

Primljeno / Received: 06.09.2021.
Prihvaćeno / Accepted: 29.10.2021.

UDK 528:7:551.43
Izvorni naučni rad / Original scientific paper

ANALIZA KVALITETA 3D MODELA ZASNOVANIH NA DIGITALNOJ FOTOGRAMETRIJI

QUALITY ANALYSIS OF 3D MODELS BASED ON DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

Mirko Borisov, Radovan Simić, Vladimir M. Petrović, Miroljub Milinčić

SAŽETAK

Glavni fokus rada je procjena kvaliteta 3D modela terena dobijenih iz snimaka bespilotnih letjelica (UAV). Kvalitetni i detaljni modeli terena neophodni su, prije svega, za precizno određivanje promjena na području iskopa zemljišta. Analiza kvaliteta 3D modela uključuje stepen odstupanja geometrijskih i geomorfoloških karakteristika od stvarnog položaja terena i statusa u prirodi. Za određivanje geometrijske tačnosti primjenjuje se uporedni način ispitivanja, odnosno poređenje izmjerenih vrijednosti 3D modela sa podacima dobro definisanih geodetskih i kontrolnih tačaka a posteriori mjerenih primjenom Globalnih Navigacionih Satelitskih Sistema (GNSS). Analiza kvaliteta i poređenja se obavljaju vizualno, numerički, sračunavanjem zapremine iskopa i izradom profila terena. Rezultati sugerišu da su 3D modeli dobijeni iz snimaka UAV-a veoma kvalitetni. Takođe, važna prednost korišćenja slika UAV-a za generisanje 3D modela na području iskopa je njihova efikasnost, na primjer, češće ažuriranje i mjerenje visina nepristupačnog terena i određivanje lokalnih promjena na terenu.

Ključne riječi: kvalitet, 3D model, područje iskopa, UAV, premjer zemljišta

ABSTRACT

The main focus of the paper is the assessment of the quality of the 3D terrain models obtained from the images of unmanned aerial vehicles (UAV). Quality and detailed terrain models are necessary, above all, for precise determination of changes in the area of excavation. The quality analysis of the 3D model includes the degree of deviation of geometric and geomorphological characteristics from the actual terrain position and status in nature. To determine the geometric accuracy, a comparative method of testing is used, ie a comparison of the measured values of the 3D model with the data of well-defined geodetic and control points a posteriori measured using the Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Analysis of quality and comparisons are performed visually, numerically, by calculating the excavation volume and creating a terrain profile. The results suggest that the 3D models obtained from the UAV images are of very high quality. Also, an important advantage of using UAV images to generate 3D models in the excavation area is their efficiency, for example, more frequent updating and measuring the height of inaccessible terrain and determining local changes in the terrain.

Keywords: quality, 3D model, excavation area, UAV, land survey.

1 UVOD

U oblasti geodezije i geoinformatike, dostupnost savremenih tehnika i tehnologija omogućavaju modernizaciju procesa prikupljanja i modelovanja podataka, pa samim tim i kvalitetniju analizu geoprostora. Jedna od tehnika koja se u današnje vrijeme izuzetno brzo razvija je iz oblasti digitalne fotogrametrije primjenom UAV (eng. *Unmanned Aerial Vehicles*). Zbog velikog broja aplikacija UAV tehnologije u mnogim oblastima primjene, povećane su studije o verifikaciji tačnosti rezultata obrade digitalnih snimaka i digitalnih modela terena. Naime, broj kontrolnih tačaka na površi Zemlje - GCP (eng. *Ground Control Point*) zavisi od konfiguracije terena, ali i od veličine teritorije kartiranja (Jae Jin Yu i dr., 2020).

Određeni rezultati istraživanja pokazuju da optimalan broj iznosi oko 10 kontrolnih tačaka za manje lokacije (do 10 ha) i oko 20 tačaka za veće lokacije (do 300 ha). Ako se ovi rezultati primjene za obradu UAV slika, onda je moguće modelovanje terena uz minimalne troškove i napor u prikupljanju GCP (Jae Jin Yu i dr., 2020).

