dva međusobno okomita promjera i Vertexom izmjerene visine (Tablica 1.).

Tablica 1. Primjer terenskog obrasca

Ploha	Br. stabla	Vrsta	d1 (cm)	d2(cm)	Udaljenost (m)	Azimut (o)	Visina (m)
1	1	G	42,6	42,2	4,61	286	29,1
1	2	HK	48,2	47,4	7,06	316	36,3
1	3	B	40	40,4	13,15	319	31,2
1	4	B	30,8	31,8	17,12	329	18,3
1	5	B	19,8	19	18,78	342	20,6
1	6	HK	39,4	37,6	15,61	341	36,8
1	7	HK	56,8	51,5	13,17	342	37
1	8	G	19	18,5	13,39	349	20,1
1	9	G	26,5	24,4	9,14	346	25
1	10	B	15,3	16	6,42	21	16,1
1	11	HK	49,3	48,5	6,8	22	37,3
1	12	G	17	18,3	4,83	24	19,7
1	13	B	41,2	38,4	3,04	86	33,8
1	14	G	21,8	21,6	15,27	40	19,7
1	15	HK	33,7	35,8	13,78	62	28
1	16	B	62,9	60	18,1	61	40,9
1	17	B	43,2	43,6	13,57	73	31,6

4.2. Princip rada i specifikacije FARO Focus M70 3D laserskog skenera korištenog za TLS

FARO Focus M70 je profesionalni 3D laserski skener kratkog dometa dizajniran za precizno mjerenje i snimanje unutarnjih i vanjskih prostora. Ovaj uređaj omogućava brzo, jednostavno i točno mjerenje malih građevinskih područja, fasada, kompleksnih struktura, proizvodnih i opskrbnih objekata te u ovom slučaju, šumske površine.

Princip rada:

1. Emisija lasera

Uređaj emitira laserske zrake prema objektima koje treba skenirati. Laserska zraka se ispušta iz rotirajuće glave koja se okreće horizontalno i vertikalno, omogućujući skeniranje cijelog prostora oko uređaja.

2. Mjerenje vremena i udaljenosti

Kada laserska zraka pogodi površinu objekta, dio zrake se odbija natrag prema skeneru.

Uređaj mjeri vrijeme potrebno za povratak laserske zrake (time-of-flight) kako bi izračunao udaljenost do objekta. Ova metoda je poznata kao „time-of-flight“ tehnologija.

3. Sakupljanje podataka

Skener prikuplja milijune točaka podataka, poznatih kao „Point Cloud“. Svaka točka sadrži informacije o svojoj točnoj poziciji u prostoru.

Uz udaljenost, uređaj može prikupljati i informacije o intenzitetu reflektiranog signala, što pomaže u razlikovanju različitih materijala i površina.

4. Kreiranje 3D modela

Softver povezan sa skenerom koristi oblake točaka za stvaranje detaljnog 3D modela skeniranog područja ili objekta.

Modeli se mogu koristiti za različite svrhe, uključujući arhitekturu, građevinu, forenziku, proizvodnju i geodetska mjerenja.

5. Integracija i analiza

Dobiveni 3D modeli mogu se integrirati s drugim softverskim alatima za daljnju analizu, usporedbu s nacrtima ili planovima, te za vizualizaciju.



Slika 6.

FARO Focus M70

(Preuzeto 6.7.2024.; Izvor: <https://www.g2metric.co.il/product/faro-laser-scanner-focus-m70/>)

FARO Focus M70 je dizajniran za pružanje visoke preciznosti i efikasnosti u raznim primjenama . Ovaj uređaj ima domet skeniranja do 70 metara, što ga čini idealnim za mjerenje malih i srednjih prostora. Njegove dimenzije od 230 x 183 x 103 mm i težina od samo 4,2 kg omogućuju laku prenosivost i jednostavno postavljanje na terenu. Skener može prikupljati podatke brzinom od 122,000, 244,000 ili 488,000 točaka u sekundi, ovisno o zahtjevima projekta. Točnost mjerenja udaljenosti je ± 3 mm, što osigurava visoku razinu preciznosti potrebnu za detaljne analize i modeliranje.

FARO Focus M70 je dizajniran za rad u različitim uvjetima, s radnom temperaturom od 5° do 40°C, uz prošireni raspon od -20° do 55°C, što omogućuje upotrebu u različitim klimatskim uvjetima. Podaci se pohranjuju na SD, SDHC™, ili SDXC™ kartice, s kapacitetom pohrane do 32GB, omogućujući pohranu velikih

količina podataka izravno na uređaju. Uz to, kompaktni dizajn i vodootporni transportni kofer osiguravaju sigurnost i dugovječnost uređaja, čak i u teškim terenskim uvjetima.

Ove tehničke specifikacije omogućuju FARO Focus M70 da pruži visoku razinu detalja i preciznosti u različitim primjenama, od arhitekture i građevine do šumarstva i industrijske proizvodnje. (Technical Specification Sheet for the Focus Laser Scanner 2022.)

