

Izmjera normalnih poprečnih profila šumske ceste nizinskog reljefnog područja upotrebom suvremenih mjernih uređaja

Hikl, Marko

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:108:945232>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

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



**FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
ŠUMARSKI ODSJEK**



**IZMJERA NORMALNIH POPREČNIH PROFILA ŠUMSKE
CESTE NIZINSKOG RELJEFNOG PODRUČJA UPOTREBOM
SUVREMENIH MJERNIH UREĐAJA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
ŠUMARSKI ODSJEK

IZMJERA NORMALNIH POPREČNIH PROFILA ŠUMSKE
CESTE NIZINSKOG RELJEFNOG PODRUČJA UPOTREBOM
SUVREMENIH MJERNIH UREĐAJA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij Šumarstvo, smjer: Tehnika, tehnologija i management u šumarstvu

Predmet: Projektiranje šumskih prometnica

Ispitno povjerenstvo: 1. izv. prof. dr. sc. Ivica Papa
2. prof. dr. sc. Tibor Pentek
3. Mihael Lovrinčević, mag. ing. silv.
Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Nevečerel (zamjenski član)

Student: Marko Hiki

JMBAG: 0068231892

Datum odobrenja teme: 26. travnja 2024.

Datum predaje rada: 10. rujna 2024.


Datum obrane rada: 13. rujna 2024.

Zagreb, rujna 2024.

DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov	Izmjera normalnih poprečnih profila šumske ceste nizinskog reljefnog područja upotrebom suvremenih mjernih uređaja
Title	Measurement of Standard Cross-Section Profiles on Forest Road in Lowland Area Using Modern Measuring Devices
Autor	Marko Hinkl
Adresa autora	Matije Gupca 45, 31550 Harkanovci
Mjesto izrade	Fakultet šumarstva i drvine tehnologije Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Izv. prof. dr. sc. Ivica Papa
Izradi rada pomogao	Izv. prof. dr. sc. Ivica Papa Mihael Lovrinčević, mag.ing.silv.
Godina objave	2024
Obujam	Poglavlja: 6, stranica 55, slika: 41, tablica: 12, navoda literature: 54
Ključne riječi	Bespilotne letjelice, digitalni model terena, primjena bespilotnih letjelica u šumarstvu, šumske prometnice, poprečni profil šumske ceste
Key words	Unmanned aerial vehicles, digital terrain model, application of unmannes aerial vehicles in forestry, cross-section profile on forest road
Sažetak	<p>Ovim diplomskim radom istraživana je mogućnost korištenja bespilotne letjelice DJI Mavic 3 Enterprise opremljene kamerom DJI Mavic 3E Wide pri izmjeri normalnih poprečnih profila šumske ceste nizinskog reljefnog područja koja se provodila u UŠP Bjelovar, šumariji Vrbovec, gospodarskoj jedinici „Česma“ u usporedbi sa referentnom metodom terenske izmjere koju je predstavljala upotreba totalne stanice. Ujedno se testirao utjecaj dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima te visine vegetacije sa pokosa nasipa na točnost očitanih podataka sa digitalnih modela terena (zimski i proljetni aspekt) dobivenih temeljem aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom, odnosno analizirano je dolazi li do statistički značajne razlike u očitanim x, y, i z koordinatama točaka (validacijskih i terenskih) sa DMR-ova u odnosu na prikupljene x, y, i z koordinate točaka (validacijskih i terenskih) referentnom metodom terenske izmjere uz utvrđivanje uzroka pogreške. Rezultati rada doprinijet će boljem razumijevanju mogućnosti korištenja bespilotnih letjelica pri provođenju ovakve vrste terenskih istraživanja a definiranje uzroka zamijećenih razlika u očitanim/prikupljenim podacima zasigurno će biti od pomoći pri odabiru prikladne metode terenske izmjere poprečnih profila šumskih cesta nizinskoga reljefnog područja.</p>
Summary	<p>The purpose of the thesis was to investigate the possibility of using the DJI Mavic 3 Enterprise unmanned aerial vehicle equipped with the DJI Mavic 3E Wide camera in forest road normal cross section profile survey in the lowland forest area. The research was conducted in the</p>

UŠP Bjelovar, forestry office Vrbovec, management unit "Česma". UAV data was compared to the field survey reference method, recorded by total station. At the same time, stagnant water depth in the ditches and the vegetation height on the embankment slope influence on the (accuracy) precision of the digital terrain models (winter and spring aspect) generated on the basis of aerial photographs collected by an unmanned aerial vehicle was tested, that is, analyzed whether there is a statistically significant difference in the x, y, and z coordinates of points (validation and field) from DTMs in relation to the recorded x, y, and z coordinates of points (validation and field) using the reference method of field measurement to determine the cause of the error. The results of the thesis will contribute to a better understanding of the possibilities of using unmanned aerial vehicles for conducting this type of field research, while defining the causes of observed differences in the read/collected data will certainly be helpful for choosing a suitable field measurement method of cross section profiles of forest roads in a lowland area.

	IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI	OB FŠDT D8 01
		Revizija: 3
		Datum: 29.04.2021

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

vlastoručni potpis

Marko Hikl

U Zagrebu, 10. rujna 2024. godine

PREDGOVOR

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Papi na pomoći prilikom izrade diplomskog rada, te savjetima za daljnje razvijanje u struci. Također se zahvaljujem Mihaelu Lovrinčeviću mag. ing. silv. na uloženom vremenu i trudu u cijeli proces izrade ovog diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem prijateljima, obitelji i zaručnici na podršci tijekom svih ovih godina studiranja.

SADRŽAJ

1. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA.....	1
1.1. Cestovna prometna infrastruktura u RH	1
1.2. Šumske prometnice	1
1.3. Karakteristike šumskih prometnica s obzirom na reljefno područje.....	7
1.3.1. Karakteristike šumskih prometnica u nizinskom reljefnom području.....	9
1.4. Normalni poprečni profili	10
1.5. Metode i uređaji prikupljanja terenskih podataka.....	12
1.5.1. Klasična metoda terenske izmjere	12
1.5.2. Suvremena metoda terenske izmjere	13
1.5.3. Bepilotna letjelica.....	15
1.6. Digitalna fotogrametrija	17
1.6.1. Digitalni model reljefa (DMR) i način korištenja u šumarstvu	18
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....	20
2.1. Orografske i hidrografske prilike.....	20
2.2. Geološka podloga i tlo.....	20
2.3. Klima.....	21
2.4. Šumske zajednice.....	21
2.5. Postojeća i planirana šumska prometna infrastruktura u G.J. „Česma“	21
3. CILJ I METODE ISTRAŽIVANJA.....	22
3.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja	22
3.2. Opis metode istraživanja	22
3.2.1. Način prikupljanja terenskih podataka totalnom stanicom.....	23
3.2.2. Način prikupljanja terenskih podataka bepilotnom letjelicom.....	24
3.2.3. Izmjera dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i visine vegetacije na kosinama nasipa	27
3.2.4. Obrada terenskih podataka	27
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	32
4.1. Terenski podaci prikupljeni totalnom stanicom	32
4.2. Terenski podaci prikupljeni bepilotnom letjelicom (zimski aspekt).....	32
4.2.1. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka (zimski aspekt)	32
4.3. Terenski podaci prikupljeni bepilotnom letjelicom (proljetni aspekt).....	34
4.3.1. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka (proljetni aspekt)	34
4.4. Uočene razlike između terenskih podataka	36

4.5. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima	40
4.5.1. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane stagnirajućom vodom u odvodnim jarcima – zimski aspekt.....	40
4.5.2. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima – proljetni aspekt.....	41
4.6. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane vegetacijom na kosinama nasipa	42
4.7. Korekcija z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-ova	43
5. RASPRAVA SA ZAKLJUČCIMA.....	50
6. LITERATURA.....	53

KAZALO SLIKA

Slika 1. Sastavnice šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014).....	2
Slika 2. Karta nagiba terena u Republici Hrvatskoj (Poršinsky i dr. 2014)	8
Slika 3. Prikaz mreže šumskih prometnica u nizinskom reljefnom području na istraživanom području. (google maps).....	9
Slika 4. Normalni poprečni presjek nasipa	11
Slika 5. Normalni poprečni presjek usjeka.....	11
Slika 6. A) Normalni poprečni presjek zasjeka u punom presjeku; B) Normalni poprečni presjek tipičnog zasjeka	12
Slika 7. Totalna stanica Stonex R35 (https://stonex.hr/product/r35-windows-totalna-stanica/)	13
Slika 8. Princip rada totalne stanice (Leica Geosystems, n.d.)	14
Slika 9. Postupci u fotogrametriji (Linder).....	18
Slika 10. Mjesto istraživanja, UŠP Bjelovar, šumarija Vrbovec, gospodarska jedinica Česma	20
Slika 11. Prikaz validacijskih (plave linije) i terenskih (crvene linije) točaka na crtanom poprečnom profilu.....	23
Slika 12. Prikaz validacijskih (plave),GCP (žute) i terenskih (crvene) točaka na DMR-u	23
Slika 13. Prikupljanje terenskih podataka totalnom stanicom Stonex R35.....	24
Slika 14. Korištena bespilotna letjelica DJI Mavic 3 Enterprise.....	26
Slika 15. Snimanje GCP točke uređajem GNSS korištene za georeferenciranje aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom.....	26
Slika 16. Digitalni model snimanog područja tijekom proljetnog razdoblja u Pix4D mapper programu. Plavom bojom označene pozicije validacijskih točaka na temelju kojih je izračunato prostorno odstupanje po x, y i z koordinati	28
Slika 17. Digitalni model snimanog područja tijekom zimskog razdoblja u Pix4D mapper programu. Žutom bojom označene pozicije GCP točaka	28
Slika 18. Primjer označavanja mjesta GCP točke u programu Pix4D mapper	29
Slika 19. Validacijske (plavo) i terenske (crveno) točke snimljene totalnom stanicom te vidljivim DMR-om u pozadini	30
Slika 20. Alat Add Surface Information programa ArcMap 10.8.....	31
Slika 21. Prikaz pozicija validacijskih točaka na trasi istraživane šumske ceste	32
Slika 22. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referente vrijednosti x i y koordinata validacijskih točaka snimljenih totalnom stanicom	33
Slika 23. Prikaz DMR-a istraživanog područja u zimskom aspektu	33
Slika 24. Prikaz hillshade-a u zimskom aspektu.....	34
Slika 25. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referente vrijednosti x i y koordinata validacijskih točaka snimljenih totalnom stanicom	35
Slika 26. Prikaz DMR-a istraživanog područja u proljetnom aspektu.....	35

Slika 27. Prikaz hillshade-a istraživanog područja u proljetnom aspektu.....	36
Slika 28. Korijen srednje kvadratne pogreške (nekorigirane) z koordinate terenskih točaka između referentne metode i DMR-ova (zimski i proljetni aspekt)	37
Slika 29. Oznaka validacijske oznake na tlu.....	37
Slika 30. <i>t</i> -test za vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom aspektu (nekorigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * <i>p</i> < 0,05; ** <i>p</i> < 0,001; *** <i>p</i> < 0,0001	38
Slika 31. <i>t</i> -test za vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu. Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * <i>p</i> < 0,05; ** <i>p</i> < 0,001; *** <i>p</i> < 0,0001.....	39
Slika 32. Razlike u vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-ova izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom i proljetnom aspektu (nekorigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Slova označavaju statističku razliku između korištenih metoda izmjere (Tukey HSD), pri <i>p</i> < 0,05.....	40
Slika 33. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovanog stagnirajućom vodom (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima (zimski aspekt)	41
Slika 34. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovanog stagnirajućom vodom (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima (proljetni aspekt)	42
Slika 35. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovanog visinom vegetacije (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene vrijednosti visine vegetacije	43
Slika 36. Korijen srednje kvadratne pogreške z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referente vrijednosti visina z koordinata terenskih točaka snimljenih totalnom stanicom	44
Slika 37. <i>t</i> -test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom aspektu (korigirane sa izmjerenom dubinom stagnirajuće vode). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * <i>p</i> < 0,05; ** <i>p</i> < 0,001; *** <i>p</i> < 0,0001.....	45
Slika 38. <i>t</i> -test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom dubinom stagnirajuće vode). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * <i>p</i> < 0,05; ** <i>p</i> < 0,001; *** <i>p</i> < 0,0001.....	46
Slika 39. <i>t</i> -test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom visinom vegetacije). Kružić (circle) prikazuje	

aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$47

Slika 40. *t*-test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom visinom vegetacije i dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$ 48

Slika 41. Razlike u vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-ova izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom i proljetnom aspektu (korigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Slova označavaju statističku razliku između korištenih metoda izmjere (Tukey HSD), pri $p < 0,05$49

KAZALO TABLICA

Tablica 1. Širina planuma i minimalni radijusi šumskih cesta (Šikić i dr. 1989).....	3
Tablica 2. Ocjena konfiguracije terena.....	3
Tablica 3. Najveći uzdužni nagib šumske ceste % (Šikić i dr. 1989)	4
Tablica 4. Poprečni nagibi kolnika u horizontalnim krivinama i pravcu za sve kategorije šumskih cesta (Šikić i dr. 1989).....	4
Tablica 5. Horizontalne sastavnice različitih kategorija šumskih cesta (Pentek i dr. 2007)	4
Tablica 6. Vertikalne sastavnice različitih kategorija šumskih cesta (Pentek i dr. 2007)	5
Tablica 7. Tehnički uvjeti za gradnju šumskih prometnica različitih kategorija prema pravilniku o provedbi mjere M04 te intervenciju 73.08._Izgradnja šumske infrastrukture 2023. – 2027	5
Tablica 8. Udio kategorija nagiba padina u ukupnoj površini kopnenog teritorija Republike Hrvatske (Janeš 2021)	8
Tablica 9. Kategorizacija bespilotnih letjelica	16
Tablica 10. Plan izgradnje šumskih prometnica za I/1 gospodarsko polurazdoblje	21
Tablica 11. Tehničke specifikacije korištene mjerene opreme.....	25
Tablica 12. Vrijeme trajanja radnih operacija na terenu ovisno o metodi terenske izmjere...50	

1. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA

1.1. Cestovna prometna infrastruktura u RH

Javne prometnice prema zakonu o cestama (NN 84/11, 18/13, 22/13, 54/13, 148/13, 92/14 i 110/19) definirane su kao javno dobro u općoj upotrebi u vlasništvu Republike Hrvatske. Ovisno o njihovom prometnom i gospodarskom značenju, razvrstavaju se u četiri kategorije: državna cesta, županijska cesta, lokalna cesta i autocesta. Prema odluci o razvrstavanju javnih cesta (NN 18/2021) u Hrvatskoj je 1422,97 kilometara autocesta; 7307,63 kilometara državnih cesta; 9371,91 kilometara županijskih cesta; te 8447,96 kilometara lokalnih cesta. Uz prethodno navedene, u Hrvatskoj postoji i kategorija nerazvrstanih cesta i putova koji su prema zakonu o cestama (NN 84/11, 18/13, 22/13, 54/13, 148/13 i 92/14) i Zakonu o sigurnosti na cestama (NN 67/08, 48/10, 74/11, 80/13, 158/13, 92/14) definirane kao “ceste koje se koriste za promet vozilima, koje svatko može slobodno koristiti na način i pod uvjetima određenim ovim Zakonom i drugim propisima, a koje nisu razvrstane kao javne ceste u smislu ovoga Zakona“. Navedene površine koriste se za promet vozilima po bilo kojoj osnovi i koja je dostupna većem broju raznih korisnika te koje svatko može slobodno koristiti na način i pod uvjetima određenim navedenim zakonima (seoski, poljski i šumski putovi, putovi na nasipima za obranu od poplava, pristupne ceste i prostori parkirališta, benzinskih crpki i sl.).

1.2. Šumske prometnice

Pravilnik o uređivanju šuma (NN 97/2018) šumsku prometnu infrastrukturu definira kao sastavni dio šuma i šumskog zemljišta koji se sastoji od primarne i sekundarne šumske prometne infrastrukture, a namijenjena je prvenstveno za potrebe održivog gospodarenja šumama. Primarnu šumsku prometnu infrastrukturu čine sve kategorije šumskih cesta te one javne ceste koje se mogu koristiti pri radovima u šumarstvu (to su najčešće javne ceste nižih kategorija – županijske i lokalne ceste) (Pentek 2014) (**Error! Reference source not found.**). Sa 01.12.2020. na području kojim gospodare HŠ mreža primarne šumske prometne infrastrukture sastoji se od šumskih cesta u ukupnoj duljini od 18755,16 km te 5125,52 km javnih cesta koje ulaze u obračun klasične primarne otvorenosti šuma. Sekundarnu šumsku prometnu infrastrukturu čine sekundarne šumske prometnice: traktorski putovi i traktorske vlake za sustave pridobivanja drva kod kojih se drvo kreće po tlu (izvoženje ili vuča drva) i žične linije za sustave pridobivanja drva kod kojih se drvo kreće po zraku (iznošenje drva) (Pentek i dr. 2011).

Efikasno gospodarenje šumama, a osobito pridobivanje drva, zahtjeva mrežu prometnica prikladne gustoće i nosivosti (Fraefel 2021). Šumske prometnice su žile kucavice šumskog područja (Heiniman 2017), a primarna i sekundarna mreža šumskih prometnica nadovezuje se jedna na drugu i kao takve se međusobno dopunjuju te tek u svome logičnome jedinstvu čine neraskidivu cjelinu i u potpunosti obnašaju svoju temeljnu zadaću – provođenje svih zadataka u postupku gospodarenja šumom definiranih *Programom gospodarenja* (Pentek 2005).



Slika 1. Sastavnice šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014)

Šumske prometnice se klasificiraju na temelju Tehničkih uvjeta za gospodarske ceste prema Šikiću i dr. (1989). Klasifikacija se radi prema vrsti prometa, značenju, konfiguraciji terena, prometnom opterećenju, veličini i učestalosti transporta drvene mase.

Prema vrsti prometa razlikuju se primarne i sekundarne šumske prometnice. Pravilnik o uređenju šuma (NN 97/2018) definira da primarna prometna infrastruktura obuhvaća sve kategorije šumskih cesta i protupožarne prosjeke s elementima šumskih cesta. Prema spomenutom Pravilniku, sekundarna šumska prometna infrastruktura obuhvaća sve vrste sekundarnih šumskih prometnica (traktorske putove, traktorske vlake i žične linije) te služi prvenstveno za primarni transport (privlačenje) drva.

Prema značenju šumske prometnice su definirane u pravilniku o provedbi mjere M04 »Ulaganja u fizičku imovinu«, podmjere 4.3. »Potpora za ulaganja u infrastrukturu vezano uz razvoj, modernizaciju i prilagodbu poljoprivrede i šumarstva«, tipa operacije 4.3.3. »Ulaganje u šumsku infrastrukturu« iz Programa ruralnog razvoja Republike Hrvatske za razdoblje 2014. – 2020. (NN 106/2015, 65/17, 77/17), a dijele se na:

- spojne ceste (ŠC) - povezuju gospodarske šumske ceste s javnim cestama i s njima čine prometnu mrežu gospodarskih cesta šireg šumskog područja
- glavne šumske ceste (GŠC) - prolaze kroz šumsko područje i na taj način spajaju šumski kompleks s javnim prometnicama
- sporedne šumske ceste (SŠC) - odvajaju se od glavne šumske ceste, ulaze u pojedine dijelove šumskog kompleksa
- prilazne šumske ceste A (PŠCA) - mogu se odvajati od glavnih ili sporednih šumskih cesta, prolaze kroz šumski kompleks do pojedinih većih ili manjih šumskih radilišta
- prilazne šumske ceste B (PŠCB).

Za sve kategorije šumske ceste propisane su širine kolnika te širine bankina u ovisnosti o broju prometnih traka. Također su u ovisnosti o kategoriji propisani minimalni polumjeri horizontalne krivine (tablica 1).

Tablica 1. Širina planuma i minimalni radijusi šumskih cesta (Šikić i dr. 1989)

Kategorija šumske ceste	Širina planuma		Najmanji polumjer horizontalne krivine, m
	2 prometna traka	1 prometni trak	
	Kolnik	Kolnik	
	Bankina	Bankina	
Spojna šumska cesta (SŠC)	4,50 – 5,00	/	NT = 150 BT/PT = 40 S = 15
	0,75 – 1,00		
Glavna šumska cesta (GŠC)	5,00 – 5,50	/	NT = 50 BT/PT = 20 S = 12
	0,75 – 1,00		
Sporedna šumska cesta (SPŠC)	4,50 – 5,00	3,50 – 4,00	NT = 20 BT/PT = 20 S = 12
	0,75 – 1,00	0,75	
Prilazna šumska cesta (PŠC)	/	3,50 – 4,00	NT = 20 BT/PT = 20 S = 12
		0,75	

NT – nizinski teren, BT – brdski teren, PT – planinski teren, S – serpentina

Prema prometnom opterećenju šumske ceste dijele se na ceste s neznatnim prometnim opterećenjem (do 100 bruto tona prometa dnevno); ceste s lakim prometnim opterećenjem (100 do 500 bruto tona dnevno); te ceste sa srednje teškim prometnim opterećenjem (500 – 2500 bruto tona dnevno), dok prema veličini i učestalosti transporta drvne mase šumske ceste na šumske ceste prvog, drugog i trećeg reda.

S obzirom na konfiguraciju terena šumske ceste se dijele na ravničarske, prigorsko-brdske i planinske ceste. Osnovne karakteristike terena s obzirom na konfiguraciju terena prikazana je prema tehničkim uvjetima za gospodarske ceste (Šikić i dr. 1989) (tablica 2).

Tablica 2. Ocjena konfiguracije terena.

Osnovne karakteristike terena	Konfiguracija terena		
	Ravničarski (RT)	Brdovit (BT)	Planinski (PT)
Visinska razlika u reljefu u duljini do 1 km	manje od 20 m	20 - 120 m	više od 120 m
Nagib padine	do 1:10	1:10 do 1:3	1:3 do 1:0
Naboranost terena	neznatna	izražena	vrlo jaka
Mogući elementi trase	izbor slobodan	izbor djelomično jače ograničen	elementi ceste minimalni

Prema istom autoru propisan je i najveći uzdužni nagib šumske ceste s obzirom na kategoriju šumske ceste te konfiguraciju terena (tablica 3).

Tablica 3. Najveći uzdužni nagib šumske ceste % (Šikić i dr. 1989)

Kategorija šumske ceste	Najveći uzdužni nagib šumske ceste (%)		
	Nizinski teren	Brdski teren	Planinski teren
Spojna šumska cesta (SŠC)	4	8 (12)*	8 (12)*
Glavna šumska cesta (GŠC)	4	6 (8)*	6 (8)*
Sporedna šumska cesta (SPŠC)	4	6	15 (20)*
Prilazna šumska cesta (PŠC)	4	6	15 (20)*

* smije se koristiti samo u izuzetnim slučajevima i na kraćim potezima

Poprečni nagib kolnika izvodi se radi bržeg otjecanja vode čime se povećava sigurnost u prometu, odnosno time se sprječava zadržavanje vode na kolniku. Poprečni nagib je jednostran i u pravcima usmjeren prema elementima odvodnje, a u krivinama je uvijek usmjeren prema centru krivine. Za poprečni nagib kolnika Šikić i dr. (1989) propisuje nagibe u ovisnosti o radijusu horizontalne krivine te o kategoriji šumske ceste (tablica 4).