Predmet ovog rada je analiza kvaliteta 3D modela terena, a sve u cilju utvrđivanja da li metoda digitalne fotogrametrije zasnovana na snimanju bespilotnim letjelicama može zadovoljiti standarde u geodeziji i specifične inženjerske poslove poput iskopa zemljišta i ruda. Iako većina modela terena koji se koriste u ovom radu spadaju u kategoriju digitalnih modela površi i digitalnih modela visina, izraz 3D model terena primjenjuje se uopšteno na sve prikaze nadmorske visine. Podaci u 3D modelima se prikazuju i koriste u obliku regularne mreže (GRID), mreže nepravilnih trouglova (TIN) ili izolinije (Li i dr., 2005).

Određivanje visine, geomorfoloških odlika i topografskih parametara terena (reljef, nagib, orijentacija, zakrivljenost) od velikog su značaja u mnogim analizama i primjenama kao što su geološke i hidrološke studije, analiza poljoprivrednog zemljišta, prostorno planiranje, zaštita prirodne sredine i drugo (Mukherjee i dr., 2013).

2 METODOLOGIJA RADA

2.1 Područje od interesa

Osnovna ideja prilikom izbora lokaliteta za rad bila je da se odabere područje za koje već postoje određeni podaci o terenu, a čije je prikupljanje obavljeno u određenim vremenskim periodima nekom od postojećih geodetskih metoda premjera. Shodno tome odabran je površinski kop gline „Garajevac“, Novi Bečej, u Autonomnoj Pokrajini Vojvodina, Republika Srbija. Naime, za ovaj lokalitet se obavljaju često periodična snimanja terena u cilju praćenja promjena kopa, odnosno određivanje kubatura iskopane gline i procjenu bilansnih rezervi sirovinskih masa za buduća iskopavanja. Područje od interesa je podijeljeno na tri lokacije, shodno konfiguraciji i pokrivaču zemljišta, testiranju same misije leta različitih parametara i postupku 3D modelovanja i analizi terena, odnosno dobijanju rezultata (Slika 1).



Slika 1. Područje obuhvaćeno radom (a) i podjela na lokacije od interesa (b)

Lokalitet označen brojem 1, odnosi se na “Glavni kop” površine oko 1,5 ha, gdje je zemljišni prekrivač pretežno glina. Na obodu je nisko rastinje i manje vodene površi. Na pojedinim mjestima iskopa zadržani su testerasti profili terena. Lokalitet broj 2, predstavlja kop “Jalovinu” površine 0,6 ha, gdje je zemljišni prekrivač glina, sitno rastinje i pijesak, a na obodu zahvata su prilazni putevi bez vegetacije i rastinja. Iskop je približno ravna površ sa naglim promjenama samo po obodu zahvata. Lokalitet broj 3, odnosi se na “Sjevero-istočni kop” površine 0,9 ha, gdje je zemljišni prekrivač glina, a na obodu zahvata je nisko i rijetko rastinje. Sa zapadne strane je njiva pod suncokretom, a sa sjeverne strane deponija smeća i nekoliko većih površi pod vodom. Eksploatacijom i iskopavanjem terena, formirana je zemljišna rampa koja se spušta do najnižih dijelova kopa, dok su po obodima oštri zasjeci tla.

2.2 Prethodna modelovanja terena

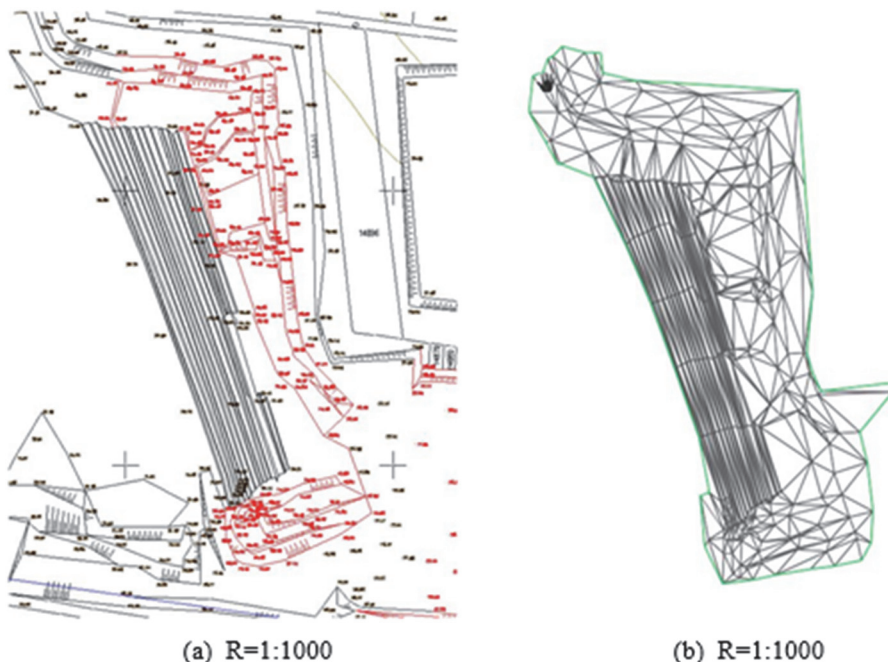
Prethodna praćenja i kartiranja gore pomenutih kopova baziraju na geodetsko-topografskom premjeru. Premjer je obavljan terestričkim metodama, kombinacijom GPS tehnologije i mjerenja totalnom stanicom. Na datom području formirana je geodetska osnova za mjerenje, koja se oslanja na državnu trigonometrijsku i poligonsku mrežu. Prikupljanje podataka je obavljano u horizontalnom i vertikalnom smislu, u referentnom državnom koordinatnom sistemu uz propisanu proceduru i klasu tačnosti prethodno definisanim zadatkom od strane izvođača radova. Projektna klasa tačnosti iznosi:

