

Izmjera normalnih poprečnih profila šumske ceste pomoću digitalnih modela terena izrađenih različitim metodama klasifikacije

Rončević, Jakov

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:606266>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE



JAKOV RONČEVIĆ

**IZMJERA NORMALNIH POPREČNIH PROFILA ŠUMSKE
CESTE POMOĆU DIGITALNIH MODELA TERENA
IZRAĐENIH RAZLIČITIM METODAMA KLASIFIKACIJE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, studeni 2024. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ŠUMARSTVA I DRVNE TEHNOLOGIJE
ŠUMARSKI ODSJEK

IZMJERA NORMALNIH POPREČNIH PROFILA ŠUMSKE
CESTE POMOĆU DIGITALNIH MODELA TERENA
IZRAĐENIH RAZLIČITIM METODAMA KLASIFIKACIJE

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.
4. Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Nevečerel (zamjenski član)

Student: Jakov Rončević

JMBAG: 0068233423

Datum odobrenja teme: 26. travnja 2024.

Datum predaje rada: 25. studenoga 2024.

Datum obrane rada: 29. studenoga 2024.

DOKUMENTACIJSKA KARTICA


Naslov	Izmjera normalnih poprečnih profila šumske ceste pomoću digitalnih modela terena izrađenih različitim metodama klasifikacije
Title	Measurement of Standard Cross-Section Profiles on Forest Road using Digital Terrain Models Created by Different Classification Methods
Autor	Jakov Rončević
Adresa autora	Bana J. Jelačića 114a, Selci Đakovački
Mjesto izrade	Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Izv. prof. dr. sc. Ivica Papa
Izradu rada pomogao	Mihael Lovrinčević, mag. ing. silv.
Godina objave	2024.
Obujam	Stranica 49 + tablice 9 + slika 26 + navoda citirane literature 54
Ključne riječi	Šumske ceste, bespilotna letjelica, oblak točaka, Digitalni model terena, klasifikacija, količine zemljorada
Key words	Forest roads, unmanned aerial vehicle, point cloud, digital terrain model, classification, earthwork

Sažetak

Tehnološkim napretkom i povećanom dostupnošću novih tehnologija kao što su bespilotne letjelice dolazi do sve veće njihove implementacije u operativno šumarstvo. Jedna od mogućih aplikacija ove suvremene tehnologije je i prilikom projektiranja šumskih cesta. Naime, iako je Republika Hrvatska uložila značajna sredstva u izgradnju šumskih cesta, još uvijek ima nedovoljno otvorenih šumskih površina na kojima je potrebno planirati te projektirati šumske ceste. U tu svrhu, provedeno je istraživanje mogućnosti primjene bespilotne letjelice za potrebe prikupljanja terenskih podataka nužnih za provedbu faze projektiranja šumskih cesta. Na području Uprave šuma podružnica Delnice, šumarija Vrbovsko, G.J „Miletka“, u odsjecima 44c i 44d bespilotnom letjelicom DJI Mavic 3 Enterprise snimljena je trasa planirane šumske ceste u dužini od 860,9 m. Temeljem snimljenih aerofotografija generiran je oblak točaka naknadno klasificiran automatskom i ručnom klasifikacijom iz kojega su izrađena dva digitalna modela terena istraživanog područja. Daljnjim analizama utvrđivane su sličnosti/razlike u prostornim podacima koordinate (Z) na terenskim točkama pri izmjeri normalnih poprečnih profila šumske ceste.

Summary:

Operational forestry is increasing implementation of new technologies, such as unmanned aerial vehicles. One of the possible applications of this modern technologies is for forest road design. Although the Republic of Croatia has invested significant funds in the construction of forest roads, there are still insufficient open forest areas (areas with low accessibility) where it is necessary to plan and design forest roads. For this purpose, possibility of using an unmanned aerial vehicle for field data survey necessary in forest road design was tested. The route of the planned forest road in the length of 860.9 m was recorded by the DJI Mavic 3 Enterprise unmanned aerial vehicle in the area managed by Forestry Administration Delnice, Forest office Vrbovsko, management unit "Miletka", sections 44c and 44d. A point clouds were generated based on aerial photographs, classified automatically and manually, and used for creating two digital terrain models of the researched area. Further analyses determined the similarities/differences in the spatial data of Z coordinates at field points, calculated cut and fill volumes.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum:

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

vlastoručni potpis

Jakov Rončević

U Zagrebu, 29. studenoga 2024.

PREDGOVOR

Zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Papi prije svega na prihvaćanju mentorstva, prenesenom znanju, pomoći i vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada. Posebno zahvaljujem Mihaelu Lovrinčeviću, mag. ing. silv. također na uloženom vremenu i trudu te neskromnom dijeljenju svog znanja informacija i podataka koji su bili potrebni za izradu ovoga rada.

SADRŽAJ:

1. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA	1
1.1. Javna cestovna prometna infrastruktura u RH	1
1.2. Šumska prometna infrastruktura	2
1.3. Primarna šumska prometna infrastruktura.....	3
1.4. Karakteristike šumskih cesta s obzirom na reljefno područje	8
1.5. Uspostava optimalne mreže šumskih cesta	8
1.5.1. Planiranje šumskih prometnica	9
1.5.2. Projektiranje šumskih cesta	11
1.5.2.1. Metode i uređaji prikupljanja terenskih podataka.....	12
1.5.2.2. Klasična metoda terenske izmjere prilikom projektiranja šumskih cesta.....	12
1.5.2.3. Suvremena metode terenske izmjere prilikom projektiranja šumskih cesta.....	13
1.5.3. Uredska faza projektiranja šumskih cesta	14
1.5.4. Izgradnja šumskih cesta s nadzorom.....	14
1.5.4.1. Radovi na donjem ustroju.....	15
1.5.5. Održavanje šumskih cesta.....	15
1.6. Bespilotne letjelice i primjena u šumarstvu	16
1.7. Digitalna fotogrametrija.....	17
1.8. Digitalni model terena (DMT) i način korištenja u šumarstvu.....	18
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	20
2.1. Orografske i hidrografske prilike	20
2.2. Geološka podloga i tlo	21
2.3. Klima	22
2.4. Šumske zajednice	22
2.5. Postojeća i planirana šumska prometna infrastruktura u G.J. „Miletka“	22
3. CILJ I METODE ISTRAŽIVANJA	24
3.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja.....	24
3.2. Metode istraživanja.....	24

3.2.1 Prikupljanja terenskih podataka bespilotnom letjelicom.....	24
3.3. Obrada terenskih podataka	26
3.3.1. Obrada aerofotografija u programu Pix4d mapper	26
3.3.2. Izrada glavnog projekta šumske ceste u programu RoadEng	28
3.3.3. Statistička analiza podataka	31
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	32
4.1. Terenski podaci prikupljeni bespilotnom letjelicom	32
4.2. Razlike između Z vrijednosti validacijskih točaka očitanih sa DMT-ova izrađenih temeljem automatske i ručne klasifikacije oblaka točaka.....	33
4.3. Uredska faza projektiranja ŠC na temelju izrađenih DMT-ova	34
4.4. Razlike između izračunatih volumena zemljanih radova dobivenih na temelju DMT-ova dobivenih automatskom i ručnom klasifikacijom	37
4.5. Faktorska analiza varijance (ANOVA)	40
5. ZAKLJUČAK I RASPRAVA	44
6. LITERATURA.....	46

POPIS SLIKA:

Slika 1. Prikaz šumske prometne infrastrukture; A) Šumska cesta ((Izvor: www.directindustry.com), B) Traktorska vlaka (Pentek i Papa 2021)	3
Slika 2. Razredba šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014.).....	4
Slika 3. Faze uspostavljanja optimalne mreže šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014.).....	9
Slika 4. Razine planiranja šumskih cesta (Pentek i dr. 2014.)	10
Slika 5. Mjesto istraživanja, UŠP Delnice, šumarija Vrbovsko, G.J. „Miletka”	20
Slika 6. Korištena bespilotna letjelica (DJI Mavic 3 Enterprise)	26
Slika 7. Oblak točaka na temelju aerofotografija u programu Pix4D mapper i pozicija korištenih GCP točaka (zelene oznake).....	26
Slika 8. Boje svake od klasa oblaka točaka u programu Pix4D mapper	27
Slika 9. Klasificirani oblak točaka s prikazom boja kategorija istraživanog područja	27
Slika 10. Prikaz ručne klasifikacije oblaka točaka u programu Pix4D mapper	28
Slika 11. Alat Point cloud editing programa Pix4D mapper	28
Slika 12. Sučelje Survey/Map modula programa RoadEng	29
Slika 13. Sučelje Terrain modula programa RoadEng	30
Slika 14. Sučelje Location modula programa RoadEng.....	31
Slika 15. Ortofoto istraživanog područja (A) i digitalni model površine (DMP) (B)	32
Slika 16. DMT istraživanog područja izrađen temeljem automatske klasifikacije oblaka točaka	33
Slika 17. Z vrijednosti validacijskih točaka dobivene očitanjem sa DMT-ova dobivenih automatskom i ručnom klasifikacijom prikazane su kako sredina (mean), sredina \pm standardna pogreška (mean \pm SE) (pravokutnik), sredina \pm 1,96 st. pogreška (mean \pm 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: *p < 0,05; **p < 0,001; ***p < 0,0001	34
Slika 18. Položajni nacrt (M 1:4000) sa prikazanim osovinskim poligonom i pozicijom profila istraživane šumske ceste	35
Slika 19. Crtani uzdužni presjek (M 1:650/6500) sa prikazanim uzdužnim razvijanjem terena i uklopljenom zaobljenom niveletom istraživane šumske ceste	36
Slika 20. Izgled normalnih poprečnih presjeka na projektiranoj trasi šumske ceste .	37

- Slika 21. Razlike u količinama iskopa na temelju projekta ŠC na podlozi digitalnog modela terena dobivenog automatskom i ručnom klasifikacijom prikazane se kako sredina (mean), sredina \pm standardna pogreška (mean \pm SE) (pravokutnik), sredina \pm 1,96 st. pogreška (mean \pm 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: *p < 0,05; **p < 0,001; ***p < 0,0001..... 38
- Slika 22. Razlike u količinama nasipa prikazane se kako sredina(mean), sredina \pm standardna pogreška (mean \pm SE) (pravokutnik), sredina \pm 1,96 st.pogreška (mean \pm 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: *p < 0,05; **p < 0, 001; ***p < 0,0001..... 39
- Slika 23. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa uzdužnog nagiba terena na pojavnost količina u iskopu 41
- Slika 24. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa uzdužnog nagiba terena na pojavnost količina u nasipu 42
- Slika 25. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa poprečnog nagiba terena na pojavnost količina u iskopu 43
- Slika 26. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa poprečnog nagiba terena na pojavnost količina u nasipu 43

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Podjela javnih prometnica i njihova duljina	1
Tablica 2. Podjela javnih cesta prema veličini dnevnog prometa	1
Tablica 3. 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 4. Kategorije nagiba i udjela površine u Hrvatskoj (Poršinsky i dr. 2014.)	8
Tablica 5. Kategorizacija bespilotnih letjelica (Europska komisija 2019.).....	16
Tablica 6. Tipovi tla G.J. „Miletka“	22
Tablica 7. Šumske zajednice G.J. „Miletka“	22
Tablica 8. Tehničke karakteristike bespilotne letjelice DJI Mavic 3 Enterprise	25
Tablica 9. Ukupne količine iskopa i nasipa na temelju različitih podloga	45

1. PROBLEMATIKA ISTRAŽIVANJA

1.1. Javna cestovna prometna infrastruktura u RH

Na temelju članka 7. stavka 2. Zakona o cestama («Narodne novine», broj 84/11, 22/13, 54/13, 148/13, 92/14, 110/19 i 144/21) i Uredbe o mjerilima za razvrstavanje javnih cesta («Narodne novine», broj 34/12), cestovna prometna infrastruktura Republike Hrvatske dijeli se na:

- ⇒ autoceste
- ⇒ državne ceste
- ⇒ županijske ceste
- ⇒ lokalne ceste

Javna cestovna mreža u Republici Hrvatskoj duga je 26.653,164 km. Od kojih čine:

Tablica 1. Podjela javnih prometnica i njihova duljina

autoceste	1.487,201 km
državne ceste	7.340,387 km
županijske ceste	9.359,208 km
lokalne ceste	8.466,368 km

Prema vrstama javne ceste se također mogu podijeliti na: ceste za motorni promet (brze ceste i autoceste) i javne ceste za mješoviti promet. S obzirom na količinu prometa gledano na razini prosječnog godišnjeg dnevnog prometa definira se razred i kategorija ceste (autocesta, razredi 1-5 i cestovne kategorije) (Kobasić 2013.)

Tablica 2. Podjela javnih cesta prema veličini dnevnog prometa

Oznaka prema prometnoj podjeli	Oznaka veličine prometa	Ukupan broj vozila u 24 sata(PGDP)
Autoceste/ brze ceste	najveći	>14000
1.razred	vrlo velik	>12000
2.razred	velik	7000-12000
3.razred	srednji	3000-7000
4.razred	malen	1000-3000
5.razred	vrlo malen	<1000

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. Šumska prometna infrastruktura

Šumska prometna infrastruktura predstavlja neizostavan preduvjet današnjeg suvremenog gospodarenja šumskim ekosustavima (Pentek i dr. 2014.). Osim uloge u najvidljivijoj fazi rada u šumarstvu, transportu drva, šumske prometnice imaju i druge, ne manje važne uloge kao što je protupožarna uloga. Tako Montorselli i dr. (2008.) govore kako dobro raspoređena mreža šumskih cesta pojednostavljuje kontrole i prevencije požara te omogućuje izravni napad na požarni front i daljnje operacije gašenja. Queen i dr. (1997.) ističu kako su šumske ceste sastavni dio mnogih ruralnih i rekreacijskih sustava u prirodi, pružajući pristup rekreacijskim sadržajima poput ribarskih jezera i kampova. Same ceste mogu se smatrati rekreacijskim sadržajima za aktivnosti poput rekreacijske vožnje, "izazovne" vožnje kao što je motocross, rally i sl., promatranja divljih životinja i razgledavanja te mnoge druge uloge poput uzgajanja i zaštite šuma, edukativnih uloga i dr. Kako bi sve navedene uloge i zadaće šumska prometna infrastruktura ispunjavala optimalno, odnosno kako ne bi imala štetan utjecaj na šumski ekosustav u kojem se nalazi, potrebno je uspostaviti optimalnu mrežu šumskih prometnica na terenu te ih redovno održavati (Pentek i dr. 2014). Prema Zakonu o šumama (Narodne novine br. 68/18, 115/18, 98/19, 32/20, 145/20, 101/23), šumska infrastruktura obuhvaća prometnu infrastrukturu i druge građevine u šumama i na šumskom zemljištu namijenjene njihovom gospodarenju te je sastavni dio šume i šumskog zemljišta.

Podjela šumske prometne infrastrukture je na primarnu, sekundarnu i na posebnu šumsku prometnu infrastrukturu (Šikić i dr. 1989.). Primarnoj šumskoj prometnoj infrastrukturi pripadaju sve kategorije šumskih cesta te one javne ceste koje se mogu koristiti pri radovima u šumarstvu (najčešće županijske i lokalne ceste, odnosno javne ceste nižih kategorija) (Šikić i dr. 1989.). Sekundarnu šumsku prometnu infrastrukturu čine sekundarne šumske prometnice: traktorski putovi, traktorske vlake i žične linije. Navedene sastavnice sekundarne šumske prometne infrastrukture namijenjene su prvenstveno za privlačenje drva od mjesta skupljanja drva do pomoćnoga stovarišta (primarni transport drva) te mogu služiti i za izvršavanje zadataka predviđenih planom gospodarenja (Šikić i dr. 1989.).

- ⇒ Šumske ceste - kao trajni građevinski objekti omogućuju stalan promet motornim vozilima radi obavljanja zadataka koji su predviđeni planom gospodarenja. Prilikom izgradnje šumskih cesta trajno se oduzima plodno šumsko tlo (osim u slučaju njihova zatvaranja i revitalizacije staništa). Čine ih donji i gornji ustroj sa svim tehničkim obilježjima ceste (Šikić i dr. 1989.).
- ⇒ Traktorski putovi su građevinski objekti trajnoga karaktera (osim u slučaju njihova zatvaranja i revitalizacije staništa), a izgrađeni su samo od donjeg ustroja. Vežu se uz nagnute terene, teže građevinske kategorije materijala i područjima u kojima su prisutne površinske prepreke (Šikić i dr. 1989.).

- ⇒ Traktorske vlake su privremene sekundarne šumske prometnice koje se formiraju probijanjem trase kroz šumu. Proces uključuje eventualno uklanjanje panjeva, a nastaju uslijed ponovljenog prolaska strojeva za izvlačenje drva (poput skidera ili forvardera) istim putem. Ove prometnice su tipične za ravne terene, gdje se koriste materijali niže građevinske kategorije i nema značajnih površinskih prepreka, što omogućava lak prolaz (Šikić i dr.1989.).



Slika 1. Prikaz šumske prometne infrastrukture; A) Šumska cesta ((Izvor: www.directindustry.com), B) Traktorska vlaka (Pentek i Papa 2021)

1.3. Primarna šumska prometna infrastruktura

Prema Pravilniku o provedbi intervencije 73.08. »Izgradnja šumske infrastrukture« iz Strateškog plana Zajedničke poljoprivredne politike Republike Hrvatske 2023. – 2027.) (NN 90/2024), šumske ceste dijelimo na:

- ⇒ spojne ceste (ŠC) - spajaju gospodarske šumske ceste i javne ceste i s njima tvore prometnu mrežu gospodarskih cesta šireg šumskog područja
- ⇒ glavne šumske ceste (GŠC) - prolaze kroz šumsko područje i tako spajaju šumski kompleks i javne prometnice
- ⇒ sporedne šumske ceste (SŠC) - razdvajaju se od glavne šumske ceste te ulaze u pojedine dijelove šumskog kompleksa
- ⇒ prilazne šumske ceste A (PŠCA) - mogu se razdvajati od glavnih ili sporednih šumskih cesta, prolaze kroz šumski kompleks do određenih manjih ili većih šumskih radilišta
- ⇒ prilazne šumske ceste B (PŠCB) – razlikuju se od PŠCA po tome što se bankine u pravilu ne izvode (ili se izvode dimenzija 0,25m.)



Slika 2. Razredba šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014.)

Tablica 3. 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		Tlocrtni 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 cesta (GŠC)	Šk=4,5-5,00 m		RT =70(50) m	mimoilaznice se ne projektiraju	RT = 4%	RT =1000 m	RT =800 m	RT/BT/PT = 40 m
			BT=40(30) m		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 ≤ 25 m = 6%					
					na mostovima = 6%			
	šb=0,75-1,00 m							
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	

Kategorija prometnice	Elementi poprečnog presjeka		Tlocrtni 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						
			PT= 20 (18) m		PT= 10 (12)%	PT= 500 m	PT= 300 m	
	šb=0,75-1,00 m	šb=0,5 - 0,75 m	Z= 12 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	RT = 6%	RT =600 m	RT =400 m	RT/BT/PT = 25 m

Kategorija prometnice	Elementi poprečnog presjeka		Tlocrtni 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		BT= 18 (15) m PT= 18 (15) m Z= 10 (8) m	prema potrebi dmax = ≤150-300 m	BT= 12 (15)% PT= 15 (18)%	konveksna	konkavna	
	2 prometna traka	1 prometni trak				BT=300 m	BT=150 m	
						PT= 300 m	PT= 150 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).

1.4. Karakteristike šumskih cesta s obzirom na reljefno područje

Reljef ima ključnu ulogu u planiranju i izgradnji šumskih prometnica, kao i u izvođenju svih radova u šumarstvu. Na temelju karakteristika reljefa određuje se lokacija i način planiranja prometnica, kao i izbor sustava za pridobivanje drvne mase (Janeš i dr. 2021).

Iako zauzima relativno malu površinu, Hrvatska se odlikuje izuzetno raznolikim reljefom. Veći dio zemlje čine nizine, s oko 53% teritorija ispod 200 metara nadmorske visine. Otprilike 26% površine čine brežuljkasti predjeli i pobrđa visine između 200 i 500 metara, dok preostalih 21% teritorija obuhvaća područja koja su viša od 500 metara nadmorske visine (Hrvatska.eu – Zemlja i Ljudi, n.d.).