Tablica 4. Poprečni nagibi kolnika u horizontalnim krivinama i pravcu za sve kategorije šumskih cesta (Šikić i dr. 1989)

Kategorija šumske ceste	Poprečni nagib šumske ceste, %				
	u horizontalnoj krivini				u pravcu
	R ≥ 200 m	R ≥ 150 m	R ≥ 100 m	R ≥ 80 m	
Spojna šumska cesta (SŠC)	3	4	5	6	1,5-3
Glavna šumska cesta (GŠC)	3	4	5	6	3-4
Sporedna šumska cesta (SPŠC)	3	4	5	6	3-4
Prilazna šumska cesta (PŠC)	3	4	5	6	3-4

Na temelju novih spoznaja u gospodarenju šumama te novih tehnologija i načine pridobivanja, Pentek i dr. (2007) predlažu nove tehničke uvjete pri čemu uzimaju u obzir prometno opterećenje kojem su izložene prometnice, te elemente horizontalnog i vertikalnog razvijanja trase (tablica 5, 6).

Tablica 5. Horizontalne sastavnice različitih kategorija šumskih cesta (Pentek i dr. 2007)

Kategor. šumske ceste	Sredstvo transporta	Prometno opterećenje brutto t/god.	Broj prom. traka	Širina kolnika	Širina bankine	Širina planuma	Minimalni radijus		Razmak mimoil.
							Kružni luk	Serpen.	
I	Kamion sa prikolicom	>80.000	2	7	1	9	50	12	-
II	Kamion sa prikolicom	60.000-80.000	2 (1)	6	0,75	7,5	40	12	- 300
III	Kamion sa prikolicom	40.000-60.000	1	5	0,5	6	20	10	400
IV	Kamion sa prikolicom (kamion)	<40.000	1	4	0,5	5	18	10	500

Tablica 6. Vertikalne sastavnice različitih kategorija šumskih cesta (Pentek i dr. 2007)

Kategorija šumske ceste	Najveći uzdužni nagib	Minimalni radijus		Minimalni razmak između vertikalnih krivina		Najveća dubina usjeka (iskopa)	Najveća visina nasipa
		Konkav. krivina	Konvek. krivina	Različitog smjera	Istog smjera		
	%	m		m		m	
I	6	1000	1000	50	40	2	1,5
II	6(8)*	500	800	45	35	2,5	1,5
III	8(12)*	300	500	40	30	3	2,5
IV	10(14)*	200	400	30	25	3	2,5

* smije se koristiti samo u izuzetnim slučajevima i na kraćim potezima

Tablica 7. Tehnički uvjeti za gradnju šumskih prometnica različitih kategorija prema pravilniku o provedbi mjere M04 te intervenciju 73.08. _Izgradnja šumske infrastrukture 2023. – 2027

Kategorija prometnice	Elementi poprečnog presjeka		Tloctni elementi		Visinski elementi			
	šk- širina kolnika (m)		Rhmin- najmanji polumjer horizontalne krivine (m)	dmax- najveći razmak između mimoilaznica (m)	Dmax- najveći uzdužni razmak između mimoilaznica (m)	Rvmin - Najmanji polumjer vertikalne krivine (m)		dmax- najmanji razmak između vertikalnih krivina suprotnog smjera (m)
	šb- širina bankine					konveksna	konkavna	
	2 prometna traka	1 prometni trak						
Spojna cesta (SC)	Šk=4,5-5,00 m		RT =150 m	mimoilaznice se ne projektiraju	RT = 4%	RT =2000 m	RT =1500 m	RT/BT/PT = 50 m
			BT=40(30) m		BT= 6 - 8%	BT=1000 m	BT=500 m	
			PT= 30(20) m		PT= 8 - 10%	PT= 1000 m	PT= 500 m	
	Z=15 (12) m		za R ≤ 25 m = 6%					
	za R ≤ 100 m Projektirati prijelazne krivine		na mostovima = 6%					
	šb=0,75-1,00 m							
Glavna šumska	Šk=4,5-5,00 m		RT =70(50) m		RT = 4%	RT =1000 m	RT =800 m	RT/BT/PT = 40 m

cesta (GŠC)	šb=0,75- 1,00 m		BT=40(30) m	mimoilaznice se ne projektiraju	BT= 6 - 8%	BT=600 m	BT=400 m	
			PT= 30(20) m		PT= 8 - 10%	PT= 600 m	PT= 400 m	
			Z=15 (12) m		za $R \leq 25$ m = 6%			
					na mostovima = 6%			
Sporedna šumska cesta (SŠC)	šk=4,5- 5,00 m	šk= 3,5 - 4,00 m	RT =30 m	dmax = ≤300 m	RT = 6%	RT =800 m	RT =600 m	RT/BT/PT = 35 m
			BT= 20 (18) m		BT= 8 (10)%	BT=500 m	BT=300 m	
			PT= 20 (18) m		PT= 10 (12)%	PT= 500 m	PT= 300 m	
	Z= 12 m							
	šb=0,75- 1,00 m	šb=0,5 - 0,75 m						
Prilazna šumska cesta A (PŠCA)		šk= 3,50 - 4,00 m	RT =20 m	dmax = ≤400 m	RT = 6%	RT =800 m	RT =400 m	RT/BT/PT = 30 m
			BT= 20 (16) m		BT= 10 (12)%	BT=500 m	BT=200 m	
			PT= 20 (16) m		PT= 12 (15)%	PT= 500 m	PT= 200 m	
		Z= 12 (10) m						
		šb=0,75 - 1,00 m						
Prilazna šumska cesta B (PŠCB)		šk= 3,00 - 3,50 m	RT =20 m	dmax = ≤400 m	RT = 6%	RT =600 m	RT =400 m	RT/BT/PT = 30 m
			BT= 20 (16) m		BT= 10 (12)%	BT=400 m	BT=200 m	
			PT= 20 (16) m		PT= 12 (15)%	PT= 400 m	PT= 200 m	
		Z= 12 (10) m						
		bankine se u pravilu ne izvode (može se izvesti bankina širine 0,25 m)						
Glavni traktorski put (GTP)		šk= 3,50 - 4,00 m	RT =20 m	mimoilaznice se izvode prema potrebi dmax = ≤150-300 m	RT = 6%	RT =600 m	RT =400 m	RT/BT/PT = 25 m
			BT= 18 (15) m		BT= 12 (15)%	BT=300 m	BT=150 m	
			PT= 18 (15) m		PT= 15 (18)%	PT= 300 m	PT= 150 m	
		Z= 10 (8) m						

Sporedni traktorski put (STP)		šk= 3,00 - 3,50 m	RT =20 m	mimoilaznice se izvode prema potrebi dmax = ≤150-300 m	RT = 6%	RT =400 m	RT =300 m	RT/BT/PT = 15 m
			BT= 15 (12) m		BT= 20 (25)%	BT=200 m	BT=100 m	
			PT= 15 (12) m		PT= 20 (25)%	PT= 200 m	PT= 100 m	
			Z= 10 (8) m					

Tumač znakova: RT – ravničarski (nizinski) teren, BT – brdoviti (prigorski) teren, PT – planinski (gorski) teren, Z – zaokretnica (serpentina), () – iznimna vrijednost (može se upotrijebiti samo u iznimnim, opravdanim slučajevima uz detaljno obrazloženje u tehničkoj dokumentaciji).

1.3. Karakteristike šumskih prometnica s obzirom na reljefno područje

Jedan od najznačajnijih utjecaja na planiranje i gradnju šumskih prometnica, ali i na izvođenje svih radova u šumarstvu ima upravo reljef. S obzirom na reljef određuje se gdje i kako će planirati buduće prometnice, te koje sustave pridobivanja će se koristiti (Janeš i dr. 2021)

Hrvatska, iako relativno mala, površinom ima izuzetno raznolik reljef. Hrvatska je pretežno nizinska zemlja, 53% njezina teritorija niže je od 200 metara, oko 26% čine brežuljkasti krajevi i pobrđa visine 200–500 metara, dok je 21% više od 500 metara nadmorske visine (Hrvatska.eu – Zemlja i Ljudi, n.d.).

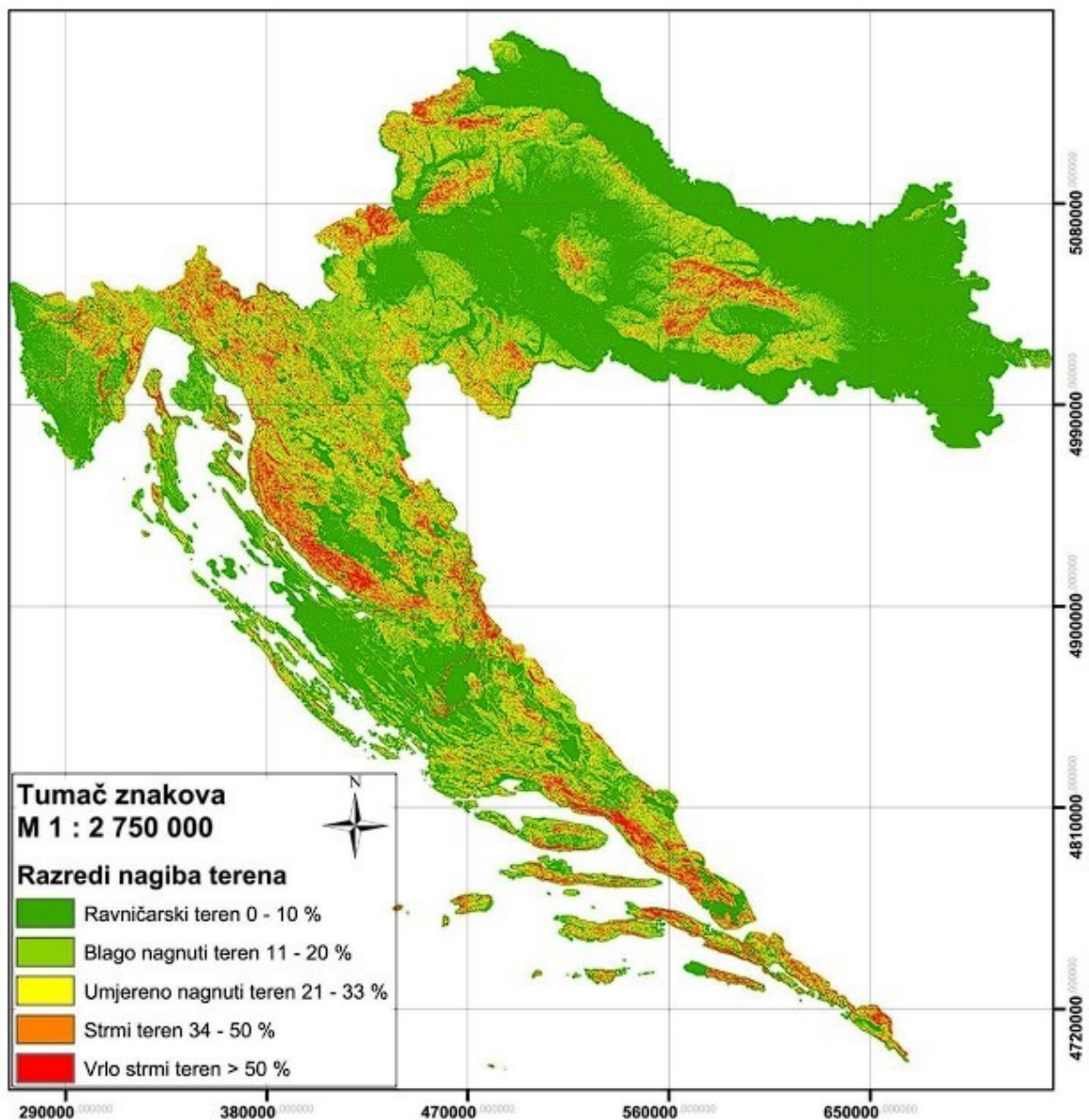
Osim reljefa, izuzetno veliki utjecaj na šumarstvo ima nagib terena koji se u Hrvatskoj kreće između 0° pa do preko 55° (slika 2) (tablica 7). Nagib terena spada u grupu makrotopografskih značajki terena koje utječu na kretanje vozila, pri čemu se svi kotači vozila sukobljavaju s jednakim makrotopografskim vrijednostima (Poršinsky i dr. 2014). Mellgren (1980) nagibe terena pri izvođenju šumskih radova razvrstava u 5 kategorija.

1. Ravničarski teren: 0 – 10%
2. Blago nagnuti teren: 11 – 20%
3. Umjereno nagnuti teren: 21 – 33%
4. Strmi teren: 34 – 50%
5. Vrlo strmi teren: > 50%

Na temelju te kategorizacije udio pojedine kategorije nagiba terena u ukupnoj površini Hrvatske prikazana je u tablici 8 te na slici 2.

Tablica 8. Udio kategorija nagiba padina u ukupnoj površini kopnenog teritorija Republike Hrvatske (Janeš 2021)

Kategorija	Nagib (%)	Udio u površini RH (%)
1	0-10	54,73
2	11-20	17,38
3	21-33	14,20
4	34-50	9,13
5	>50	4,56



Slika 2. Karta nagiba terena u Republici Hrvatskoj (Poršinsky i dr. 2014)

1.3.1. Karakteristike šumskih prometnica u nizinskom reljefnom području

Šume u nizinskom reljefnom području zauzimaju 22,35% šumskih površina u Hrvatskoj (Pentek 2011). Mreža šumskih cesta nizinskog područja ima uglavnom pravilan oblik (veliki broj dugačkih pravaca i mali broj zavoja), usporedne šumske ceste se nalaze na približno jednakoj udaljenosti, prolaze postojećim prosjekama i zatvaraju površine pravilnog oblika (Pentek i dr. 2016).

Za nizinske šume su karakteristične pravokutne „table“ odnosno odjeli pravilnih dimenzija omeđenih prometnicama (slika 3). Takve prometnice je moguće projektirati u velikim šumskim kompleksima u kojima nisu mozaičko raspoređena naselja ili poljoprivredne površine. U tim slučajevima prometnice prate granice naselja i oranica te se kreću granicom šume. Također, u blizini vodotokova i velikih rijeka oblik mreže će biti „vijugav“.



Slika 3. Prikaz mreže šumskih prometnica u nizinskom reljefnom području na istraživanom području. (google maps)

Horizontalno razvijanje trase šumske ceste ovisi o terenskim uvjetima i prilikama. Pičman (2007) daje smjernice za kvalitetno vođenje trase:

- šumske ceste projektirati što bliže predviđenim mjestima proizvodnje
- trase voditi sa što više pravaca, koristeći se postojećim prosjekama, te u odjelima ići sa minimalnom širinom
- ne graditi cestu na mjestima slabe nosivosti tla (močvare, tresetišta, itd.)
- odabrati što kvalitetniji materijal za donji ustroj ceste
- mostove planirati na najpreglednijim mjestima.

Isti autor navodi i smjernice za visinsko vođenje trase šumske ceste u nizinskom reljefnom području:

- radi površinske odvodnje niveletu projektirati s najmanje 0,5% nagiba
- na poplavnom području visina nasipa ne bi smjela biti manja od 0,5 m iznad razine visoke vode
- niveletu voditi s odmakom od terena u visinu za 0,4 m do 0,6 m
- niveletu mosta projektirati prema visini visoke vode.

Kako bi se osigurala prohodnost ceste tokom cijele godine u nizini se gotovo isključivo rade poprečni profil u nasipu (slika 4). Na taj način se cesta izdiže od okolnog terena time omogućavajući otjecanje površinske vode te sprječavamo plavljenje za vrijeme intenzivnih kiša. Osim plavljenja, utjecaj oborina očituje se i u eroziji, odnosno odnošenju sitnog veznog materijala sa šumske ceste. Također, ovisno o količini i učestalosti oborina potrebno je planirati količinu i dimenzije cijevnih propusta.

1.4. Normalni poprečni profili

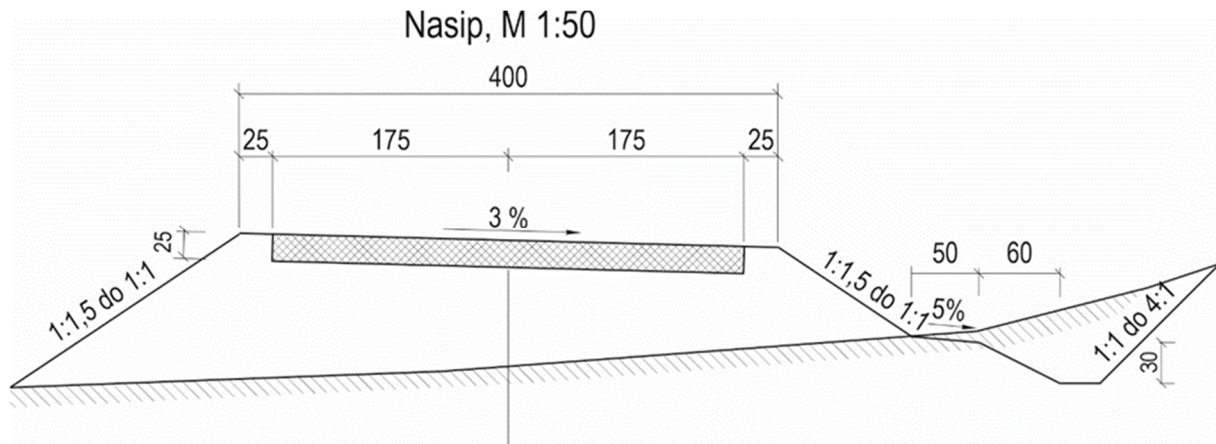
Kramer (2001) definira poprečni presjek kao prirodni profil tla okomito na cestu; oni prikazuju nagib i kut topografije u bilo kojoj točki. Normalni poprečni presjek prikazuje oblik ceste postavljene na nagib prirodnog tla. Na poprečnom presjeku možemo vidjeti veličinu i oblik zemljanog trupa, gornji i donji ustroj ceste, cestovno zemljište te manje cestovne objekte. U glavnom izvedbenom projektu šumske ceste poprečni se presjeci nalaze u prilogima „normalni poprečni presjeci“ i „crtani poprečni presjeci“. Kod projektiranja se šumskih cesta razlikuje normalni odnosno tipski (orijentacijski) i stvarni poprečni presjek.

Normalni poprečni presjek se crta za sve tipove presjeka koje se nalaze na projektiranoj trasi šumske ceste (nasip, usjek, zasjek, galerija, stepenice, potporni zid, obložni zid, propust, mimoilaznica, okretnica, procjednica, preljevnica i dr.) u mjerilu 1:100, 1:50 i 1:25 ovisno o dimenzijama objekta. Normalni poprečni presjek sadrži podatke i elemente cijele ceste za pojedinu terensku liniju, osim toga prikazuju i koncepciju ceste te donji i gornji ustroj ceste (Pičman 2007).

Poprečnim presjekom definirane su dimenzije, oblik i površina donjeg ustroja na svim mjestima gdje se mijenja odnos zaobljene nivelete prema terenu i teren lomi u smjeru pružanja i poprečno (Pentek 2012). Na temelju podataka stvarnog poprečnog presjeka na terenu se vrši obilježavanje te gradnja zemljanog trupa, kolničke konstrukcije te gornjeg ustroja i manjih objekata. Na svakom poprečnom profilu treba biti jasno naznačen broj i oznaka profila, kote terena i nivelete, dubina iskopa i visina nasipa ovisno o tipu presjeka. Normalni poprečni presjeci crtaju se za sve tipove poprečnih presjeka koji se nalaze na trasi šumske ceste, a oni su: nasip, usjek, zasjek, galerija, stepenice, potporni zid, obložni zid, propust, mimoilaznica, okretnica, procjednica, preljevnica (Pentek 2012). Najčešći stvarni poprečni presjeci su nasip, usjek i zasjek, crtaju se u mjerilu 1:100 i 1:200, te će upravo ti presjeci biti opisani u nastavku.

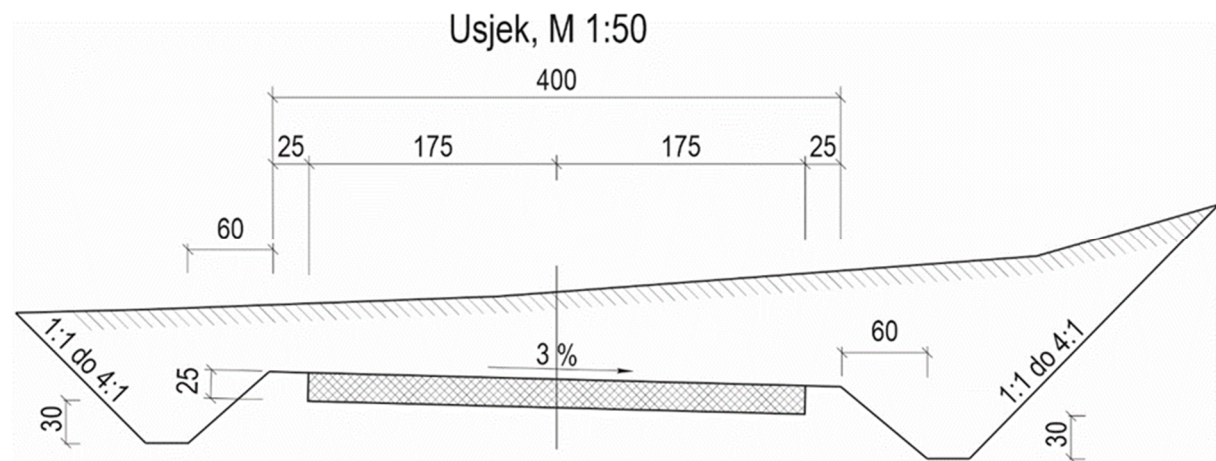
Nasip je građevinski objekt nastao nasipavanjem te zbijanjem materijala (zemljanih ili kamenih) odgovarajućim građevinskim strojevima. Glavna karakteristika nasipa je kota nivelete koja je iznad kote terena te poprečni nagib ceste u smjeru odvodnog jarka (slika 4). Kako bi se smanjili troškovi dovoza materijala na trasi šumske ceste rade se odvodni jarci s obje strane šumske ceste koji ujedno predstavljaju pozajmišta odnosno materijalne rovove iz kojih se iskopani materijal ugrađuje u trup ceste. Stabilnost padine nasipa ovisi o nekoliko varijabli, uključujući sile koje uzrokuju nestabilnost (gravitacijske i hidrostatske sile) te sile koje se suprotstavljaju nestabilnosti (npr. otpor čvrstoće smicanja tla ili kamenog

materijala izražen kao unutarnji kut trenja ili kohezija). Stabilnost padine nasipa može se povećati uključivanjem različitih tehnika dizajna i gradnje (Anon 2023).