- Standardna devijacija horizontalnog položaja ≤ 50 cm i
- Standardna devijacija vertikalnog položaja ≤ 5 cm.

Radovi i iskop na predmetnoj lokaciji je obavljan avgusta mjeseca 2019. godine i nakon obustave iskopa, izvršeno je terestričko mjerenje trenutnog stanja površi zemljišta. Podaci o površi su

bilježeni u formi spiskova tačaka sa svojim koordinatama, koje se za dalju obradu dopunjuju terenskim skicama. Primarni cilj je bio da se sračuna kubatura iskopane i razvežene glinske mase. Već pomenutom metodologijom, na osnovu dostupnih terenskih podataka prikupljenih terestričkim metodama, kreirane su digitalne karte i 3D modeli terena u softveru AutoCAD Civil 3D (Autodesk, 2019).

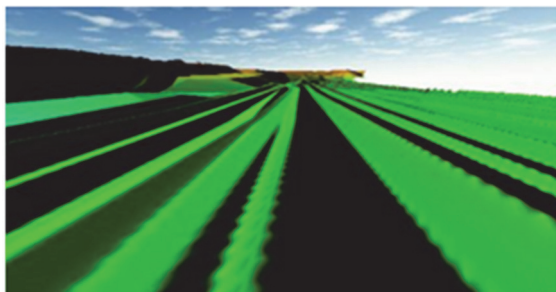
Pored standardnog prikaza karata (Slika 2a) u *.dwg* formatu datoteka, dodatni proizvod rada u pomenutom programskom paketu je i digitalni model terena koji se predstavlja kao entitet sa određenim atributima i metapodacima, koji ga kao takvog prezentuje trodimenzionalni digitalni model sa kojim je omogućena geoprostorna analiza i vizualizacija terena (Slika 2b).



Slika 2. Modeli podataka lokacije 1 "Glavni kop": (a) Kartografski model, (b) 3D model terena

Postupak modelovanja terena svodi se na definisanje ulaznog seta podatka koji se generalno preuzima sa kreirane digitalne karte, a čine je detaljne tačke terena određene prostornim koordinatama. Njima se prilikom modelovanja pridružuju i strukturne linije (Slika 3). Ukoliko se ispuni uslov pridruživanja karakterističnih linija i tačaka, formirani 3D model iskopa može vjerno reprezentovati konfiguraciju zemljišta, odnosno topografiju iskopa (Wierzbicki i dr., 2019).

Kreirani 3D model terena je u TIN strukturi, što pruža mogućnost fleksibilnih analiza i prikaza, odnosno informacija i metapodataka 3D modela kao što su: površ u horizontalnoj projekciji, površ u prostoru, minimalni i maksimalni nagib terena, broj trouglova triangulacije, minimalna i maksimalna visina itd. Pored toga, od izuzetnog značaja je struktura podataka unutar kreiranog 3D modela sa aspekta interoperabilnosti, tj. mogućnosti primjene modela u druge aplikacije i namjene.