4.3. Princip rada i specifikacije Geoslam Zeb Horizon skenera korištenog za PLS

GeoSLAM ZEB Horizon je napredni mobilni laserski skener koji omogućava brzo i precizno prikupljanje podataka u raznim uvjetima. Ovaj uređaj koristi VLP-16 skener, sposoban za akviziciju 300,000 točaka u sekundi sa 16 kanala. Maksimalni domet skeniranja je 100 metara, što omogućuje skeniranje velikih područja s visokim stupnjem detalja. Skener koristi lasersku zraku klase 1, siguran za oči, s valnom duljinom od 903 nm. Kutna rezolucija uređaja varira između 0.1° i 0.4°, što omogućava precizno mapiranje okolnih objekata. Težina skenera je samo 1.3 kg, što ga čini vrlo prenosivim i pogodnim za različite terenske uvjete. Veličina neobrađenih (raw) podataka kreće se između 100-200MB u minuti, dok rotacija skenera iznosi 10Hz.

GeoSLAM ZEB Horizon koristi PAG L90 SLIM bateriju kapaciteta 90 Wh (14.8V, 6.1 Ah), koja omogućuje operativno vrijeme od 3.5 sati. Uređaj je opremljen s 120GB interne pohrane i može raditi u temperaturnom rasponu od 0° do 50°C. ZEB Horizon podržava povezivanje putem ZEB kabela (LEMO) i USB 3.0 porta. Težina dataloggera je 2.4 kg, a cijeli sustav ima zaštitu klase IP54, što znači da je otporan na prašinu i prskanje vodom.

U pogledu obrade podataka, GeoSLAM ZEB Horizon koristi post-procesiranje za generiranje točnih 3D modela, s točnošću između 1 - 3 cm. Sustav dolazi s GeoSLAM HUB softverom, koji je industrijski lider u pretvaranju LiDAR podataka u upotrebljive informacije. Softver omogućava korisnicima da brzo i jednostavno analiziraju prikupljene podatke i stvaraju detaljne 3D modele.

GeoSLAM ZEB-CAM za Horizon dodaje dodatnu vrijednost uređaju s 4K rezolucijom, 30fps frame rateom, 16:9 omjerom stranica i vidnim poljem od 130°. Uređaj se može koristiti i s UAV platformama, omogućavajući prikupljanje podataka s različitih visina i brzina, s gustoćom točaka od 1000 pts/m² na visini od 15 metara, 600 pts/m² na 25 metara, te 350 pts/m² na 50 metara.



Slika 7.

GeoSLAM ZEB Horizon (Preuzeto 6.7.2024.,
Izvor: https://shop.laserscanning-europe.com/Used-GeoSLAM-ZEB-Horizon_1)

GeoSLAM ZEB Horizon je posebno dizajniran za mobilno skeniranje, što znači da se može nositi i koristiti u pokretu. Senzor kontinuirano skenira okolinu dok korisnik hoda ili se kreće kroz područje koje se skenira, omogućujući brzo i efikasno prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. Ova tehnologija je izuzetno korisna za aplikacije koje zahtijevaju brzinu i mobilnost, poput skeniranja unutrašnjosti zgrada, tunela, šuma, rudnika ili urbanih područja. (Geo SLAM Zeb Horizon, 2016.)

4.4. Uređaji korišteni za izvođenje ULS

Za potrebe ovoga istraživanja područje istraživanja snimljeno je i bespilotnom letjelicom (dron) DJI M300 (Slika 8.).



Slika 8.

Bespilotna letjelica (DRON) DJI M300 (Preuzeto 23.4.2023., Izvor: <https://www.dslrpros.com/dji-zenmuse-l1-lidar-rgb-survey-camera.html>)

koja je nosila senzor za fotogrametrijsko snimanje RGB P1 full frame 45 MP i lećom od 35 mm (Slika 9.).



Slika 9.

Kamera RGB P1 full frame 45 MP i lećom od 35 mm (Preuzeto 23.4.2023. Izvor: <https://www.dslrpros.com/dji->

zenmuse-l1-lidar-rgb-survey-camera.html)

Isto područje je snimljeno i LiDAR tehnologijom DJI L1 na visini od 100 m, a ostvarene su snimke gustoće točaka od 200-300 točaka/m² (Slika 10.).



Slika 10.

LiDAR DJI L1 (Preuzeto 23.4.2023. Izvor: <https://www.dslrpros.com/dji-zenmuse-l1-lidar-rgb-survey-camera.html>)