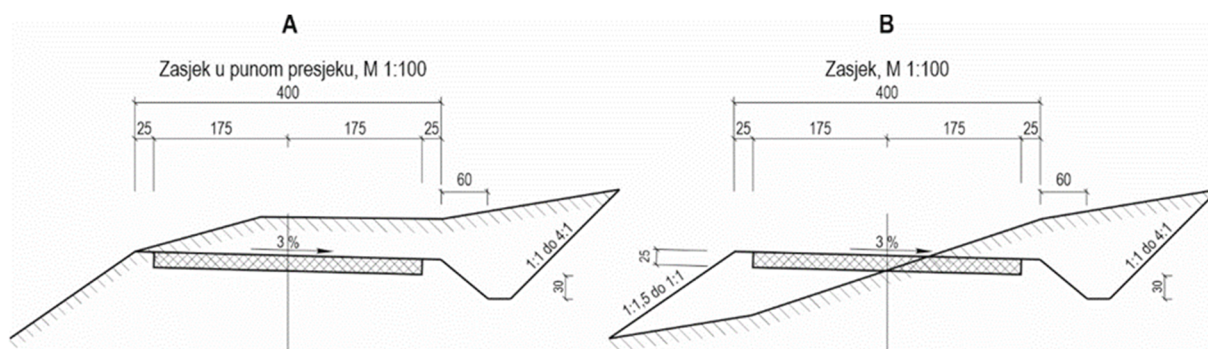
Slika 4. Normalni poprečni presjek nasipa

Usjek je građevinski objekt nastao iskapanjem ili usijecanjem ceste u prirodno tlo ili stijenu, a kota nivelete niža je od kote terena (slika 5). Poprečni presjek usjeka karakterističan je za prijevoje ili sedla te kod uskih grebena gdje nije moguće drugačije horizontalno razvijanje trase. Papa (2015) tvrdi da usjek predstavlja najveći izazov kod održavanja šumskih cesta te potencijalnu opasnost od pojave oštećenja kolničke konstrukcije, osobito ako su objekti odvodnje nekvalitetno izgrađeni ili loše održavani. Poprečni profil usjeka karakteriziraju odvodni jarci s obje strane ceste te jednostruki poprečni nagib kolnika, a pokosi kosina iskopa kreću su u rasponu 1:1 do 4:1 što ovisi o vrsti temeljnog tla u kojoj se usjek izvodi.



Slika 5. Normalni poprečni presjek usjeka

Zasjek odnosno mješoviti profil (tipični zasjek) je građevinski objekt nastao iskopom materijala s jedne strane te nasipanjem i sabijanjem materijala s druge strane, također može biti i potpuno usječen u tlo. Ovisno o nagibu terena i odnosu kote nivelete i kote terena razlikujemo zasjek u punom presjeku i normalni zasjek (slika 6). Zasjek u punom presjeku je u cijelosti usječen u tlo s time da mu je jedna strana (donja, prema padini) otvorena, a odvodni jarak se nalazi na gornjoj strani. Tipični zasjek je jednim dijelom u iskopu, a drugim u nasipu s odvodnim jarkom u strani iskopa te kotom terena i kotom nivelete u istoj visini. Prema Papi i Penteku (2023) tipični zasjek se smatra najpovoljnijim poprečnim profilom prilikom projektiranja i gradnje šumskih cesta jer omogućava bočnu kompenzaciju zemljanih masa čime uvelike smanjuje troškove izgradnje šumskih cesta čime se ujedno minimizira i štetan utjecaj na okoliš.



Slika 6. A) Normalni poprečni presjek zasjeke u punom presjeku; B) Normalni poprečni presjek tipičnog zasjeke

1.5. Metode i uređaji prikupljanja terenskih podataka

Terenska se izmjera šumske prometne infrastrukture može podijeliti na klasičnu i suvremenu metodu izmjere. Klasična metoda izmjere podrazumijeva uporabu teodolita, nivelira i padomjera dok suvremena uporabu totalne stanice (Papa i dr. 2017). Razvojem i implementiranjem novih tehnologija u šumarstvu, pa tako i tijekom svih faza uspostave optimalne mreže šumskih prometnica, javlja se potreba analize njihove točnosti i uporabljivosti, te izrada novih metoda rada s ciljem iskorištavanja njihovih prednosti u odnosu na dosad uobičajene klasične metode izmjere.

1.5.1 Klasična metoda terenske izmjere

Klasična metoda prikupljanja terenskih podataka pomoću teodolita, nivelira i padomjera i danas je široko raširena u Hrvatskom šumarstvu. Papa i Pentek (2023) navodi kako tijekom postupka projektiranja šumskih cesta. Nakon uklapanja osovinskog poligona, pristupamo terenskoj izmjeri po koracima:

- iskolčenje glavnih i detaljnih točaka, međutočaka te detaljnih točaka trase šumske ceste pomoću teodolita i ostale potrebne opreme
- nivelacija pomoću nivelira i ostale potrebne opreme
- stacioniranje profila pomoću mjerne vrpce ili laserskog daljinomjera
- izmjera poprečnih profila pomoću Meridijan padomjera te metodom ravnjače i podravnjače
- procjena građevinske kategorije materijala
- snimanje trase GPS uređajem
- definiranje položaja i značajki cestovnih objekata
- prikupljanje ostalih podataka
- konačna obilježba i fiksiranje profila.

Treba imati na um da se pri klasičnoj metodi terenska izmjera poprečnog razvijanja terena u svakom profilu šumske ceste izvodi metodom ravnjače-podravnjače s točnošću na 5 cm dok se isto mjerenje koristeći suvremenu mjernu opremu izvodi sa milimetarskom preciznošću temeljem čega Pentek (2012) ističe kako suvremena metode terenske izmjere predstavlja daleko precizniji način izmjere koja daje točnije rezultate. Kao glavnu prednost klasične metode terenske izmjere u odnosu na suvremene Papa i dr. (2017) naglašava nižu nabavnu cijenu mjerenih uređaja te manje troškove njihova održavanja.

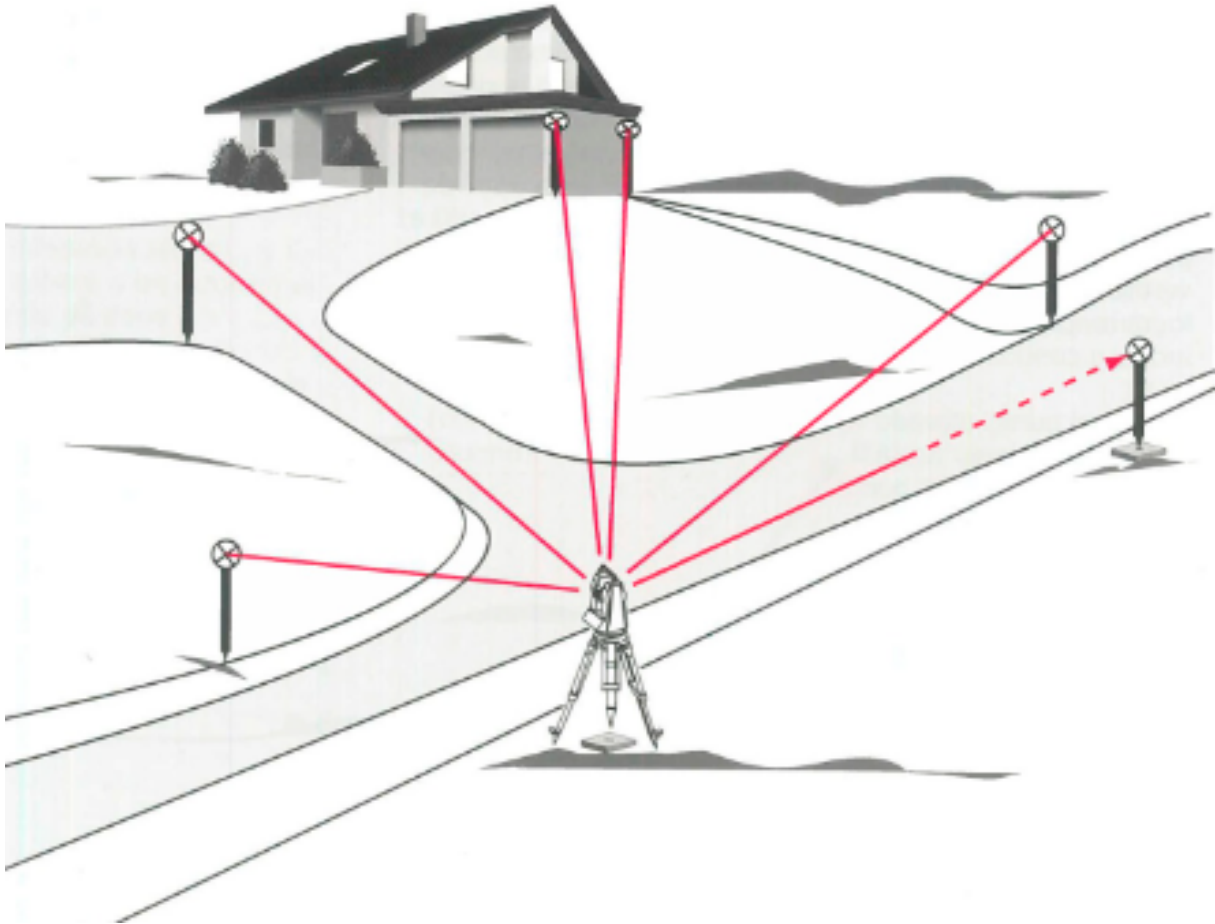
1.5.2. Suvremena metoda terenske izmjere

Suvremena metoda terenske izmjere se temelji na upotrebi totalne stanice (također se još naziva i geodetska ili mjerna radna stanica) (slika 7). Barković (1998) definira totalnu stanicu kao teodolit s integriranim sustavom za automatsko očitavanje horizontalnih i vertikalnih katova uz elektronički daljinomjer i sustav za automatsko pohranjivanje podataka. Isti autor navodi kako takav sustav poprima karakteristike osnovnog (jednostavnog) modela totalne mjerne stanice. Gradišer i Domiter (2016) objašnjavaju kako se totalna stanica postavlja iznad unaprijed definirane točke kojoj su određene sve 3 koordinate (x, y, z ili N, E, h), koordinate nepoznate točke mogu se odrediti ukoliko je moguće izravno izmjeriti horizontalni i vertikalni kut te udaljenost prema nepoznatoj točki. Pomoću triangulacije i trigonometrijskih jednadžbi, uz uvrštavanje izmjerenih veličina i poznate početne točke možemo izračunati koordinate nepoznate točke. Prema Papi i Penteku (2023) totalna stanica je najsuvisliji uređaj koji se danas operativno koristi pri projektiranju šumskih cesta (GPS prijemnici i bespilotne letjelice opremljene raznim sensorima još su uvijek u eksperimentalnoj fazi).



Slika 7. Totalna stanica Stonex R35 (<https://stonex.hr/product/r35-windows-totalna-stanica/>)

Rad sa totalnom stanicom kreće njenim postavljanjem iznad točke sa prethodno određenim koordinatama. U svrhu orijentacije totalne stanice postavlja se druga točka poznatih koordinata te se vrši usmjeravanje totalne stanice (slika 8). Barković i Zrinjski (2020) navode više metoda za određivanje koordinata terenskih točaka, ali ovdje se navode samo neke: triangulacija, presjeke pravaca, ortogonalna metoda, fotogrametrija, polarna metoda, GNSS metoda, nivelman, te diferencijalni odometar. Za navedene metode se koriste tahimetar, teodolit, GNSS uređaj, te totalna stanica.



Slika 8. Princip rada totalne stanice (Leica Geosystems, n.d.)

Promise i dr. (2022) ovisno o proizvođaču i modelu totalne stanice ističu kako kutna točnost varira između 1" i 20", točnost mjerenja udaljenosti ovisi o dva faktora: greška instrumenta koja se kreće između +/- 10 mm i +/- 2 mm te greška radi daljine mjerenja koja iznosi od +/-100 mm/km do +/- 2 mm/km.

Benčić i Solarić (2008) navode kako je u odnosu na totalnu stanicu, GNSS uređaj zbog svoje izrazite točnosti te jednostavnosti korištenja postao odabir sve većeg broja stručnjaka. Unatoč iznimnoj točnosti GNSS uređaja u geodetskim izmjerama, posebne karakteristike mjerenja pod zastorom krošnja utječu na točnosti mjerenja te se pojavljuje znatna razlika u mjerenju totalnom stanicom i GNSS uređajem. Kweon i dr. (2020) u mjerenjima dužine šumske ceste dobili razliku između GNSS-a i totalne stanice od 2830 mm/km do 4610 mm/km. Pirti i dr. (2017) pak navode razliku mjerenja 2-5 cm u horizontalnom smjeru, te 3-10 cm u vertikalnom. Iz toga se može zaključiti kako je točnost mjerenja u šumskim uvjetima izrazito varijabilna te ovisi o više čimbenika, ali je gotovo uvijek manja od točnosti na otvorenim površinama.

Prednosti suvremene metode izmjere u odnosu na klasičnu su: brže provođenje same izmjere radi korištenja samo jednog instrumenta za sva mjerenja; manji broj potrebnih radnika; veća preciznost mjerenja; veliki kapacitet memorije što omogućuje spremanje velike količine podataka; smanjenje pogreške radi automatskog prijenosa podataka (Pentek 2012).

Nedostaci suvremene metode u odnosu na klasičnu su: veća nabavna cijena instrumenta te troškovi održavanja i popravaka; potreba za dodatnom edukacijom radnika; masa i dimenzije

instrumenta su veće nego kod instrumenata klasične metode, što može stvarati probleme kod cjelodnevnog nošenja i korištenja uređaja (Pentek 2012).

Prema Papi i dr. (2017) prilikom usporedbe klasične i suvremene metode prikupljanja terenskih podataka za potrebe rekonstrukcije šumskih cesta, suvremena metoda je funkcionalniji izbor radi manjeg broja pomoćnih radnika te bržeg prikupljanja podataka. Također, navodi jednostavniji (automatski) unos podataka u računalo, odnosno računalni program.

Prema Šanteku (2013) umrežavanjem s CROPOS-om (Hrvatski pozicijski sustav) koji je dio GNSS-a omogućava se preciznost mjerenja s točnošću od +/- 2 cm u horizontalnom smislu, te +/- 4 cm u vertikalnom. Diferencijalni pozicijski servis (DPS) (Usluga CROPS-a) u stvarnom vremenu namijenjen je za primjenu u geoinformacijskim sustavima (GIS), upravljanju prometom, preciznoj navigaciji, zaštiti okoliša, poljoprivredi, šumarstvu i slično (Marjanović 2010). Radi sve veće dostupnosti usluge, te zadovoljavajuće preciznosti, GNSS uređaji imaju sve veću primjenu u praksi.

1.5.3. Bepilotna letjelica

Bepilotne letjelice, prema definiciji predstavljaju sve letjelice koje imaju mogućnost letenja u zraku bez posade, a može se njima upravljati (Bendea i dr. 2007). Takve letjelice mogu biti samoupravljive ili daljinski upravljane, a prilikom letenja nose koristan teret koji kod aerosnimanja predstavlja kamera. Pojavom prvih bepilotnih letjelica (dronova) njihova primarna uporaba bila je isključivo vojna, dok s razvojem tehnologije u posljednjih 10 godina navedena oprema dobiva sve veću i značajniju ulogu i u civilne svrhe (Vugdelića 2016).

Prema Europskoj zajednici za bepilotne letjelice (eng. European Association of Unmanned Vehicles Systems – EUROUVS) na osnovu karakterističnih parametara (visina leta, trajanje leta, brzina, maksimalna nosivost, veličina letjelice, domet signala i dr.) te se letjelice dijele u četiri glavne kategorije (Anon. 2006):

- mikro/mini (MAV/Mini)
- taktičke (TUAV)
- strateške
- bepilotne letjelice s posebnom zadaćom

S obzirom na tehnologiju dijelimo ih na letjelice s fiksnim krilima i letjelice s rotirajućim krilima. Prema pravilniku o sustavima bepilotnih zrakoplova (NN 49/2015) letjelice dijelimo prema operativnoj masi na:

- Klasa 5: letjelice do 5 kg
- Klasa 25: letjelice od 5kg do 25 kg
- Klasa 150: letjelice od 25 do, i uključujući 150 kg.

Prema novoj europskoj regulativi (Europska komisija 2019.) bepilotne letjelice dijelimo u 5 kategorija od C0 do C6 ovisno o određenim kriterijima kao što su masa letjelice, maksimalna brzina, potrebna osposobljenost pilota, dozvoljeno područje operacija, itd. (tablica 9). Kategorije 5 i 6 donose se na posebne letjelice i nadogradnje nižih kategorija te nisu prikazane u tablici.

Bespilotne letjelice, ovisno o vrsti zadatka mogu nositi razne senzore. Osim klasične RGB video/foto kamere, za ostale senzore je potrebna posebno dizajnirana letjelica ili dodatna nadogradnja. Neke od najčešćih senzora su:

- RGB (vidljivi spektar) kamera
- video kamera
- NIR (blisko infracrvenom) kamera
- IR (infracrvena) kamera
- LIDAR
- IMU
- RTK GNSS prijamnik

Tablica 9. Kategorizacija bespilotnih letjelica

Specifikacije	C0	C1	C2	C3	C4
Težina/energija udara	<250 g	900 g	<4 kg	<25 kg	<25 kg
Maks. brzina	19 m/s = 69 km/h	19 m/s = 68 km/h	-	-	-
Maks. visina leta	120 m	120 m ili podesivo ograničenje visine	120 m ili podesivo ograničenje visine	120 m podesivo ograničenje visine	120 m ili prema uzletištu modela
Zahtjevi tehnike	Smjernica za igračku ili <68 km/h, ograničenje visine	< 68 km/h, ograničenje visine, slijetanje u nuždi kod gubitka signala	Ograničenje visine, slijetanje u nuždi kod gubitka signala, način male brzine, zadane točke loma	Ograničenje visine, slijetanje u nuždi kod gubitka signala, način male brzine, zadane točke loma	Nije dozvoljeno automatsko upravljanje
Potrebna registracija pilota na daljinu	Ne odn. da kod dronova s kamerom	Da	Da	Da	Da
Osposobljenost pilota na daljinu	Pročitati uputstva za korištenje	Pročitati uputstva za korištenje, EU potvrda o osposobljenosti A1/A3	Pročitati uputstva za korištenje, EU potvrda o osposobljenosti A1/A3, potvrda za daljinsko pilotiranje A2	Pročitati uputstva za korištenje, EU potvrda o osposobljenosti A1/A3	Pročitati uputstva za korištenje, EU potvrda o osposobljenosti A1/A3
Potrebna daljinska identifikacija	Ne	Da	Da	Da	Ne
Pogon u otvorenoj kategoriji	A1 = let iznad ljudi	A1 = let iznad ljudi	A2 = let u blizini ljudi, A3 = let na velikoj udaljenosti od ljudi	A3 = let na velikoj udaljenosti od ljudi	A3 = let na velikoj udaljenosti od ljudi

Unatoč relativno novoj tehnologiji, bespilotne letjelice u Hrvatskom šumarstvu sve se više koriste. Upotreba bespilotnih letjelica u šumarstvu još uvijek je u eksperimentalnoj fazi, ali se očekuje da će se dalje razvijati. Točne informacije o sastavu, strukturi, rastu i drvnjoj zalihi šuma (koje se prikupljaju prilikom inventure šuma) od iznimne su važnosti za održivo gospodarenje šumama, a mogu se prikupiti daljinskim izmjerama pomoću bespilotnih letjelica. Brojni autori naglašavaju mogućnosti primjene bespilotnih letjelica, te njihovu višenamjensku primjenu bez potrebe za dodatnim nadogradnjama bespilotne letjelice (Kušan 1996, Balenović i dr. 2010, Benko i Balenović 2011, Ecke i dr. 2022).

U posljednjih nekoliko godina sve veća pažnja usmjerena je na unapređenje upotrebe daljinske izmjere u svrhu kartiranja šuma (Tang i Shao 2015). Ortofoto snimak pruža vizualne informacije kao što su struktura sastojine, gustoća biljaka i granica sastojine, dok digitalni model površine (engl. Digital Surface Model – DSM) daje informacije o visini drveća i topografiji terena, sa visokom preciznošću (Rokhmana 2015). Prilikom prikaza isključivo zemljine površine koristi se digitalni model terena (engl. Digital Terrain Model – DTM,) odnosno digitalni visinski model scene na kojoj se nalazi samo gola zemlja (prirodni reljef) (Maune 2001).

Bespilotne letjelice imaju potencijal za širok spektar upotrebe u šumarstvu: prikupljanje informacija o broju i zdravlju drveća, izračun drvne zalihe biomase, prepoznavanje i kartiranje dijelova koji su pretrpjeli sječū, upravljanje brzorastućim plantažama, kontrola obrasta, kartiranje i izmjera šupljina na stablima, monitoring ilegalne sječe itd. (Watts i dr. 2012). Đuka i dr. (2023) tvrde kako se izmjera volumena trupaca može odraditi preciznije i ekonomičnije upotrebom bespilotnih letjelica.

Primjena bespilotnih letjelica u planiranju i projektiranju šumskih prometnica uvelike olakšava proces te smanjuje potrebno vrijeme. Upotrebom digitalnog modela reljefa (DMR) (ekvivalent inozemnom pojmu DTM (Krtalić i dr. 2019), dobivenog snimanjem bespilotnih letjelica moguće uklapati više inačica nul-linije te odabrati najpovoljniju bez potrebe za terenskim izmjerama (Kinali i Çalışkan 2022). Pomoću bespilotnih letjelica moguće je odrediti količine zemljanih radova (iskopa i nasipa) prilikom gradnje novih šumskih cesta (Bugday 2018), te prilikom održavanja postojećih (Hasegawa i dr., 2023).

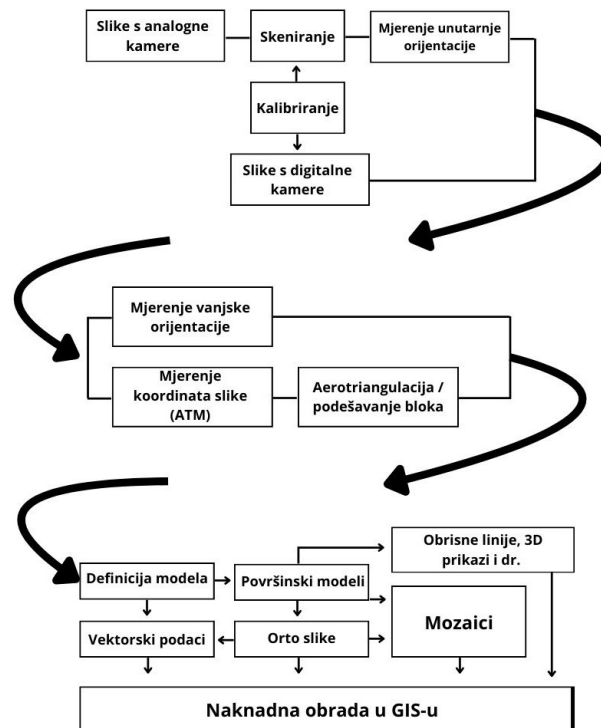
1.6. Digitalna fotogrametrija

Na temelju fotogrametrijskog snimanja izvodi se trodimenzionalni oblak točaka, a on je rezultat slikovne korelacije koja automatski određuje koordinate korespondirajućih točaka (piksela) lijeve i desne aerosnimke (stereopara) na temelju njihove radiometrijske i geometrijske sličnosti (White i dr. 2013). Ako je korelacija zadovoljavajuća točka se uzima u obzir za obradu (aerotriangulacija, digitalno modeliranje terena, itd.). Oblak točaka se u daljnjim postupcima obrade (interpolacijom) koristi za modeliranje terena, ponajprije za izradu digitalnog modela površine (DSM, prema engl. Digital Surface Model).