Slika 3. Modelovanje terena kopa na osnovu terestričkog premjera

2.3 Primjena digitalne fotogrametrije

Premjer primjenom UAV sistema zahtjeva dvije osnovne procedure: planiranje misije tj. let i mjerenje kontrolnih tačaka na terenu u cilju georeferenciranja. Misija (let i prikupljanje podataka) se obično planira u kancelariji, polazeći od poznavanja područja od interesa, zahtijevane prostorne rezolucije snimaka GSD (eng. *Ground Sample Distance*) ili otisaka i osnovnih parametara ugrađene digitalne kamere (Leitão i dr., 2016). Let se može odvijati ručnom, potpomognutom ili automatskom režimu. UAV letjelice su opremljene GNSS i INS navigacionim uređajima, koji obezbjeđuju pozicioniranje i orijentaciju u prostoru, pa samim tim ovi sistemi omogućavaju automatski režim misije i prikupljanje snimaka.

Postupak modelovanja i ocjena kvaliteta podataka realizovan je u programskim paketima: "Agisoft Metashape Professional", "Global Mapper", "QGIS3" i "Auto Cad Civil 3D". Za UAV premjer korišćen je savremeni model drona „Anafi Parrot“ koji je opremljen kamerom koja daje snimke 4K HDR rezolucije, uređajima za satelitsko pozicioniranje, inercijalnim sistemom, stabilizatorom kamere i dr. U cilju georeferenciranja i povećanja globalne preciznosti snimanja na lokalitetu je prije misije leta raspoređeno 29 markera sa ulogom kontrolnih tačaka (GCP), gdje su korišćena tri tipa biljega različitih dimenzija (Slika 4).



Slika 4. Kontrolni markeri korišćeni u svrhu obezbjeđivanja "GCP"

Svim kontrolnim tačkama su određene 3D prostorne koordinate GPS premjerom. Planiranje misije leta obavljeno je korišćenjem softvera „Pix4D Capture“ koji u potpunosti automatizuje let sa unaprijed definisanim parametrima kao što su: tip misije, brzina letjelice, preklopi snimaka, visina leta i dr. Svi parametri leta podešavaju se u zavisnosti od ciljane prostorne rezolucije snimaka GSD (eng. *Ground Sample Distance*). Za sva tri područja GSD je u domenu 1cm/px. Vremenski uslovi prilikom snimanja su bili idealni: period opažanja od 10 do 13 časova, blagi povjetarac, temperatura vazduha oko 30°C, veoma malo oblaka, bez formiranja sjenki i bez padavina. Ukupno su realizovana 602 snimka terena (Tabela 1).

Tabela 1

Opšte informacije o snimanju područja od interesa

Informacije misije leta					
Lokacija	Broj snimaka	Dimenzije područja [m]	Visina leta H [m]	Preklap [%]	Vrijeme trajanja
1. "Glavni kop"	278	172 x 290	40 m	80 %	13 min
2. "Jalovina"	114	75 x 119	30 m	80 %	6 min
3. "Sjevero-istočni kop"	210	224 x 186	40 m	80 %	12 min

Procesiranje fotografija pomoću „Agisoft Metashape Professional“ počinje učitavanjem snimaka na osnovu podataka o položaju koje je zabilježio UAV sistem, uz prikaz prostornih koordinata i preciznosti rasporeda. U softveru se pokreće opcija „Align Photo“, nakon čega se pojavljuje dijalog prozor sa nekoliko podešavanja koja se tiču nivoa željene preciznosti i pojedinih ograničenja.

Kod preklapanja treba razlikovati dva koraka procesiranja referentnih tačaka koje softver identifikuje na snimcima. Prvo, nominacija „Key Points“, odnosno tačke na 2D snimku koje softver identifikuje kao važne karakteristike. One se koriste za računanje relativnog položaja kamere radi kreiranja oblaka podudarnih tačaka „male gustine“. Oblak tačaka velike gustine se potom kreira na osnovu ovih rijetkih oblaka tačaka i položaja kamera. Drugo je pronalaženje „Tie Points“, odnosno „Key Points“ tačke koje se mogu identifikovati na dva ili više snimka radi računanja 3D položaja, dakle ključne tačke za formiranje „masivnog“ oblaka tačaka (Sebastian i dr., 2012). Nakon pokretanja procesa podudaranja, formira se oblak referentnih tačaka „Tie Points“, uz napomenu da to nije konačni oblak tačaka koji će se koristiti za modelovanje površi već samo onih tačaka koje definišu uklapanje snimaka (Tabela 2).