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

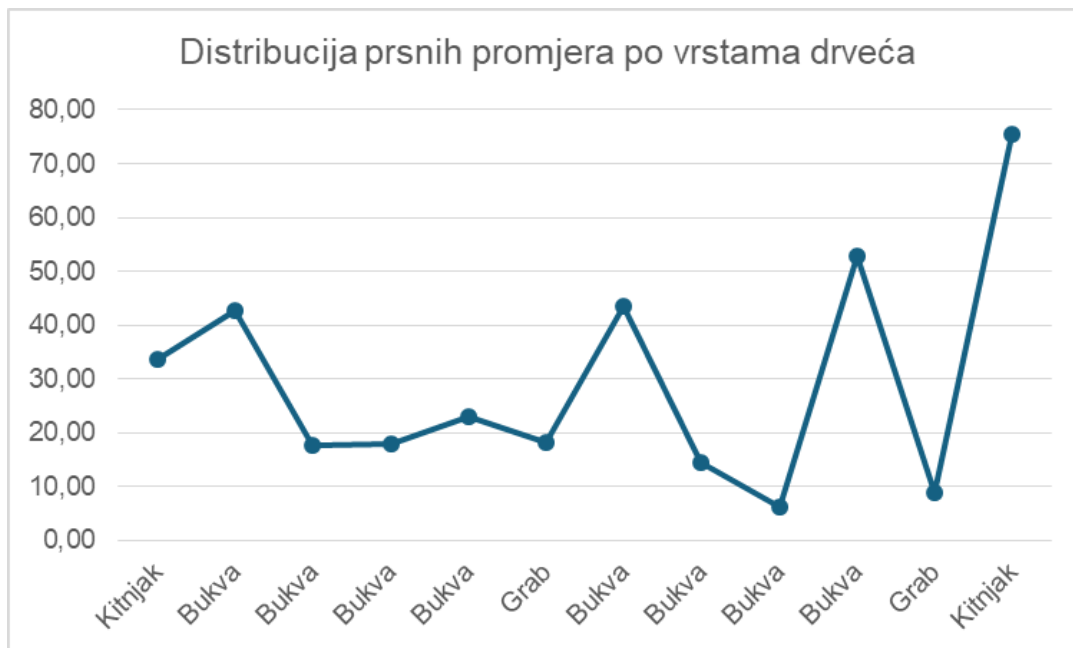
5.1. Rezultati terenskih mjerenja

Kako je već opisano na pokusnoj terenskoj plohi, označena su sva stabla, njihove udaljenosti i kutevi u odnosu na središte plohe, određene vrste drveća, svakom stablu izmjerena su dva međusobno okomita promjera i Vertexom izmjerene visine (Tablica 2.)

Tablica 2. Rezultati terenske izmjere na pokusnoj plohi

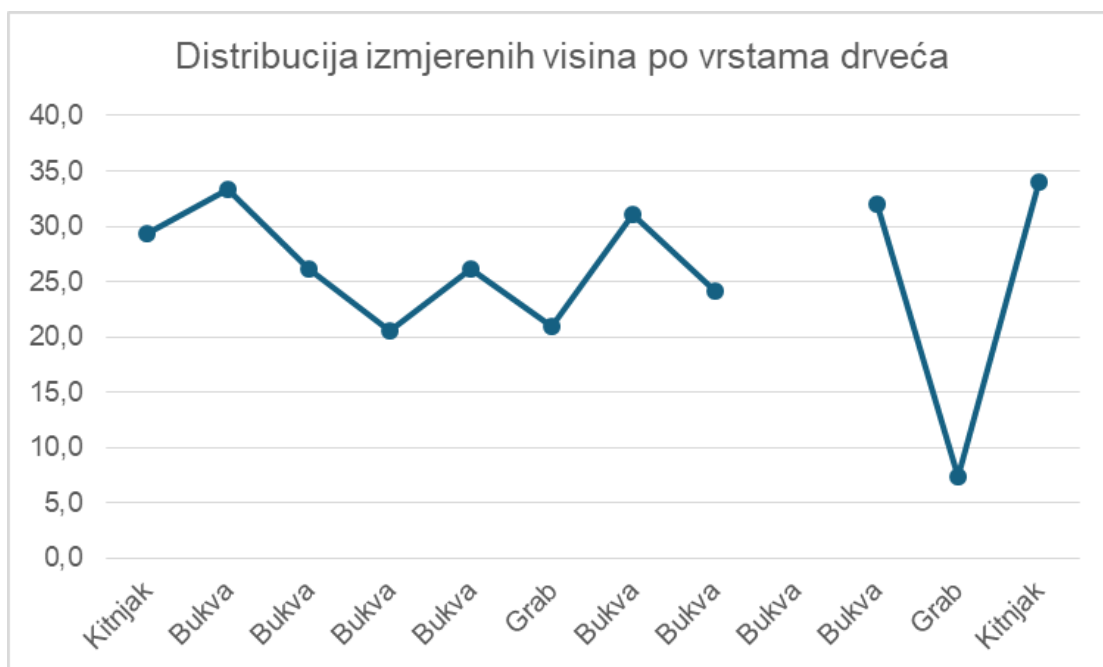
Odsjek	Ploha	Stablo	Vrsta	E (X)	N (Y)	D1_1-23	D2_1-23	Dsr_1-23	H-v_1-23
47a	21	1	Kitnjak	460617,02	5055120,82	35,1	31,9	33,50	29,4
47a	21	2	Bukva	460617,69	5055111,81	43,8	41,6	42,70	33,4
47a	21	3	Bukva	460621,20	5055111,04	18,3	16,7	17,50	26,2
47a	21	4	Bukva	460625,49	5055108,37	17,7	18,2	17,95	20,5
47a	21	5	Bukva	460623,19	5055103,58	23,0	22,7	22,85	26,2
47a	21	6	Grab	460622,85	5055101,83	19,4	17,0	18,20	21,0
47a	21	7	Bukva	460619,05	5055105,63	43,3	43,4	43,35	31,1
47a	21	8	Bukva	460617,94	5055103,49	13,7	15,1	14,40	24,2
47a	21	9	Bukva	460611,37	5055110,02	6,2	6,0	6,10	
47a	21	10	Bukva	460611,02	5055109,88	52,7	52,9	52,80	32,0
47a	21	11	Grab	460612,41	5055119,04	8,4	9,0	8,70	7,3
47a	21	12	Kitnjak	460613,99	5055120,50	77,5	73,6	75,55	34,0

Na temelju izmjerenih prsnih promjera svih stabala na plohi napravljena je i distribucija srednjih prsnih promjera prema vrstama drveća (Grafikon 1.)