Linder (2009) opisuje korake fotogrametrije (slika 9). Postupak počinje snimanjem digitalnih fotografija. Nakon toga se računaju orijentacijski parametri za svaku pojedinačnu fotografiju koja se koristi u daljnjem postupku. Mjerenjem koordinata te smještanjem fotografija u prostor mogu se izraditi razni prikazi kao što su DMR i DMS, u konačnici koristiti rezultate u daljnje analizu u GIS softverima.

GSD (eng. ground sampling distance) je definirana kao udaljenost između centara dvaju susjednih piksela mjerena na tlu. Veća vrijednosti GSD-a označava manje detalja na snimci, odnosno slabiju prostornu rezoluciju. Vrijednost GSD-a ovisi o karakteristikama kamere (širina slike, širina senzora, žarna udaljenost), te visine leta, odnosno udaljenosti kamere od objekta snimanja. Ovisno o potrebama prostorne rezolucije određujemo GSD, te se izračunava potrebna visina leta za odabranu kameru. Treba

napomenuti da će se uz konstantu visinu leta GSD mijenjati radi nepravilnosti terena te promjene kuta snimanja. Iz tog razloga se izražava prosječni GSD za snimljenu površinu (Pix4D, n.d.).



Slika 9. Postupci u fotogrametriji (Linder)

1.6.1. Digitalni model reljefa (DMR) i način korištenja u šumarstvu

Digitalni model reljefa je prikaz terena izrađen u obliku mreže obrojčanih četverokuta, kod kojega svaka točka mreže predstavlja koordinate terena x , y , z (Dürstein 1992). DMR je nastao obradom prikupljenih podataka metodom interpolacije, a prikazuje reljef u rasterskom obliku specifične rezolucije. Glavna odlika DMR-a je uvođenje treće dimenzije (3D) u GIS, time omogućava provođenje modeliranja terena i prostorne analize.

Za izradu digitalnog modela reljefa razlikuju se dvije faze: prva faza je sakupljanje podataka (digitalizacija odnosno vektorizacija, fotogrametrija, te izmjera na terenu) i druga faza je uređivanje topoloških odnosa između podataka (razlikujemo implicitno, eksplicitno i hibridno) (Sabolović i dr. 2015, Ištuk 2023).

Prema Klimanek (2018) šumarstvo pripada područjima koja se bave upravljanjem obnovljivim prirodnim resursima, a karakteristike terena značajno utječu na pojedine komponente šumskih ekosustava. DMR se može koristiti djelomično u općim disciplinama usmjerenim na šumarstvo (šumska pedologija, tipologija, gradnja, melioracije, itd.), a djelomično u samom planiranju gospodarenja šumama. Stoga je moguće modelirati karakteristike tla na temelju DMR-a (npr. vlažnost tla i transport sedimenata), hidrološke karakteristike (npr. smjer protoka i akumulacija, sliv, opasnost od erozije) i klimatske karakteristike (npr. parametri temperature i insolacije).

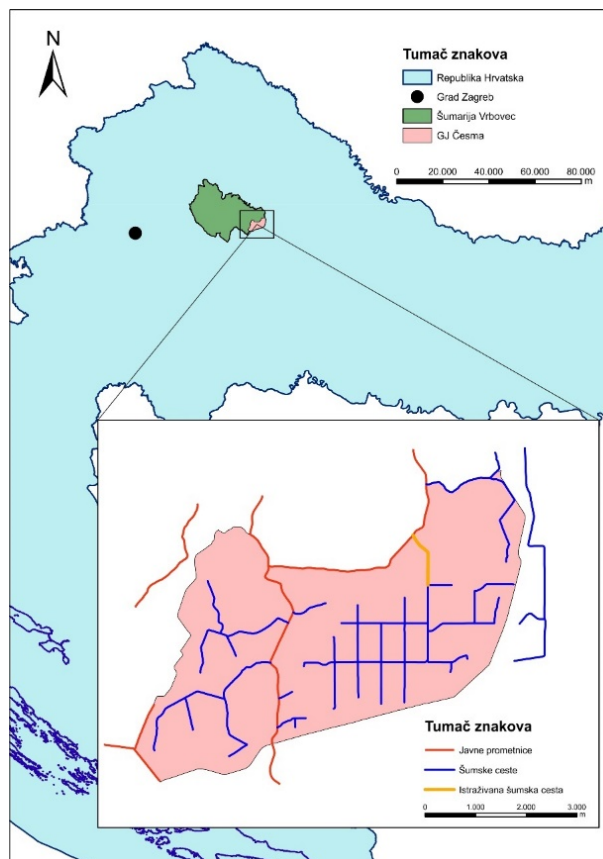
U području planiranja gospodarenja šumama, predlažu se mnoge funkcije za učinkovitost i točnost rada (Seletković i dr. 2016, Ištuk 2023, Šantić 2023):

- mjerenje visine sastojine na temelju detaljnog DMR-a i zračnih stereo fotogrametrijskih snimaka
- ortorektifikacija zračnih i satelitskih snimaka za izradu planova gospodarenja šumama

- optimizacija mreže šumskih puteva i naknadni izračuni mase za izgradnju
- podaci za izračunavanje opasnih faktora erozivne izloženosti šumskih tala
- podaci za klasifikaciju terena u sječi
- modeliranje klimatskih parametara koji koreliraju s nadmorskom visinom i oblikom terena (mrazišta, anemo-orografski sustavi, itd.)
- podaci za modeliranje širenja abiotičkih i biotičkih štetnih faktora (požari, zagađivači, životinjski štetnici, itd.).

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Terensko istraživanje provodilo se na području državnih šuma kojima gospodari tvrtka Hrvatske šume d.o.o Zagreb, točnije na području uprave šuma podružnice Bjelovar, šumarije Vrbovec, gospodarska jedinica Česma (slika 10). Gospodarska jedinica Česma prostire se u kotlini smještenoj između Papuka i Psunja s istočne strane, Kalnika i Medvednice sa zapadne, Moslavačke gore s južne, te Bilogore sa sjeverne. Ukupna površina gospodarske jedinice je 4181,11 ha od kojih je 3986,46 ha obrasle površine.



Slika 10. Mjesto istraživanja, UŠP Bjelovar, šumarija Vrbovec, gospodarska jedinica Česma

2.1. Orografske i hidrografske prilike

Područje gospodarske jedinice Česma šumarije Vrbovec možemo okarakterizirati kao valovitu nizinu s gredama i nizinama u kojima duže ili kraće vrijeme leži voda. Najviša točka nalazi se na 125 m.n.v., a najniža na 103 m.n.v. Rijeka Česma s uređenim koritima i pritocima izgrađuje bogat hidrografski sustav. Značajan faktor je stagnerajuća voda u nizinama koja u pojedinim dijelovima leži i po nekoliko tjedana. Radi gradnje hidro regulacijskih kanala došlo je do opadanja nivoa podzemne vode, što je uzrokovalo značajne stanišne promjene i odumiranje hrasta lužnjaka. Izgradnjom pregrada stvorene su akumulacije u kanalima i tokovima unutar šume, što je vratilo uvjete u prijašnje stanje.

2.2. Geološka podloga i tlo

Geološka podloga je važan čimbenik tvorbe tla o kojem ovise mnogobrojne karakteristike tla. U istraživanoj gospodarskoj jedinici nalaze se matični supstrati aluvijalnih nanosa i lesnih tvorevina.

Aluvijalne nanose pronalazimo uz tokove rijeka i pritoka, a sastav im ovisi o neposrednoj okolini izvorišta vodenog toka. Lesne tvorevine nastale u pleistocenu sastoje se većinski od zrnaca kvarca pomiješanih s glinovitim materijalom.

Od tala, najrasprostranjeniji je pseudoglej ravničarski kojeg karakteriziraju tri faze vlaženja: mokra faza, vlažna faza i suha faza. Drugo po površini je levisirano tlo-luvisol koje karakterizira duboko kiselo tlo visokog udjela humusa, te visoka produktivnost.

Od ostalih tala nalazimo distrično smeđe tlo, pseudoglej-glej, epiglej, hipoglej i amfiglej.

2.3. Klima

Istraživano područje nalazi se u eurosibirsko-sjevernoameričkoj regiji, odnosno njenoj ilirskoj provinciji. Prema Koppenu oznaka klime je Cfbwx. S obzirom na Langov kišni faktor područje pripada semihumidnoj klimi s vrijednošću od 69,6.

2.4. Šumske zajednice

U gospodarskoj jedinici Česma pojavljuju se tipične zajednice nizinskog pojasa. Najzastupljenije zajednice su šume hrasta lužnjaka s pratilicama. Tipična šuma hrasta lužnjaka i običnog graba (*Carpino betuli - Quercetum roboris subass. typicum* Rauš 1971) te *Genisto elate – Quercetum roboris subass. caricotosum brizoides* (Horvat 1938) su najzastupljenije, a slijede ih razne subasocijacije kao što su *Genisto elate – Quercetum roboris subass. caricotosum remotae*, *Carpino betuli - Quercetum roboris var. Fraxinus angustifoliae*, *Carpino betuli - Quercetum roboris subass. fagetosum*. Od ostalih zajednica pojavljuju se *Carici pilosae – Fagetosum* Pelcer 1983, te *Leucoio – Fraxinetum angustifoliae* Glavač 1959. Zbog promjena u uvjetima vodnog režima te promjenama u nivou podzemne vode dolazi do masovnog sušenja hrasta lužnjaka. Uz sušenje pojedinih vrsta, na pogođenim područjima dolazi do promjene sastava biljnih zajednica.

2.5. Postojeća i planirana šumska prometna infrastruktura u G.J. „Česma“

Klasična otvorenost G.J. Česma iznosi 16,17 km/1000 ha. U I/1 gospodarskom polurazdoblju važeće osnove gospodarenja propisana je izgradnja prometnica u dužini 1,25 km. Izgradnjom prometnica otvorenost gospodarske jedinice će se povećati na 16,41 km/1000 ha (Tablica 9).

Prosječna postojeća otvorenost nizinskog područja kojim gospodari poduzeće Hrvatske šume d.o.o. iznosi 9,06 km/1000 ha. Minimalna klasična otvorenost šuma u nizinskom području iznosi 7 km/1000 ha, a planirana klasična otvorenost do 2030. godine iznosi 15 km/1000 ha (Hodić i Jurušić 2011). S obzirom na minimalnu i planiranu klasičnu otvorenost nizinskog područja u koje pripada gospodarska jedinica Česma, klasična otvorenost gospodarske jedinice premašuje klasičnu planiranu otvorenost šuma nizinskog reljefnog područja prema planiranoj klasičnoj otvorenosti šuma za 2030. koju su definirali Hodić i Jurušić (2011).

Tablica 10. Plan izgradnje šumskih prometnica za I/1 gospodarsko polurazdoblje

Redni broj	Prolazi kroz odjel, odsjek	Donji stroj km
1	Granicom 18 i 19 odjela	0,49
2	Granicom 22 i 23 odjela	0,5
3	Kroz 89f odjel	0,25
Ukupno		1,25

3. CILJ I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Ciljevi istraživanja za izradu ovog diplomskog rada postavljeni su kroz sljedeće korake:

- Snimiti poprečne profile na istraživanoj dionici šumske ceste totalnom stanicom Stonex R35, odnosno prikupiti aerofotografije istraživanog područja bespilotnom letjelicom DJI Mavic 3 Enterprise. Dužina dionice iznosi 910 m s prosječnom širinom svijetle pruge od od 19,6 m.
- Izraditi DMR istraživanog područja na temelju aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u svrhu testiranja njegove točnosti.
- Na temelju dobivenih podataka različitim metodama terenske izmjere utvrditi postoji li statistički značajna razlika u x, y i z koordinatama kontrolnih i validacijskih točaka, te pokušati utvrditi terenske uzroke istih.

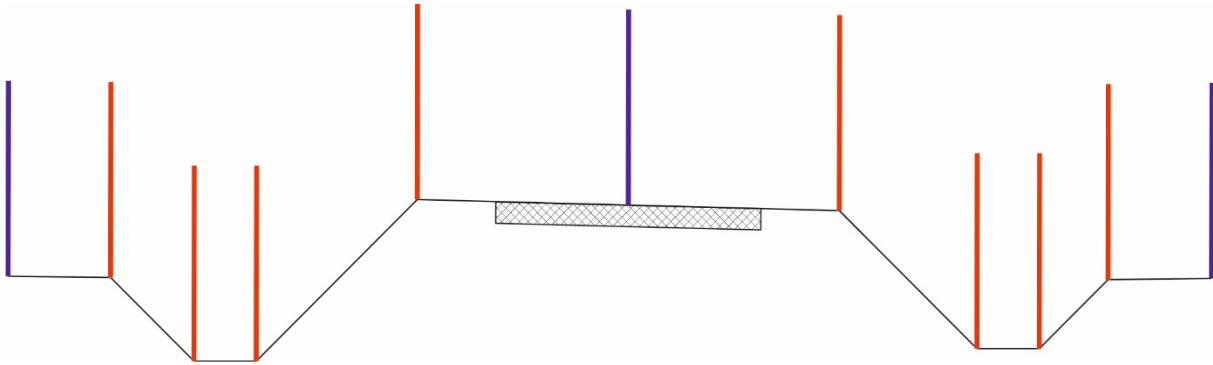
Hipoteze istraživanja koje proizlaze iz postavljenih ciljeva su:

- Između normalnih poprečnih profila testiranih temeljem x, y i z koordinata kontrolnih i validacijskih točaka mjerenih totalnom stanicom i rezultata dobivenih očitanjem s DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom dolazi do statistički značajne razlike.
- Do statistički značajne razlike u izmjeri z koordinata totalnom stanicom i upotrebom bespilotne letjelice dolazi zbog stagnirajuće vode u odvodnim jarcima tijekom zimskog mjerenja odnosno zbog kombinacije stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i visine vegetacije koja se pojavljuje na kosinama nasipa tijekom proljetnog mjerenja.
- Nakon korekcije z koordinata kontrolnih i validacijskih točaka na digitalnom modelu terena temeljem podataka o dubini stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i visini vegetacije na kosinama nasipa prikupljenih tijekom terenskih mjerenja visina razlika z koordinata kontrolnih i validacijskih točaka nije statistički značajna.

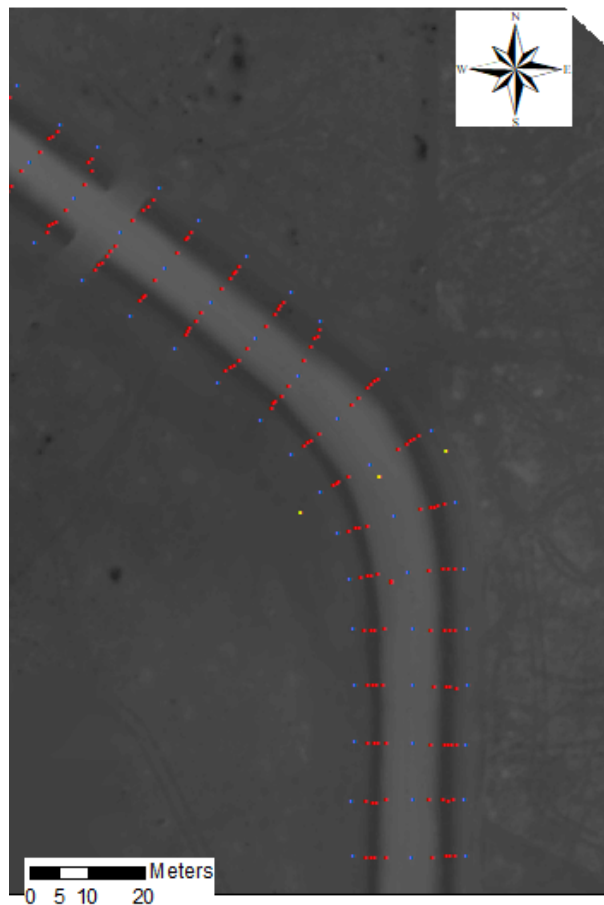
3.2. Opis metode istraživanja

Za potrebe ovog istraživanja ukupno je snimljeno 910 m šumske ceste. Svakih 10 metara šumske ceste označeno je mjesto izmjere poprečnog profila sprejom u boji. Na istraživanom dijelu šumske ceste isključivo se radilo o poprečnom presjeku nasipa. Prikupljanje terenskih podataka vršeno totalnom stanicom Stonex R35 i bespilotnom letjelicom DJI Mavic 3 Enterprise opremljenom kamerom DJI Mavic 3E Wide. Za potrebe izrade ovog diplomskog rada, totalna stanica korištena je kao referentna metoda izmjere. Za georeferenciranje totalne stanice korištene su dvije točke poznatih koordinata. Koordinate točaka za georeferenciranje totalne stanice određene su pomoću GNSS uređaja u RTK modu. GCP (eng. ground control points) točke, korištene za smještanje aerofotografija u prostor, označene su lako vidljivim oznakama na tlu kako bi ih bilo lakše uočiti prilikom obrade podataka na računalu. Oznake na tlu fiksirane su drvenim kolcem. Terenske ili validacijske točke, snimljene totalnom stanicom, korištene su za određivanje x, y, i z koordinata te izračun pogreške mjerenja prilikom obrade podataka u Arcgis-u. Ukupno je snimljeno 1108 terenskih i validacijskih točaka koje su korištene za analiziranje prostornog odstupanja DMR-a. Od 1108 snimljenih točaka za 276 validacijskih točaka postavljene su vidljive oznake na tlu prilikom snimanja bespilotnom letjelicom, te su validacijske točke korištene za kasnije testiranje prostorne pogreške x, y i z koordinata digitalnog modela terena. dok su ostale terenske točke njih 832, korištene za testiranje točnosti z koordinate izrađenih DMR-ova (zimski

i proljetni aspekt). Validacijske točke koje su imale oznaku na tlu postavljene su na lijevi i desni kraj trupa ceste, te sredinu kolničke konstrukcije snimanih profila (Slika 11). Pozicija GCP i validacijskih točaka vidljiva je na slici 12.



Slika 11. Prikaz validacijskih (plave linije) i terenskih (crvene linije) točaka na crtanom poprečnom profilu



Slika 12. Prikaz validacijskih (plave), GCP (žute) i terenskih (crvene) točaka na DMR-u

3.2.1. Način prikupljanja terenskih podataka totalnom stanicom

Za potrebe ovog diplomskog rada korištena je totalna stanica (Stonex R35) (slika 13). Pozicija totalne stanice i koordinate točaka koje su nam služile za vezu, odnosno pomoću kojih smo oblak točaka prikupljen radnom stanicom georeferencirali snimljeni su GNSS uređajem u RTK modu. Točke (GCP, validacijske, terenske) na kojima je vršeno terensko mjerenje prikazane su na slici 12. Na svakom poprečnom profilu je snimljeno minimalno 11 točaka, dok je na pojedinim profilima gdje su zamijećene

nagle promjene u poprečnom pružanju terena snimljeno više točaka kako bi teren bio prikazan što zornije.



Slika 13. Prikupljanje terenskih podataka totalnom stanicom Stonex R35

Mjerenje totalnom stanicom rađeno je samo za vrijeme zimskog mjerenja. Za vrijeme snimanja totalna stanica je samo jednom premještena, time osiguravajući točnost podataka s minimalnim utjecajem pozicioniranja same stanice, odnosno izbjegavanja greške uzrokovane ljudskim faktorom. Naime, prilikom svakog premještanja totalne stanice može doći do pogreške pozicioniranja odnosno instrumentalne pogreške (odmaka centra totalne radne stanice od točke) i pogreške izmjerenog položaja točke pozicioniranja. Pogreške se zbrajaju i dolazi do akumulirane pogreške te se na taj način povećava pogreška mjerenja koja, u slučaju većeg broja premještanja može biti signifikantna i utjecati na krajnji rezultat. Prilikom izvođenja radova takva vrsta greške je zanemariva, ali u pogledu znanstvenog rada može znatno utjecati na rezultate istraživanja (Lasić 2008).

3.2.2. Način prikupljanja terenskih podataka bespilotnom letjelicom

Bespilotna letjelica DJI Mavic 3 Enterprise opremljena s RTK modulom te kamerom visoke rezolucije korištena je za prikupljanje aerofotografija istraživanog područja (slika 14). Tehničke specifikacije korištenih mjernih uređaja prikazani su u Tablici 10. Misija letačke operacije kreirana je u aplikaciji DJI Pilot 2. Isti parametri snimanja korišteni su za snimanje zimi i u proljeće. Visina leta iznosila je 60 metara. Preklapanje je iznosilo 80% za prednje i 80% za bočno preklapanje aerofotografija. Vrijeme snimanja iznosilo je 18:34 minute za proljetno snimanje, te 19:35 minuta za zimsko snimanje. Prilikom snimanja, korištena je opcija mehaničkog zatvarača, čime su se izbjegla zamućenja pri pokretu bespilotne letjelice i omogućilo brzo snimanje. Veličina piksela za DMR dobiven u zimskom snimanju iznosila je 8,8 cm, dok je za proljetno snimanje veličina piksela iznosila 8,9 cm.

Tablica 11. Tehničke specifikacije korištene mjerene opreme

	Totalna stanica Stonex R35	Bespilotna letjelica DJI Mavic 3E
MJERENJE KUTOVA (kutne jedinice):	360° (stupnjevi) / GON 400 / MIL 6.400	Kamera: DJI Mavic 3E Wide Kamera: 20 MP senzor Mehanički zatvarač: 8-1/2.000 s
RASPOLOŽIVI RASPON MJERENJA UDALJENOSTI:	Standardni način (prizma) 3.000 m Dugi način (prizma) 5.000 m	Horizontalna udaljenost 15 km Maksimalna visina leta 500 m
TOČNOST MJERENJA UDALJENOSTI:	Standardni način (prizma) 2 mm + 2 ppm Dugi način (prizma) 2 mm + 2,5 ppm	Točnost RTK pozicioniranja: Horizontalno 1 cm + 1 ppm; Vertikalno 1,5 cm + 1 ppm
LASERSKI VISAK (laserska jedinica):	635 nm poluvodički laser	-
NAPAJANJE (baterija):	7,4 V / 4.300 mAh Li-ion	5.000 mAh LiPo 4S baterija 15,4 V (standardni napon)
NAPAJANJE (vrijeme rada):	Do 5 h	45 minuta (bez vjetra)
FIZIČKE SPECIFIKACIJE (dimenzije):	206 × 203 × 360 mm	347,5 × 283 × 107,7 mm (bez propelera)
FIZIČKE SPECIFIKACIJE (težina uključujući bateriju):	6,1 kg	915 g



Slika 14. Korištena bespilotna letjelica DJI Mavic 3 Enterprise

Iako je korištena bespilotna letjelica bila opremljena RTK modulom za preciznije pozicioniranje aerofotografija, snimljeno je ukupno 12 GCP točaka pomoću uređaja GNSS (Stonex S900A) koje su tijekom obrade aerofotografija korištene za smještanje DMR-a (zimski i proljetni aspekt) u prostor (slika 15).