Tabela 2
Specifikacija procedure uklapanja snimaka

Uklapanje snimaka					
	Lokacija	Tačnost	“Tie Points”	Vrijeme podudaranja	Vrijeme uklapanja
1.	„Glavni kop“	High	376 773	53 min 26 s	8 min 33 s
2.	„Jalovina“	High	177 572	23 min 24 s	4 min 11 s
3.	„Sjeverno-istočni kop“	High	254 584	36 min 5 s	2 min 40 s
1.	„Glavni kop“	Medium	345 592	44 min 46 s	3 min 32 s

Za „Glavni kop“ preklapanje je urađeno sa različitim podešavanjem preciznosti u cilju prikaza razlike u realizaciji procesa i dobijenog rezultata. Naime, iz Tabele 2, vidi se da je broj referentnih tačaka različit za otprilike 10%, a da se vrijeme trajanja procesa razlikuje za približno 20% što bi u nekim zahtjevnijim objektima posmatranja bio faktor za razmatranje. Za svaki snimak se može obaviti pregled identifikovanih referentnih tačaka u postupku „Image matching“.

Za formiranje oblaka tačaka, tj. indirektno 3D modela, neophodne su dvije operacije: prikupljanje podataka i procedure vezane za preklapanje snimaka (Zhou i dr. 2017). Prva faza je definisana egzaktnim parametrima (tip UAV letjelice, vremenski uslovi, cilj prikupljanja podataka i sl.). Druga faza je zahtjevnija i uključuje određene algoritme i operacije. Pritom, za snimke visoke rezolucije mogu se primijeniti savremene fotogrametrijske metode za rekonstrukciju, tzv. procedure *Structure From Motion* (SFM). Procedura SFM zasniva se na istim principima kao stereoskopska fotogrametrija, na osnovu koje se prvenstveno može rekonstruisati 3D topografija na osnovu niza preklapajućih snimaka (Nyimili i dr., 2016).

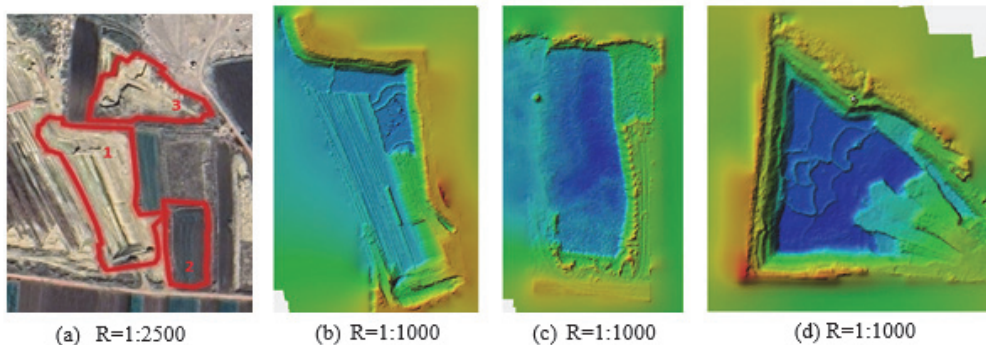
Tabela 3
Specifikacija oblaka tačaka i vrijeme generisanja

Gusti oblak tačaka						
	Lokacija	Tačnost gustog oblaka	Tačnost “Tie Point”	Tačke oblaka	Vrijeme generisanja mapa	Vrijeme generisanja gustog oblaka
1.	„Glavni kop“	Srednja	Niska	524 787	4 min 30 s	1 min 19 s
1.	„Glavni kop“	Visoka	Srednja	4 940 303	2 h 10 min	9 min 32 s
2.	„Jalovina“	Visoka	Srednja	3 786 309	2 h 43 min	7 min 8 s
3.	„Sjevero-istočni kop“	Visoka	Niska	991 537	25 min 36 s	2 min 21 s
3.	„Sjevero-istočni kop“	Visoka	Visoka	15 536 863	8 h 47 min	52 min 10 s

U prethodnom koraku proces „Image Matching“ je obezbjedio generisanje rijetkog oblaka tačaka sačinjenog u postupku preklapanja snimaka. U pitanju je preliminarni oblak tačaka rjeđe gustine, generisan na osnovu pozicija kamera i sračunatih „dubina“ informacija na osnovu koga se generiše oblak tačaka velike gustine „Dense Point Cloud“ odnosno vrši se profinjenje prethodno generisanog oblaka tačaka. Jedan od algoritama za ovakvu vrstu obrade je MVS (eng. *Multi-View Stereo*) koji se može implementirati različitim algoritmima zavisno od svrhe i veličine oblaka

tačaka (Cucchiario i dr. 2020). Generisanje oblaka tačaka sa zadatim nivoom „srednje“ detaljnosti (Tabela 3) sa stanovišta planirane upotrebe, reprezentuje površ terena na zadovoljavajući način.