Grafikon 1. Distribucija srednjih prsnih promjera po vrstama drveća

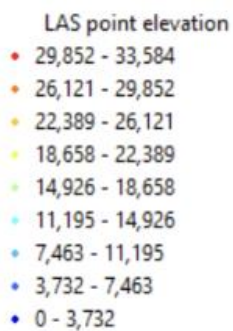
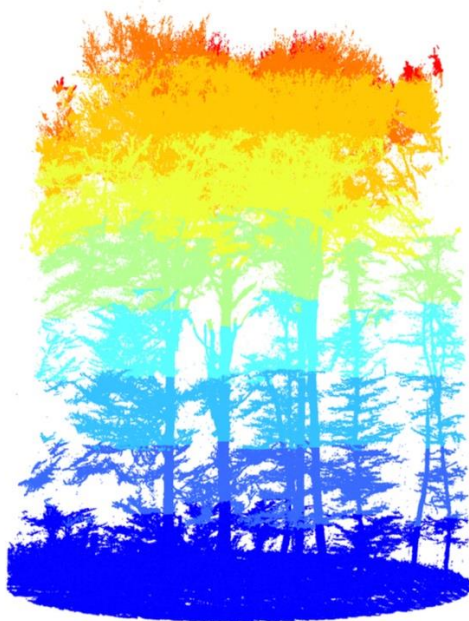
Isto tako i distribucija izmjerenih visina prema vrstama drveća (Grafikon 2.)



Grafikon 2. Distribucija izmjerenih visina po vrstama drveća

5.2. Rezultati terestričkog i ručnog laserskog skeniranja

Kao produkt terestričkog i ručnog laserskog skeniranja dobiven je gusti 3D oblak točaka.



Slika 11.

3D oblak točaka dobiven terestričkim laserskim skeniranjem, s legendom



Slika 12.

3D oblak točaka dobiven ručnim laserskim skeniranjem s legendom

Nadalje obavljen je izračun 3D oblaka LiDAR točaka, klasifikacija i filtriranje LiDAR točaka, te izrada digitalnog modela reljefa (DMR), digitalnog modela visina (DMV), a kao krajnji produkt i digitalni model visina krošanja (DMVK).

Upravo digitalni model visina krošanja (DMVK) omogućava izmjeru visina pojedinačnih stabala koji je proveden nakon segmentacije pojedinačnog stabla na pokusnoj plohi, a samim time i izmjeru prsnih promjera.

Analizom podataka terestričkog i ručnog laserskog skeniranja dobivene su vrijednosti prsnih promjera i visina za svako pojedinačno stablo (Tablica 3. i 4.)

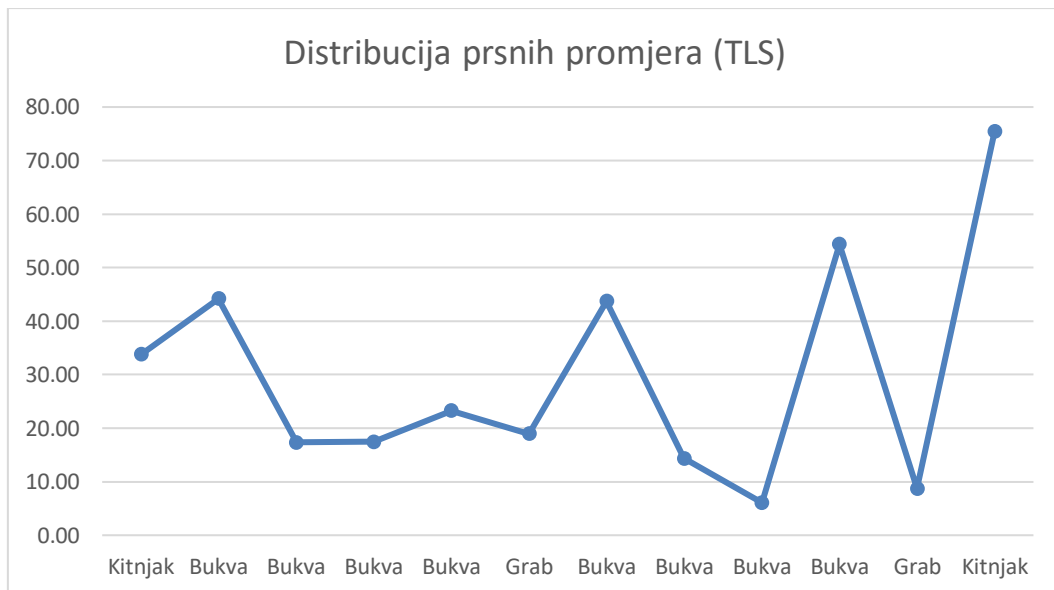
Tablica 3. Rezultati terestričkog laserskog skeniranja (TLS) na pokusnoj plohi

Broj stabla	Vrsta	X	Y	Prsni promjer (cm)	Visina (m)
1	Kitnjak	460617,89	5055120,84	33,82	27,07
2	Bukva	460617,99	5055111,65	44,20	31,83
3	Bukva	460621,32	5055110,47	17,37	23,78
4	Bukva	460625,40	5055107,52	17,48	19,70
5	Bukva	460622,77	5055102,73	23,25	26,76
6	Grab	460622,05	5055100,84	18,93	20,26
7	Bukva	460618,75	5055105,02	43,71	29,12
8	Bukva	460617,32	5055103,09	14,35	19,81
9	Bukva	460611,19	5055110,28	6,08	4,69
10	Bukva	460610,62	5055110,13	54,34	31,42
11	Grab	460612,65	5055119,29	8,70	6,63
12	Kitnjak	460613,84	5055120,93	75,46	33,44