Pored reljefa, nagib terena ima značajan utjecaj na šumarstvo, a u Hrvatskoj varira od 0° do više od 55° (Lozić 1996.). Nagib terena spada u makrotopografske karakteristike koje utječu na kretanje vozila, pri čemu svi kotači vozila dolaze u kontakt s istim makrotopografskim uvjetima. Mellgren (1980) nagib terena s obzirom na izvođenje šumskih radova podijeljen u 5 kategorija.

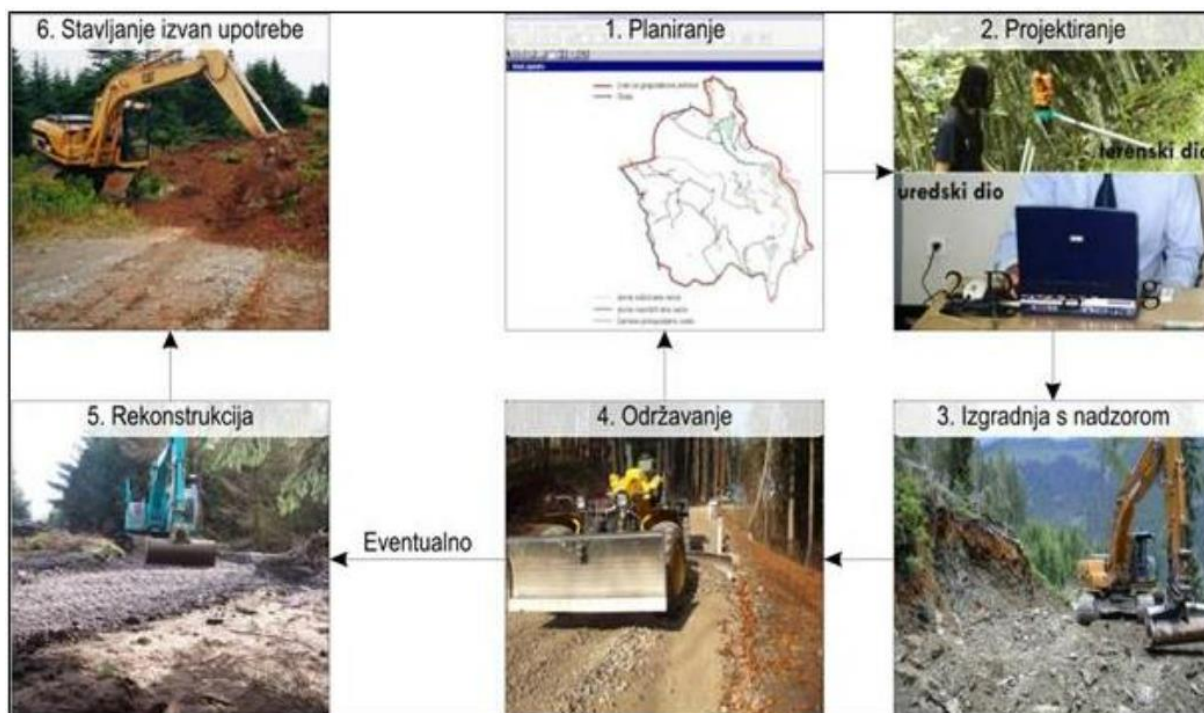
- ⇒ Ravničarski teren 0 – 10%
- ⇒ Blago nagnuti teren 11 – 20 %
- ⇒ Umjereno nagnuti teren 21 – 33%
- ⇒ Strmi teren 34 – 50%
- ⇒ Nagnuti teren >50%

Tablica 4. Kategorije nagiba i udjela površine u Hrvatskoj (Poršinsky i dr. 2014.)

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

1.5. Uspostava optimalne mreže šumskih cesta

Šumska prometna infrastruktura koja je optimalno postavljena u prostoru, projektirana i izvedena te regularno održavana, osnova je suvremenoga šumarstva (Heinimann 2017.). Optimalna otvorenost određenog područja šumskim prometnicama predstavlja krajnji cilj otvaranja šuma, a ostvaruje se postizanjem najmanjih kumulativnih troškova privlačenja drva zajedno s troškovima izgradnje i održavanja šumskih prometnica (Sessions 2007.). Svaku od faza uspostave optimalne mreže šumskih prometnica na terenu koja se odvija kroz 4 obavezne radne faze (planiranje, projektiranje, izgradnja s nadzorom i održavanje) (Pentek i dr. 2006.) nužno je provesti s ciljem da novoizgrađene šumske prometnice omogućuju pristup šumskim površinama s minimalnim mogućim troškovima za izgradnju i održavanje (Akay i dr. 2021., Dodson 2021.).



Slika 3. Faze uspostavljanja optimalne mreže šumske prometne infrastrukture (Pentek i dr. 2014.)

1.5.1. Planiranje šumskih prometnica

Prema razini na kojoj se planiranje provodi, složenosti, vremenskom razdoblju za koje se provodi planiranje te s obzirom na veličinu otvaranog područja, planiranje šumskih prometnica se može podijeliti na tri razine: 1. Strategijsko ili globalno, 2. Taktičko ili generalno i 3. Operativno ili lokalno planiranje (Pentek i dr. 2014.).

1. Strategijsko planiranje mreže šumskih prometnica obavezno je uključeno u Osnovu područja na razini Republike Hrvatske, ali može biti i dio drugih planova. Na najvišoj razini, planiranje mreže šumskih cesta treba prema Penteku i dr. (2014.):

- ⇒ odrediti reljefna područja uzimajući u obzir mjerljive terenske i sastojinske parametre,
- ⇒ definirati postojeću te ciljanu klasičnu otvorenost (gustoću mreže šumskih prometnica) napraviti njihovu analizu i usporedbu
- ⇒ ustanoviti buduće smjernice primarnoga i sekundarnog otvaranja šuma i odrediti modele koji su primjenjivi u različitim reljefnim područjima
- ⇒ definirati smjernice za moguće i pogodne sustave pridobivanja drva pojedinih reljefnih područja, uz uvažavanje sastojinskih čimbenika te postojeće otvorenosti šuma.

2. Taktičko planiranje rezultira izradom studije otvaranja šuma (primarnog i/ili sekundarnog) za određenu gospodarsku jединicu. Sveobuhvatna studija primarnog i sekundarnog otvaranja šuma omogućuje sukladno Penteku i dr. (2014.):

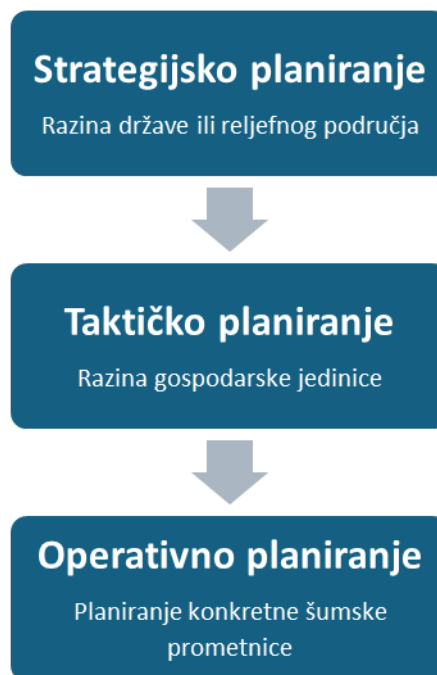
- ⇒ sustavno, plansko i kontrolirano otvaranje šuma

- ⇒ racionalizaciju troškova izgradnje šumskih prometnica
- ⇒ sustavno, plansko i kontrolirano održavanje i popravak šumskih prometnica
- ⇒ racionalizaciju radova održavanja i popravaka šumskih prometnica
- ⇒ planiranje, kontrolu i racionalizaciju radova pridobivanja drva
- ⇒ smanjivanje negativnoga utjecaja šumskih prometnica i radova pridobivanja drva na okoliš (šumski ekosustav) i dr.

3. Nakon završetka taktičkog planiranja šumskih prometnica, odnosno izrade studije primarnog i sekundarnog otvaranja šuma, kojom se dobiva optimalna mreža šumskih prometnica prelazi se na operativno planiranje. Operativno planiranje se provodi za svaku šumsku prometnicu zasebno, prije faze njenog projektiranja. Opseg područja koje se otvara ovisi o vrsti i kategoriji šumske prometnice te njenoj duljini. Tako se razlikuju otvaranja za skupinu pojedinih odjela ili odsjeka, određeno gravitacijsko područje, pojedinu sječinu ili njen dio (Pentek i dr. 2014.).

Studije primarnog i sekundarnog otvaranja šuma, izrađene uz pomoć GIS sustava, definiraju preliminarne trase budućih dijelova šumske transportne mreže. Te preliminarne trase određene su pomoću glavnih lomnih točaka, gdje trasa mijenja smjer. Koordinate tih točaka, a time i cijele trase šumske prometnice, mogu se uz pomoć visokokvalitetnog GPS prijemnika precizno i brzo prenijeti na teren. Na taj način postavljene preliminarne trase na terenu zamjenjuju nulte linije koje su se ranije projektirale klasičnom metodom "koraka šestara" na topografskim kartama (Pentek i dr. 2014.).

U idejnu trasu šumske prometnice uklapa se operativni poligon, a nakon toga definira se osovinski poligon šumske ceste; zatim slijede poznate sastavnice faze projektiranja šumskih prometnica (Pentek i dr. 2014.).



Slika 4. Razine planiranja šumskih cesta (Pentek i dr. 2014.)

1.5.2. Projektiranje šumskih cesta

Projektiranje šumske ceste podrazumijeva njezino osmišljavanje, detaljan opis te računalnu i grafičku obradu. Tek kada je projekt u potpunosti dovršen, moguće je provesti analizu i započeti izgradnju. Pičman (2007.) proces projektiranja šumskih cesta dijeli na dvije odnosno tri faze:

1. Prikupljanje općih i tehničkih podataka,
2. Trasiranje (terenska izmjera),
3. Izrada projekta (uredska obrada podataka i prikaz rezultata).

U prvoj fazi, prikupljaju se podaci koji predstavljaju temelj za izradu projekta. Opći podaci su većinom ekonomski, dok tehnički uključuju geometrijske, geodetske, geološke, hidrološke i druge relevantne informacije (Pičman 2007.).

Druga faza, trasiranje, sastoji se od dva dijela: trasiranje i izrada projekta. Trasiranje podrazumijeva definiranje linije buduće ceste, dok izrada projekta uključuje izradu idejnog, generalnog i glavnog projekta. (Pičman 2007.).

Postoje dva pristupa projektiranju šumskih cesta:

- ⇒ Skraćeni postupak: obuhvaća izradu idejnog i glavnog projekta,
- ⇒ Puni postupak: uključuje izradu idejnog, generalnog i glavnog projekta.

Šumske ceste mogu biti projektirane kroz tri vrste projekata:

- ⇒ Idejni projekt,
- ⇒ Generalni projekt,
- ⇒ Glavni/izvedbeni projekt.

Idejni projekt se fokusira na rješenja trase šumske ceste te uključuje tehničke i ekonomske studije. Izrađuje se na kartama u različitim mjerilima (1:5000 do 1:50000) koje uključuju gospodarsku podjelu, katastar prometne infrastrukture i hidrografiju. Ovdje se također proučavaju podaci o drvnjoj zalihi i planu sječe. Više verzija trase se prenosi na teren, nakon čega se odabire najpovoljnija inačica, koja se potom koristi za izradu orijentacijskog troškovnika i tehničko-ekonomske studije (Pičman 2007.).

Generalni projekt temelji se na prihvaćenom idejnom projektu. Trasiranje se obavlja pomoću tahimetrijskog snimanja što podrazumijeva mjerenje kose duljine, horizontalnog kuta i vertikalnog kuta s poznate točke prema nepoznatim točkama te se određuju relativne polarne koordinate točaka terena, nakon čega se u uredskom radu izrađuje plan slojnica, određuju horizontalne krivine i izrađuju poprečni presjeci za proračun zemljanih radova. Generalni projekt pruža detaljnije tehničke i ekonomske podatke o budućoj cesti (Pičman 2007.).

Glavni/izvedbeni projekt je najkompletniji, zasnovan na idejnom i/ili generalnom projektu. Sadrži sve potrebne elemente za započinjanje izgradnje, uključujući tehničke opise, položajne nacрте, presjeke i proračune, te troškovnike (Pičman 2007.). Nastaje

na temelju idejnog i generalnog ili samo idejnog projekta. To je najkompletniji projekt koji je, jedini od svih projekata, osnova za započinjanje postupka izgradnje (Pentek i Papa 2021.).

Za terensku izmjeru i prikupljanje podataka koriste se tri metode: klasična metoda (teodolit, nivelir), suvremena metoda (geodetska mjerna stanica) (Papa i dr. 2017.) i eksperimentalna metoda (GNSS uređaji, podaci dobiveni fotogrametrijskom analizom, lidarski podaci) koja je u fazi ispitivanja (Lovrinčević i dr. 2024.). Sve tri metode imaju za cilj prikupljanje terenskih podataka s ciljem njihove obrade i izrade glavnog/izvedbenog projekta šumske ceste.

1.5.2.1. Metode i uređaji prikupljanja terenskih podataka

U šumarstvu najveći značaj imaju klasična i suvremena metoda terenske izmjere. Primjenom klasične i suvremene metode izmjere na terenu koristi neposredno ili direktno trasiranje šumskih cesta Pentek i dr. (2014.).

Svaka metoda, bez obzira o kojoj je riječ, uključuje instrument te odgovarajući pribor, zatim propisani postupak izvođenja mjerenja, postupak obrade izmjerenih veličina i način izračuna traženih veličina (Šimić 2017.).

1.5.2.2. Klasična metoda terenske izmjere prilikom projektiranja šumskih cesta

Tradicionalni način prikupljanja terenskih podataka uz pomoć teodolita, nivelira i padomjera još uvijek je u širokoj upotrebi u šumarstvu Hrvatske. Prema Papi i Penteku (2023.), prilikom planiranja šumskih cesta provode se određeni koraci nakon određivanja osovinskog poligona, a to uključuje:

- ⇒ Iskolčavanje glavnih, međutočaka i detaljnih točaka trase šumske ceste uz korištenje teodolita i dodatne opreme,
- ⇒ Nivelacija glavnih, međutočaka i detaljnih točaka trase uz pomoć nivelira i ostale potrebne opreme,
- ⇒ Stacioniranje glavnih, međutočaka i detaljnih točaka trase pomoću mjerne vrpce ili laserskog daljinomjera,
- ⇒ mjerenje poprečnih profila s Meridijan padomjerom ili koristeći metodu ravnjače i podravnjače,
- ⇒ procjenu građevinske kategorije materijala,
- ⇒ snimanje trase putem GPS uređaja,
- ⇒ određivanje položaja i karakteristika cestovnih objekata,
- ⇒ prikupljanje dodatnih podataka,
- ⇒ finalno označavanje i stabilizaciju profila.

Treba uzeti u obzir da se kod tradicionalnih metoda terenskog mjerenja poprečnih presjeka terena za svaki profil šumske ceste koristi metoda ravnjače i podravnjače s preciznošću od 5 cm, dok moderna mjerna oprema omogućuje postizanje milimetarske preciznosti. Zbog toga Pentek (2012.) ističe kako suvremene metode terenskih mjerenja pružaju znatno veću preciznost i točnost rezultata.

Prednost tradicionalnog pristupa u odnosu na suvremeni, prema Papi i dr. (2017.), jest niži trošak nabave mjernih uređaja i manji izdaci za njihovo održavanje.

1.5.2.3. Suvremena metode terenske izmjere prilikom projektiranja šumskih cesta

Izmjera suvremenom metodom podrazumijeva uporabu totalne stanice Papa i dr. (2017.). Mjerne, odnosno totalne stanice, elektronički su uređaji koji omogućuju precizno određivanje lokacije u tri dimenzije korištenjem elektroničkog mjerenja udaljenosti (Rick 2018.). Današnje totalne stanice integriraju više funkcija u jednom uređaju, kombinirajući elektronički teodolit, elektrooptički daljinomjer i unutarnju memoriju s računalom. Na taj način totalna stanica obavlja funkcije različitih geodetskih instrumenata istovremeno (Rick 2018.). Totalna stanica sastoji se od teleskopa, tipkovnice za unos podataka (poput koordinata i programskih naredbi), zaslona za prikaz rezultata, te ugrađenog elektrooptičkog daljinomjera (eng. Electronic Distance Measurement) smještenog u rotirajućoj glavi koja sadrži teleskop. Stanica se postavlja na stativ i opremljena je postoljem za horizontiranje. Radi na principu slanja infracrvenih ili radijskih signala prema objektu, koji se potom odbijaju natrag do uređaja. Vrijeme potrebno da se signal vrati koristi se za izračunavanje udaljenosti između stanice i objekta (Gopi i dr. 2018.). Prema istim autorima, u praksi se totalna stanica postavlja iznad poznate fiksne točke unutar koordinatnog sustava, te se određuje usmjerenje i mjeri visina instrumenta. Nakon što se instrument pravilno postavi, može se započeti sa preciznom izmjerom i snimanjem objekata, uključujući lokacije artefakata, dimenzije građevina, topografske karakteristike ili druge značajke terena. Kod same izrade šumske ceste nakon uklapanja osovinskog poligona na trasu šumske ceste te nakon što su iskolčeni svi profili može se krenuti na snimanje s totalnom stanicom. Snimaju se svi profili na trasi šumske ceste, a okomito na uzdužnu os snima se i poprečni izgled terena odnosno sve točke terena u kojima je poprečni nagib promijenio vrijednost u istom pojasu, odnosno 8 m na jednu i drugu stranu u odnosu na centralnu os šumske ceste. Nakon, na ovakav način prikupljenih podataka, obrada istih nastavlja se u uredu u koristeći jedan od specijaliziranih programskih paketa za projektiranje šumskih cesta Papa i dr. (2017.).

Prednosti suvremene u odnosu na klasičnu metodu terenske izmjere (u prosječnim sastojinskim i stanišnim uvjetima) (Pentek 2012.):

- ⇒ veća točnost,
- ⇒ jednostavniji i brži rad,
- ⇒ manji broj pomoćnih radnika,
- ⇒ manja mogućnost pogreške na terenu,
- ⇒ brži (automatski) prijenos podataka u osobno računalo,
- ⇒ manja mogućnost pogreške pri unosu terenskih podataka u osobno računalo.

Nedostaci suvremene u odnosu na klasičnu metodu terenske izmjere (Pentek 2012.):

- ⇒ skuplji uređaj,
- ⇒ skuplje održavanje i popravci,
- ⇒ veće dimenzije i težina uređaja,
- ⇒ složenija edukacija.

Osim klasične i suvremene metode terenske izmjere šumske prometne infrastrukture, sve više su u upotrebi i moderni uređaji kao što su bespilotne letjelice opremljene različitim sensorima (RGB kamere, lidarski senzori), mobilni ili stacionarni laserski senzori, GNSS uređaji i slično. Upotreba bespilotnih letjelica u šumarstvu i prilikom izmjere šumske prometne infrastrukture detaljnije će biti opisana u poglavlju *1.6 Bespilotne letjelice i primjena u šumarstvu*.

1.5.3. Uredska faza projektiranja šumskih cesta

Danas je gotovo nemoguće postići rezultat visoke točnosti pri projektiranju šumskih cesta u kratkom vremenu bez upotrebe specijaliziranih softverskih alata za projektiranje šumske cestovne infrastrukture (Lepoglavec i dr. 2011.). Moderni projekti šumskih cesta, posebno glavni i izvedbeni, izrađuju se uz pomoć naprednih računalnih programa. Ključna uloga tih programa je uredska obrada podataka i generiranje rezultata.

Upotreba računalnih programa donosi brojne prednosti u odnosu na tradicionalne, ručne metode projektiranja. Neke od tih prednosti uključuju automatski unos terenskih podataka (npr. pomoću diferencijalnog GPS-a, totalne stanice ili LIDAR-a), povećanu preciznost, bržu izradu projekata, jednostavnije ispravke te kvalitetnija i ujednačenija rješenja. Osim toga, programi omogućuju simulaciju različitih rješenja i izradu više inačica projekata, čime se olakšava optimizacija dizajna (Pentek 2010.).