Slika 15. Snimanje GCP točke uređajem GNSS korištene za georeferenciranje aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom

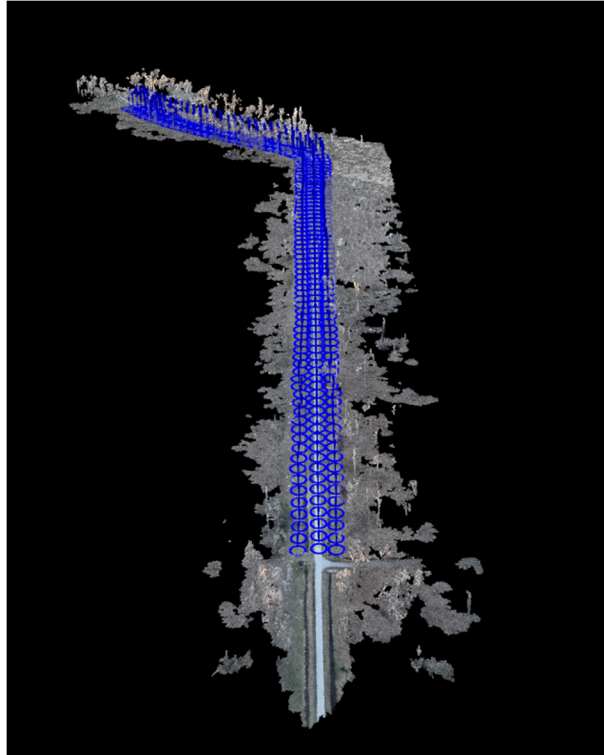
3.2.3. Izmjera dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i visine vegetacije na kosinama nasipa

Visina vegetacije prilikom proljetnog mjerenja te visine vode tijekom zimskog i proljetnog mjerenja izmjerena je pomoću mjerne letve mjereno na centimetar s procjenom na milimetre. Za visinu vegetacije u proljeće rađeno je više mjerenja između terenskih točaka na kosinama nasipa te je uzeta njihova prosječna vrijednost. Za visinu vegetacije u odvodnom jarku mjerila se visina vegetacije na sredini odvodnog jarka, a kao referentna vrijednost nije uzimana najveća visina vegetacije već prosječna visina na kojoj vegetacija zatvara sklop. Za dubinu stagnirajuće vode referentnu vrijednost predstavljala je izmjerena visina vode na sredini odvodnog jarka. Mjerenja su obavljena na svakom poprečnom profilu s lijeve i desne strane šumske ceste.

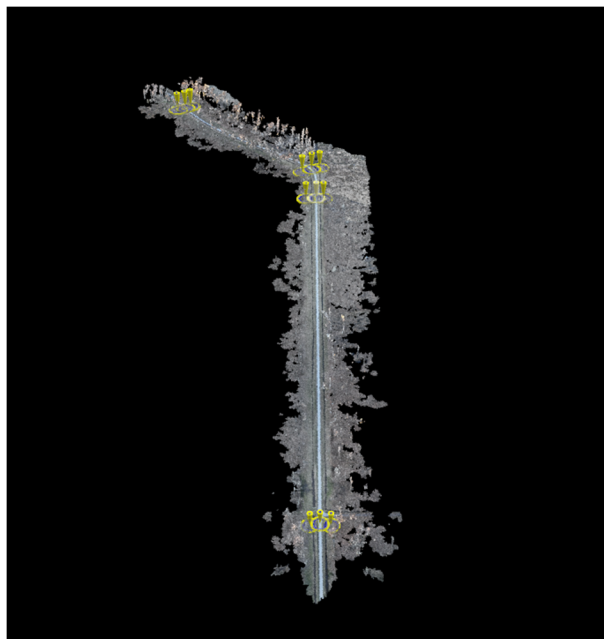
3.2.4. Obrada terenskih podataka

Aerofotografije snimljene bespilotnom letjelicom učitane su u program Pix4Dmapper (v 4.8.4.). Kao i drugi programi koji služe za fotogrametrijsku analizu, ovaj program radi na temelju osnovnih načela fotogrametrije koji su opisani u poglavlju **1.6.1. Digitalna fotogrametrija**. Nakon učitavanja aerofotografija, fotografije su smještene u prostor pomoću GCP točka snimljenih GNSS uređajem, pridruživanjem oznaka vidljivih na aerofotografijama očitanim koordinatama snimljenih GCP točaka. Analiza prostornog odstupanja DMR-a vršila se na dva načina. Za validacijske točke, za njih 276, za koje su postojale oznake na tlu, vršena je analiza x, y, i z koordinata u Pix4D mapper programu. Učitane su koordinate točaka snimljenih totalnom stanicom u Pix4d mapper. Program ovako učitane točke smatra točnim odnosno referentnim vrijednostima te na temelju njih vršit usporedbu s aerofotografijama i oblakom točaka. Nakon toga, ručno su se označile na aerofotografijama sredine oznake validacijskih točaka kako bi se definirala prostorna pozicija svake točke oblaka podataka odnosno dobivenog DMR-a. Na kraju, temeljem učitanih i označenih koordinata program računa korijen srednje kvadratne pogreške (eng. RMSE) (slika, 16, 17, 18).

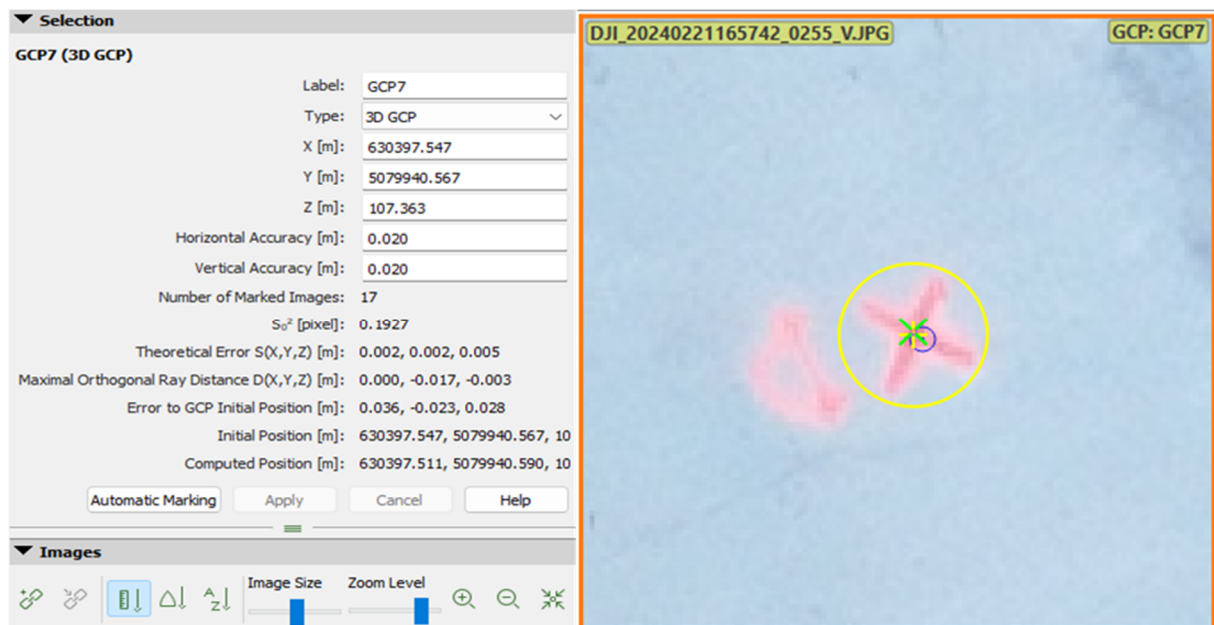
Analiza rezultata u Pix4d rađena je na osobnom računalu sljedećih karakteristika: CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz, RAM: 16GB, GPU: Intel(R) HD Graphics 530 (Driver: 23.20.16.4973).



Slika 16. Digitalni model snimanog područja tijekom proljetnog razdoblja u Pix4D mapper programu. Plavom bojom označene pozicije validacijskih točaka na temelju kojih je izračunato prostorno odstupanje po x, y i z koordinati



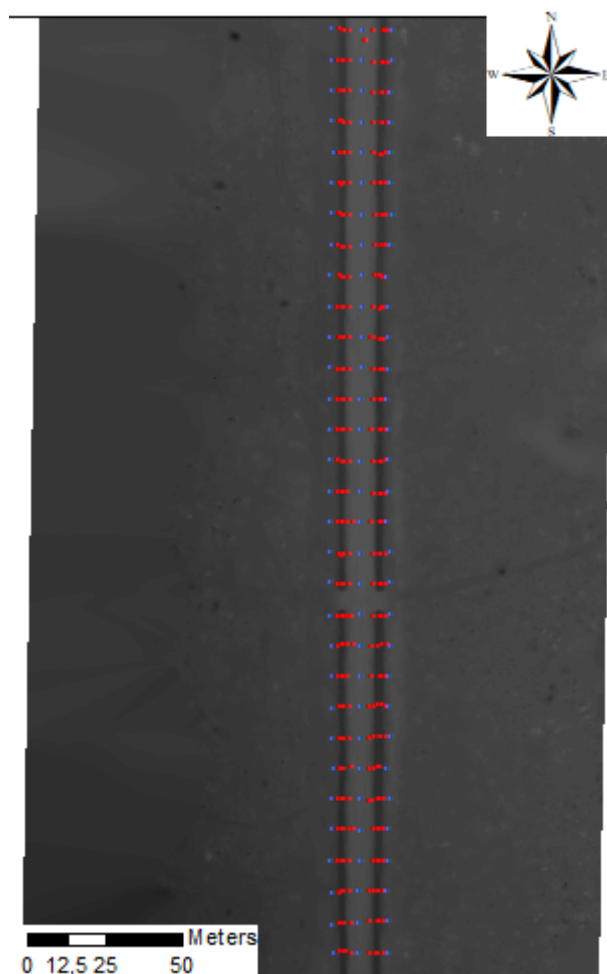
Slika 17. Digitalni model snimanog područja tijekom zimskog razdoblja u Pix4D mapper programu. Žutom bojom označene pozicije GCP točaka



Slika 18. Primjer označavanja mjesta GCP točke u programu Pix4D mapper

Na isti način kao na slici 18 označavaju se i validacijske točke (u programu pod nazivom check point), uz razliku da prilikom označavanja validacijskih točaka ne dolazi do prostorne izmjene DMR-a kao prilikom označavanja GCP točaka.

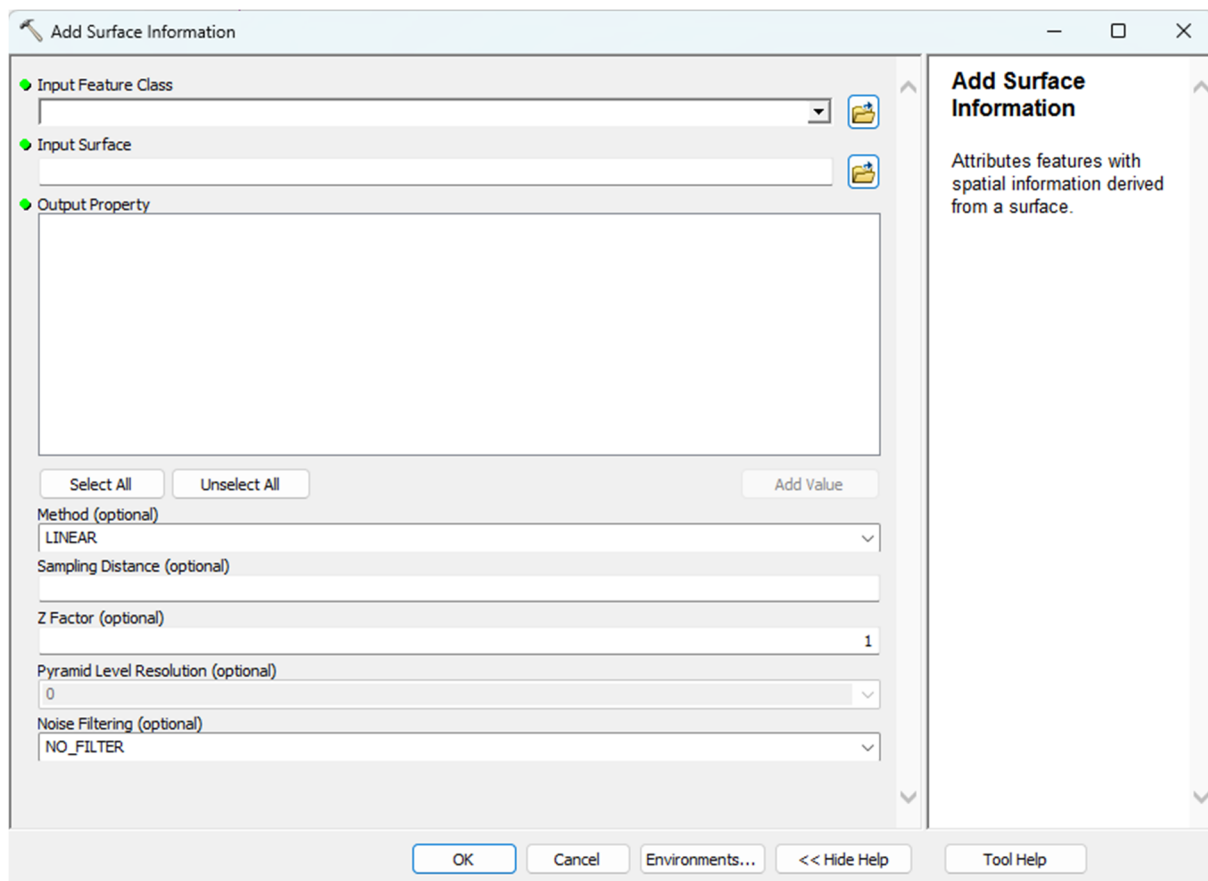
Ujedno se za sve validacijske i terenske točke vršila i analiza prostornog odstupanja po z koordinati. Točke snimljene totalnom stanicom te dobiveni DMR-ovi učitani su u ArcGis 10.8. program (slika 19). Na temelju prostornih podataka koje nose DMR-ovi te horizontalne pozicije validacijskih točaka očitane su z vrijednosti za zimsko i proljetno mjerenje. Veličina piksela DMR-a za zimski aspekt iznosi 8,8 cm, dok za proljetni aspekt veličina piksela iznosi 8,9 cm. Iako postoji više funkcija pomoću kojih se može očitati vrijednost z koordinata na temelju vektorskog podatka (koja u ovom slučaju označava horizontalnu poziciju) i rasterskog podatka (DMR-a), za potrebe ovog istraživanja koristila se funkcija **Add Surface Information** (slika 20). Alat *Add Surface Information* nalazi se u *ArcToolbox-u* → *3D Analyst Tools* → *Functional Surface* → *Add Surface Information*. Ovim alatom u atributnoj tablici stvara se zasebni stupac koji sadrži informaciju o prostornim podacima za točke, linije i poligone (vektorske podatke). Za potrebe ovog istraživanja izdvajala se samo z vrijednost. **Input Feature Class** odnosno vektorski podatak koji određuje poziciju s koje će se očitati z vrijednost u ovom slučaju bile su validacijske i terenske točke mjerene totalnom stanicom. Odabirom DMR-ova zimskog i proljetnog mjerenja u izborniku **Input Surface** definirana je površina koja sadrži informaciju o z vrijednosti. Ostale vrijednosti kao **Z Factor** i **Sampling Distance** se nisu unosile u ovom slučaju.



Slika 19. Validacijske (plavo) i terenske (crveno) točke snimljene totalnom stanicom te vidljivim DMR-om u pozadini

Podaci atributne tablice izvezeni su nakon toga u programski paket MS Excel u kojem se oformila baza koja je korištena za danju statističku analizu. Za potrebe izračuna RMSE računala se razlika z vrijednosti i to:

- Totalna stanica – DMR, zimsko mjerenje
- Totalna stanica – DMR, korigiran za izmjerenu dubinu stagnirajuće vode snimljene u odvodnim jarcima, zimsko mjerenje
- Totalna stanica – DMR, proljetno mjerenje
- Totalna stanica – DMR korigiran za izmjerenu visinu vegetacije snimljene na pokosima nasipa, proljetno mjerenje
- Totalna stanica – DMR, korigiran za izmjerenu dubinu stagnirajuće vode snimljene u odvodnim jarcima, zimsko mjerenje
- Totalna stanica – DMR, korigiran za izmjerenu visinu, vegetacije snimljene na pokosima nasipa odnosno dubinu stagnirajuće vode snimljene u odvodnim jarcima, proljetno mjerenje



Slika 20. Alat Add Surface Information programa ArcMap 10.8

U programu Statistica 14.0.0. provedena je deskriptivna statistička analiza. Testirana je normalnost podataka, proveden je t -test između svih mjerenja te je provedena analiza varijance (ANOVA). Iskazana je korelacija između vrijednosti pogreške:

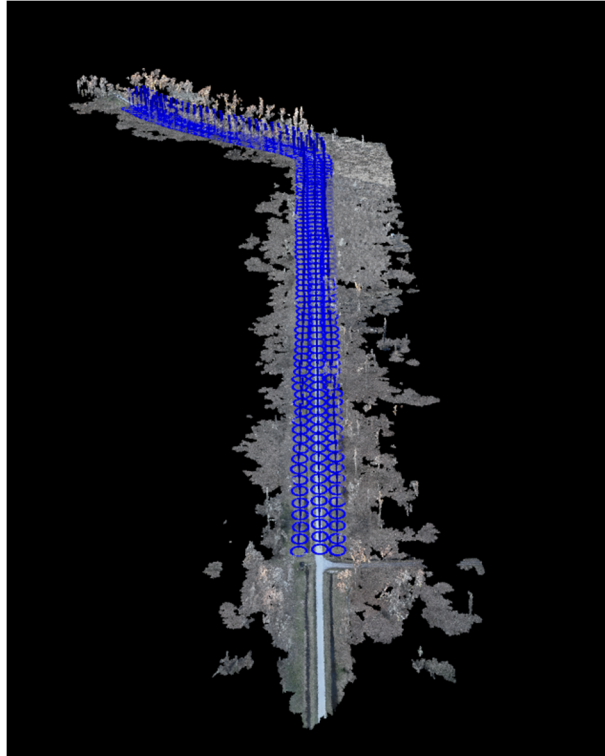
- pozicioniranja validacijskih točaka, točnije njihovih x i y koordinata očitanih sa DMR-a u odnosu na x i y koordinate validacijskih točaka dobivenih terenskom izmjerom pomoću radne stanice (referentna metoda)
- terenskih točaka, točnije njihovih z koordinata očitanih sa DMR-ova u odnosu na z koordinate terenskih točaka dobivenih terenskom izmjerom pomoću radne stanice (referentna metoda) te je istraživana utjecaj visine vegetacije i dubine stagnirajuće vode na njihovu točnost (zimski i proljetni aspekt).

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

4.1. Terenski podaci prikupljeni totalnom stanicom

Ukupno je snimljeno 1108 točaka totalnom stanicom od čega je njih 276 predstavljalo validacijske točke, a preostale 832 snimljene točke predstavljale su terenske točke izmjere (slika 21).

Maksimalna vrijednost nadmorske visine izmjerena je na točki 89 na 1. profilu te je iznosila 109,90 m.n.v. (metara nadmorske visine). Minimalna vrijednost nadmorske visine definirana je za točku 1086 na 91. profilu te je iznosila 104,52 m.n.v.



Slika 21. Prikaz pozicija validacijskih točaka na trasi istraživane šumske ceste

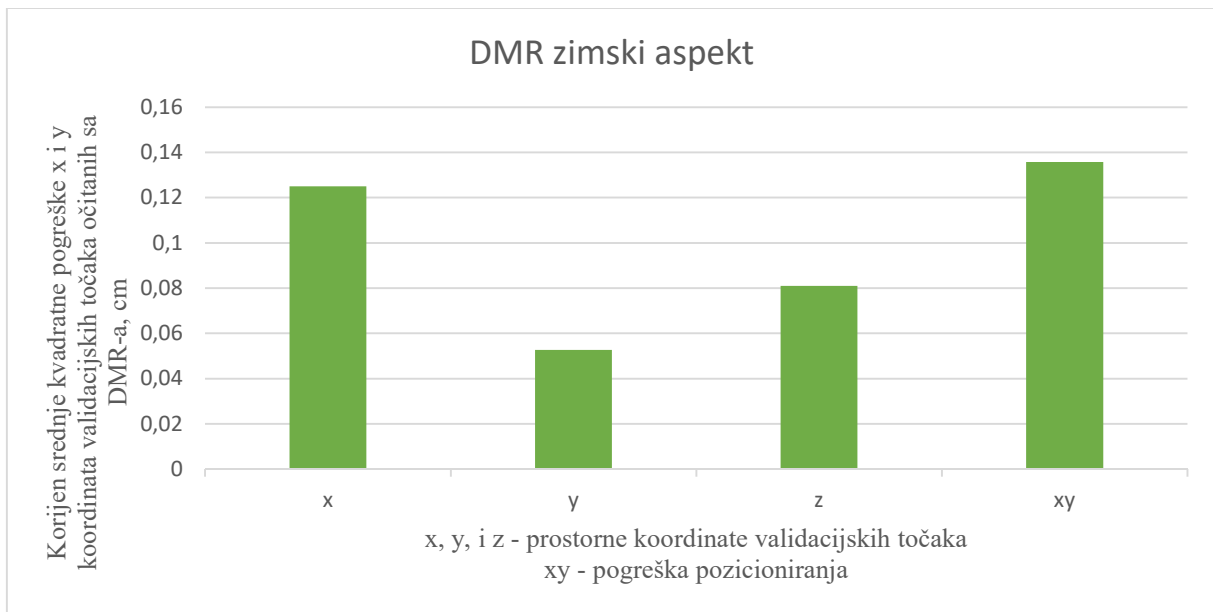
4.2. Terenski podaci prikupljeni bespilotnom letjelicom (zimski aspekt)

Za potreba izrade DMR-a prikupljeno je ukupno 687 aerofotografija temeljem kojih je izrađen digitalni model terena za 16,018 ha šumske površine. Prosječni GSD (eng. Ground sampling distance) je iznosio 1,76 cm s veličinom piksela od 8,8 cm. RMSE za GCP točke je iznosio 0,02 m po x osi, 0,02 m po y, te 0,03 m po z osi. RMSE za validacijske točke iznosio je 0,13 m po x osi, 0,06 m po y, te 0,08 m po z osi.