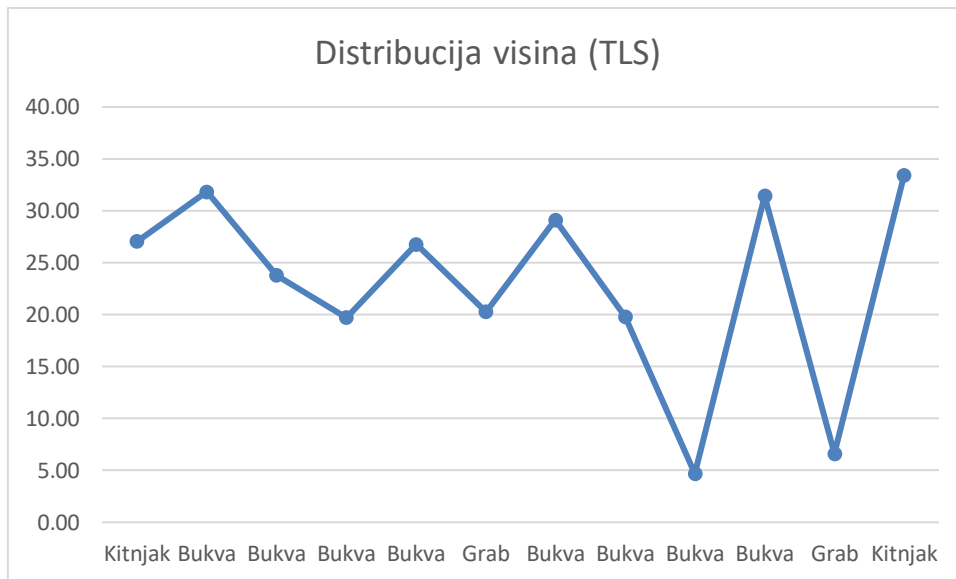
Tablica 4. Rezultati ručnog laserskog skeniranja (PLS) na pokusnoj plohi

Broj stabla	Vrsta	X	Y	Prsni promjer (cm)	Visina (m)
1	Kitnjak	460617,96	5055120,81	32,67	27,10
2	Bukva	460618,02	5055111,61	42,37	31,56
3	Bukva	460621,33	5055110,41	16,60	23,12
4	Bukva	460625,39	5055107,44	17,05	19,82
5	Bukva	460622,70	5055102,65	22,69	26,85
6	Grab	460621,96	5055100,78	17,36	20,26
7	Bukva	460618,71	5055104,98	41,91	29,12
8	Bukva	460617,25	5055103,05	16,04	19,71
9	Bukva	460611,19	5055110,31	6,67	4,68
10	Bukva	460610,61	5055110,17	51,96	31,48
11	Grab	460612,75	5055119,32	11,87	6,71
12	Kitnjak	460613,93	5055120,95	74,73	33,34

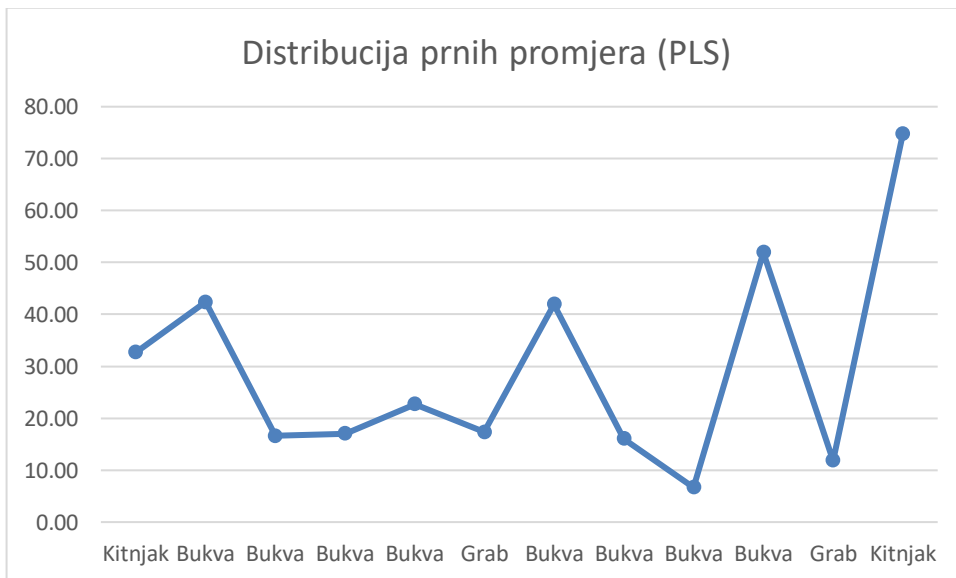
Na temelju dobivenih rezultata prikazane su distribucije prsnih promjera i visina pojedinačnih stabala po vrstama drveća za terestričko lasersko skeniranje (TLS) i ručno lasersko skeniranje (PLS) – (Grafikoni 3. do 6.)