U Hrvatskoj se za projektiranje šumskih cesta koriste softveri „CESTA“, razvijen od slovenske tvrtke SoftData te RoadEng kanadske tvrtke Softree. Na međunarodnoj razini koriste se i drugi programi poput Bentley PowerCivil (SAD), Plateia (SAD), CivilStrips (Pakistan), Dioklos (Grčka), CalQuan (Indija), Roadpac (Češka) i Anadelta Tessera (Grčka) (Lepoglavec 2014.).

1.5.4. Izgradnja šumskih cesta s nadzorom

Faze izgradnje šumske ceste na terenu možemo podijeliti na: pripremljene radove, radove na donjem ustroju, radove na objektima odvodnje, betonske i kamenarske radove, radove na gornjem ustroju, sanaciju tla i klizišta, izgradnju objekata na trasi šumske ceste, ostale radove (Pentek 2012.).

Različiti reljefni uvjeti zahtijevaju primjenu specifičnih metoda i tehnologija prilikom izgradnje šumskih cesta (Pentek 2012.). Prema istom autoru prilikom gradnje šumskih cesta u nizinskim reljefnim područjima koriste se dozeri i bageri, dok su za brdska i planinska reljefna područja prikladniji i ekološki prihvatljiviji bageri (Winkler 1998.). Sedlak (1996.) naglašava da je na strmim terenima, gdje poprečni nagib prelazi 40 %, obavezna upotreba bagera opremljenog hidrauličkim čekićem. Izgradnja

šumskih cesta uključuje kontinuirani i povremeni nadzor radova, pri čemu voditelj gradilišta redovito prati rad strojara i svakodnevno unosi podatke u građevinski dnevnik i građevinsku knjigu. Nadzorni inženjer svakodnevno provjerava rad voditelja gradilišta i izvođača te ovjerava potrebnu dokumentaciju. Također, glavni nadzorni inženjer povremeno kontrolira postupak izgradnje prema potrebi, dok konačnu kontrolu vrši Povjerenstvo za primopredaju radova.

1.5.4.1. Radovi na donjem ustroju

Donji ustroj, donji stroj, tijelo ili trup šumske ceste je temeljna, umjetna konstrukcija izrađena od zemlje ili drugog materijala na kojoj se izvodi gornji ustroj (Pentek i Papa 2021.).

U okviru postupka projektiranja, u fazi prikupljanja općih i tehničkih podataka, potrebno je, prije započinjanja trasiranja, obaviti istraživanja i prikupljanje podataka te izraditi ili pribaviti nekoliko elaborata koji će poslužiti kao osnova za projektiranje donjeg ustroja šumske ceste, a prema Penteku i Papi 2021. to su:

- ⇒ Geotehnička istraživanja
- ⇒ Hidrometeorološka istraživanja
- ⇒ Hidrološka i hidraulička istraživanja

Prema analizama Pape i dr. (2023.) postoje mnogi utjecajni faktori (nagib terena, vrijednost kolnika, kategorija materijala) koji utječu na udio troškova zemljanih radova u ukupnim troškovima izgradnje šumske ceste. Na analiziranim šumskim cestama uočena vrlo velika razlika u udjelu navedenih troškova koji se kretao od maksimalnih 74,22% do minimalnih 43,63% u odnosu na ukupnu cijenu izgradnje.

Radovi na donjem ustroju ubrajaju se u kompleksne aktivnosti tijekom izgradnje šumskih cesta. Izrada nasipa uključuje pažljivo planiranje transportiranog materijala iz iskopa različitih kategorija, njegovo polaganje u ravnomjerne slojeve debljine 30 cm te sabijanje do zadane zbijenosti (Dabić 2021.).

1.5.5. Održavanje šumskih cesta

Redovito održavanje šumskih cesta ključno je za produljenje njihovog vijeka trajanja, smanjenje troškova održavanja i povećanje sigurnosti svih sudionika u prometu. Također, pravilno održavanje smanjuje negativan utjecaj na prirodne resurse i osigurava dugoročno korištenje šumskih cesta (Anon. 2000.).

S obzirom na vrstu i intenzitet, održavanje šumskih cesta dijeli se na redovito, investicijsko i periodičko održavanje (Potočnik 1992.). Također, održavanje se može podijeliti s obzirom na dio šumske ceste na koji se odnosi i to na održavanje donjega i održavanje gornjega ustroja, pri čemu se prvo odnosi na održavanje cestovne infrastrukture, a drugo na održavanje kolničke konstrukcije. Glavni uzroci oštećenja šumskih cesta uključuju loše planiranje i nepravilnu uporabu, kao i djelovanje prirodnih sila. Prometno opterećenje, osobito tijekom transporta drvnih sortimenata, značajno utječe na stanje i propadanje šumskih cesta. Upravo iz tog razloga šumske ceste s

većim prometnim opterećenjem trebaju biti pravilno dimenzionirane i češće održavane u usporedbi s onima s manjim opterećenjem (Potočnik i dr. 2005.).

1.6. Bepilotne letjelice i primjena u šumarstvu

Bepilotne letjelice su sve letjelice koje imaju mogućnost letenja u zraku bez posade, a može se njima upravljati (Bendea i dr. 2007.). Dije se prema svrsi na civilne, vojne i istraživačke (Bendea i dr. 2007.). S obzirom na tehnologiju dijelimo ih na letjelice s fiksnim krilima i letjelice s rotirajućim krilima (Krevh 2018.).

Prema pravilniku o sustavima bespilotnih zrakoplova (NN 49/2015) letjelice dijelimo prema operativnoj masi na:

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

Prema novoj europskoj regulativi (Europska komisija 2019.) bespilotne letjelice podijeljene su 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 5).

Bepilotne letjelice predstavljaju inovativno rješenje za precizno mapiranje šumskih područja i analizu njihovih struktura. Njihova sposobnost da snimaju slike visoke rezolucije, često do 7 cm po pikselu (Getzin i dr. 2014.), omogućuje detaljno prepoznavanje manjih struktura, poput praznina krošanja veličine samo 1 m², što je ključno za procjenu bioraznolikosti u šumama (Getzin i dr. 2014.). Ove letjelice pružaju fleksibilnost u planiranju letova i smanjuju utjecaj loših vremenskih uvjeta, poput oblačnosti, zahvaljujući svojoj niskoj visini leta. Kao rezultat, bespilotne letjelice postaju dragocjeni alati za praćenje ekoloških fenomena i upravljanje prirodnim resursima u raznim ekosustavima (Getzin i dr. 2014.).

Korištenje bespilotnih letjelica (UAV) vrlo je korisno u smislu prikupljanja visokokvalitetnih i visoko-razlučivih podataka za planiranje izgradnje šumskih cesta i procjenu alternativnih ruta (Bičić i Zeybek 2020.). Bepilotne letjelice (UAV) pokazale su se također prikladnima i za otkrivanje oštećenja na cestama (Bičić i Zeybek 2020.).

Tablica 5. Kategorizacija bespilotnih letjelica (Europska komisija 2019.)

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,	< 68 km/h, ograničenje visine,	Ograničenje visine, slijetanje u nuždi kod	Ograničenje visine, slijetanje u nuždi kod gubitka	Nije dozvoljeno

	ograničenje visine	slijetanje u nuždi kod gubitka signala	gubitka signala, način male brzine, zadane točke loma	signala, način male brzine, zadane točke loma	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

* Kategorije 5 i 6 donose se na posebne letjelice i nadogradnje nižih kategorija te nisu prikazane u tablici

1.7. Digitalna fotogrametrija

Fotogrametrija, koja se temelji na pojmovima "foto", "gram" i "metrija", predstavlja znanost i tehniku određivanja oblika, veličine ili položaja objekata pomoću snimanja, mjerenja i analize fotografskih slika. Ova metoda koristi geometrijske i optičke principe koji omogućuju djelomičnu ili potpunu rekonstrukciju objekata na temelju snimaka. Jedna snimka može pružiti dvodimenzionalne informacije, što omogućuje potpunu rekonstrukciju ravnih objekata, poput zemljišta ili pročelja zgrada, dok za trodimenzionalne rekonstrukcije, poput obrisa predmeta, potrebne su dvije snimke iz različitih kutova, tzv. stereopar. Ovakvo snimanje zove se stereoskopsko, a rekonstrukcija pomoću tih snimaka poznata je kao stereofotogrametrija (Kružić 1897.).

Prema položaju snimanja, fotogrametrija se dijeli na aerofotogrametriju, gdje se objekti snimaju iz zrakoplova, satelita ili sonde, i terestričku fotogrametriju, kod koje se objekti snimaju s tla. Aerofotogrametrija je usmjerena na vertikalno snimanje, dok je terestrička fotogrametrija horizontalna. Snimanje se najčešće provodi posebno kalibriranim kamerama, što olakšava orijentaciju snimke i rekonstrukciju geometrijskih odnosa. Stereoskopsko snimanje bliskih objekata obavlja se stereokamerom, dok se za zračne snimke koriste automatske aerokamere. Danas su digitalne kamere i mobilni uređaji gotovo u potpunosti zamijenili klasične fotografske kamere (Anon. 2024.).

Analitička fotogrametrija koristi računalnu obradu za numeričku rekonstrukciju, dok digitalna fotogrametrija, u kombinaciji s tehnikama računalne obrade slike, omogućuje gotovo potpuno automatiziranu izradu trodimenzionalnih modela. (Anon. 2024.).

Na temelju fotogrametrijske metode snimanja generira se trodimenzionalni oblak točaka, koji nastaje procesom slikovne korelacije. Taj proces automatski

identificira koordinate odgovarajućih točaka (piksela) na lijevoj i desnoj aerosnimci (stereopar), koristeći njihove radiometrijske i geometrijske sličnosti (White i dr. 2013.). Kada je korelacija zadovoljavajuća, točke se uključuju u daljnju obradu (aerotriangulacija, digitalno modeliranje terena i dr.). U kasnijim fazama, oblak točaka koristi se kroz interpolacijske postupke za izradu modela terena, posebno digitalnog modela površine (DSM, prema eng. Digital Surface Model).

Fotogrametrija se koristi u različitim područjima zbog svoje sposobnosti prikupljanja podataka bez izravnog kontakta s objektima. U geodeziji se aerofotogrametrija primjenjuje za brzu izmjeru zemljišta i izradu karata, dok u inženjeringu pomaže pri projektiranju prometnica, u hidrotehnici, urbanizmu i prostornom planiranju. Aerosnimke se također koriste u arheologiji, geologiji, geografiji i vojnim svrhama. Terestrička fotogrametrija našla je primjenu u kriminalistici, arhitekturi i zaštiti kulturne baštine, dok su moderni digitalni postupci proširili njenu primjenu na medicinu i industriju (Kružić 1897.). Najčešći programi koji se danas koriste za fotogrametrijsku analizu su: Pix4d, Agisoft Metashape, RealityCapture, Autodesk ReCap, Meshroom (AliceVision), 3DF Zephyr, DroneDeploy i dr. Kao krajnji rezultat fotogrametrijske analize mogu se dobiti podaci kao što su: digitalni model terena (DMT), oblak točaka, ortofotografija i dr.

1.8. Digitalni model terena (DMT) i način korištenja u šumarstvu

Reljef je jedan od ključnih geografskih elemenata jer oblikuje osnovni izgled terena i značajno utječe na klimu, vegetaciju, raspored stanovništva i brojne druge aspekte geografskog prostora (Pernar 1996.). Reljef obuhvaća razne oblike Zemljine površine, uključujući ravnine, neravnine, uzvišenja i udubljenja (Peterca i dr. 1974.). Pojam digital terrain model (DMT) uveli su Miller i LaFlamme (1958.), definirajući ga kao statističku reprezentaciju kontinuirane površine terena pomoću velikog broja odabranih točaka s poznatim koordinatama X, Y i Z unutar zadanog koordinatnog sustava. Prema tome, Digitalni model terena (ekvivalent inozemnom pojmu DMT (Krtalić i dr. 2019.)) predstavlja skup točaka određenog dijela Zemljine površine, čije su koordinate organizirane i pohranjene u formatu koji omogućuje računalnu obradu (Kušan 1994.).

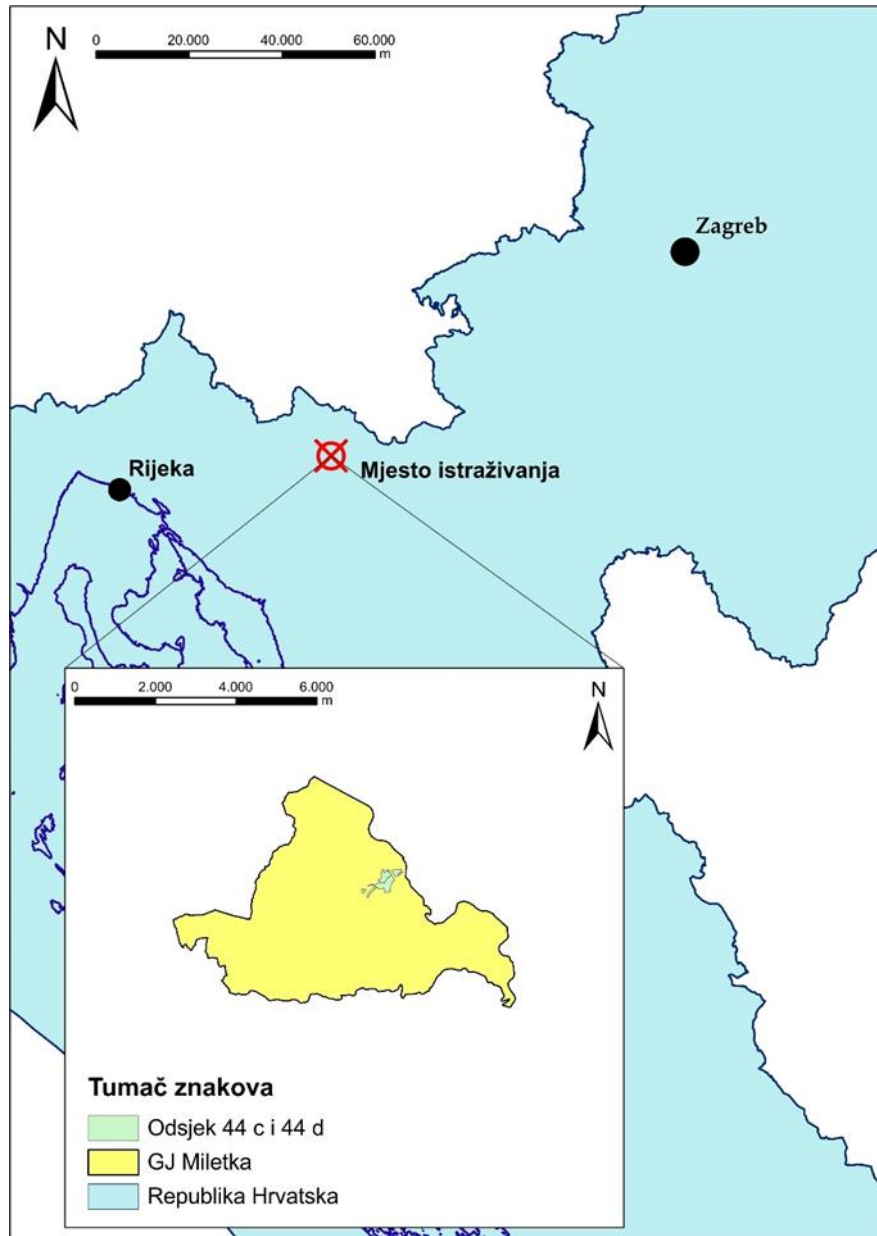
Prikazivanje reljefa, trodimenzionalnog objekta, na dvodimenzionalnoj površini kartografski je izazov. Cilj je postići geometrijsku preciznost kako bi se omogućili precizni mjerni radovi, ali i osigurati vizualnu jasnoću koja omogućuje razumijevanje trodimenzionalnosti prikazanog prostora. Za izradu i korištenje digitalnih modela terena koriste se specijalizirani računalni programi koji uključuju tri osnovna dijela:

- ⇒ Unos podataka (terenske izmjere, stereo snimke, digitalizirani zemljovid),
- ⇒ Obrada i analiza podataka (izrada DMT-a, povezivanje DMT-a s bazama podataka, analiza modela),
- ⇒ Prikaz podataka (3D prikazi, ptičja perspektiva, animacije izrađenih 3D modela).

Upotreba digitalnih modela reljefa postala je standard u šumarstvu, bilo u tehničkim ili biološkim disciplinama. U šumarstvu, koje uključuje interdisciplinarni pristup, kao što su ekologija, prostorno planiranje, turizam i zaštita okoliša, velika količina prikupljenih podataka zahtijeva suvremene metode za učinkovito upravljanje prirodnim resursima. Reljef kao ekološki čimbenik može se koristiti za izračunavanje stanišnih karakteristika poput nagiba terena, izloženosti i insolacije. DMT omogućuje brzo i jednostavno dobivanje ovih podataka, čime olakšava proučavanje staništa životinja (Pernar 1996.).

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Terensko istraživanje provedeno je na području državnih šuma Republike Hrvatske kojima gospodari tvrtka Hrvatske šume d.o.o Zagreb, točnije na području uprave šuma podružnice Delnice, šumarije Vrbovsko, gospodarska jedinica (G.J) „Miletka“, odsjek 44 c i odsjek 44 d (slika 5). Ukupna površina navedene G.J. iznosi 1329,80 ha od kojih je 1287,07 ha obrasle površine šuma.



Slika 5. Mjesto istraživanja, UŠP Delnice, šumarija Vrbovsko, G.J. „Miletka“

2.1. Orografske i hidrografske prilike

Prirodnim značajkama gospodarske jedinice temeljno estetsko-pejzažno obilježje daje reljef jedinice. U vertikalnom smislu šume G.J. „Miletka“ prostiru se od 390 - 960 metara nadmorske visine. Najviša kota je na granici odsjeka 25b i 36c s

apsolutnom nadmorskom visinom od 959 m, a najniža uz rijeku Dobru (390 m), što znači da relativna razlika u nadmorskoj visini iznosi 550 m.

U G.J. „Miletka“ nailaze se na dva potpuno različita reljefna oblika:

I - istočni, znatno veći dio glavnog masiva nalazi se na karbonatnoj podlozi (vapnenci i dolomiti). Ovaj dio pruža se u obliku grebena od sjeverozapada prema jugoistoku s dva dominantna vrha (Lisina i Oštri vrh). U gornjem većem djelu ovog masiva gdje je vapnenačka podloga, javljaju se tipična obilježja visinskog krša: glavice, platoi, strane, vrtače, uvalice, grebeni, škrape i dr. Kamen samo ponegdje (na višim položajima) izbija na površinu. Na strmim nižim padinama (prema rijeci Dobri) prevladava dolomitna podloga sa svim njezinim karakteristikama (strme padine s duboko usječenim jarcima).

II - zapadni dio jedinice (odjeli 14 do 18) nalazi se pretežno na silikatnoj podlozi, pa se konfiguracija terena značajno razlikuje od one na kraškom terenu. Hidrografski čimbenici su ključni jer voda predstavlja temeljni uvjet za rast vegetacije, a šumska vegetacija, kao najčešća vrsta vegetacije, također utječe na vodne procese kao što su kružni tok vode, površinsko otjecanje, infiltracija vode u tlo i utjecaj na plodnost tla.

Voda u prirodi se pojavljuje u tri oblika: nadzemna, podzemna i oborinska. U krajnjem zapadnom dijelu gospodarske jedinice, voda je prisutna u većim količinama u odnosu na ostatak područja, gdje se izvori kao što su Mlaka i Studeno vrelo nalaze u donjem dijelu prema Dobri. Potoci iz ovog zapadnog dijela gospodarske jedinice ulijevaju se u Sušički jarak, koji prolazi kroz kraški masiv poznat kao kanjon Kozja greda, a kod Moravica se spaja s Dobrom.