4.2.1. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka (zimski aspekt)

RMSE za validacijske točke je iznosio 0,13 m po x osi, 0,05 m po y osi, te 0,08 m po z osi. Kombinirani RMSE za xy os iznosio je 0,13 m (slika 22).

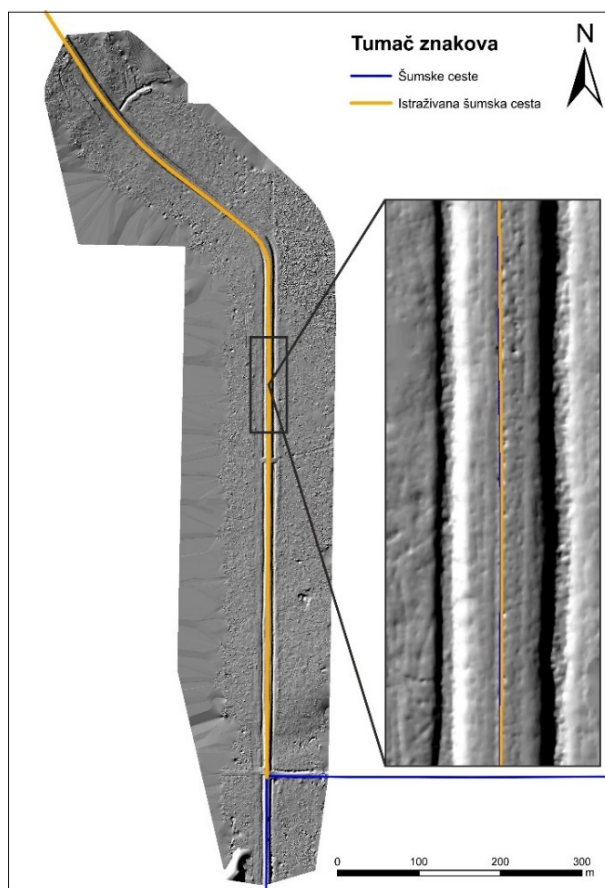
Maksimalna vrijednost nadmorske visine uočena je na terenskoj točki 5 na 1. profilu i iznosila je 109,91 m.n.v. Minimalna vrijednost nadmorske visine izmjerena je na terenskoj točki 1100 na 92. profilu te je iznosila 104,82 m.n.v. (slika 23, 24).



Slika 22. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referentne vrijednosti x i y koordinata validacijskih točaka snimljenih totalnom stanicom



Slika 23. Prikaz DMR-a istraživanog područja u zimskom aspektu



Slika 24. Prikaz hillshade-a u zimskom aspektu

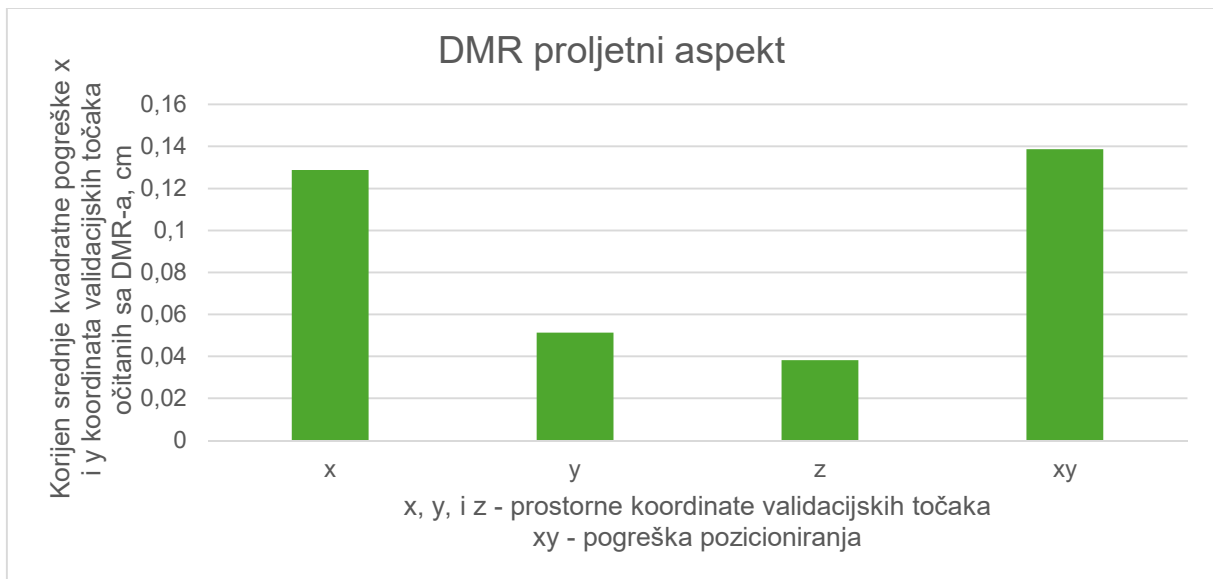
4.3. Terenski podaci prikupljeni bespilotnom letjelicom (proljetni aspekt)

Za potreba izrade DMR-a prikupljeno je ukupno 687 aerofotografija temeljem kojih je izrađen digitalni model terena za 14,004 ha šumske površine. Prosječni GSD je iznosio 1,78 cm s veličinom piksela od 8,9 cm. RMSE za GCP iznosi 0,02 m po x osi, 0,02 m po y, te 0,04 m po z osi. RMSE za validacijske točke iznosi 0,13 m po x osi, 0,05 m po y, te 0,04 m po z osi.

4.3.1. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka (proljetni aspekt)

RMSE za validacijske točke je iznosio 0,12 m po x osi, 0,05 m po y osi, te 0,04 m po z osi. Kombinirani RMSE za xy osi iznosio je 0,14 m (slika 25).

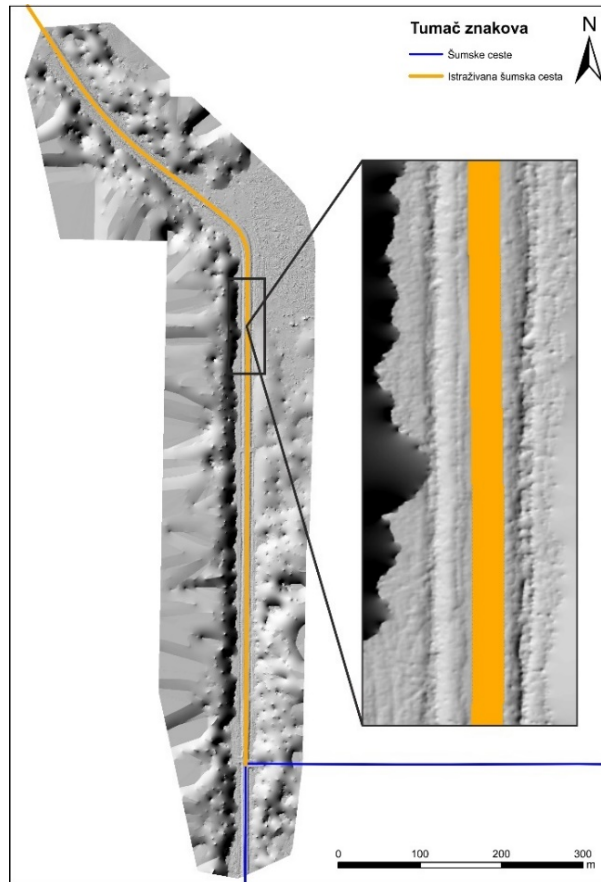
Maksimalna visina izmjerena je na točki 12 na 2. profilu te je iznosila 110,15 m.n.v. Minimalna visina izmjerena je na točki 1068 na 89. profilu te je iznosila 105,08 m.n.v. (slika 26, 27).



Slika 25. Korijen srednje kvadratne pogreške x i y koordinata validacijskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referentne vrijednosti x i y koordinata validacijskih točaka snimljenih totalnom stanicom



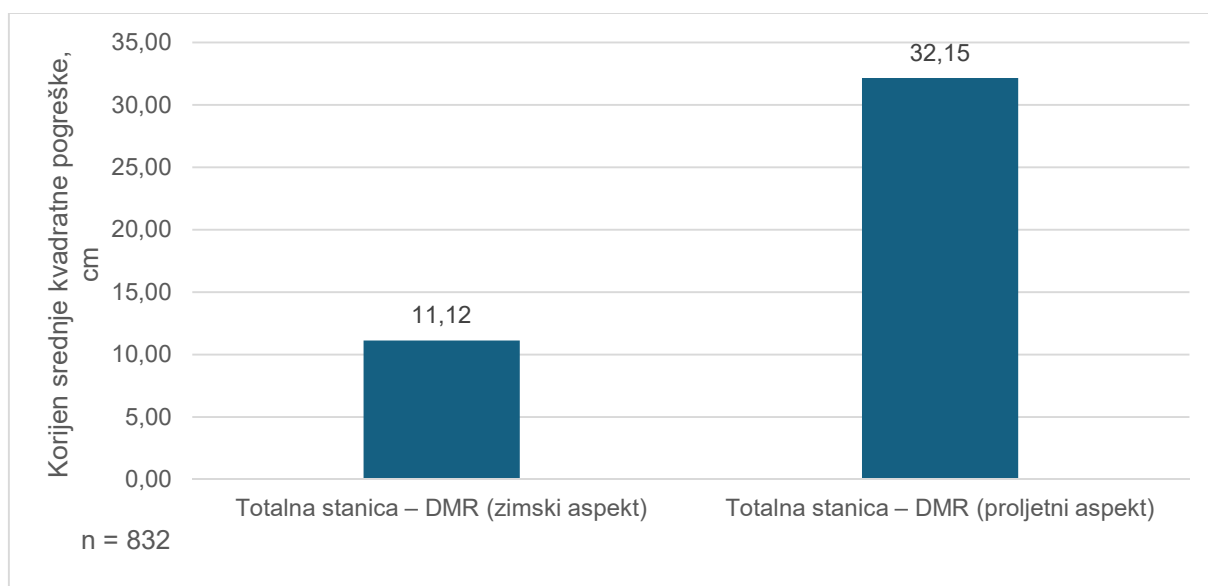
Slika 26. Prikaz DMR-a istraživanog područja u proljetnom aspektu



Slika 27. Prikaz hillshade-a istraživanog područja u proljetnom aspektu

4.4. Uočene razlike između terenskih podataka

Korijen srednje kvadratne pogreške prilikom usporedbe mjerenja terenskih točaka totalnom stanicom i očitavanja s DMR-a zimski aspekt je znatno manji u usporedbi totalne stanice s DMR-om dobivenim nakon proljetne izmjere. Razlog tome možemo pronaći u razlici, u prisutnosti i gustoći vegetacije i vrijednosti njene visine na istraživanom području između dva navedena mjerenja (slika 28). Tijekom zimskih mjeseci vegetacija nije mjerena zbog zanemarive vrijednosti njene visine dok je srednja vrijednost visine vegetacije tijekom proljetnog mjerenje iznosila 0,17 m. U usporedbi s RMSE-om dobivenog iz Pix4d izvještaja temeljenog na 276 validacijskih točaka, RMSE računat za 832 terenske točke znatno je veći kod DMR dobiven aerofotografijama prikupljenim u proljetnom aspektu. Razlog tome leži u činjenici što se na mjestu svih validacijskih točaka korištenih u Pix4d analizi nalazila oznaka postavljena u razni sa okolnim tlom promjera 16 cm što je sprečavalo rast vegetacije a ujedno je kod označavanja validacijskih točaka na terenu okolna vegetacija bila uklanjana (Slika 29.).

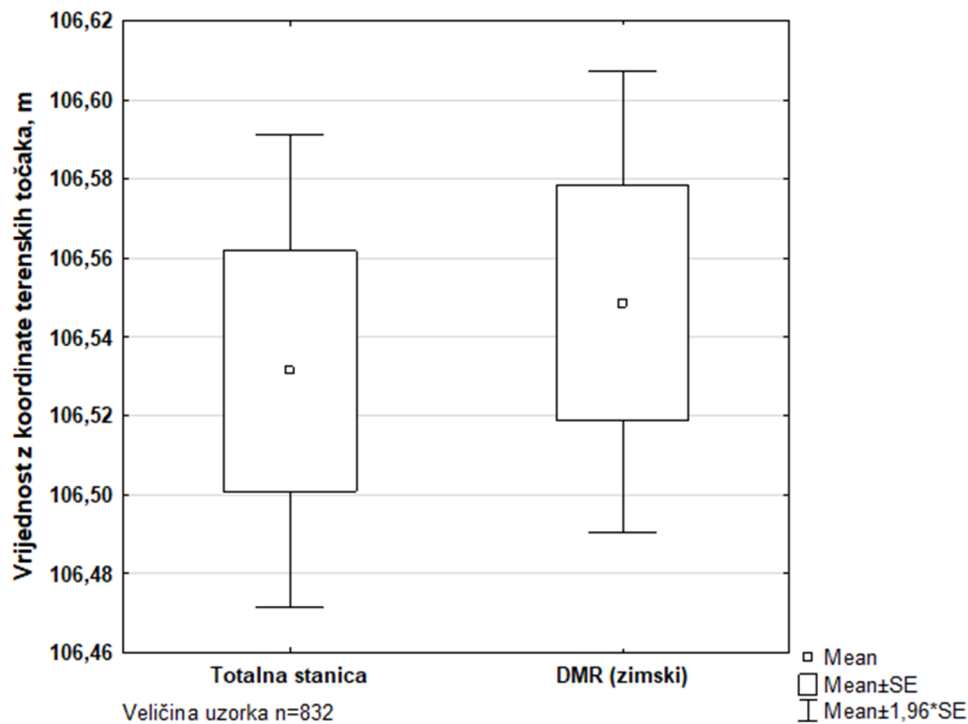


Slika 28. Korijen srednje kvadratne pogreške (nekorigirane) z koordinata terenskih točaka između referentne metode i DMR-ova (zimski i proljetni aspekt)



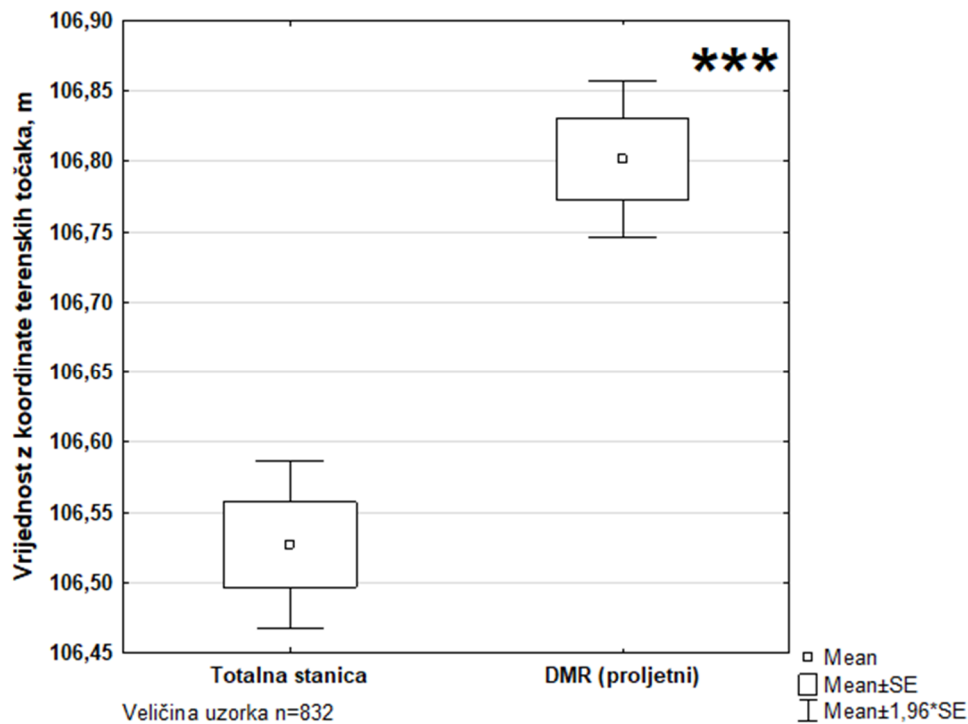
Slika 29. Oznaka validacijske oznake na tlu

t-testom je dokazano kako ne postoji statistički značajne razlike između z koordinata terenskih točaka mjerenih totalnom stanicom u odnosu na očitane podatke sa DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija prikupljenih u zimskom aspektu. Prosječna vrijednost z koordinata terenskih točaka snimljenih totalnom stanicom iznosila je 106,53 m, dok je prosječna vrijednost z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a (zimski aspekt) iznosila 106,55 m (slika 30).



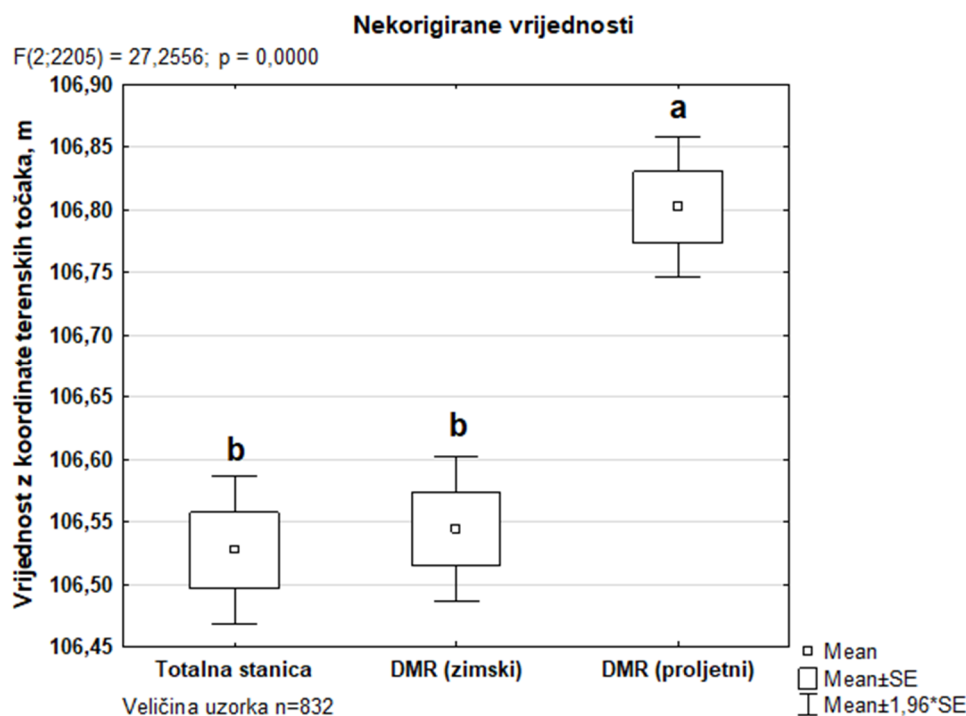
Slika 30. *t*-test za vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjenjenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom aspektu (nekorrigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

t-testom je dokazano kako postoji statistički značajna razlika između z koordinata terenskih točaka mjenjenih totalnom stanicom u odnosu na očitane podatke sa DMR-a izrađenog na temelju aerofotografija prikupljenih u proljetnom aspektu. Prosječna vrijednost z koordinate terenskih točaka snimljenih totalnom stanicom iznosila je 106,53 m, dok je prosječna vrijednost z koordinate terenskih točaka očitanih sa DMR-a (proljetni aspekt) iznosila 106,80 m (slika 31).



Slika 31. *t*-test za vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu. Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

Analiza varijance (ANOVA) i Tukey post hoc test značajnih razlika (Tukey HSD) za nekorrigirane vrijednosti z koordinate istraživanih terenskih točaka koje su: izmjerene direktnom terenskom izmjerom na terenu pomoću totalne stanice odnosno, očitane sa DMR-ova dobivenih temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom (zimski i proljetni aspekt) utvrđeno je da dolazi do statistički značajne razlike u vrijednosti z koordinate terenskih točaka između DMR-a (proljetni aspekt) i ostale dvije promatrane metode (totalna stanica i DMR-a zimski aspekt) pri 95 % intervalu pouzdanosti $p < 0,05$. Iz tog razloga, provedene su daljnje statističke analize utjecaja dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i vegetacije sa kosina nasipa na očitane vrijednosti z koordinate sa DMR-ova zimski i proljetni aspekt (slika 32).



Slika 32. Razlike u vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-ova izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom i proljetnom aspektu (nekorigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Slova označavaju statističku razliku između korištenih metoda izmjere (Tukey HSD), pri $p < 0,05$

4.5. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima

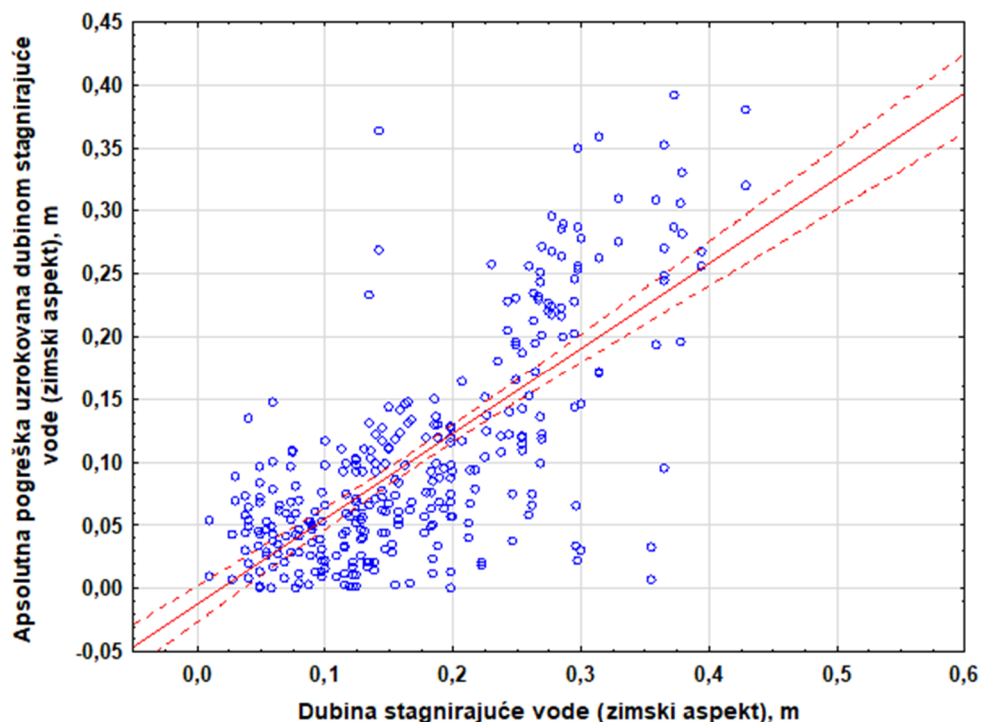
Prosječna izmjerena vrijednost dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima tijekom zimskog mjerenja iznosila je 0,17 m dok je za vrijeme proljetnog mjerenja prosječna izmjerena vrijednost dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima iznosila 0,14 m. Prilikom proljetnog mjerenja zabilježena je stagnirajuća voda u odvodnim jarcima na 87 profila što čini 94,57% ukupnog broja profila obuhvaćenih istraživanjem, dok je za vrijeme zimskog mjerenja zabilježena prisutnost stagnirajuće vode u odvodnim jarcima na 81 profilu (88,04 % od ukupnog broja profila). Minimalna izmjerena vrijednost dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima u zimskom i proljetnom mjerenju iznosila je 0,01 m a zabilježena je u profilima 14,15, 83, 87 za proljetno mjerenje, te profilu 60 za zimsko mjerenje dok je najviša izmjerena vrijednost dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima u zimskom mjerenju iznosila je 0,43 m zabilježena u profilu 21, a u proljetnom 0,45 m u profilu 60.