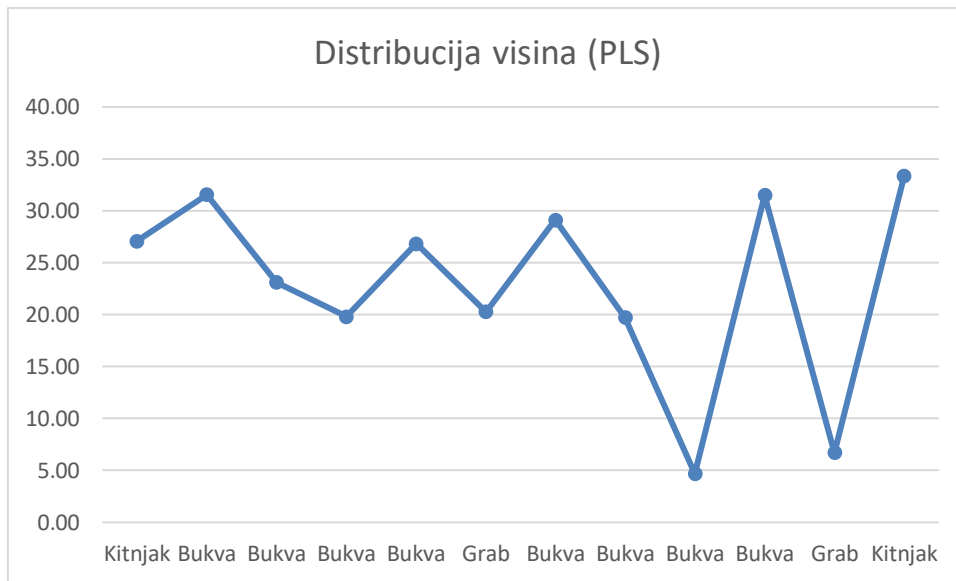
Grafikon 3. Distribucija prsnih promjera po vrstama drveća (TLS)



Grafikon 4. Distribucija visina po vrstama drveća (TLS)



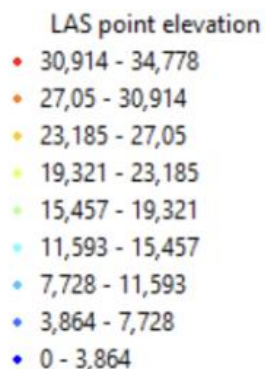
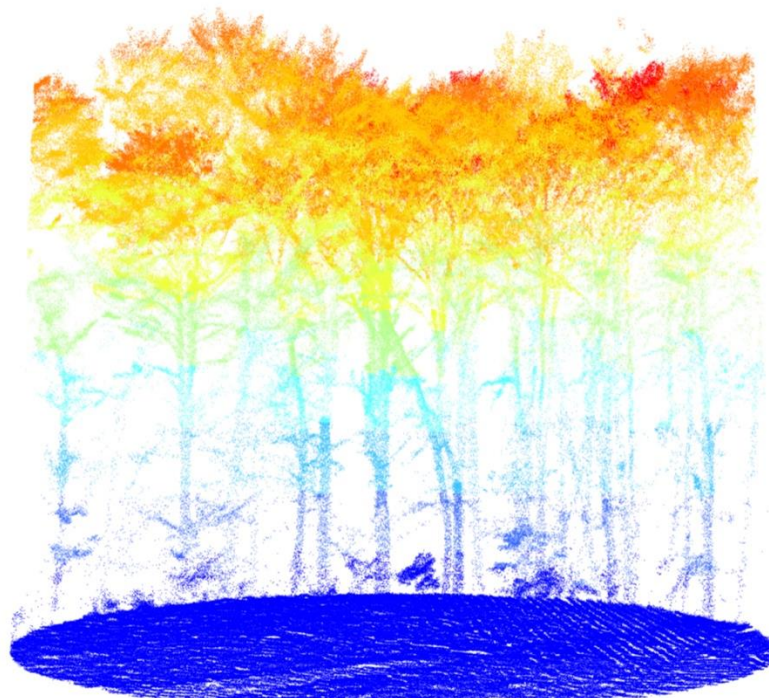
Grafikon 5. Distribucija prsnih promjera po vrstama drveća (PLS)



Grafikon 6. Distribucija visina po vrstama drveća (PLS)

5.4. Rezultati laserskog skeniranja iz zraka (besposadna letjelica)

Provedeno je i lasersko skeniranje iz zraka, opisano u materijalima i metodama rada, ali obradom podataka nisu dobiveni zadovoljavajući podaci koji bi bili usporedivi na razini stabla, pogotovo misleći na prsni promjer. Upravo iz tog razloga odlučeno je da se u podaci laserskog skeniranja iz zraka izuzmu iz kasnijih analiza i usporedbi.