U G.J. „Miletka“, voda se pojavljuje kroz obilne padaline i otapanje snijega, stvarajući sezonske potoke i bujice. Oborinska voda je glavni izvor vodenih dotoka za šume u G.J. "Miletka" i dostupna je u dovoljnoj količini tijekom cijele godine.

2.2. Geološka podloga i tlo

Geološku podlogu područja G.J. "Miletka" čine vapnenci i dolomiti jurske i trijaske starosti, trijaske naslage pješčenjaka, brečko konglomerata i siltnih šejlova, dok je manji dio površine jedinice na silikatnoj podlozi.

Na području G.J. „Miletka“ utvrđene su slijedeće zemljišne kombinacije tla:

- ⇒ smeđe tlo na vapnencu i dolomitu
- ⇒ crnica na vapnencu i dolomitu
- ⇒ lesivirano tlo na vapnencu - luvisol
- ⇒ rendzina
- ⇒ smeđi podzol (brunipodzol)

Tablica 6. Tipovi tla G.J. „Miletka“

Tip tla	Površina (ha)	%
Crnica na vapnencu i dolomitu	28,89	2,21
Distrično smeđe – kiselo smeđe	134,10	10,25
Smeđe tlo na vapnencu i dolomitu	873,82	66,78
Lesivirano tlo	57,73	4,41
Podzolasto smeđe	214,05	16,36
Ukupno:	1308,59	100,00

2.3. Klima

Područje G.J. „Miletka“ nalazi se u zoni srednjoeuropske klime, koju karakteriziraju dugačke i snježne zime, niska prosječna godišnja temperatura, velika zračna vlaga, kratka vegetacijska perioda, obilje oborina sa dosta jakim vjetrovima sa sjeveroistoka (bura) i jugozapada (jugo). Prema Köppenovoj klasifikaciji nalazi se u klimatskoj zoni C (snježna šumska klima), a ima oznaku Cfsbx".

2.4. Šumske zajednice

Šumske zajednice koje pridolaze u G.J. „Miletka“ navedene su u tablici (7) uz iskazanu površinu koju nastanjuju. Najzastupljenija zajednica je Bukovo-jelove šume s mišjim uhom zapadnih dinarida - *Omphalodo-Fagetum*. gdje je jela zastupljena sa 64,61 % (76 m³/ha), dok je bukve 35,32 % odnosno 42 m³/ha. Površina koju nastanjuje smreka je 15,18%.

Tablica 7. Šumske zajednice G.J. „Miletka“

Šumska zajednica	Površina (ha)	%
Sastojine sivkaste i veleresne vrbe - <i>Salicetum eleagno-daphnoidis</i> Moor 1958 (Grass 1993)	4,07	0,32
Bukova šuma s rebračom - <i>Blechno-Fagetum</i> (Horvat 1950) Tx. Et Oberd. 1958 corr. Rivas-Martinez 1962	11,39	0,88
Bukova šuma s volujskim okom - <i>Hacquetio-Fagetum</i> Košir 1962	80,52	6,26
Bukove šume s kukurjekom - <i>Helleboro nigri-Fagetum</i> Zukrigl 1973 (Pelzer 1978 nom. Illeg.)	27,15	2,11
Bukovo-jelove šume s mišjim uhom zapadnih dinarida - <i>Omphalodo-Fagetum</i> (Tregubov 1957 corr. Puncer 1980) Marinček et al. 1993	740,37	57,52
Dinarska jelova šuma s milavom na vapnenačkim blokovima - <i>Calamagrostio-Abietetum</i> Horvat (1950) Horvat in Cestar 1967	17,40	1,35
Jelova šuma s rebračom - <i>Blechno-Abietetum</i> Ht. (1938) Horvat in Cestar 1967	210,84	16,38
Smrekova šuma s kukurjekom na dolomitu - <i>Helleboro nigri-Piceetum</i> (Horvat 1958) Trinajstić et Pelcer 2005	96,26	7,48
Smrekova šuma s trokrpastom mahovinom – <i>Bazzanio-Picetum</i> Br.-Bl. Et Sissingh in Br.-Bl. Et al. 1939	99,07	7,70
Ukupno:	1287,07	100,00

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

Ukupna duljina javnih i šumskih cesta u G.J. „Miletka“ iznosi 33,80 km, od kojih se 30,93 km odnosi na šumske ceste dok se 2,87 km odnosi na javne prometnice. U izračun klasične otvorenosti šuma istraživane gospodarske jedinice uzima se ukupno 30,54 km šumskih i javnih cesta. Klasična primarna otvorenost šuma dobivena na

temelju cesta koje se koriste za potrebe pridobivanja iznosi 25,34 km/1000 ha. Prema Pravilniku o provedbi intervencije 73.08. »Izgradnja šumske infrastrukture« iz Strateškog plana Zajedničke poljoprivredne politike Republike Hrvatske 2023. – 2027, minimalna klasična otvorenost šuma gorskog područja iznosi 15 km/1000 ha, dok ciljana klasična otvorenost definirana Pravilnikom iznosi 25 km/1000 ha, što bi značilo da ova gospodarska jedinica zadovoljava oba navedena parametra.

Šumskogospodarskim planom za nadolazeće razdoblje planira se održavanje šumskih cesta u ukupnoj dužini od 30,93 km. Radovi će uključivati sanaciju vododerina, popunjavanje većih rupa te uklanjanje zemlje i krupnog kamenja s postojećih prometnica, dok šumskogospodarskim planom za naredno razdoblje nije predviđena izgradnja novih šumskih cesta.

3. CILJ I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Ciljevi istraživanja za izradu ovog diplomskog rada definirani su sljedećim koracima:

- ⇒ 1. Prikupiti terenske podatke, koristeći bespilotnu letjelicu opremljenu kamerom
- ⇒ 2. Temeljem obrade prikupljenih aerofotografija izraditi Digitalni model terena i to na principu automatske i ručne klasifikacije oblaka točaka
- ⇒ 3. U programu RoadEng obaviti uredsku fazu projektiranja šumske ceste na temelju izrađenih DMT-ova, rezultat koje će biti količine zemljorada, odnosno količina iskopa i nasipa potrebnih za izradu donjeg ustroja šumske ceste
- ⇒ 4. Analizirati i usporediti dobivene količine zemljanih radova temeljene na različitim DMT-a

Hipoteze istraživanja su:

- ⇒ 1. Ručnom klasifikacijom oblaka točaka na temelju koje se izrađuje Digitalni model terena potreban za provedbu uredske faze projektiranja šumske ceste značajno se utječe na izračunate količine iskopa potrebnog za izradu donjeg ustroja šumske ceste
- ⇒ 2. Količine nasipa izračunate prilikom uredske faze projektiranja šumske ceste na temelju DMT-a dobivenog ručnom klasifikacijom statistički se značajno razlikuju u odnosu na količine dobivene na temelju DMT-a deriviranog pomoću automatske klasifikacije
- ⇒ 3. Količine iskopa izračunate prilikom uredske faze projektiranja šumske ceste na temelju DMT-a dobivenog ručnom klasifikacijom statistički se značajno razlikuju u odnosu na količine dobivene na temelju DMT-a deriviranog pomoću automatske klasifikacije

3.2. Metode istraživanja

3.2.1 Prikupljanja terenskih podataka bespilotnom letjelicom

Prikupljanje terenskih podataka, odnosno aerofotografija, obavljeno je bespilotnom letjelicom DJI Mavic 3 Enterprise opremljenom s RTK modulom te kamerom visoke rezolucije (slika 6). Tehničke specifikacije korištene bespilotne letjelice prikazane su u (Tablici 8). Iako je korištena bespilotna letjelica bila opremljena RTK modulom za preciznije pozicioniranje bespilotne letjelice i snimljenih aerofotografija, snimljeno je ukupno i 12 GCP točaka pomoću uređaja GNSS (Stonex S900A) koje su tijekom obrade aerofotografija korištene za što točnije pozicioniranje oblaka točaka i izrađenog DMT-a u prostor.

Tablica 8. Tehničke karakteristike bespilotne letjelice DJI Mavic 3 Enterprise

Specifikacija	DJI Mavic 3E
Težina (s propelerima, bez dodatne opreme)	915 g
Maksimalna težina pri uzletu	1,050 g
Dimenzije (sklopljeno)	221×96.3×90.3 mm
Dimenzije (rasklopljeno)	347.5×283×107.7 mm
Dijagonalna udaljenost	380.1 mm
Maksimalna brzina uspona	6 m/s (Normal Mode), 8 m/s (Sport Mode)
Maksimalna brzina spuštanja	6 m/s (Normal Mode), 6 m/s (Sport Mode)
Maksimalna brzina leta	15 m/s (Normal Mode)
Maksimalna brzina leta (Sport Mode)	21 m/s (Naprijed), 20 m/s (Bočno), 19 m/s (Nazad)
Maksimalna otpornost na vjetar	12 m/s
Maksimalna visina uzleta iznad razine mora	6000 m (bez tereta)
Maksimalno vrijeme leta (bez vjetra)	45 min
Maksimalno vrijeme lebdenja (bez vjetra)	38 min
Maksimalna udaljenost leta	32 km
Maksimalni kut nagiba	30° (Normal Mode), 35° (Sport Mode)
Maksimalna kutna brzina	200°/s
GNSS	GPS+Galileo+BeiDou+GLONASS
Preciznost lebdenja (vertikalno)	±0.1 m (s Vision System); ±0.5 m (s GNSS)
Preciznost lebdenja (horizontalno)	±0.3 m (s Vision System); ±0.5 m (s High-Precision Positioning System)
Raspon radne temperature	-10° do 40° C
Motor	2008
Propeleri	9453F Propeleri za Enterprise
Signalizator	Ugrađen u zrakoplov
Klasa	C2 (EU)
Široka kamera - senzor	4/3 CMOS, 20 MP
Široka kamera - žarišna daljina	FOV: 84°, f/2.8-f/11
ISO raspon	100-6400
Brzina zatvaranja	8-1/8000 s (elektronska); 8-1/2000 s (mehanička)
Maksimalna slika	5280×3956
Načini fotografiranja	Single: 20 MP, Timed: 20 MP
Video rezolucija	4K: 3840×2160@30fps
Bitrate (4K)	130 Mbps
Podržani formati datoteka	exFAT

Letačka operacija kreirana je u aplikaciji DJI Pilot 2. Visina leta iznosila je 70 metara. Preklapanje aerofotografija iznosila je 80% za prednje i bočno preklapanje aerofotografija. Vrijeme snimanja, odnosno izvršenja letačke operacije, iznosilo je 17:49 minute. Korištena je opcija mehaničkog zatvarača kamere, čime su se izbjegla zamućenja pri kretanju bespilotne letjelice i omogućilo brže snimanje. Također, tijekom izvođenja snimanja bespilotna letjelica je pratila razvijanje terena te visina leta je konstantno iznosila 70 m. Ukupna snimljena površina iznosila je 28,89 ha.

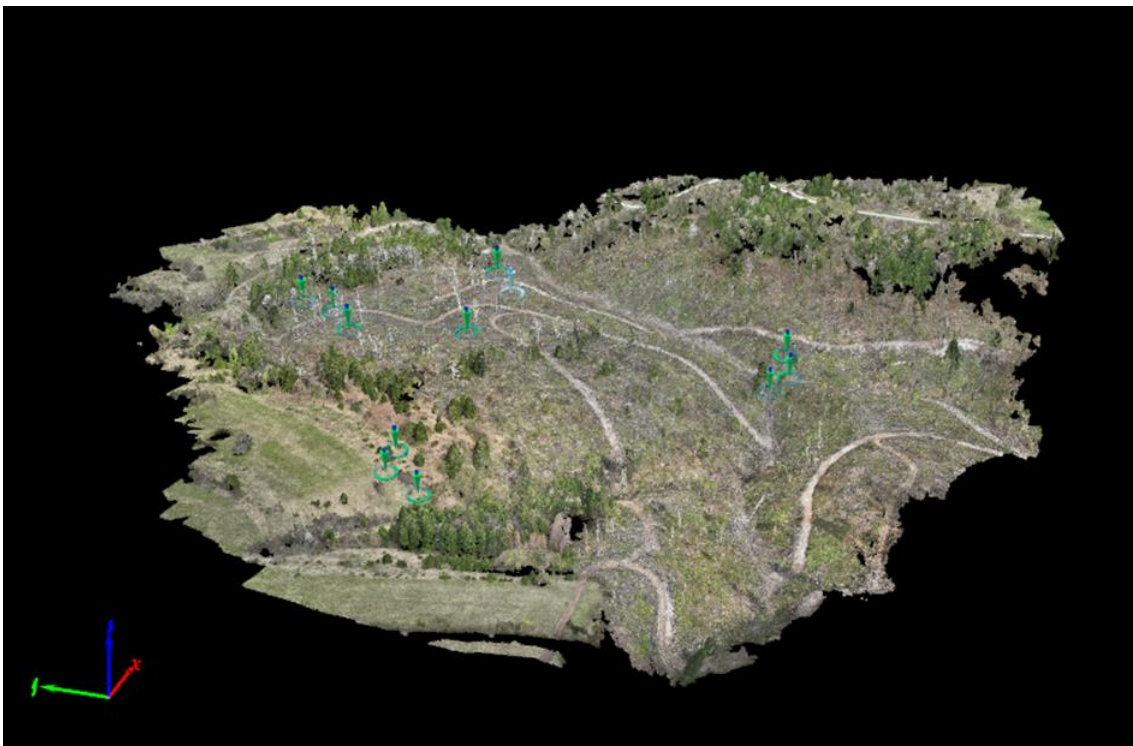


Slika 6. Korištena bespilotna letjelica (DJI Mavic 3 Enterprise)

3.3. Obrada terenskih podataka

3.3.1. Obrada aerofotografija u programu Pix4d mapper

Fotogrametrijska analiza i kreiranje digitalnog modela reljefa vršena je u programu Pix4Dmapper (v 4.8.4.) na temelju snimljenih aerofotografija bespilotnom letjelicom. Kao i drugi programi koji služe za fotogrametrijsku analizu, ovaj program radi na temelju osnovnih načela fotogrametrije koji su opisani u poglavlju *1.7 Digitalna fotogrametrija*. Fotografije su smještene u prostor pomoću snimljenih GCP točaka na terenu GNSS uređajem, pridruživanjem terenskih oznaka vidljivih na aerofotografijama očitanim koordinatama snimljenih GCP točaka.



Slika 7. Oblak točaka na temelju aerofotografija u programu Pix4D mapper i pozicija korištenih GCP točaka (zelene oznake)

Prilikom fotogrametrijske analize omogućena je automatska klasifikacija dobivenog oblaka točaka. Naime, za izradu DMT-a, ovaj program koristi samo točke koje su klasificirane kao tlo i ceste, dok sve ostale točke zanemaruje. U slučaju da se ne radi automatska i ručna klasifikacija oblaka točaka, izrađeni DMT predstavlja izgladenu verziju digitalnog modela površina (eng. DMP). DMT izrađen na temelju automatski klasificiranog oblaka točaka, za potrebe ovog Diplomskog rada, nazvan je **AK DMT**.

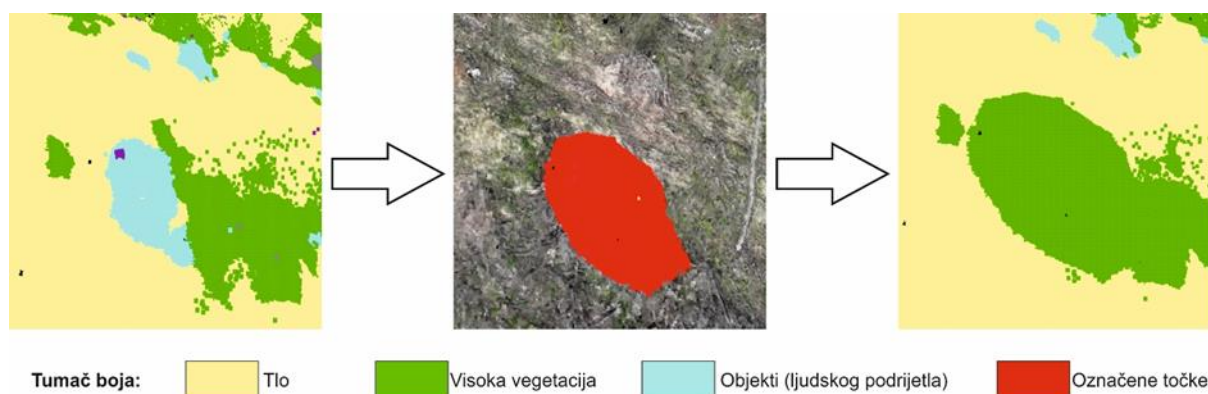
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Unclassified	(Neklasificirano)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	(Onemogućeno)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Ground	(Tlo)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Road Surface	(Cestovna površina)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	High Vegetation	(Visoka vegetacija)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Building	(Zgrade)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Human Made Object	(Objekti ljudskog podrijetla)

Slika 8. Boje svake od klasa oblaka točaka u programu Pix4D mapper

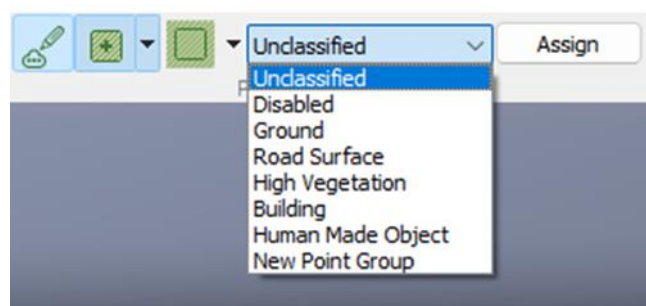


Slika 9. Klasificirani oblak točaka s prikazom boja kategorija istraživanog područja

Ručna klasifikacija oblaka točaka provedena je također u programu Pix4D mapper. Za potrebe ovog postupka korišten je alat *Point cloud editing* (slika 11). Pomicanjem po planiranoj trasi šumske ceste, u širini od 20 metara od centrale osi vršila se ručna klasifikacija označavajući točke oblaka koje nisu automatski dobro klasificirane. U većini slučajeva program je pogrešno klasificirao uspostavljeni šumski red gdje je šumski ostatak klasificirao kao tlo. Označenim točkama bi se nakon toga pridružila odgovarajuća klasa. Na temelju ovako klasificiranog oblaka točaka izradio se novi DMT, nazvan **RK DMT**.



Slika 10. Prikaz ručne klasifikacije oblaka točaka u programu Pix4D mapper



Slika 11. Alat Point cloud editing programa Pix4D mapper

Analiza rezultata u Pix4d rađena je na osobnom računalu sljedećih karakteristika: CPU: intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz, RAM: 16GB, GPU: Quadro T1000

3.3.2. Izrada glavnog projekta šumske ceste u programu RoadEng

Izrada glavnog projekta šumske ceste vršena je u specijaliziranom programu za projektiranje šumskih cesta RoadEng (ver. 10.0.664.0). Ovaj program sastoji se od 3 modula: Survey/Map, Terrain i Location. Kroz ova tri modula radi se kompletan unos podataka, obrada i izračun terena, oblikovanje buduće šumske prometnice sa svim cestovnim objektima te ispis svih priloga potrebnih za izradu glavnoga projekta šumske ceste.