4.5.1. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane stagnirajućom vodom u odvodnim jarcima – zimski aspekt

Temeljem prikupljenih podataka tijekom zimskog mjerenja izrađena je korelacija i izračunata apsolutna pogreška uzrokovana stagnirajućom vodom na DMR-u nastalom iz snimljenih aerofotografija (zimski aspekt) i izmjerene vrijednosti dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima tijekom zimskog mjerenja.

Apsolutna pogreška uzrokovana stagnirajućom vodom (zimski aspekt) = $-0,0121 + 0,67586 * \text{dubina stagnirajuće vode}$, $r = 0,71989$

Dobivena vrijednost korelacije $r = 0,71989$ ukazuje na postojanje pozitivne i umjerene linearne veze između izmjerenih vrijednosti dubina stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i apsolutne pogreške uzrokovane stagnirajućom vodom (zimski aspekt). Korelacija je pozitivna s umjerenom raspršenosti podatka od pravca gdje apsolutna pogreška raste s porastom vrijednosti dubine stagnirajuće vode (slika 33).



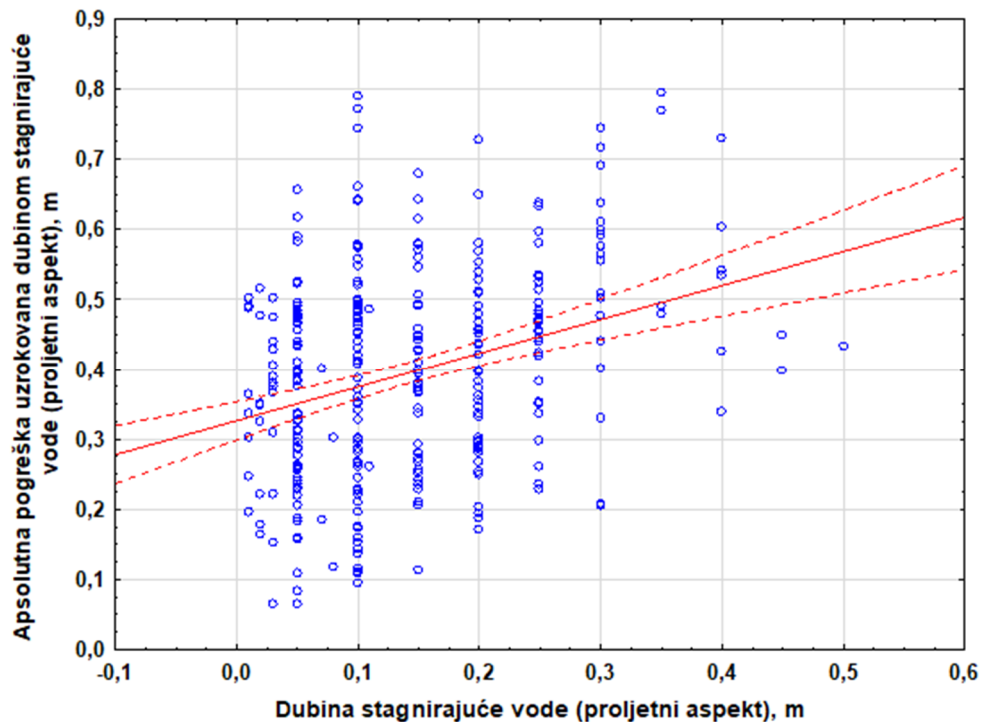
Slika 33. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovanog stagnirajućom vodom (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima (zimski aspekt)

4.5.2. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima – proljetni aspekt

Temeljem prikupljenih podataka tijekom proljetnog mjerenja izrađena je korelacija i izračunata apsolutna pogreška uzrokovana stagnirajućom vodom na DMR-u nastalom iz snimljenih aerofotografija (proljetni aspekt) i izmjerene vrijednosti dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima tijekom proljetnog mjerenja.

Apsolutna pogreška uzrokovana stagnirajućom vodom (proljetni aspekt) = $0,32619 + 0,48466 * \text{dubina stagnirajuće vode}$, $r = 0,31534$.

Dobivena vrijednost korelacije $r = 0,31534$ ukazuje na postojanje slabe i pozitivne linearne veze između izmjerenih vrijednosti dubina stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i apsolutne pogreške uzrokovane stagnirajućom vodom (proljetni aspekt). Korelacija je pozitivna s izraženom raspršenosti podatka od pravca gdje apsolutna pogreška raste s porastom vrijednosti dubine stagnirajuće vode (slika 34).



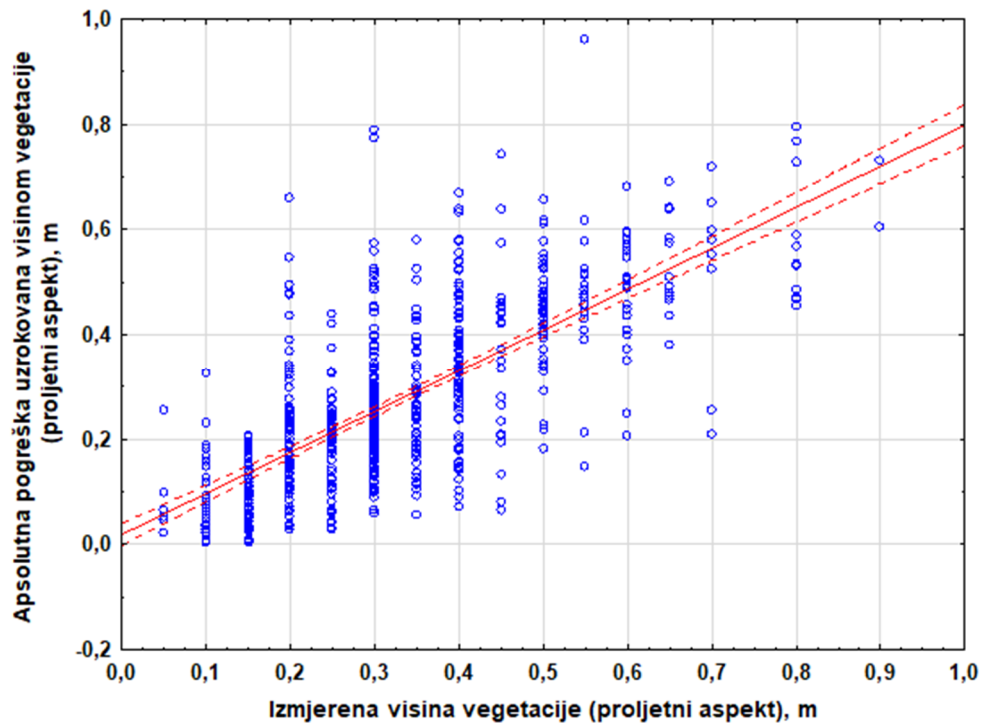
Slika 34. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovanog stagnirajućom vodom (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima (proljetni aspekt)

4.6. Razlike u vrijednostima z koordinate terenskih točaka uzrokovane vegetacijom na kosinama nasipa

Visina vegetacije na nožici nasipa pojedinog profila obuhvaćenog ovim istraživanjem mjerena je samo tijekom proljetnog aspekta iz razloga što su podaci vezani uz zimski aspekt prikupljeni tijekom veljače odnosno izvan vegetacijskog perioda. Prosječna visina vegetacije na nožicama nasipa tijekom proljetnog mjerenja iznosila je 0,32 m s minimalno izmjerenom vrijednošću od 0,03 m na nožici nasipa profila 39 do maksimalne vrijednosti u iznosu od 0,9 m zabilježene na nožici nasipa u profilu 21.

Apsolutna pogreška uzrokovana visinom vegetacije (proljetni aspekt) = $-0,01903 + 0,77926 \cdot$ visina vegetacije, $r = 0,71690$.

Dobivena vrijednost korelacije $r = 0,71690$ ukazuje na postojanje pozitivne i umjerene linearne veze između izmjerenih vrijednosti visina vegetacije na kosinama nasipa i apsolutne pogreške uzrokovane vegetacijom (proljetni aspekt). Korelacija je pozitivna s umjerenom raspršenosti podatka od pravca gdje apsolutna pogreška raste s porastom vrijednosti visine vegetacije (slika 35).

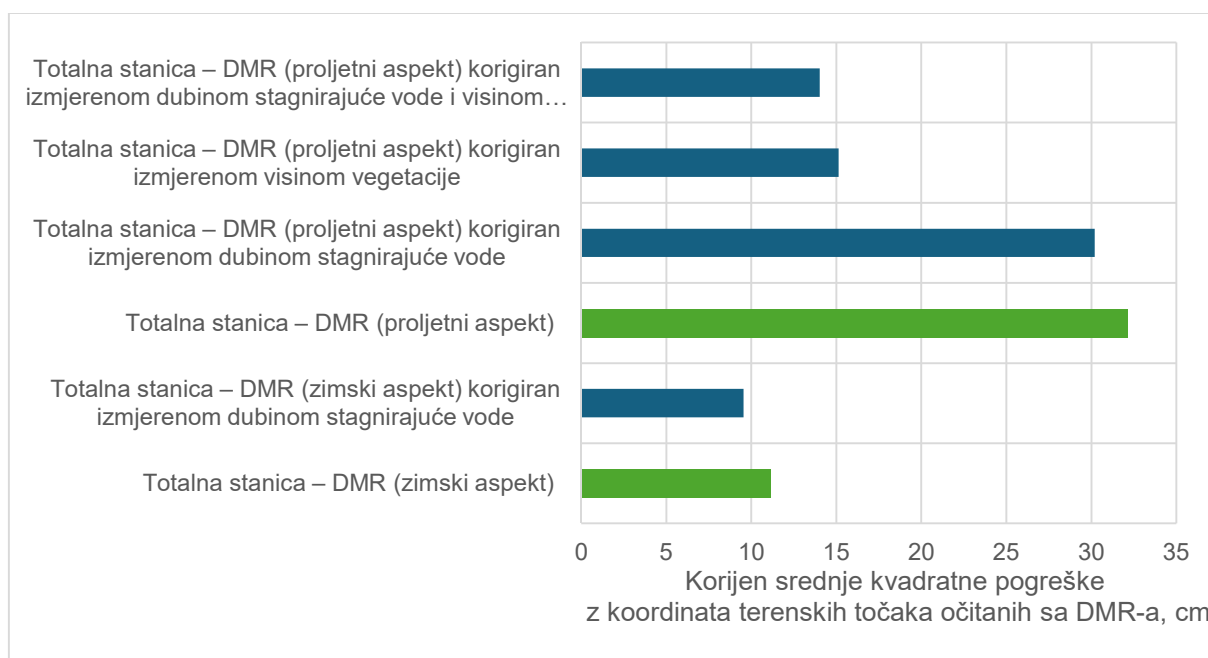


Slika 35. Korelacija između utvrđene pogreške DMR-a uzrokovane visinom vegetacije (u apsolutnoj vrijednosti) i izmjerene vrijednosti visine vegetacije

4.7. Korekcija z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-ova

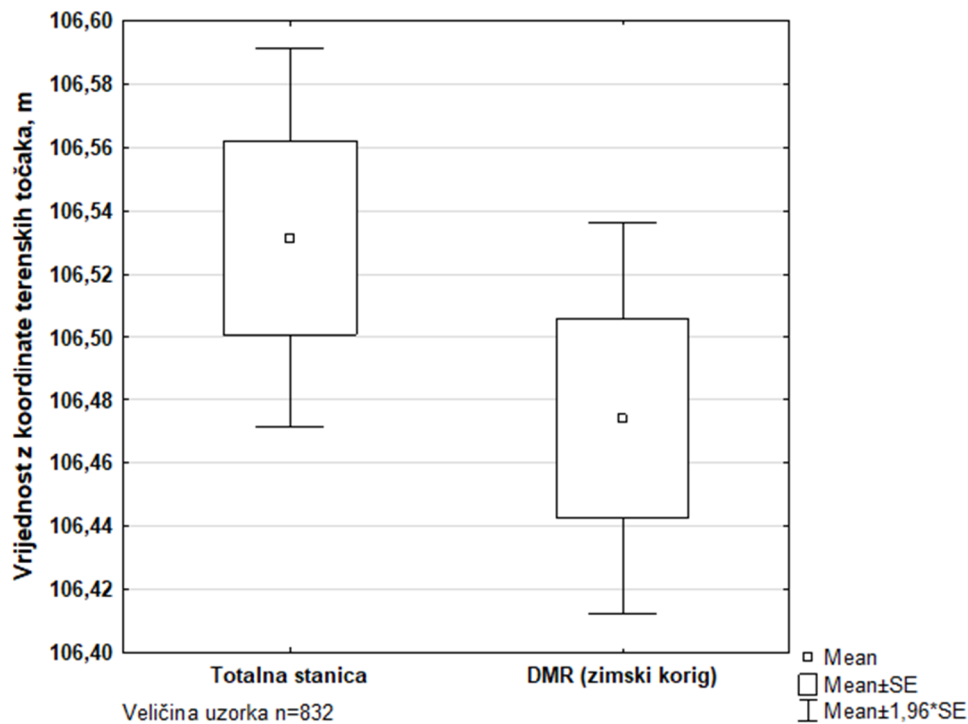
Korekcija visina z koordinata terenskih točaka obuhvaćenih istraživanjem i izravno očitanih sa DMR-ova (zimski i proljetni aspekt) izrađeni temeljem prikupljenih aerofotografija izvodila se na način da se svakoj terenskoj točki očitanoj sa pojedinog DMR-a (zimski i proljetni aspekt) oduzimala izmjerena vrijednost dubine stagnirajuće vode (zimski i proljetni izmjera) odnosno dodavala izmjerena vrijednost visine vegetacije (zimski i proljetni izmjera) za svaku terensku točku zasebno.

Nakon navedenih korekcija visina z koordinata terenskih točaka korijen srednje kvadratne pogreške DMR-ova u odnosu na referente vrijednosti visina z koordinata terenskih točaka snimljenih totalnom stanicom se smanjio (slika 36).



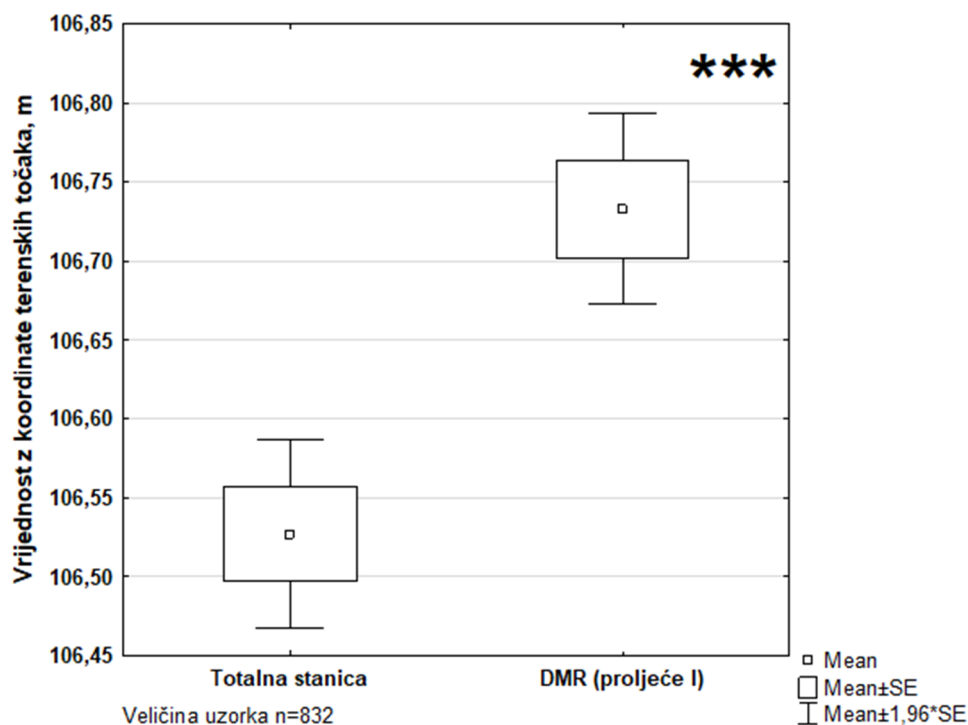
Slika 36. Korijen srednje kvadratne pogreške z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referente vrijednosti visina z koordinata terenskih točaka snimljenih totalnom stanicom

Nakon korekcije visina z koordinata terenskih točaka zimskog mjerenja očitanih sa DMR-a sa izmjerenim vrijednostima dubina stagnirajuće vode u odvodnim jarcima, prosječna vrijednost novo izračunatih visina z koordinata terenskih točaka za zimsko mjerenje iznosi 106,47 m, što je umanjeno od 8 cm u usporedbi s nekorigiranim podacima. Također, iako i korigirane i nekorigirane vrijednosti ne pokazuju statistički značajnu razliku, treba napomenuti kako je do veće razlike u korijenu srednje kvadratne pogreške z koordinata istraživanih terenskih točaka došlo nakon korekcije podataka (slika 37).



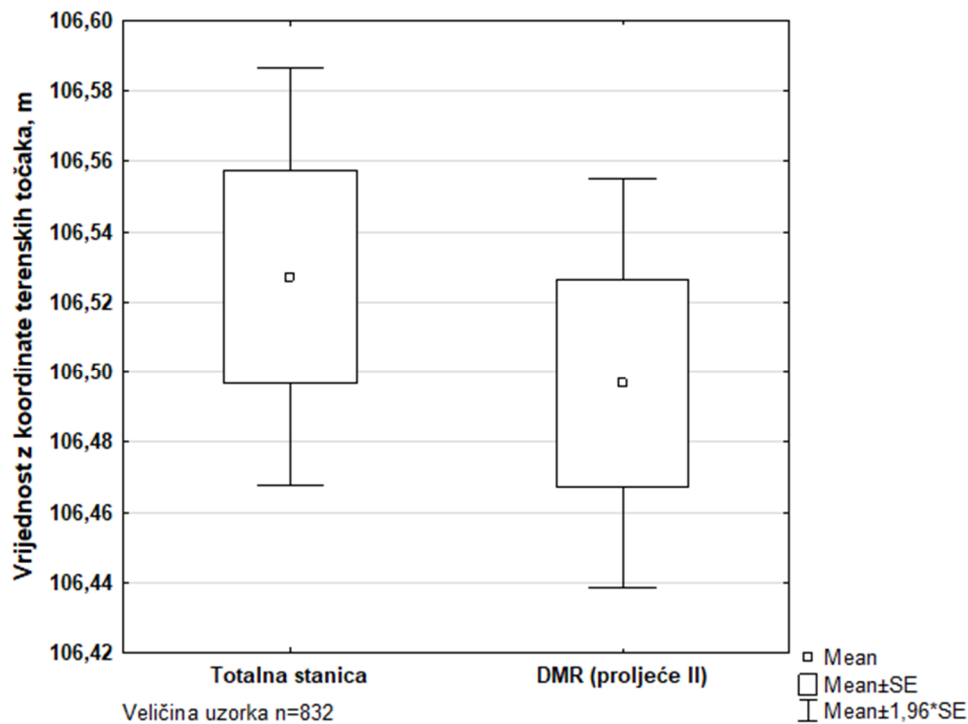
Slika 37. *t*-test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom aspektu (korigirane sa izmjerenom dubinom stagnirajuće vode). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

Nakon korekcije visina z koordinata terenskih točaka proljetnog mjerenja očitanih sa DMR-a sa izmjerenim vrijednostima dubina stagnirajuće vode u odvodnim jarcima, prosječna vrijednost novo izračunatih visina z koordinata terenskih točaka za proljetno mjerenje iznosi 106,73 m, što je umanjenje od 7 cm u usporedbi s nekorigiranim podacima. Proljeće I na grafu označuje korekciju visine proljetnog mjerenja s dubinom stagnirajuće vode (slika 38).



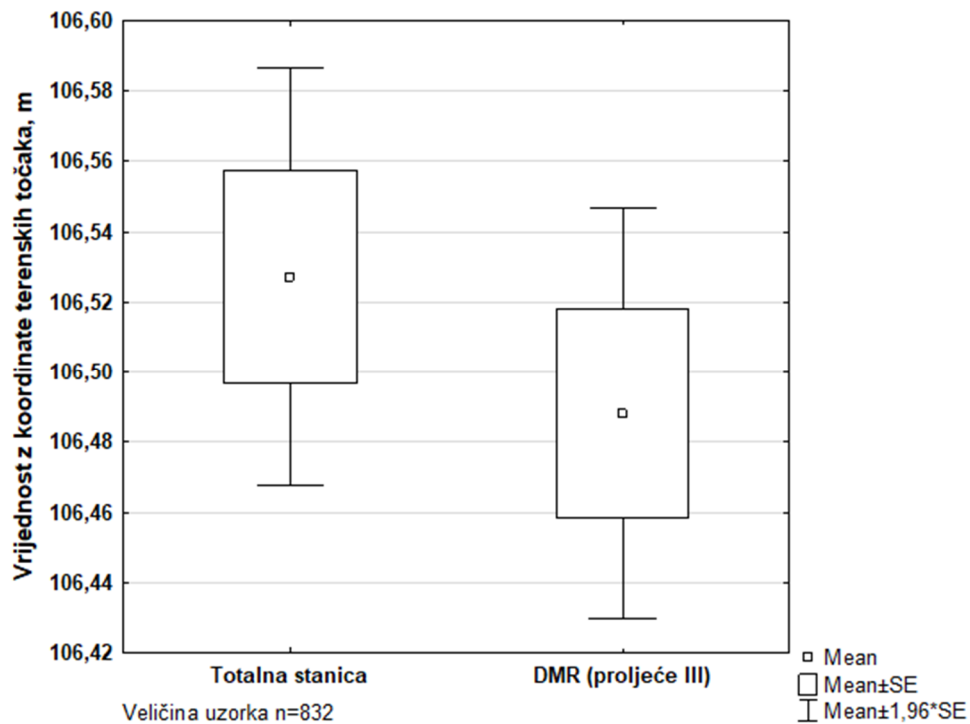
Slika 38. *t*-test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom dubinom stagnirajuće vode). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

Nakon korekcije visina z koordinata terenskih točaka proljetnog mjerenja očitanih sa DMR-a sa izmjerenim vrijednostima visine vegetacije na kosinama nasipa, prosječna vrijednost novo izračunatih visina z koordinata terenskih točaka za proljetno mjerenje iznosi 106,50 m, što je umanjenje od 30 cm u usporedbi s nekorigiranim podacima. Proljeće II označuje korekciju visine proljetnog mjerenja s visinom vegetacije. (slika 39).