Kreirani 3D modeli u formi oblaka tačaka, obiluju ogromnom količinom podataka. Preciznije rečeno, masivnost podataka ovakve strukture ogleđa se u ogromnoj količini tačaka sa svojom geoprostorom pozicijom i mogućnošću proširenja sa koloritnim kodom „RGB“, određenom na osnovu snimka sa koga podatak potiče (Oštir i Mulahusić, 2014). Upravo ova masivnost podataka dobija značaj u savremenom pristupu 3D modelovanja realnih objekata. Sa stanovišta prvenstveno geodezije, ovakvu strukturu podataka treba smatrati kao neobrađene podatke, koji iako veoma vjerno reprezentuju realnost, daju i veliki broj mogućnosti manipulacije prema ciljanoj upotrebi (Slika 5).



Slika 5. Lokacije i odgovarajući 3D modeli terena

Dakle, prikupljanje podataka UAV sistemom premjera omogućila je dobijanje oblaka tačaka koje prikazuju osim površine terena i objekte koji se na njemu nalaze. Obzirom da je objekat istraživanja površ iskopa terena, nameće se pitanje koju će visinu model prikazati u ćeliji. Za razliku od terestričkog snimanja gdje u postupku premjera geodetski stručnjak bira detalje snimanja, ovdje je to onemogućeno jer se područje premjera posmatra kao jedinstvena cjelina i gdje se detaljnost definiše parametrima prikupljanja i eventualnim prostornim ograničenjima. Takođe, u kontekstu prikupljanja podataka o terenu, samo prikupljanje podataka digitalnom fotogrametrijom može imati i negativnu konotaciju u vidu „viška“ informacija. Međutim, ovakvo posmatranje „suvišnih“ informacija je pogrešno, jer postoje procedure koje mogu izdvojiti objekte na površi terena i formirati poseban sloj podataka, koje predstavljaju dodatak na informacije o objektu istraživanja.

3 REZULTATI, ANALIZA I DISKUSIJA

Koncept analize rezultata svodi se na upoređivanje digitalnog modela UAV premjera sa drugim dostupnim 3D modelima i informacijama, prvenstveno prikupljenih u prethodnom periodu i primjenom terestričkog premjera. U radu, za uslovno tačan model usvojen je digitalni model terena zasnovan na terestričkom premjeru. Ovo je opravdano činjenicom da su na predmetnoj lokaciji u prošlosti već obavljena ovakva mjerenja i to u svrhu komercijalnih geodetskih radova. Drugi razlog ovakvog tretmana terestričkog modela je shodno metodi premjera koja spada u precizniji način, pa je apsolutno adekvatan u ocjenjivanju kvaliteta drugih modela. U

procedurama analize kao najprecizniji podatak u terestričkom modelu smatraće se pozicija na površi koja je direktno opažana geodetskim instrumentom.

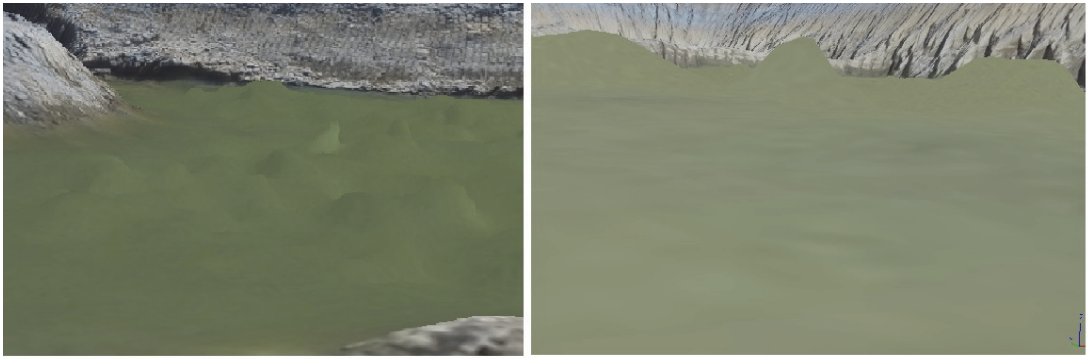
3.1 Vizuelna inspekcija 3D modela terena