Modul Survey/Map služi za unos svih podataka koji su prikupljeni na terenu za određeni poligon buduće šumske ceste ili podataka o nultoj liniji. Sastoji se od osam glavnih izbornika s njihovim podizbornicima od kojih svaki ima različitu funkciju vezanu uz definiranje unosa i oblika podataka. Moguće je već prilikom unosa nulte linije/poligona definirati građevinske kategorije materijala u alatu Ground Types Editor. Po završetku unosa nulte linije/poligona (unos dužina, azimuta te uzdužnih nagiba) mogu se unijeti podaci o poprečnim presjecima, snimljenih padomjerom ili metodom ravnjače i podravnjače. U modulu Survey/Map, po završetku kompletnoga unosa snimljenih podataka, može se izračunati nulte linije/poligona te dobiti prikaz u obliku linije u različitim mjerilima. Ako je potreban ispis tabličnih podataka ili grafički prikaz unesenoga nulte linije/poligona, jednostavno se namjesti željeno mjerilo te odabere

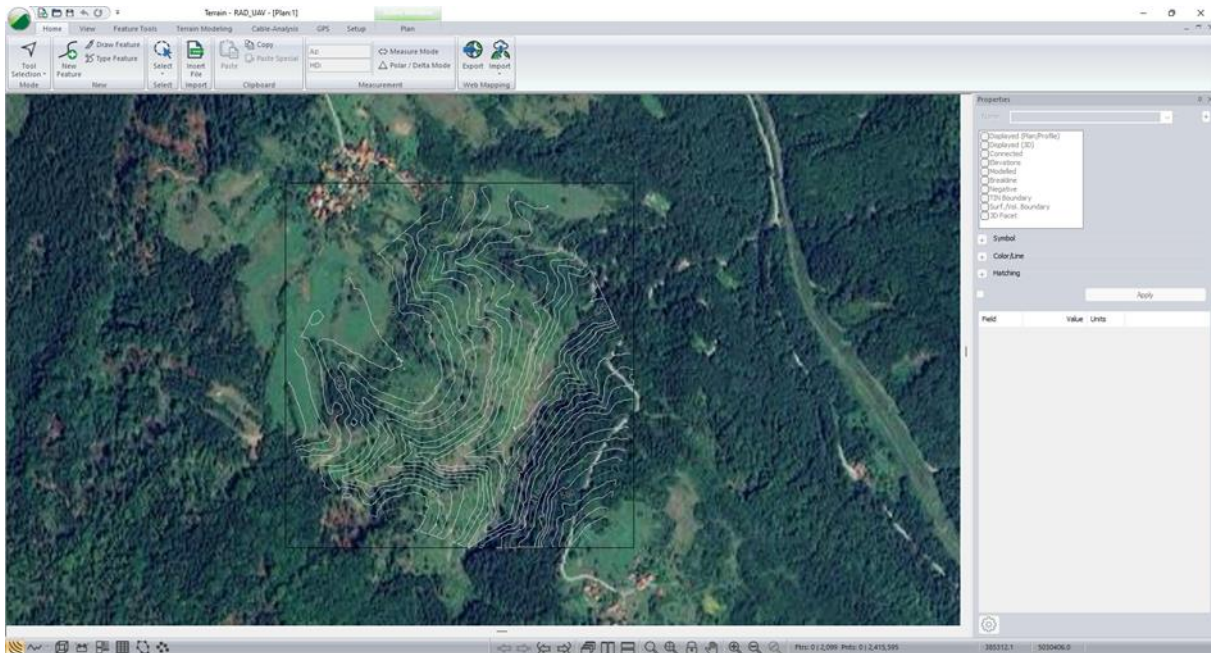
opcija Print (Lepoglavec i dr. 2011.). Za potrebe ovog istraživanja, ovaj modul se nije koristio. Naime, tjemena osovinskom poligona snimljena su GNSS uređajem te su učitane u modul Terrain, a nakon toga i u modul Location.

Station	Fore Azim	H.D.	dZ	SSL dZ/H.D.	SSR dZ/H.D.	GND	Label	Z
0.00	134:43:02	32.20	-2.92	0.00/.	0.00/.	**		503.40
32.20	129:38:35	26.63	-2.42	0.00/.	0.00/.	**		500.48
58.83	125:24:48	41.17	-3.60	0.00/.	0.00/.	**		498.06
89.99	100:19:22	26.27	-2.32	0.00/.	0.00/.	**		494.47
126.27	71:24:20	26.66	-2.20	0.00/.	0.00/.	**		492.15
152.92	47:02:47	40.54	-3.27	0.00/.	0.00/.	**		489.95
193.46	25:35:39	41.47	-3.73	0.00/.	0.00/.	**		486.68
234.93	3:30:21	41.10	-3.68	0.00/.	0.00/.	**		482.95
276.03	317:45:11	26.03	-2.21	0.00/.	0.00/.	**		479.27
302.05	1:31:43	29.74	-2.92	0.00/.	0.00/.	**		477.06
331.79	9:45:37	38.81	-3.39	0.00/.	0.00/.	**		474.14
370.60	324:10:36	24.48	-2.21	0.00/.	0.00/.	**		470.75
395.08	288:24:11	20.78	-2.22	0.00/.	0.00/.	**		468.54
415.87	347:04:59	16.82	-1.58	0.00/.	0.00/.	**		466.32
432.68	37:21:17	21.28	-1.99	0.00/.	0.00/.	**		464.75
453.96	99:36:50	21.14	-2.37	0.00/.	0.00/.	**		462.75
475.11	125:21:03	19.49	-2.38	0.00/.	0.00/.	**		460.39

Slika 12. Sučelje Survey/Map modula programa RoadEng

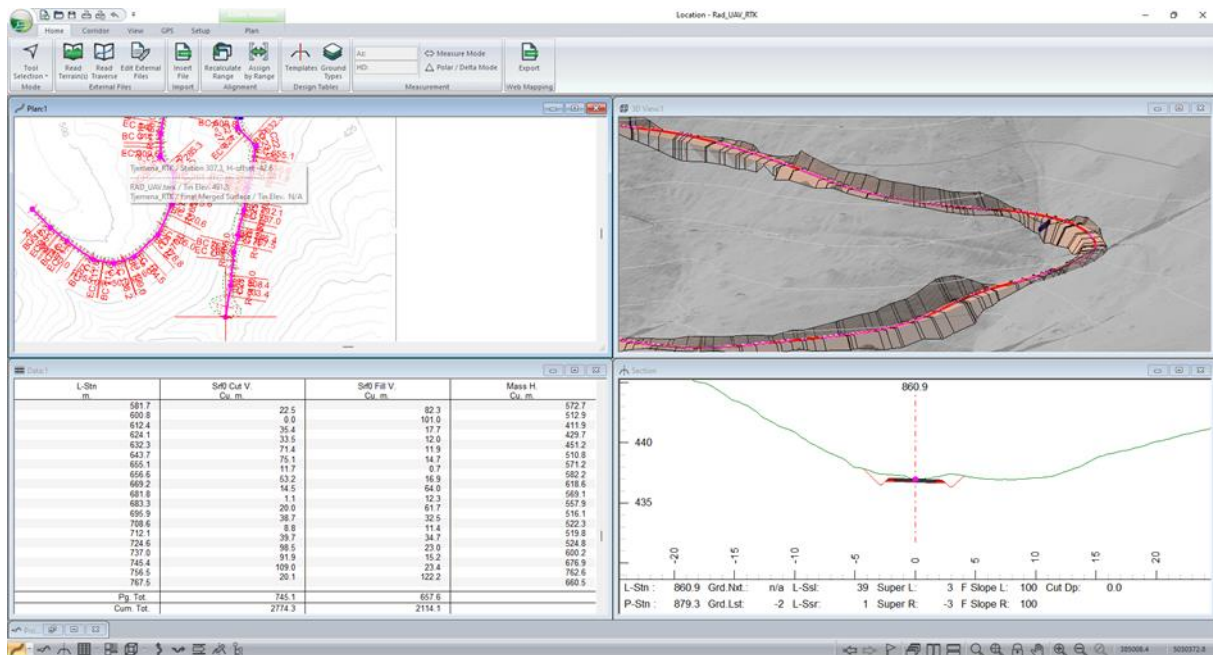
Modul Terrain služi za kreiranje digitalnog terena iz snimljenih podataka, kartiranje, dizajniranje te analizu žičnih linija te ujedno pruža mogućnosti za obradu raznih topografskih i drugih oblika karata. Sam modul sastoji se od osam glavnih izbornika s njihovim podizbornicima. Podaci koji se koriste za obradu mogu biti iz modula Survey/ Map (nakon ručnoga unosa), digitalni podaci iz raznih tablet uređaja, iz vanjskih datoteka ili jednostavnim unosom na zaslonu pomoću miša te ručnim definiranjem vrijednosti. Modul omogućuje više pogleda, pa se tako može uključiti više prozora istodobno, promatrajući neki teren ili poligon u situaciji, uzdužnom pogledu i 3D prikazu. Uz grafičke prikaze modul Terrain pruža i uvid u razne podatke o terenu ili poligonu, kao što su duljine, koordinate točaka, nadmorska visina, površina i dr. 3D prikaz sadrži nekoliko korisnih opcija, npr. boja sjenčanja i preklapanje slika. Također se mogu koristiti i digitalne slike (ortofotografske snimke, skenirane karte ili satelitske snimke) kao podloga kako bi se poboljšala vizualizacija karata ili crteža. Spomenuti modul pruža i mogućnosti kao što su izračunavanje površine, izračun zemljanih masa,

povezivanje više podataka u jednu cjelinu, mogućnost prikaza prostornih podataka te njihova analiza i dr. O primjenjivosti modula Terrain u planiranju mreže šumskih prometnica Heralt (2002) iznosi da je, iako taj program nije razvijen u prvom redu za završne optimizacije studija planiranja, vrlo primjenjiv u svakidašnjim aktivnostima pri donošenju odluka. Omogućuje upraviteljima šumarija sigurno određivanje različitih varijanta budućih šumskih cesta te smanjivanje pogrešaka koje mogu imati negativan utjecaj na okoliš (Lepoglavec i dr. 2011.).



Slika 13. Sučelje Terrain modula programa RoadEng

Pomoću modula Location brže se može postići željeni rezultat, zahtijeva interaktivnu obradu podataka, tj. pristup u kojem vertikalno i horizontalno poravnanje prati jedno drugo svakim pomakom kursora miša te pruža dobar uvid u prikazane podatke. Pri razvijanju ovoga modula vodilo se računa o tome da se omogući maksimalno rukovanje svim presjecima šumske ceste u jednom prozoru, što rezultira bržim i preciznijim radom pri uredskim poslovima projektiranja šumskih cesta. Osnovne funkcije modula su: balansiranje podataka u situaciji te uzdužnom i poprečnom presjeku; sadrži osnovne predloške za dimenzije kolnika i cestovnih objekata; omogućuje definiranje propusta odvodnje (položaj, duljina i tip); vrši izračun zemljanih radova, izrađuje izvješće o uzdužnom nagibu terena/nivelete; sadrži podatke o horizontalnim i vertikalnim krivinama; omogućuje kreiranje digitalnoga modela terena; služi za ispisivanje situacije, uzdužnoga i poprečnoga presjeka; vrši izvoz u formatu .ascii, .dwg, .dxf i dr. (Lepoglavec i dr. 2011.). Ovaj modul omogućuje dobivanje svih potrebnih priloga i proračuna koji su sastavni dio Glavnog/izvedbenog projekta šumske ceste.



Slika 14. Sučelje Location modula programa RoadEng

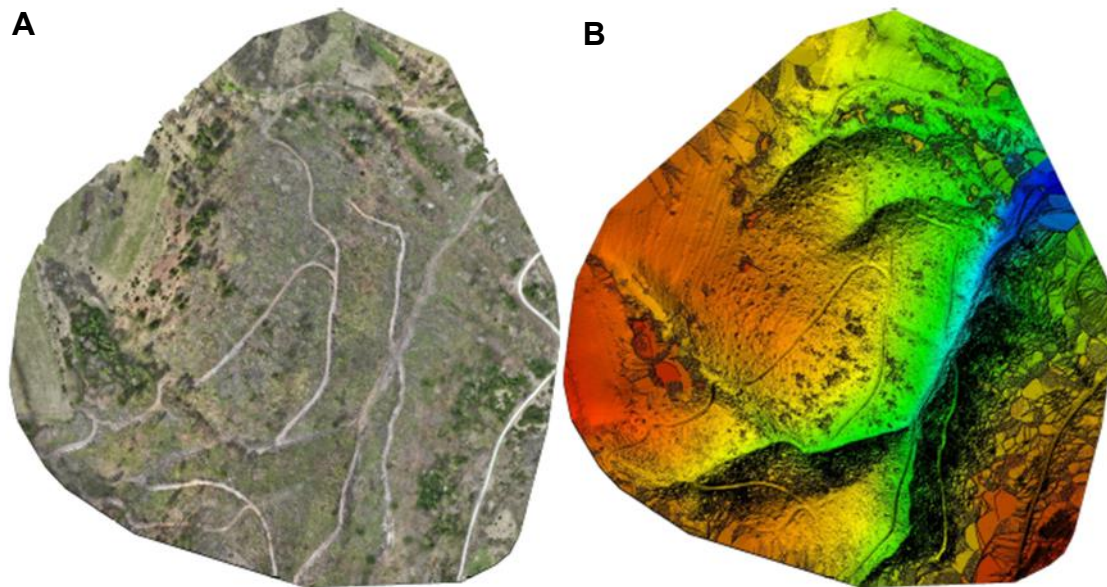
3.3.3. Statistička analiza podataka

Statističke analize provedene su u programu Statistica 14 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). Provjera normalnosti podataka provedena je Kolmogorov-Smirnov i Lilliefors-ovim testom normalnosti. Deskriptivna statistička analiza, odnosno utvrđivanje prosječnih vrijednosti i njihovi pripadajućih standardnih devijacija provedena je u sklopu „Descriptive Statistics“ u korištenom programu Statistica. Podaci su prikazani kao prosječne vrijednosti i njihove pripadajuće standardne pogreške, a izračunate su pomoću t-testa. t-test (također poznat kao Studentov t-test) je alat za procjenu srednjih vrijednosti jedne ili dvije populacije pomoću testiranja hipoteza. t-test se može koristiti za procjenu razlikuju li se dvije skupine jedna od druge (neovisni t-test dva uzorka) što se koristilo pri izradi ovog diplomskog rada.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

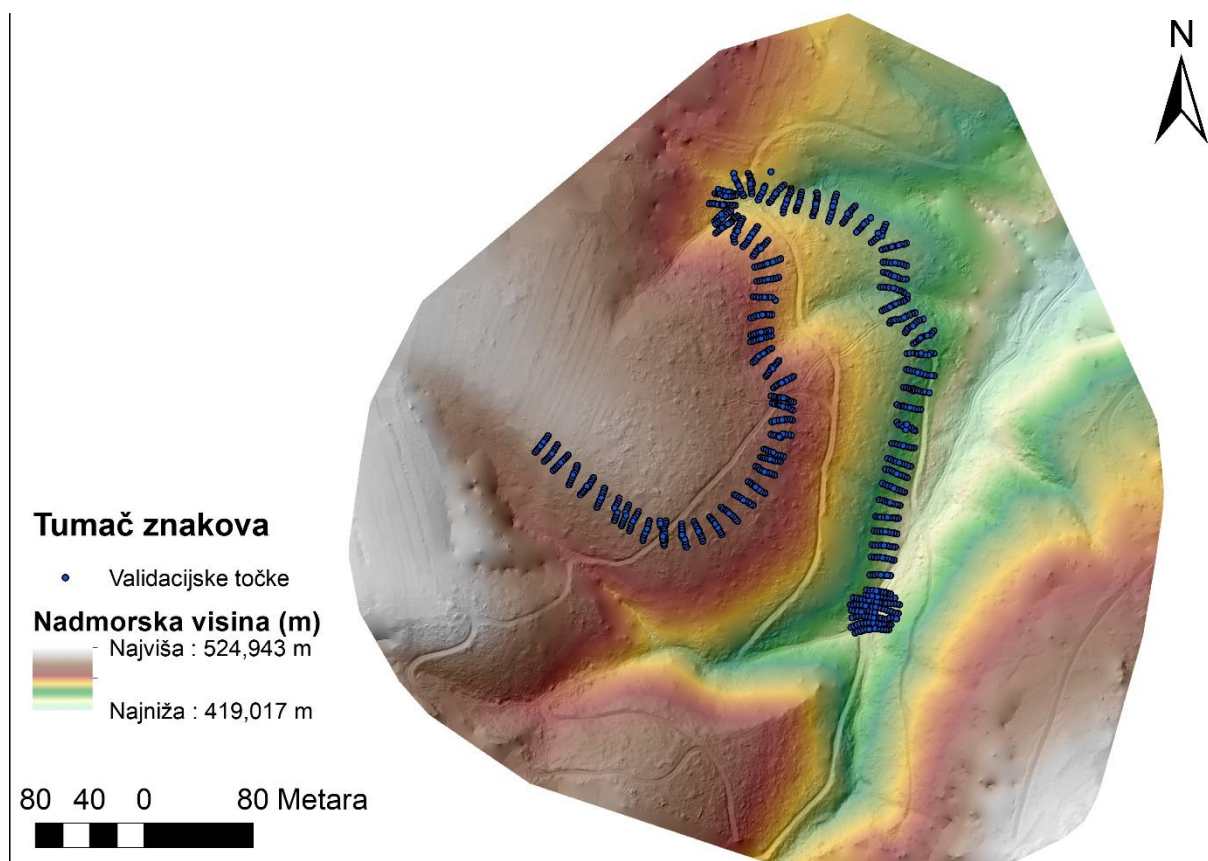
4.1. Terenski podaci prikupljeni bespilotnom letjelicom

Obavljenom letačkom operacijom snimljeno je ukupno 692 aerofotografija. Average Ground Sampling Distance (GSD) iznosio je 2,28 cm dok je veličina pixela kod oba DMT-a iznosila 5 x tu vrijednost. Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) u odnosu na korištenih 12 kontrolnih (GCP) točaka iznosio je 0,024 m.



Slika 15. Ortofoto istraživanog područja (A) i digitalni model površine (DMP) (B)

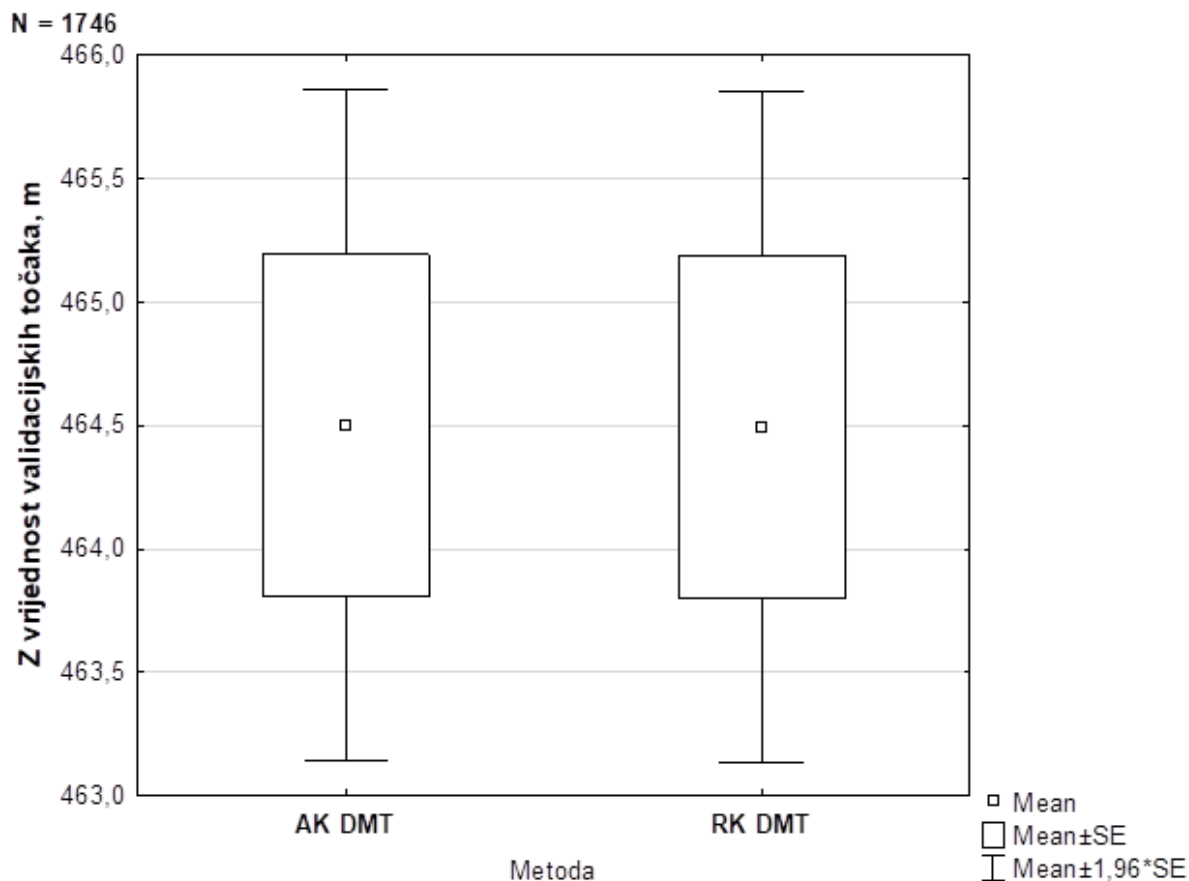
Vrijeme za fotogrametrijsku analizu iznosilo je po fazama: Inicijalna obrada: 2 sata i 58 minuta (jedna inicijalna obrada za oba DMT-a) te završna obrada (dio koje je izrada automatske klasifikacije (AK) DMT-a) 2 sata i 43 minute po izrađenom DMT-u dok je potrebno vrijeme za ručnu klasifikaciju (RK) oblaka točaka iznosilo je 10 h.