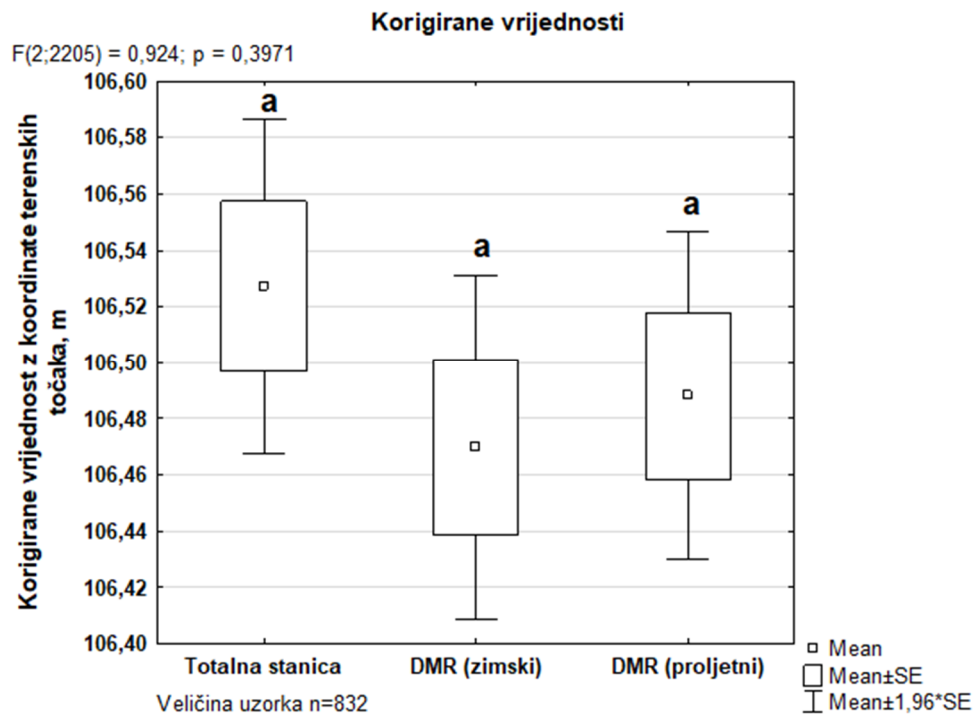
Slika 39. *t*-test za prosječne vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom visinom vegetacije). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

Nakon korekcije visina z koordinata terenskih točaka proljetnog mjerenja očitanih sa DMR-a sa izmjerenim vrijednostima visine vegetacije na kosinama nasipa i dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima, prosječna vrijednost novo izračunatih visina z koordinata terenskih točaka za proljetno mjerenje iznosi 106,49 m, što je umanjeње od 31 cm u uspoređbi s nekorigiranim podacima. Proljeće III označuje korekciju visine proljetnog mjerenja s dubinom vode i visinom vegetacije. (slika 40).



Slika 40. *t*-test za prosječne vrijednosti z koordinata terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-a izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u proljetnom aspektu (korigirane sa izmjerenom visinom vegetacije i dubinom stagnirajuće vode u odvodnim jarcima). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (wiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Statistički značajne razlike označene su zvjezdicama kako slijedi: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

Naposljetku, izrađena je analiza varijance (ANOVA) popraćena Tukey post hoc testa značajnih razlika (Tukey HSD), temeljem kojih je vidljivo kako kod korigiranih visina z koordinata istraživanih terenskih točaka bilo da se radi o zimskom ili proljetnom aspektu nije zamijećena statistički značajna razlika u analiziranim z koordinatama terenskih točaka izmjerenih radnom stanicom u odnosu na očitane a kasnije i računski korigirane visine z koordinata terenskih točaka obuhvaćenih ovima istraživanjem pri 95 % intervalu pouzdanosti $p < 0,05$ (slika 41).



Slika 41. Razlike u vrijednosti z koordinate terenskih točaka izmjerenih totalnom stanicom i DMR-ova izrađenog temeljem aerofotografija snimljenih bespilotnom letjelicom u zimskom i proljetnom aspektu (korigirane vrijednosti). Kružić (circle) prikazuje aritmetičku sredinu, pravokutnik (box) standardnu pogrešku sredine, vertikalne linije (whiskers) 1,96 standardnu pogrešku sredine. Slova označavaju statističku razliku između korištenih metoda izmjere (Tukey HSD), pri $p < 0,05$.

5. RASPRAVA SA ZAKLJUČCIMA

U posljednjih desetak godina segment bespilotnih letjelica sve je zastupljeniji na tržištu a samim time i njihova primjena nalazi praktičnu svrhu u velikom spektru različitih struka a jedna od njih je i šumarstvo. Upravo temeljem navedenih spoznaja provedeno je istraživanje za svrhu imalo ustanoviti mogućnost korištenja bespilotne letjelice DJI MAVIC 3E prilikom snimanja šumske ceste nizinskoga reljefnoga područja s ciljem definiranja normalnog presjeka svakog snimljenog profila odnosno utvrđivanja točnosti prikupljenih podataka u odnosu na podatke prikupljene referentnom metodom terenske izmjere (totalnom stanicom Stonex R35). Ujedno se direktnom izmjerom na terenu dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima (zimski aspekt) odnosno dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima i visine vegetacije na pokosima nasipa (proljetni aspekt) željelo ustanoviti utječu li navedeni parametri na točnost prikupljenih podataka bespilotnom letjelicom.

Temeljem dobivenih rezultata možemo zaključiti kako digitalni model reljefa naročito sa aspekta brzine prikupljanja terenskih podataka o normalnom poprečnom presjeku šumske ceste nizinskoga reljefnog područja može zamijeniti klasičnu metodu terenske izmjere upotrebom radne stanice. Uspoređujući prikupljanje terenskih podataka na istraživanih 910 m šumske ceste nizinskog reljefnog područja (92 profila) totalnom stanicom u odnosu na snimanje aerofotografija bespilotnom letjelicom a uzimajući u obzir sve potrebne radne operacije na terenu 2,24 puta je dugotrajnije u odnosu na prikupljanje terenskih podataka bespilotnom letjelicom (tablica 12).

Tablica 12. Vrijeme trajanja radnih operacija na terenu ovisno o metodi terenske izmjere

Radna operacija	TOTALNA STANICA		BESPILOTNA LETJELICA	
	Potrebno vrijeme za izvršenje, min	Potrebna broj radnika za izvršenje	Potrebno vrijeme za izvršenje, min	Potrebna broj radnika za izvršenje
Postavljanje profila i validacijskih oznaka	120	4	120	4
Prikupljanje terenskih podataka	720	2	18 min i 20 sek.	1
Izmjera dubine stagnirajuće vode	-	-	90	2
Izmjera visine vegetacije	-	-	90	2
UKUPNO (min svi radnici)	1920 min.		858 min i 20 sek.	

Nadalje, dobiveni i kasnije analizirani podaci upućuju na činjenicu kako upravo dubina stagnirajuće vode u odvodnim jarcima odnosno visina vegetacije na kosinama nasipa mogu značajno utjecati na točnost očitavanja z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a dobivenog temeljem aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom a samim time i na točnost izmjere normalnog poprečnog profila šumske ceste nizinskog reljefnog područja. Naravno, utjecaj vegetacije uvelike ovisi o periodu u godini kada se terenski podaci prikupljaju pa možemo zaključiti kako vegetacija nema utjecaj na rezultate mjerenja ukoliko se ovakva vrsta podatka prikuplja tijekom zime odnosno za vrijeme mirovanja vegetacije dok je njen utjecaj na točnost z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a statistički značajan unutra vegetacijskog perioda (ožujak – studeni).

Naravno utjecaj vegetacije uvelike ovisi i o vremenu i načinu održavanja svijetle pruge šumske ceste točnije planiranih kosina nasipa. Potrebno napomenuti da za potrebe ovog mjerenja na istraživanoj

dionici šumske ceste između zimskog i proljetnog mjerenja (23. veljače 2024. – 18. travnja 2024.) nije vršeno održavanje svijetle pruge šumske ceste odnosno nije došlo do košnje vegetacije na planiranim kosinama nasipa. U suprotnom, da je u međuvremenu došlo do održavanja istraživane dionice šumske ceste u vidu košnje trave na kosinama nasipa, navedeno bi se zasigurno odrazilo na smanjene utjecaja visine vegetacije na točnost dobivenih podataka a u kojoj mjeri ovisi o proteklom periodu između košnje trave i vremena prikupljanja terenskih podataka.

Iako je ustanovljeno kako je utjecaj visine vegetacije na točnost z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a u odnosu na referentnu metodu terenske izmjere statistički značajan ističemo kako naknadnom korekcijom z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a sa vrijednostima visine vegetacije koje su prikupljene direktnom terenskom izmjerom nije zabilježena statistički značajna razlika u njihovoj točnosti. Temeljem dobivenog zaključujemo kao je pri provođenju ovakve vrste terenskih mjerenja bespilotnom letjelicom tijekom vegetacijskog perioda obavezno i direktnom terenskom izmjerom prikupljanje podataka u visini vegetacije na kosinama nasipa istraživanih profila.

S druge strane, iako je evidentiran određeni utjecaj dubine stagnirajuće vode u odvodnim jarcima na točnost z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a taj utjecaj nije bio toliko značajan kao utjecaj visine vegetacije. Navedeno možemo opravdati činjenicom kako je nakon definiranja terenskih točaka koje ćemo mjeriti u svakom poprečnom profilu, od njih ukupno 8 četiri su mjerene u odvodnim jarcima (slika 11) što znači da je utjecaj dubine stagnirajuće vode mogao imati utjecaj na maksimalno 50 % terenskih točaka obuhvaćenih ovim mjerenjem. Stvaran utjecaj stagnirajuće vode u odvodnim jarcima na terenske točke iznosio 39,2% iz razloga što u pojedinom odvodnim jarcima nije evidentirana stagnirajuća voda dok se s druge strane zbog razvedenosti terena u nekim profilima povećavao broj terenskih točaka kako bi što bolje opisali poprečni izgled terena pojedinog profila. S druge strane možemo pretpostaviti kako se i samo mjerenje terena kroz vodu odvija do neke dubine što isto tako utječe na smanjenje pogreške utjecaja stagnirajuće vode rezultate istraživanja.

Do navedenog zaključka dolazimo na temelju činjenice kao smo analizirajući vrijednosti z koordinata terenskih točaka očitanih sa DMR-a u (zimski aspekt) koje su kasnije korigirane sa izmjerenim vrijednostima dubine stagnirajuće vode u dovodnim jarcima došli do rezultata kako je srednja korigirana vrijednost z koordinate terenskih točaka očitanih sa DMR-a (zimski aspekt) 6 cm niža od srednje vrijednosti z koordinate terenskih točaka dobivenih referentnom metodom terenske izmjere.

Ovim rezultatima otvaraju se nove mogućnosti istraživanja bespilotnih letjelica u svrhu prikupljanja podataka o izgledu poprečnog profila šumskih cesta nizinskog reljefnog područja s ciljem kreiranja veće baze podataka čime bi se dosegla veća točnost i bolja interpretacija prikupljenih podataka. Konkretna primjena ovog istraživanja mogla bi naći svoje mjesto u šumskoj praksi na poslovima vezanim održavanje šumskih cesta, procjenu njihova stanja pa sve do potrebe za kalkulacijom količine materijala koja je potrebna za sanaciju oštećene dionice šumske ceste. Nadalje, snimanjem poprečnih jaraka lako su uočljivi dijelovi gdje je prohodnost istih nedovoljna odnosno podaci mogu poslužiti za evidenciju kritičnih mjesta na kojima prijeti izlivanje vode iz odvodnih jaraka tijekom kišnog razdoblja. Evidentiranjem dubine odvodnih jaraka na transparentan način dolazi se do podatka koje dionice su na redu za čišćenje i/ili eventualno produbljivanje a sve s ciljem smanjenja ukupnih troškova održavanja šumskih cesta.

Osim praktične primjene za potrebe šumarstva ovo istraživanje također pomaže u boljem shvaćanju mogućnosti korištenja digitalnog modela terena izrađenog temeljem snimljenih aerofotografija prikupljenih bespilotnom letjelicom odnosno shvaćanje utjecaja dubine vode i vegetacije na točnost dobivenih podataka. Provedeno istraživanje također potiče na daljnje istraživanje u smjeru utjecaja raznih čimbenika na preciznost izrade digitalnog modela terena izrađenog temeljem

prikupljenih aerofotografija, osobito utjecaja dubine vode na preciznost mjerenja što je svakako plan ustanoviti u nekom od slijedećih istraživanja.

6. LITERATURA

1. Anon., 2023: Ministry of Transportation and Infrastructure. British Columbia Engineering Manual for Roads 6th ed.. Province of British Columbia.
2. Antolić, D., 2018: Šumske protupožarne ceste kao posebna kategorija šumskih prometnica Završni rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije.
3. Balenović, I., Marjanović, H., Benko, M., 2010: Primjena aerosnimaka u uređivanju šuma u Hrvatskoj. Šumarski list, 134 11-12, 623-630.
4. Barković, Đ., 1998: Integrirani geodetski mjerni sustav – totalne mjerne stanice. Geodetski list, 52 75 2, 117-126.
5. Barković, Đ., Zrinjski, M., 2020: Terenska mjerenja, udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zagreb.
6. Benčić, D., Solarić, N., 2008: Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Školska knjiga, Zagreb.
7. Benko, M., Balenović, I., 2011: Prošlost, sadašnjost i budućnost primjene metoda daljinskih istraživanja pri inventuri šuma u Hrvatskoj. Šumarski list, 135 13, 272-281.
8. Buğday, E., 2018: Capabilities of using UAVs in forest road construction activities. European Journal of Forest Engineering, 42, 56-62. Forest Engineering and Technologies Platform.
9. Đuka, A., Papa, I., Lovrinčević, M., Bumber, Z., Poršinsky, T., Tomljanović, K., 2023: Terrestrial vs. UAV-Based Remote Measurements in Log Volume Estimation. Remote Sensing, 1521, 5143. <https://doi.org/10.3390/rs15215143>
10. Dürrstein, H., 1992: Detailed Road Planning Using Microcomputers. Computer Supported Planning of Roads and Harvesting Workshop, Feldafing, Germany, International Union of Forestry Research Organizations.
11. Ecke S, Dempewolf J, Frey J, Schwaller A, Endres E, Klemmt H-J, Tiede D, Seifert T., 2022: UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. Remote Sensing. <https://doi.org/10.3390/rs14133205>
12. Europska komisija, 2019: Delegirana uredba Komisije EU 2019/945 od 12. ožujka 2019. o sustavima bespilotnih letjelica i o operaterima sustava bespilotnih letjelica iz trećih zemalja konsolidirani tekst. Preuzeto s http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/2020-08-09 Pristupljeno 20.8.2024
13. Fernandez-Guisuraga, J.M., Sanz-Ablanedo, E., Suarez-Seoane, S., Calvo, L., 2018: Using Unmanned Aerial Vehicles in Postfire Vegetation Survey Campaigns through Large and Heterogeneous Areas: Opportunities and Challenges. Sensors, 812. DOI: 10.3390/s18020586
14. Fraefel, M., Bont, L. G., Fischer, C., 2021: Spatially explicit assessment of forest road suitability for timber extraction and hauling in Switzerland. European Journal of Forest Research, 1406, 1195–1209. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01393-w>
15. Gradišer, L., Domiter, D., 2016: Hibridni sustavi pozicioniranja u kombinaciji s dubinomjerom. Zbornik radova Međimurskog veleučilišta u Čakovcu, 7 2, 29-35.
16. Hasegawa, H., Sujaswara, A.A., Kanemoto, T., Tsubota, K., 2023: Possibilities of Using UAV for Estimating Earthwork Volumes during Process of Repairing a Small-Scale Forest Road, Case Study from Kyoto Prefecture, Japan. Forests, 144: 677. <https://doi.org/10.3390/f14040677>
17. Hodić, I., Jurušić, Z., 2011: Analiza primarne otvorenosti šuma kojima gospodare HŠd.o.o. Zagreb kao podloga za kreiranje buduće politike izgradnje šumskih cesta. Šumarski list, 135 9-10, 487-499.
18. Hrvatska.eu – zemlja i ljudi., n.d.. <https://www.croatia.eu/index.php/hr/home-hr/zemljopis-stanovnistvo/reljefne-cjeline>. Prispupljeno 19.8.2024.
19. Ištuk, J., 2023: Izrada digitalnog ortofota za provođenje različitih prostornih analiza Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:066616>
20. Janeš, D., 2021: Planiranje primarnih šumskih prometnica u gospodarskim šumama na strateškoj i taktičkoj razini Disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:107440>

21. Janeš, D., Papa, I., Moro, M., Žarković, I., Pentek, T., Poršinsky, T. i Đuka, A., 2021: Analiza terenskih i sastojinskih čimbenika kao osnova za planiranje radova u pridobivanju drva i otvaranju šuma. *Nova mehanizacija šumarstva*, 42 1, 1-15. <https://doi.org/10.5552/nms.2021.1>
22. Kınalı, M., Çalışkan, E., 2022: Use of Unmanned Aerial Vehicles in Forest Road Projects. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 243, 530-541. <https://doi.org/10.24011/barofd.1073229>
23. Klimánek, M., 2018: Optimization of digital terrain model for its application in forestry. *Journal of Forest Science*, 52, 233-241. <https://doi.org/10.17221/4506-JFS>
24. Kramer, B.W., 2001: Forest road contracting, construction, and maintenance for small forest woodland owners.
25. Krtalić, A., Gajski, D., Maltarski, M., 2019: Digitalni trodimenzionalni prikazi scene i satelitska stereofotogrametrija. *Geodetski list*, 732, 147-164.
26. Kušan, V., 1996: Pristup daljinskim istraživanjima i GIS-u u Hrvatskome šumarstvu. *Sumarski List*. 120. 171-178.
27. Kweon, H., Seo, J. I., Lee, J. W., 2020: Assessing the applicability of mobile laser scanning for mapping forest roads in the republic of Korea. *Remote Sensing* 129: 1502. <https://doi.org/10.3390/rs12091502>
28. Lasić, Z., 2008: Praktični rad s geodetskim instrumentima, interna skripta. Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
29. Linder, W., 2009: Digital photogrammetry: A practical course 3rd ed.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92725-9>
30. Marjanović, M., 2010: CROPOS hrvatski pozicijski sustav, *Ekscentar*, 12, 28-34.
31. Maune, D. F. Ed., 2001: Digital Elevation Model Technologies and Applications: DEM Users Manual, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, 539.
32. Mellgren, P.G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. *FERIC*, 1–13.
33. Papa, I., Pentek, T., Nevečerel, H., Lepoglavec, K., Đuka, A., Šafran, B., Risović, S., 2015: Raščlamba tehničkih značajki i sustava odvodnje postojećih šumskih cesta radi utvrđivanja potrebe njihove rekonstrukcije – studija slučaja za g.j. „Belevine“ NPŠO Zalesina. *Šumarski list*, 139 11-12, 497-517.
34. Papa, I., Pentek, T., Janeš, D., Šerić, T., Vusić, D., Đuka, A., 2017: Usporedba podataka prikupljenih različitim metodama terenske izmjere pri rekonstrukciji šumske ceste. *Nova mehanizacija šumarstva*, 38 1, 1-14.
35. Papa, I., Pentek, T., 2023: Predavanja iz kolegija Projektiranje šumskih prometnica. Sveučilište u Zagrebu, fakultet šumarstva i drvna tehnologije.
36. Pentek, T., Pičman, D., Nevečerel, H., 2005: Planiranje šumskih prometnica – postojeća situacija, determiniranje problema i smjernice budućeg djelovanja. *Nova mehanizacija šumarstva* 261: 55–63.
37. Pentek, T., Nevečerel, H., Poršinsky, T., Horvat, D., Šušnjar, M., Zečić, Ž., 2007: Quality planning of forest road network – precondition of building and maintenance cost rationalisation. *Proceedings of Austro 2007 – FORMEC'07 Meeting the needs of tomorrow forests: new developments in forest engineering*, October 7 – 11, Wien – Heiligenkreuz, Austria.
38. Pentek, T., Pičman, D., Nevečerel, H., Lepoglavec, K., Papa, I., 2011: Primarno otvaranje šuma različitih reljefnih područja Republike Hrvatske. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 321: 401–416.
39. Pentek, T. 2012., Skripta iz kolegija Šumske prometnice. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 373 str.
40. Pentek, T., Nevečerel, H., Ecimović, T., Lepoglavec, K., Papa, I., Tomašić, Ž., 2014: Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti. *Nova mehanizacija šumarstva*, 35 1, 63-78.
41. Pentek, T., Đuka, A., Papa, I., Damić, D., Poršinsky, T., 2016: Elaborat učinkovitosti primarne šumske prometne infrastrukture – alternativa studiji primarnog otvaranja šuma ili samo prijelazno rješenje? *Šumarski list*, 140 9-10, 435-452.
42. Pirti, A., Gümüş, K., Erkaya, H., 2017: Evaluating repeatability of RTK GPS/GLONASS near/under forest environment. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 311, 23-33.
43. Pix4D., n.d.: Recommended hardware Pix4Dmapper. Preuzeto 24. kolovoza 2024. s <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809>
44. Poršinsky, T., Pentek, T., Đuka, A., 2014: Opisna i namjenska klasifikacija terena za pridobivanje drva i otvaranje šuma. *Studija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, 1–64.

45. Promise, I. E., Hart, L., 2022: Assessment of Relative Accuracy of Selected Total Station Instruments for a Closed Traverse Survey. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 8, 72-78. Rokhmana, C.A., 2015: The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 245-253.
46. Sabolović, M., Šiljeg, A., Zdilar, S., 2015: ZNAČAJKE DIGITALNIH MODELA RELJEFA U VOJNOGEOGRAFSKIM ANALIZAMA NA PRIMJERU VOJNO-REDARSTVENE OPERACIJE MASLENICA. *Polemos*, XVIII 36, 29-54.
47. Šantek, D., 2013: Ispitivanje CROPOS-a. *Geodetski list*, 67 90 4, 281-297.
48. Šantić, G., 2023: Primjena digitalnog modela reljefa u analizi prostora. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb
49. Seletković, A., Perić, M., Balenović, I., 2016: Fotogrametrijska procjena srednjih sastojinskih visina odvojeno po vrstama drveća u mješovitim sastojinama središnje Hrvatske. *Nova mehanizacija šumarstva*, 37 1, 15-23.
50. Šerić, T., 2017: Usporedba podataka prikupljenih različitim metodama terenske izmjere pri rekonstrukciji šumske ceste 587 B1 004, G.J. Belevine, NPŠO Zalesina. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb
51. Šikić, D., i drugi., 1989: Tehnički uvjeti za gospodarske ceste. *Znanstveni savjet za promet JAZU*, Zagreb, str. 1-40.
52. Tang, L., Shao, G., 2015: Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 264, 791-797.
53. Vugdelija, K., 2016: Bespilotne letjelice, razvoj, značaj i primjena u šumarstvu. Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb.
54. Watts, A.C., Ambrosia, V.G., Hinkley, E.A., 2012: Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4, 1671-1692.