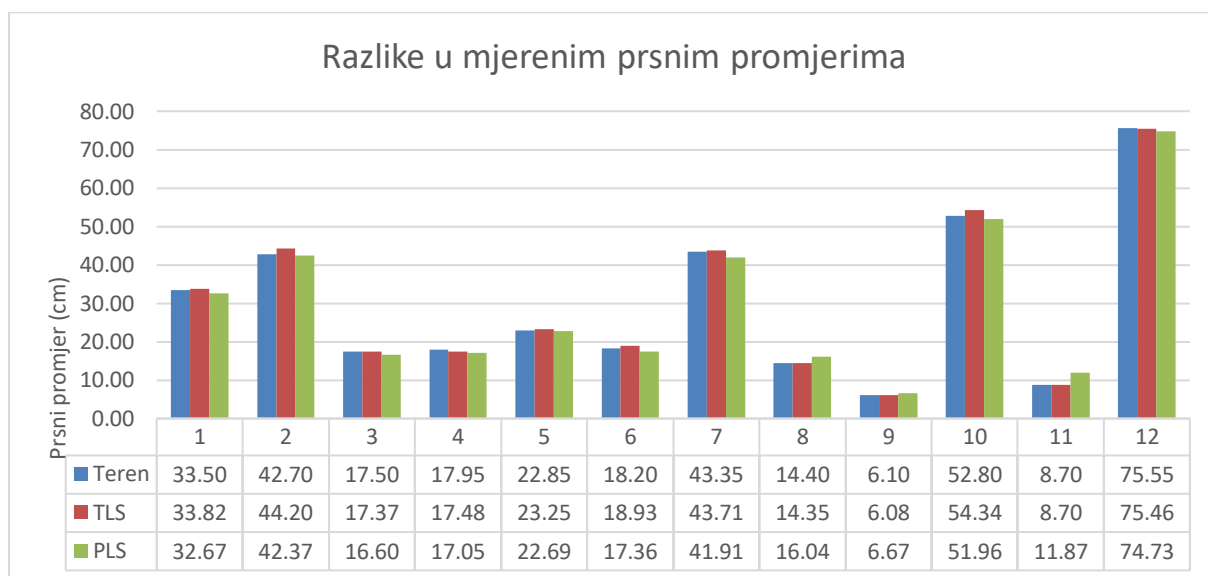


Slika 13.

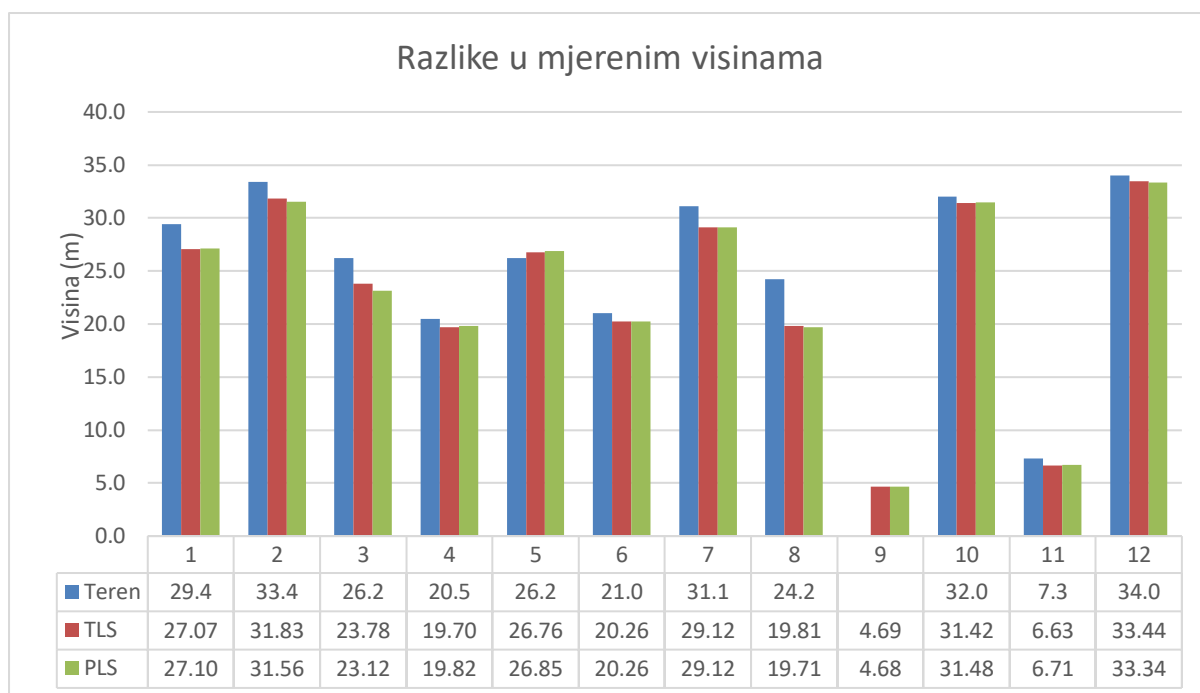
3D oblak točaka dobiven ručnim laserskim skeniranjem, s legendom

5.5. Usporedba rezultata

Na temelju dobivenih rezultata terenske izmjere, terestričkog laserskog skeniranja i ručnog laserskog skeniranja napravljena je usporedba podataka pojedinačnih stabala na pokusnoj plohi i to za prsne promjere (Grafikon 7.) i visine (grafikon 8.)



Grafikon 7. Razlike u mjenim prsnim promjerima pojedinačnih stabala



Grafikon 8. Razlike u mjerenim visinama pojedinačnih stabala

Iz usporedbe podataka vidljivo je da nema značajne razlike u izmjeri prsnih promjera. Ručni laserski skener ima neznatna odstupanja u odnosu na terestrički i terenski izmjerene podatke. Kod izmjere visina vidljivo je da su najveće vrijednosti dobivene izmjerom na terenu (VERTEX), dok TLS i PLS imaju vrlo slične rezultate. Za izmjeru visina pojedinačnih stabala kao referentnu vrijednost treba uzeti podatke TLS-a i PLS-a iz razloga što nam prikupljeni gusti 3D oblaci točaka omogućuju izradu visoko preciznih digitalnih modela reljefa (DMR) i digitalnih modela visina (DMV), a kao krajnji produkt i digitalni model visina krošanja (DMVK), pomoću kojih dobivamo podlogu za precizno određivanje visina pojedinačnih stabala.