Slika 16. DMT istraživanog područja izrađen temeljem automatske klasifikacije oblaka točaka

4.2. Razlike između Z vrijednosti validacijskih točaka očitanih sa DMT-ova izrađenih temeljem automatske i ručne klasifikacije oblaka točaka

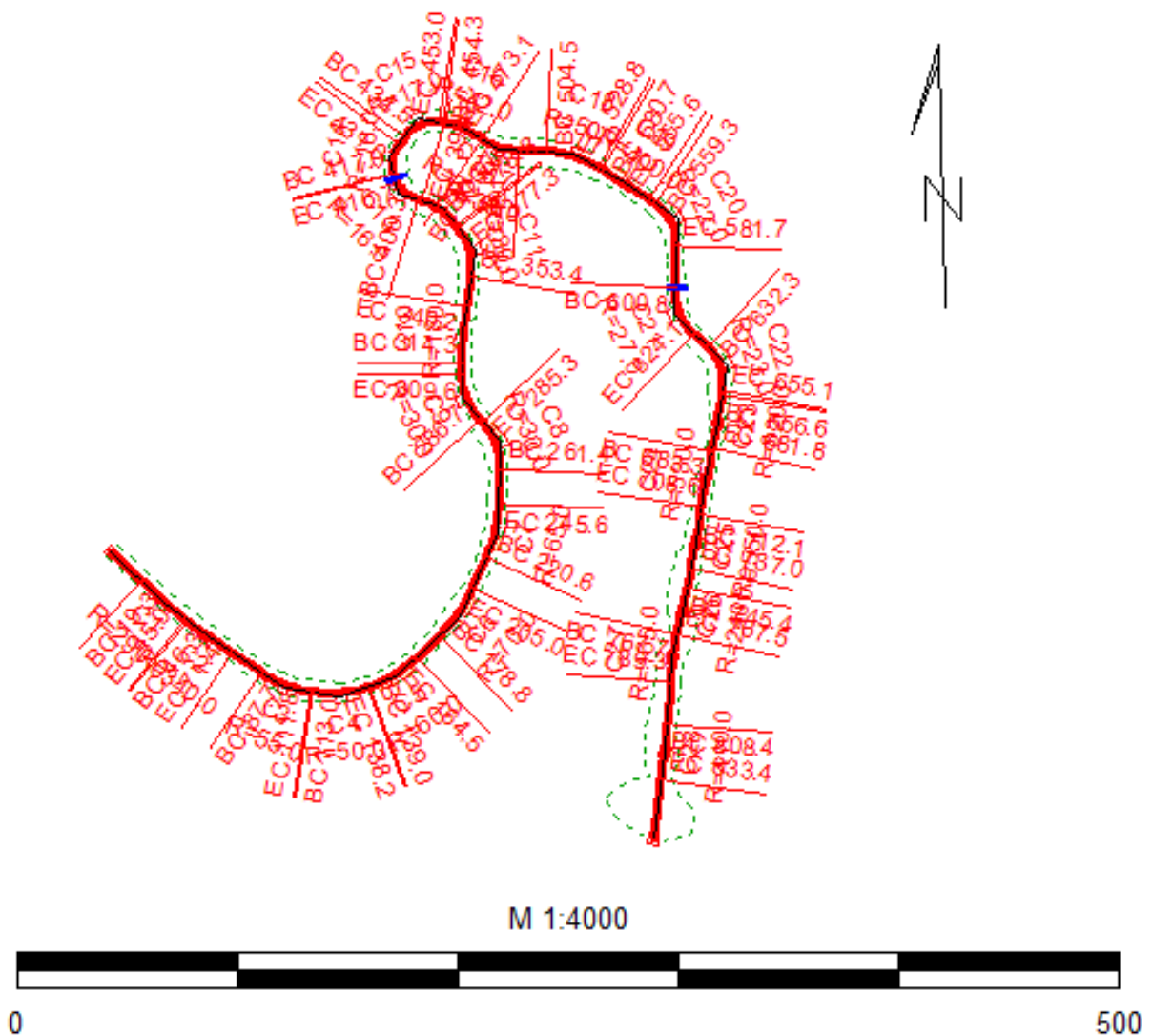
Z vrijednosti, odnosno nadmorske visine validacijskih točaka na DMT-ovima izrađenim automatskom i ručnom klasifikacijom nisu pokazale statistički značajne razlike. Z vrijednosti oba DMT-a testirana su na temelju 807 validacijskih točaka. Validacijske točke postavljene su u svakom profilu na istraživanoj trasi šumske ceste na međusobnoj udaljenosti od 2 m, u pojasu širine 8 m na lijevu i desnu stranu od centralne osi osovinskog poligona (Slika 16). Izračunate srednje Z vrijednosti i pripadajuće standardne pogreške dobivene dvjema metodama (AK DMT i RK DMT) su vrlo slične ($464,4992 \pm 0,69$ m automatska klasifikacija, $464,4929 \pm 0,69$ m ručna klasifikacija). Razlika je postojana između ručne i automatske klasifikacije na svim točkama. Najznačajnija razlike s obzirom na Z vrijednost zabilježeni su u točki 741 gdje je vrijednost prikupljenih podataka Z vrijednosti AK DMT-a iznosila 439,51 m a za ručnu klasifikaciju 439,06 m što čini razliku od 44,65 cm te u točki 150 gdje je vrijednost Z DMT-a na temelju automatske klasifikacije iznosila 488,44 m, a na temelju DMT-a ručne klasifikacije 488,10 m što čini razliku od 34,09 cm. Prosječna pogreška Z vrijednosti iznosila je 0,63 cm dok je RMSE iznosio 4,26 cm



Slika 17. Z vrijednosti validacijskih točaka dobivene očitanjem sa DMT-ova dobivenih automatskom i ručnom klasifikacijom prikazane su kako sredina (mean), sredina \pm standardna pogreška (mean \pm SE) (pravokutnik), sredina \pm 1,96 st. pogreška (mean \pm 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$

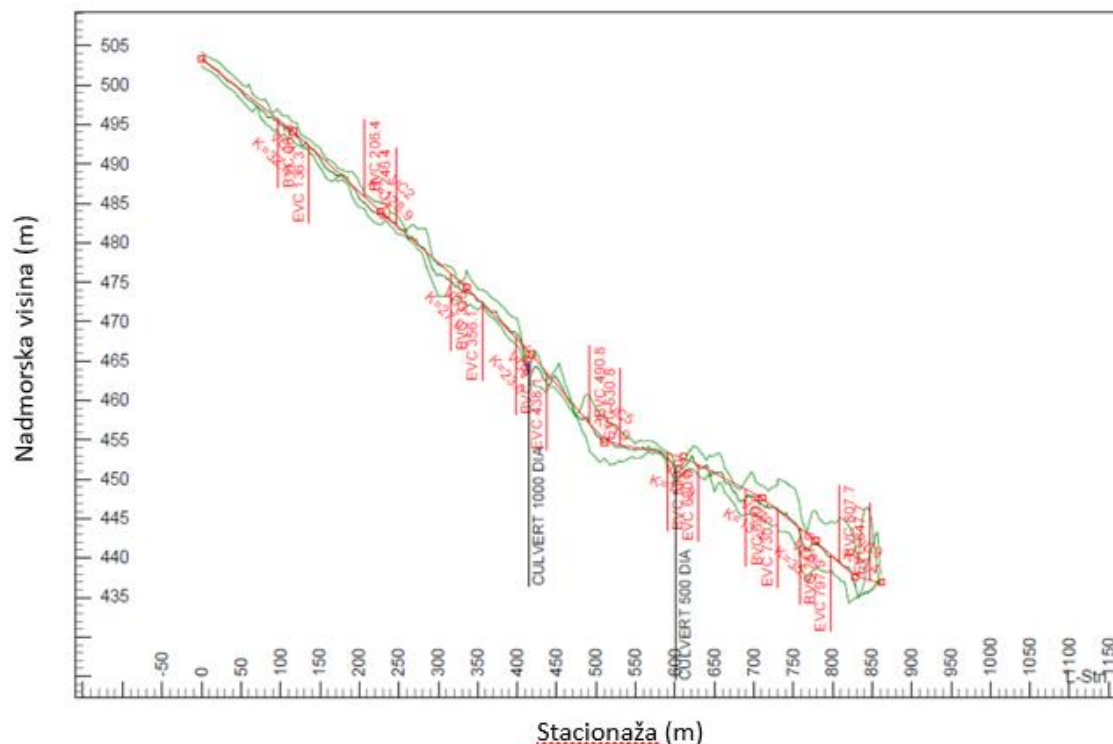
4.3. Uredska faza projektiranja ŠC na temelju izrađenih DMT-ova

Rezultat računalne faze projektiranja šumske ceste, za potrebe ovog istraživanja, su izračunate količine zemljorada, odnosno količine iskopa i nasipa potrebni za izradu donjeg ustroja šumske ceste. Projektirana je trasa šumske ceste ukupne duljine 8+60,90 hm. Horizontalno razvijanje projektirane šumske ceste definirano je postavljenim osovinskim poligonom na terenu čija tjemena (ukupno 30) su snimljena GNSS uređajem u RTK modu. Na trasi je ukupno uklopljeno 28 horizontalnih krivina. Trasa istraživane šumske ceste završava kružnom okretaljkom promjera 24 m na kojoj su zamijećene najveće količine zemljorada te najveće razlike u količinama iskopa i nasipa između dva uspoređivana DMT-a.



Slika 18. Položajni nacrt (M 1:4000) sa prikazanim osovinskim poligonom i pozicijom profila istraživane šumske ceste

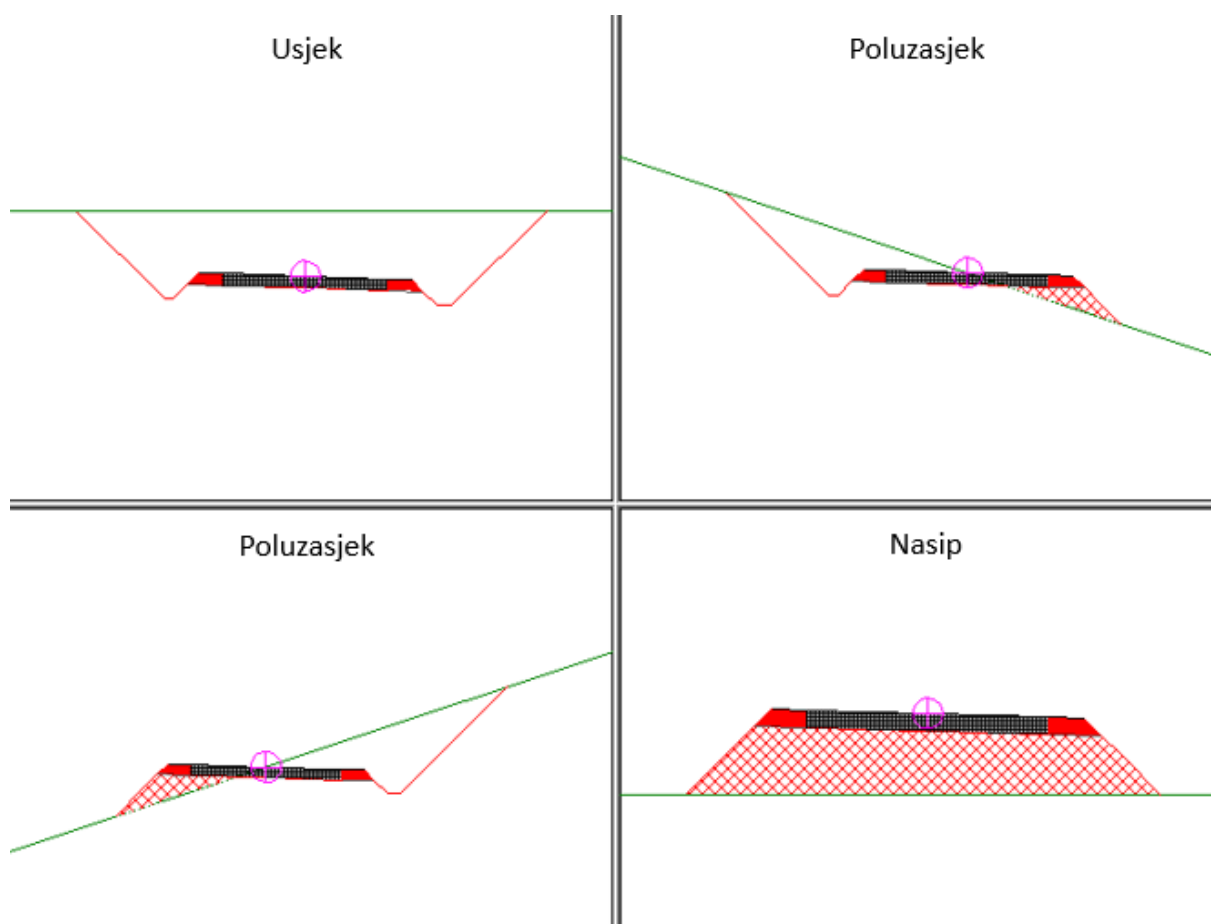
Crtani uzdužni presjek istraživane trase šumske ceste definiran je uzdužnim razvijanje terena u koji je uklopljena nezaobljena niveleta (slika 19.). Kasnijim zaobljavanjem vertikalnih lomova dobivena je zaobljena niveleta koja se konačnici sastojala od 9 vertikalnih krivina. Nagib zaobljene nivelete se kretao između 1,81 i 12,11 %. Visinska razlika između prvog profila na trasi istraživane šumske ceste (503,2 m.n.v.) i zadnjeg profila br. 86 (436,8 m.n.v.) iznosila je 66,4 m, što bi značilo da je prosječni uzdužni nagib između prvog i zadnjeg profila iznosio 7,71 %. Koeficijent K (Parabolic Rate) korišten za zaobljavanje vertikalnih krivina, koji se koristi umjesto radijusa u korištenom programu, kretao se između 3,94 i 128,9. Vrijednost $K = 1$ odgovara približno 100 m radijusa.



Slika 19. Crtani uzdužni presjek (M 1:650/6500) sa prikazanim uzdužnim razvijanjem terena i uklopljenom zaobljenom niveletom istraživane šumske ceste

Prilikom definiranja normalnih poprečnih profila, korišteni su predlošci stvoreni za kategoriju prometnice „Prilazna šumska cesta A“ sukladno Pravilniku o provedbi intervencije 73.08. »Izgradnja šumske infrastrukture« iz Strateškog plana Zajedničke poljoprivredne politike Republike Hrvatske 2023. – 2027.

Širina kolnika izvan horizontalnih krivina iznosila je 3,50 m uz širinu bankine od 0,5 m. Korišten je poprečni nagib kolnika od 3 % izvan horizontalnih krivina. U horizontalnim krivinama širina kolnika je proširivana a poprečni nagib kolnika povećavan sukladno važećem Pravilnikom. Od elemenata odvodnje projektirani su trapezni odvodni jarci, dimenzija 30 x 30 cm i nagiba kosina 1:1 koji su pratili niveletu trase šumske ceste. Na dva mjesta na trasi istraživane šumske ceste u profilima 39 (4+00,03 hm) i 63 (6+00,08 hm) predviđena je ugradnja tipskih betonskih cijevnih propusta širine otvora 1000 mm odnosno 500 mm, do spoznaje za njihovom potrebom na terenu dođeno je na temelju proučavanja tijeka oborinskih voda, jedna od mnogih mogućnosti koje nudi korišteni program.



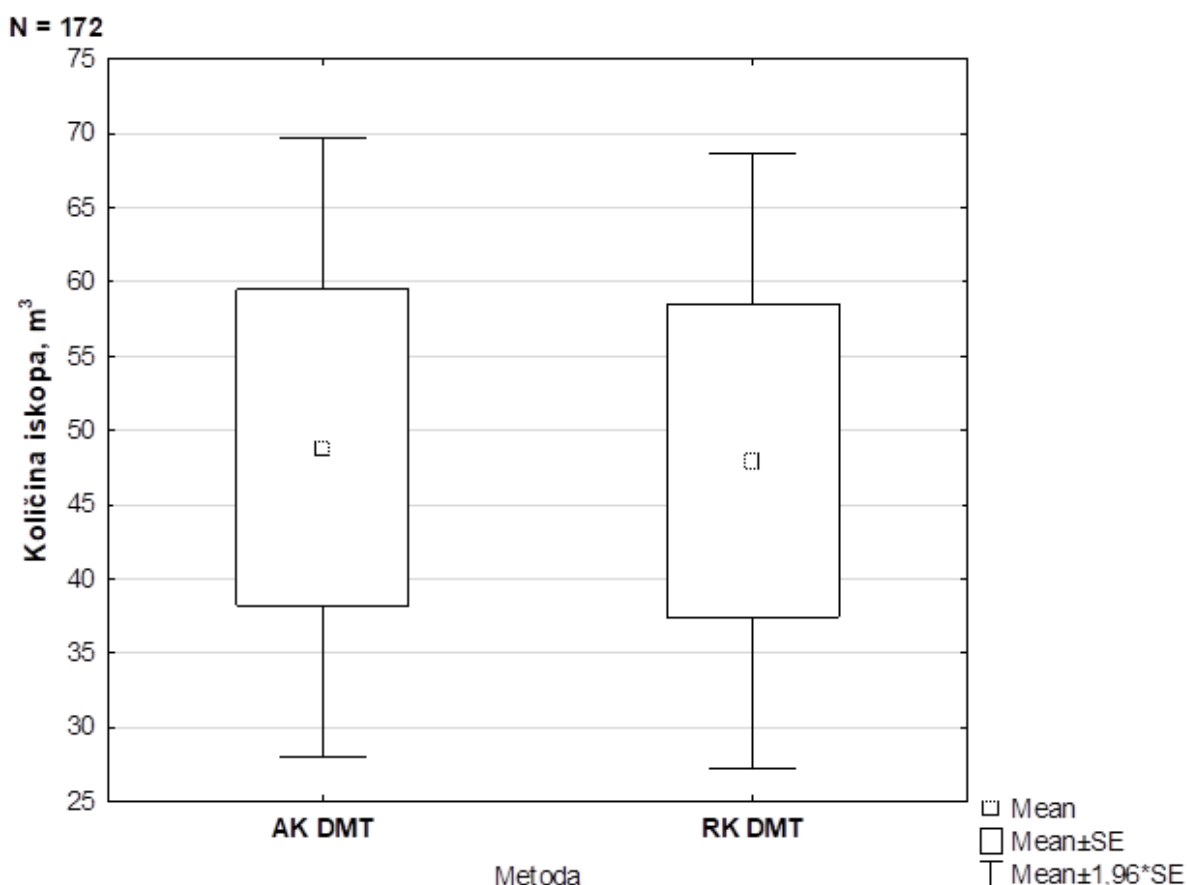
Slika 20. Izgled normalnih poprečnih presjeka na projektiranoj trasi šumske ceste

Treba napomenuti da su se prilikom provođenja uredske faze projektiranja u programskom paketu RoadEng koristili isti parametri horizontalnog i vertikalnog postavljanja odnosno vođenja trase, te isti predlošci normalnih poprečnih presjeka. Prilikom izračuna količina zemljorada mijenjala se samo podloga (Digitalni model terena) koji je bio nositelj terenskih podataka. Vertikalno razvijanje, odnosno inicijalno uklapanje nezaobljene nivelete vršilo se na podlozi digitalnog modela reljefa dobivenog automatskom klasifikacijom dok su iste te pozicije vertikalnih lomova kasnije upotrebljavane i kod uklapanja nezaobljene nivelete na podlogu DMT dobivenog ručnom klasifikacijom.

4.4. Razlike između izračunatih volumena zemljanih radova dobivenih na temelju DMT-ova dobivenih automatskom i ručnom klasifikacijom

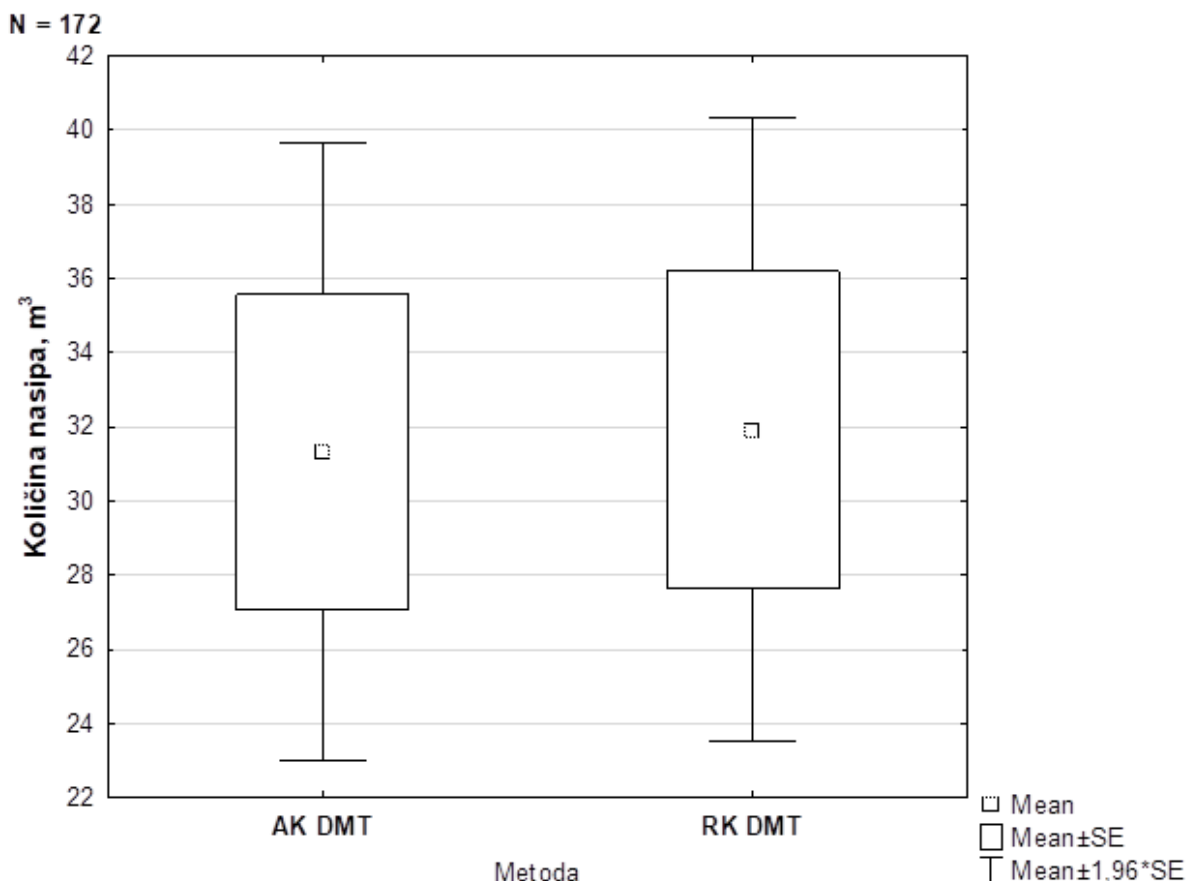
Količine iskopa i nasipa očitane su na cijeloj trasi istraživane šumske ceste u 87 profila koji su u pravilu predstavljali iskolčene glavne točke (početak luka PL; sredina luka SL; kraj luka KL) pojedine horizontalne kružne krivine dok su međutočke ukoliko je za njima bilo potrebe iskolčavane na međusobnoj udaljenosti od 10 m od prethodno iskolčenog profila. Količina zemljorada očitana na profilima istraživane šumske ceste predstavljala je razliku u volumenima između promatranog i prethodnog profila.

Temeljem automatske i ručne klasifikacije digitalnog modela terena, odnosno projekta temeljenog na dvije različite podloge, dobivene količine iskopa nisu pokazale statistički značajne razlike (slika 21). Aritmetičke sredine količina iskopa dobivenih temeljem dva različita digitalna modela terena, te njihove pripadajuće statističke pogreške vrlo su sličnih parametara. Korijen srednje kvadratne pogreške između količina iskopa izračunatih na temelju DMT-a izrađenog automatskom klasifikacijom oblaka točaka i DMT-a izrađenog ručnom klasifikacijom oblaka točaka iznosio je 1,88 m³, dok je najveća razlika uočena na mjestu okretaljke, a iznosila je od 7,70 m³. Treba istaknuti kako dobiveni rezultati ne čude jer se upravo na mjestu predviđenom za okretaljku (trasa istraživane šumske ceste između profila 86 i 87) nalazila veća količina šumskog ostatka. Ukupna količina iskopa temeljena na AK DMT-u iznosila je 4199,40 m³ dok je za RK DMT ona iznosila 4124,40 m³. Izuzev okretaljke, najveća razlika u količinama iskopa na istraživanoj trasi šumske ceste zamijećena je između profila 19 i 20 odnosno dionici trase između stacionaža 1+93,45 hm i 2+34,92 hm i iznosila je 6,8 m³ dok je najveća razlika u količinama nasipa na istraživanoj trasi šumske ceste zamijećena je između profila 65 i 73 odnosno dionici trase između stacionaža (6+27,37 hm) i (6+86,97 hm) gdje je razlika iznosila 14,5 m³.



Slika 21. Razlike u količinama iskopa na temelju projekta ŠC na podlozi digitalnog modela terena dobivenog automatskom i ručnom klasifikacijom prikazane se kako sredina (mean), sredina ± standardna pogreška (mean ± SE) (pravokutnik), sredina ± 1,96 st. pogreška (mean ± 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: *p < 0,05; **p < 0,001; ***p < 0,0001

Ukupno izračunate količine materijala koje je potrebno ugraditi u nasip tijekom izrade donjeg ustroja istraživane šumske ceste i pri digitalnom modelu reljefa dobivenog automatskom klasifikacijom kod onoga kod kojega je oblak točaka bio klasificiran ručno bile su manje od količina materijala koje je potrebno iskopati tijekom izrade donjeg ustroja istraživane šumske ceste. Za AK DMT izračunata količina nasipa iznosila je 2694,00 m³, dok je za RK DMT izračunata količina iznosila 2745,00 m³. Slika 22 prikazuje razlike u izračunatim količinama nasipa iskazanih u m³ koje su dobivene na temelju digitalnih modela reljefa izrađenih automatskom i ručnom klasifikacijom. Slično kao i kod razlika u izračunatim količinama iskopa ni ovdje nije zamijećena statistički značajna razlika u dobivenim količinama. Zamijećena je nešto niža vrijednost aritmetičke sredine količine iskopa izračunate na temelju AK DMT-a 33,33 m³ u odnosu na aritmetičku sredinu količine iskopa izračunate na temelju RK DMT-a gdje je navedena vrijednost iznosila 33,92 m³. Korijen srednje kvadratne pogreške između količina nasipa izračunatih na temelju DMT-a izrađenog automatskom klasifikacijom oblaka točaka i DMT-a izrađenog ručnom klasifikacijom oblaka točaka iznosio je 2,03 m³ što predstavlja nešto veću vrijednost u odnosu na RMSE koji je zamijećen kod izračunatih količina iskopa (1,88 m³).



Slika 22. Razlike u količinama nasipa prikazane se kako sredina(mean), sredina ± standardna pogreška (mean±SE) (pravokutnik), sredina ± 1,96 st.pogreška (mean ± 1.96 SE) (brkovi). Statistički značajna razlika između parametara uspoređivane su na nivou: *p < 0,05; **p < 0, 001; ***p < 0,0001

4.5. Faktorska analiza varijance (ANOVA)

Naposlijetku, analiziran je i utjecaj uzdužnog i poprečnog nagiba terena na razlike u izračunatim volumenima iskopa i nasipa odnosno ustanovljavano je gdje su zamijećene statistički značajne razlike. Definirane su klase (1-6) uzdužnog nagiba terena i upravo je klasa nagiba 2 predstavljala klasu sa uzdužnim nagibima terena u granicama od 3 do 5 % pokazala statistički značajno odstupanje u odnosu na ostale istraživanih klasa što ne iznenađuje jer se upravo u ovoj klasi nagiba nalazilo mjestu predviđenom za okretaljku.

Klase uzdužnog nagiba terena za potrebe ovog istraživanja podijeljene su u slijedeće klase:

1. Klasa uzdužnog nagiba terena 1 (uzdužni nagib terena od 1 do 3 %)
2. Klasa uzdužnog nagiba terena 2 (uzdužni nagib terena od 3 do 5 %)
3. Klasa uzdužnog nagiba terena 3 (uzdužni nagib terena od 5 do 7 %)
4. Klasa uzdužnog nagiba terena 4 (uzdužni nagib terena od 7 do 9 %)
5. Klasa uzdužnog nagiba terena 5 (uzdužni nagib terena od 9 do 11 %)
6. Klasa uzdužnog nagiba terena 6 (uzdužni nagib terena od 11 do 13 %).

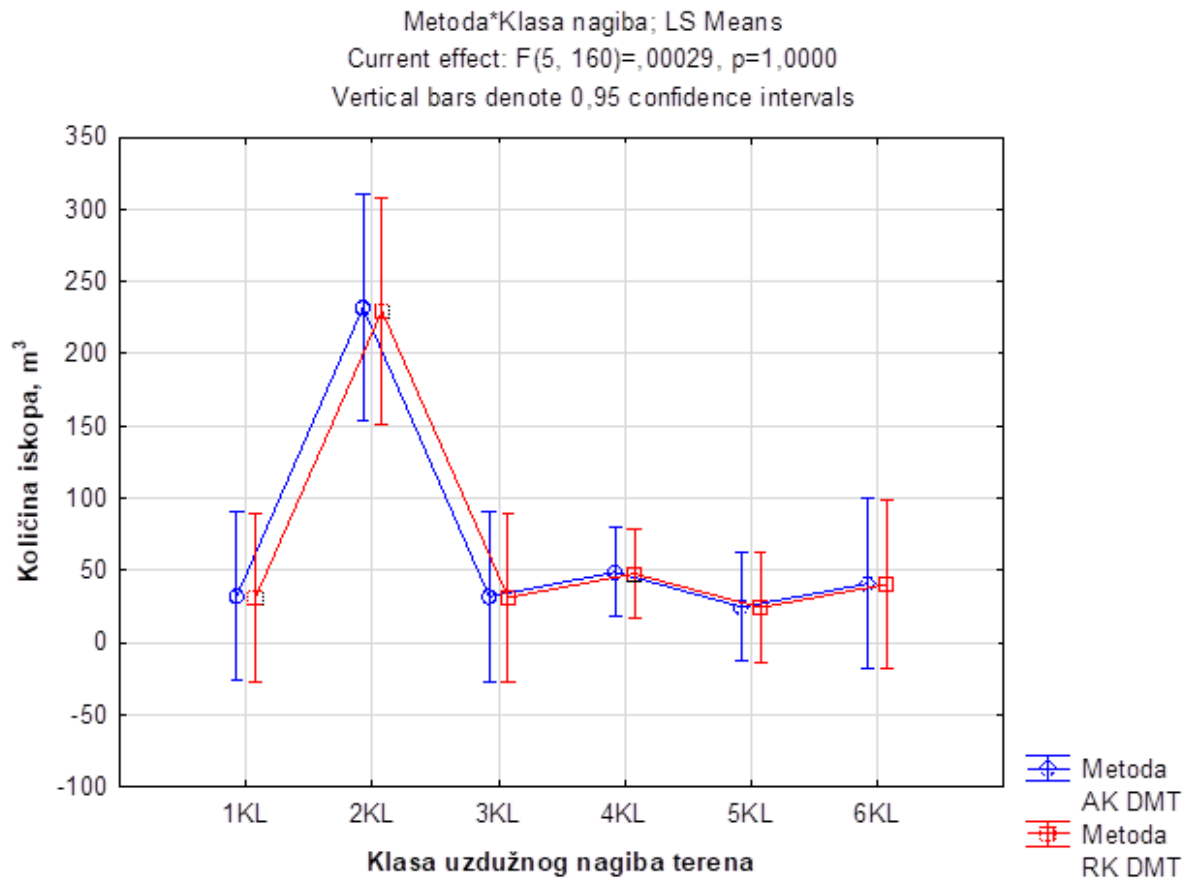
Nadalje, definirane su i 4 klase poprečnog nagiba terena sukladno Jeličiću (1983.) koji s gledišta stabilnosti nasipa na strmim padinama a u ovisnosti o vrijednostima poprečnog nagiba terena (α), teren s gledišta cestogradnje dijeli u 4 klase i to kako slijedi:

1. Klasa poprečnog nagiba terena 1 (poprečni nagib terena $\alpha \leq 20.00$ %)
2. Klasa poprečnog nagiba terena 2 (poprečni nagib terena u granicama 20.00 % $< \alpha \leq 50.00$ %)
3. Klasa poprečnog nagiba terena 3 (poprečni nagib terena u granicama 50.01 % $< \alpha \leq 67.00$ %)
4. Klasa poprečnog nagiba terena 4 (poprečni nagib terena $\alpha > 67.01$ %).

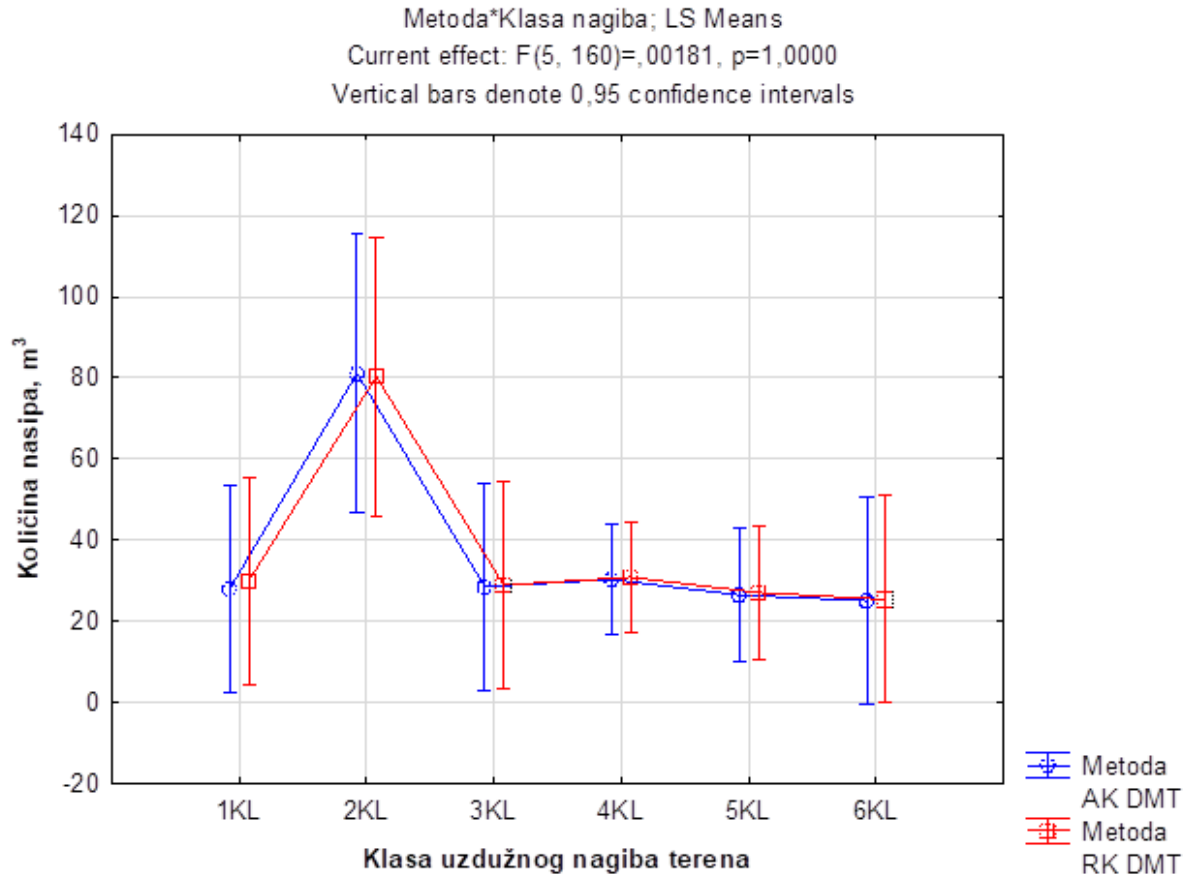
Zatim se koristila faktorska analiza varijance (ANOVA) kako bi se utvrdilo utječe li način klasifikacije oblaka točaka (automatski vs. ručni) odnosno uzdužni nagib terena pojedine klase nagiba na dobivene razlike u količinama zemljorada.

Izrađenom faktorskom analizom varijance ustanovili smo kako nema statistički značajnog utjecaja između način klasifikacije oblaka točaka (automatski vs. ručni) i pojedine klase uzdužnog nagiba terena na izračunate volumene zemljanih radova. Ujedno je vidljivo kako u klasi uzdužnog nagiba 2 dolazi do statistički značajnog odstupanja u pojavnosti izračunatih količina iskopa i nasipa u odnosu na sve ostale klase uzdužnog nagiba terena. Kako je uočeno odstupanje zamijećeno i kod volumena zemljanih radova dobivenih temeljem DMT-a izrađenog automatskom klasifikacijom

oblaka točaka i kod DMT-a izrađenog ručnom klasifikacijom oblaka točaka vidljivo je kao izrađeni digitalni modeli terena nisu uzrok odstupanja. Jedini razlog tome leži u činjenici što se klasa uzdužnog nagiba terena 2 nalazi na mjestu predviđenom za okretaljku, a koja svojim dimenzijama ujedno povećava potrebnu količinu zemljanih radova, a što posljedično dovodi do zaključka kako klasa uzdužnog nagiba terena 2 zapravo ne utječe na statistički značajno odstupanje u pojavnosti volumena tijekom izgradnje donjeg ustroja šumske ceste (slike 23. i 24.) već je ovo odstupanje uvjetovano pojavnošću okretaljke u toj klasi uzdužnog nagiba.