6. ZAKLJUČAK

- Dobiveni podatci koji su prikupljeni terestričkim laserskim skeniranjem (TLS), te ručnim laserskim skeniranjem (PLS) mogu se koristiti za potrebe izmjere šuma te određivanje visina stabala i prsnih promjera zahvaljujući gustom 3D oblaku točaka unutar kojeg je svaka točka definirana sa sve tri koordinate (x, y i z).
- Visoko precizni digitalni modela reljefa (DMR) i digitalni modela visina (DMV), a kao krajnji produkt i digitalni model visina krošanja (DMVK), predstavljaju podlogu za precizno određivanje visina pojedinačnih stabala.
- Laserskim skeniranjem iz zraka, nismo dobili zadovoljavajuće podatke koji bi bili usporedivi na razini stabla, pogotovo pri izmjeri prsnih promjera.
- Primjena daljinskih istraživanja ukazala je mogućnost primjene pri izmjeri i uređivanju šuma, što pak smanjuje opseg terenskog rada, te otvara mogućnosti ušteda vremena i novca.

7. LITERATURA

1. Balenović, I., Liang, X., Jurjević, L., Hyyppä, J., Seletković, A. I Kukko, A., 2021.. Hand-Held Personal Laser Scanning – Current Status and Perspectives for Forest Inventory Application. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42 (1), 165-183. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.858>
2. Baltsavias, E.P., 1999., Airborne Laser Scanning - Basic Relations and Formulas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 199-214.
3. Blair, J.B., D.L. Rabine and M.A. Hofton. 1999., The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 115–122
4. Chen, S., Liu, H., Feng, Z., Shen, C., Chen, P., 2019., Applicability of personal laser scanning inforestry inventory. *Plos ONE* 14(2): e0211392.<https://doi.org/10.1371/journal.pone>
5. Crespo-Peremarch, P., Torralba, J., Carbonell-Rivera, J. P., and Ruiz, L. A., 2020., Comparing The Generation Of Dtm In A Forest Ecosystem Using Tls, Als And Uav-Dap, And Different Software Tools, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2020, 575–582, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-575-2020>
6. Fassnacht, F. E., White, J. C., Wulder, M. A., & Næsset, E., 2024., Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(1), 11–37. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>
7. Geo SLAM Zeb Horizon, 2016. (Pristupljeno 6.7.2024. <https://www.skyviv.com/geoslam-zeb-horizon>)
8. Harding, D.J., Blair, J.B., Rabine, D.R. and Still, K., 1998., SLICER: Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery Instrument and Product Description. NASA; 1998.
9. Katiyar, S., 2023. Lidar BASIC PRINCIPLES AND APPLICATIONS (Pristupljeno 12.2.2024. <https://ebooks.inflibnet.ac.in/geop10/chapter/lidar-basic-principles-and-applications/>)
10. Lefsky, M.A., W.B. Cohen, G.G. Parker and D.J. Harding., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience* 52(1): 19–30
11. Lim, K., P. Treitz, M.A. Wulder, B. St-Onge and M. Flood. 2003. Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27: 88–106.
12. Lindberg, E., Holmgren, J., Nordkvist, K., & Olofsson, K., 2017., Remote sensing of forests. Sveriges lantbruksuniversitet. http://www.rslab.se/wp-content/uploads/2019/03/remote_sensing_of_forests_v1_0_161201.pdf Pristupljeno 11.2.2024.

13. Næsset, E., 2004., Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first nordic full-scale operational project, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6)
14. Ni-Meister, W., Jupp, D.L.B. and Dubayah, R., 2001., Modeling Lidar Waveforms in Heterogeneous and Discrete Canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9): 1943-1958.
15. Program gospodarenja za gospodarsku jedinicu „Vukomeričke gorice“,
16. Rosette, J. , Suárez, J., Nelson, R., Los, S., Cook, B. And North, B., (2012). Lidar Remote Sensing for Biomass Assessment, *Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications*, Dr. Lola Fatoyinbo (Ed.), 978-953-51-0313-4, intech
17. Schenk, T., S. Seo and B. Csatho, 2001., Accuracy study of airborne laser scanning data with photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Izdanje: XXXIV, Dio: 3/W4. Stranice: 113–118.
18. Suárez, J., Ontiveros, C., Smith, S. And Snape, S., 2005., Use of airborne lidar and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry, *Computers and Geosciences*, 31(2): 253-262.
19. Technical Specification Sheet for the Focus Laser Scanner 2022. (pristupljeno 6.7.2024., https://knowledge.faro.com/Hardware/Focus/Focus/Technical_Specification_Sheet_for_the_Focus_Laser_Scanner)
20. Wehr, A., Lohr, U. And Baltsavias, E., 1999. Editorial: Theme Issue on Airborne Laser Scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 61-63.
21. Wulder, M., Bater, C., Coops, N.C., Hilker, T. And White, J., 2008., The role of lidar in sustainable forest management, *The Forestry Chronicle*, 84(6).