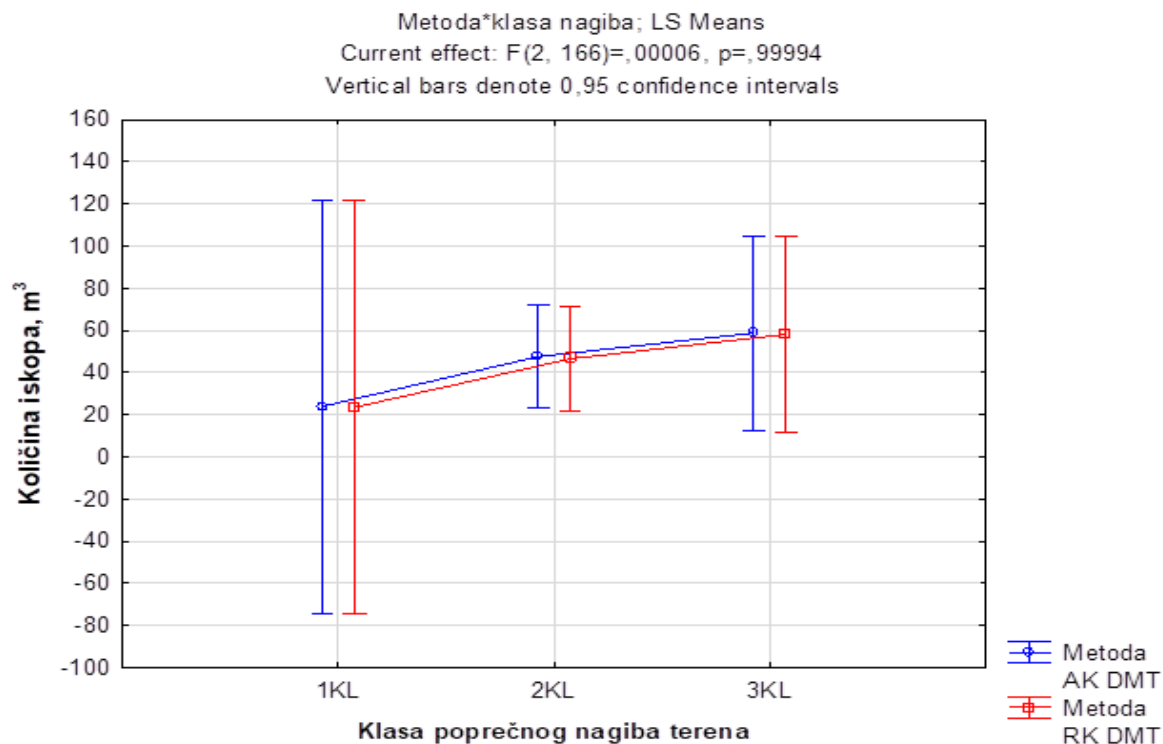


Slika 23. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa uzdužnog nagiba terena na pojavnost količina u iskopu

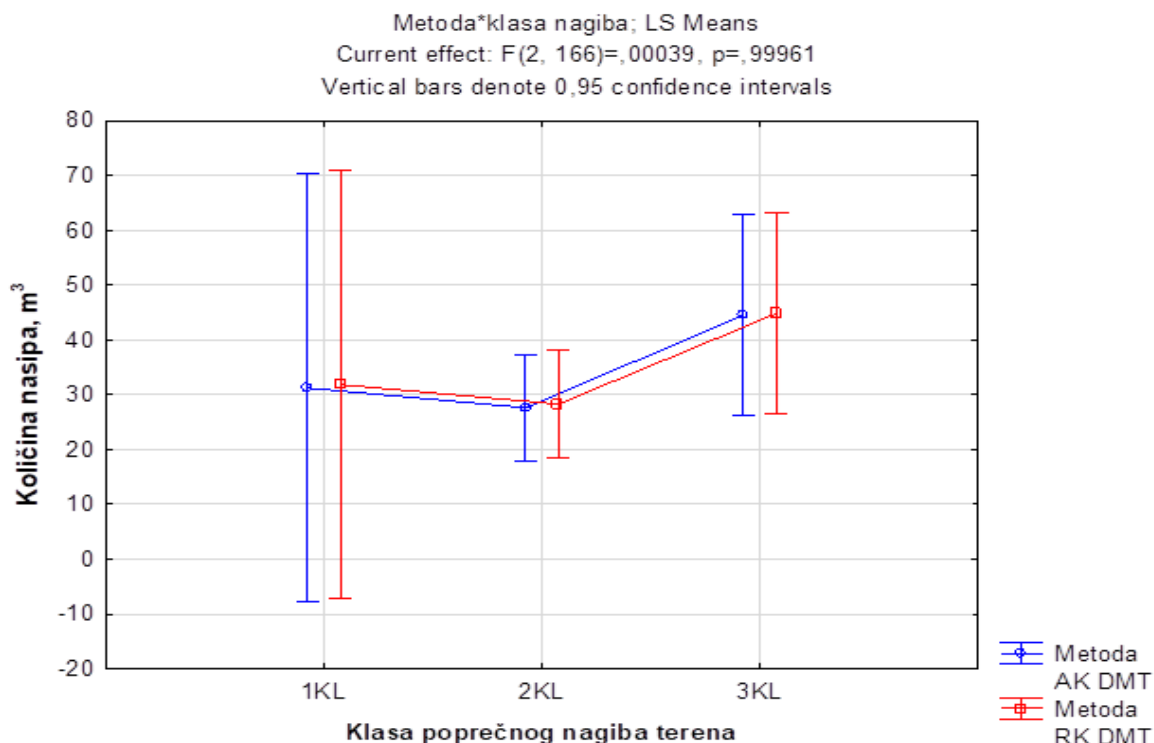


Slika 24. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa uzdužnog nagiba terena na pojavnost količina u nasipu

Daljnji cilj bio je ustanoviti pomoću izrađene faktorske analize varijance dolazi li do statistički značajnog utjecaja između načina klasifikacije oblaka točaka (automatski vs. ručni) i pojedine klase poprečnog nagiba terena na izračunate volumene zemljanih radova. Izrađenim analizama uočava se trend povećanja volumena zemljanih radova temeljem čega možemo zaključiti kako uslijed povećanja klase poprečnog nagiba terena odnosno povećanjem vrijednosti poprečnog nagiba terena predstavljene kutem α dolazi i do povećanja količina iskopa i nasipa. Kako je uočeni trend zamijećen kako kod volumena zemljanih radova dobivenih temeljem DMT-a izrađenog automatskom klasifikacijom oblaka točaka tako i kod volumena zemljanih radova DMT-a izrađenog ručnom klasifikacijom oblaka točaka vidljivo je kao izrađeni digitalni modeli terena nisu uzrok odstupanja (slike 25. i 26.).



Slika 25. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa poprečnog nagiba terena na pojavnost količina u iskopu



Slika 26. Faktorska analiza varijance (ANOVA) međusobnog utjecaja istraživanih načina klasifikacije DMT-a (automatski vs. ručni) i različitih klasa poprečnog nagiba terena na pojavnost količina u nasipu

5. ZAKLJUČAK I RASPRAVA

Bespilotne letjelice, sve zastupljenije u znanstvenom i stručnom obavljanju poslova u šumarstvu (Torresani dr. 2017, Dainelli i dr. 2021, Tomljanović i dr. 2022), omogućuju brzu izmjeru, uz korištenje manje šumskih (pomoćnih) radnika prilikom provedbe iste klasičnim metodama izmjere. Kako je šumskih radnika sve manje (Mijoč 2022.) nužno je utvrditi uporabljivost novih tehnologija, kao što su bespilotne letjelice opremljene RGB kamerama, prilikom terenske izmjere. Aerofotografije snimljene bespilotnom letjelicom omogućavaju izradu digitalnog modela terena (DMT) na temelju fotogrametrijske analize, dobivenog oblaka točaka i njegove klasifikacije. Klasifikacija točaka, koju dostupni programi za fotogrametrijsku analizu mogu raditi automatski, nužna je za definiranje točaka koje su tlo i cesta, odnosno koje se koriste za izradu DMT-a. Ovim diplomskim radom analizirala se razlika između ručne i automatske klasifikacije oblaka točaka programa Pix4D mapper na izrađene DMT-ove. Ujedno se testirala i razlika između dobivenih volumena zemljanih radova dobivenih iz glavnih projekata šumske ceste izrađenih pomoću dva navedena DMT-a. Na temelju obrađenog oblaka točaka dobivena su dva DMT-a: AK DMT i RK DMT koji su korišteni u daljnjim analizama.

Analizom Z vrijednosti dobivenih analizom 807 validacijskih točaka utvrđeno je kako ne postoji statistički značajna razlika između izrađenih DMT-ova. Korijen srednje kvadratne pogreške (RMSE) Z vrijednosti iznosio je 4,26 cm između uspoređivanih DTM-ova. Relativno mala RMSE vrijednost može se objasniti velikim brojem validacijskih točaka na mjestu kojih se ručnom klasifikacijom nije ništa mijenjalo. Naime, razlika između automatske i ručne klasifikacije najčešće je bila na mjestima na kojim se nalazio šumski ostatak, koje je korišteni program detektirao pogrešno, kao tlo. Ukupan broj validacijskih točaka na kojima je vrijednost razlike Z vrijednosti između AK DTM-a i RK DTM-a bila manja od 1 mm je 717. Iako je izračunati RMSE relativno malen, na određenim točkama razlika Z vrijednosti je poprimila značajnije vrijednosti pa je tako najveća zabilježena razlika iznosila 44,65 cm. Osim ove, najveće utvrđene razlike, na još 40 validacijskih točaka razlika je bila veća od 5 cm. Rezultat svih ovih odstupanja bio je šumski ostatak na tlu.

Izrađeni DMT-ovi za potrebe daljnje analize korišteni su kao podloga, odnosno nositelj terenskih informacija (podataka) prilikom izrade glavnog projekta šumske ceste u programu RoadEng. Projektirana je trasa šumske ceste ukupne duljine 8+60,90 hm. Kako je horizontalno i vertikalno razvijanje trase bilo isto, kao i korišteni predlošci normalnih poprečnih profila, razlike u izračunatim volumenima zemljorada rezultat su razlike između uspoređivanih DMT-ova. Nisu utvrđene statistički značajna razlike između volumena iskopa i nasipa na temelju izrađenih DMT-ova. Ukupne količine iskopa i nasipa vidljive su u tablici 9.

Tablica 9. Ukupne količine iskopa i nasipa na temelju različitih podloga

	AK DMT	RK DMT	Razlika AK DMT - RK DMT
Iskop (m³)	4199,40	4124,40	75,00
Nasip (m³)	2694,00	2745,00	-51,00

Manje vrijednosti količina iskopa u projektu izrađenom na temelju RK DTM-a rezultat su izbacivanja točaka, odnosno reklasifikacijom točaka klasificiranih kao tlo tijekom izrade AK DTM-a, a koje su u stvarnosti predstavljale šumski ostatak. Najveće su razlike zabilježene na kraju istraživane trase šumske ceste na mjestu na kojem je predviđena okretaljka i to u iznosu od 7,70 m³ što je i logično jer je upravo na tom mjestu detektirana i veća količina šumskog ostatka. Kako se ručnom reklasifikacijom pogrešno klasificiranih točaka, na tim mjestima Z vrijednost smanjila, ne treba čuditi veća ukupna količina nasipa izračunata na temelju RK DTM. Ova razlika je, ponovo, najistaknutija na mjestu okretaljke gdje ona iznosi 14,5 m³.

Faktorskom analizom varijance analiziran je utjecaj uzdužnog i poprečnog nagiba terena na izračunate volumene iskopa i nasipa. Utvrđeno je kako klasa 2 (uzdužni nagib terena od 3 do 5 %) statistički značajno utječe na količine iskopa i nasipa. Jedini razlog tome leži u činjenici što se klasa nagiba 2 nalazi na mjestu predviđenom za okretaljku. Daljnja analiza pokazala je kako, iako je zamijećen trend povećanja volumena zemljanih radova uslijed povećanja klase poprečnog nagiba terena, na uočeni trend utjecaj nije imao korišteni DMT dobiveni automatskom odnosno ručnom klasifikacijom.

Naposlijetku, može se zaključiti da iako razlike između izračunatih volumena iskopa i nasipa na temelju DMT-a izrađenih ručnom i automatskom klasifikacijom oblaka točaka nisu statistički značajni, ali su utvrđene određene razlike, koje na duljim trasama mogu značajno utjecati na procijenjenu cijenu koštanja izgradnje šumske ceste, posebno ukoliko se u obzir uzme činjenica da cijena koštanja izgradnje donjeg ustroja šumske ceste može sudjelovati i do 74,22 % u ukupnoj cijeni izgradnje šumske ceste (Papa i dr. 2023). Ručnom klasifikacijom oblaka točaka, može se vjernije prikazati teren, posebno ukoliko tlo nije moguće vidjeti na aerofotografijama. S obzirom na činjenicu kako ručna klasifikacija oblaka točaka značajno produljuje vrijeme obrade prikupljenih podataka neophodno je prije samog izvršenja ustanoviti njenu opravdanost. Konkretno, za potrebe ovog istraživanja ručna klasifikacija izvodila se 10 sati te je upravo iz tog razloga neophodno da se postupak provodi selektivno, odnosno nužno je da projektant ili osoba koja je zadužena za skupljanje terenskih podataka na samom terenu procijeni treba li se ručna klasifikacija provesti te ukoliko za njom postoji potreba, treba li to biti na ukupno snimljenoj površini ili na njenom manjem dijelu.

6. LITERATURA

1. Akay, A.E., Serin, H., Sessions, J., Bilici, E., Pak, M., 2021: Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products. *Croat. j. for. eng.* 42(2): 245–258.
2. Anon., 2000: Forest roads manual. Oregon Department of Forestry, State Forest Program, 207 str.
3. Anon., Leksikografski zavod Miroslav Krleža (2024). Hrvatska tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/fotografija.pdf>. Pristupljeno 10. kolovoza 2024.
4. Bendea, H., Chiabrandu, F., Tonolo, G.F., Marenchino, F., 2007: Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece.
5. Biçici, S., Zeybek, M., 2020: Road Distress Measurements Using UAV, *Turk J Remote Sens GIS*.
6. Dabić, G. 2021: Analiza troškova izgradnje šumskih cesta na nagnutim terenima i mogućnost njihove racionalizacije, Diplomski rad, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
7. Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., & Matese, A., 2021: Recent advances in Unmanned Aerial Vehicles forest remote sensing—A systematic review. Part II: Research applications. *Forests* 12(4): 397.
8. Dodson, E.M., 2021: Challenges in Forest Road Maintenance in North America. *Croat. j. for. eng.* 42(1): 107–116. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.777>.
9. 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 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX:02019R0945-20200809> Pristupljeno 9.10.2024.
10. Getzin, S., Nuske, R.S., Wiegand, K., 2014: Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests. *Remote Sensing*.
11. Gopi, S., Sathikumar, R., Madhu, N. (2018). *Advanced Surveying - Total Station, GPS, GIS and Remote Sensing* (str. 147), <https://ketabton.com/book/13746>. Pristupljeno 26. studenoga 2024.
12. Heinimann, H.R., 2017: Forest Road network and transportation engineering—state and perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38: 155–173.
13. Hrvatska.eu – zemlja i ljudi., n.d.. <https://www.croatia.eu/index.php/hr/home-hr/zemljopisstanovnistvo/reljefne-cjeline>. Pristupljeno 15.9.2024.

14. 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.
15. Jeličić, V., 1983: Šumske ceste i putevi. Samoupravna interesna zajednica odgoja i usmjerenog obrazovanja šumarstva i drvne industrije, Zagreb, 193 str.
16. Kobasić, D., 2013: Ceste i cestovni objekti. Nastavno pismo za programe obrazovanja odraslih. Škola za cestovni promet, Zagreb.
17. Krevh, V., 2018: Primjena bespilotnih letjelica u poljoprivredi. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zagreb.
18. Krtalić, A., Gajski, D., Maltarski, M., 2019: Digitalni trodimenzionalni prikazi scene i satelitska stereofotogrametrija. *Geodetski list* 73(96) (2): 147–164.
19. Kružić, F., 1897: Fotogrametrija i praktični dio tahimetrije. Knjigotiskarna G. Neubergera, Križevci.
20. Kušan, V., 1994: Prvi udžbenik iz geodezije na hrvatskome jeziku. *Mehanizacija šumarstva* 19(4): 292–294.
21. Lepoglavec, K., Potočnik, I., Pentek, T., Tomašić, Ž., Poje, A., Mihelič, M., 2011: Programski paket za projektiranje šumskih prometnica RoadEng. *Nova mehanizacija šumarstva* 32(1): 39–51.
22. Lepoglavec, K., 2014: Optimizacija primarne i sekundarne šumske prometne infrastrukture nagnutih terena. Disertacija, Šumarski fakultet, Zagreb, str. 1-341.
23. Lovrinčević, M., Papa, I., Đuka, A., 1 Pentek, T., 2 different methods of point cloud classification for DMT creation and their affect on the amount of forest road earthwork // 56th International Symposium on Forestry Mechanization Gdańsk, Poljska, 11.06.2024-14.06.2024
24. Lozić, S. (1996). The slope inclination of the continental part of the Republic of Croatia. *Acta Geographica Croatica*, 31(1.), 41-49.
25. Mellgren, P.G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. *FERIC*, 1–13.
26. Mijoč, D.,: 2022. Održivost radne snage u šumarstvu Federacije Bosne i Hercegovine (Disertacija). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:632418>
27. Miller, C., Laflamme, R. A., 1958: The Digital Terrain Modelling—Theory and Applications. *Photogrammetric Engineering* 24(3): 433–442.
28. Montorselli, N. B., Neri, F., Marchi, E., Piegai, F., 2008: The multi-functional role of forest road network in Italy; *International Seminar on Infrastructure and Transport in Sustainably Managed Forests*: (5-6)

29. 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: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva* 38(1).
30. Papa, I., Pentek, T., 2023: Predavanja iz kolegija Projektiranje šumskih prometnica. Sveučilište u Zagrebu, Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvna tehnologije.
31. Papa, I., Picchio, R., Lovrinčević, M., Janeš, D., Pentek, T., Validžić, D., Venanzi, R., & Đuka, A., 2023. Factors Affecting Earthwork Volume in Forest Road Construction on Steep Terrain. *Land*, 12 (2): 400. <https://doi.org/10.3390/land12020400>
32. Pentek, T., Pičman, D., Nevečerel, H., 2006: Uspostava optimalne mreže šumskih cesta na terenu – smjernice unapređenja pojedine faze rada. *Glasnik za šumske pokuse, posebno izdanje* 5: 647–663.
33. Pentek, T., 2010a: Predavanja iz kolegija Otvaranje šuma. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (.pptx prezentacije).
34. Pentek, T., 2010b: Predavanja iz kolegija Šumske prometnice. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (.pptx prezentacije).
35. Pentek, T., 2012: Skripta iz kolegija Šumske prometnice. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
36. 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: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva* 35(1): 63-78.
37. Pentek, T., Papa I., 2021: Predavanje iz kolegija Šumske prometnice. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu (.pptx prezentacije).
38. Peterca, M., Radošević, N., Milisavljević, S., Racetin, F., 1974: Kartografija. Vojnogeografski institut., Beograd.
39. Pernar, R., 1996: Primjena rezultata interpretacije snimaka i GIS-a za planiranje u šumarstvu / Meštrović, Šime (mentor). Zagreb, 1996
40. Pičman, D., 2007: Šumske prometnice. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1 - 460 str.
41. 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.
42. Potočnik, I., 1992: Ekonomski in tehnički vidiki vzdrževanja gozdnih cest. Magistarski rad, Ljubljana, 129 str.

43. Potočnik, I., Yoshioka, T., Miyamoto, Y., Igarashi, H., Sakai, H., 2005: Maintenance of forest road network by natural forest management in Tokyo University Forest in Hokkaido. *Croatian Journal of Forest Engineering* 26(2): 71–78.
44. Queen, L. P., Vlaming, J. C., Arthaud, G. J., Lime, D. W., 1997: Modeling Impacts of Forest Roads on Recreation Opportunities, *Northern Journal of Applied Forestry*, Volume 14, Issue 4, Pages 194–201)
45. Rick, J.W., 2018: Total Station. U: *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 1–3.
46. Sedlak, O.K., 1996: Forest road construction policies in Austria. *Proceedings of the Seminar on Environmentally Sound Forest Roads and Wood Transport*, Sinaia, Romania 17–22 June.
47. Sessions, J., 2007: *Harvesting operations in the tropics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 170.
48. Šikić, D., Babić, B., Topolnik, D., Knežević, I., Božičević, D., Švabe, Ž., Piria, I., Sever, S., 1989: *Tehnički uvjeti za gospodarske ceste*. Znanstveni savjet za promet Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, Zagreb, 78 str.
49. Šimić, Z., 2017: *Izmjera detalja - metode*, PPT., Geodetska tehnička škola, Zagreb
50. Tomljanović, K., Kolar, A., Đuka, A., Franjević, M., Jurjević, L., Matak, I., ... & Balenović, I., 2022: Application of UAS for monitoring of forest ecosystems – a review of experience and knowledge. *Croat. j. for. eng.* 43(2): 487–504.
51. Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., ... & Wallace, L., 2017: Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *Int. j. remote sens.* 38(8-10): 2427–2447.
52. Winkler, N., 1998: *Environmentally Sound Road Construction in Mountainous Terrain*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 54 str.
53. White, J. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Pitt, D., Woods, M., 2013: The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests* 4(3): 518–536.
54. Zeybek, M., 2018: *UAV Based 3D Modeling Application for Monitoring of Road Distress*. Conference Paper.