Jedna od osnovnih kontrola formiranog 3D modela terena je njegova vizuelna verifikacija. Obzirom na potpunost i masivnost podataka dostupnih UAV sistemom premjera, postupak vizuelne inspekcije je u mnogome olakšao procjenu kvaliteta obzirom da formirani model možemo sagledati u veoma realističnom obliku. Vizuelnim pregledom modela u formi oblaka tačaka ili 3D modela sa teksturom može se obaviti inspekcija da li je na nekom mjestu došlo do odstupanja (Slika 6). Primjetno je da formirani 3D modeli veoma vjerno oslikavaju realnu površ terena. Jedino su uočene problematične situacije na površima koje su prekrivene vodenim površima i gušćom vegetacijom (Ceylan i dr., 2011).



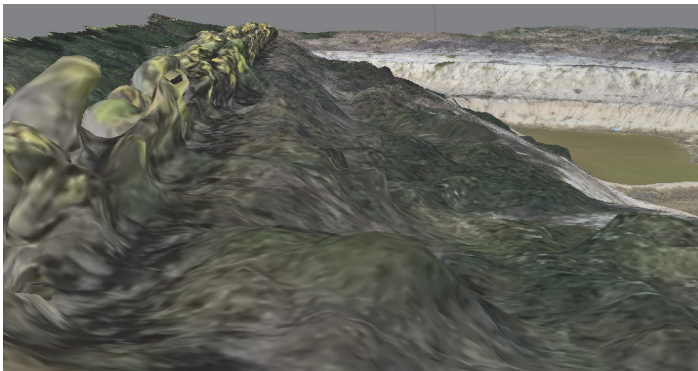
Slika 6. Vizuelna verifikacija 3D modela terena (Pal i dr. 2020)

Obzirom da se na nekim područjima nalaze veće površine pod vodom sa dubinom takvom da se ne vidi zemljano dno, uočeno je da se tu pojavio veliki šum (eng. *noise*) u oblaku tačaka. Ova negativna pojava se prilikom generisanja 3D modela malo popravila, ali na pojedinim mjestima je došlo do nerealnih „Peak“-ova u modelu (Slika 7).



Slika 7. Šumovi na površima pod vodom.

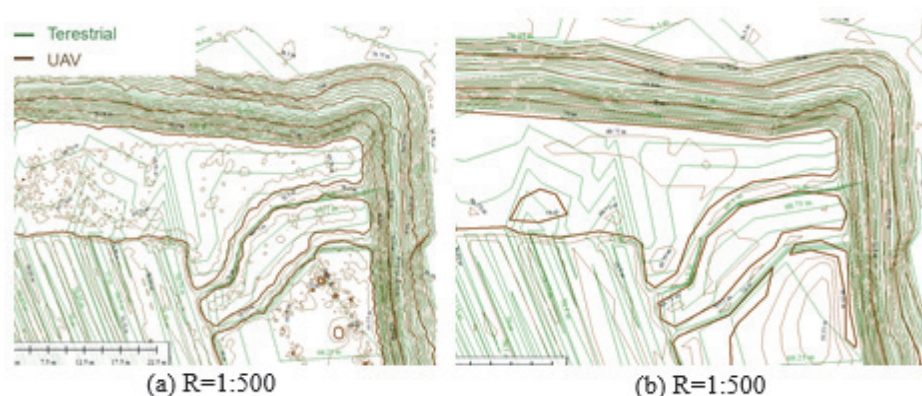
Takođe, površi prekrivene gušćom vegetacijom imaju veliki šum u oblaku tačaka i stvaraju nepreciznu sliku o stvarnoj površi. Jedna takva površ se nalazi kod lokacije 2 (Sjevero-istočni kop), gdje se zapadna granica područja dodiruje sa obradivom površinom koja je u trenutku premjera bila pod usjevom suncokreta koji je bio dostigao maksimum u svom razvoju i vegetaciji (Slika 8).



Slika 8. Površina pod usjevom suncokreta na zapadnoj granici lokacije 2 (Sjevero-istočni kop)

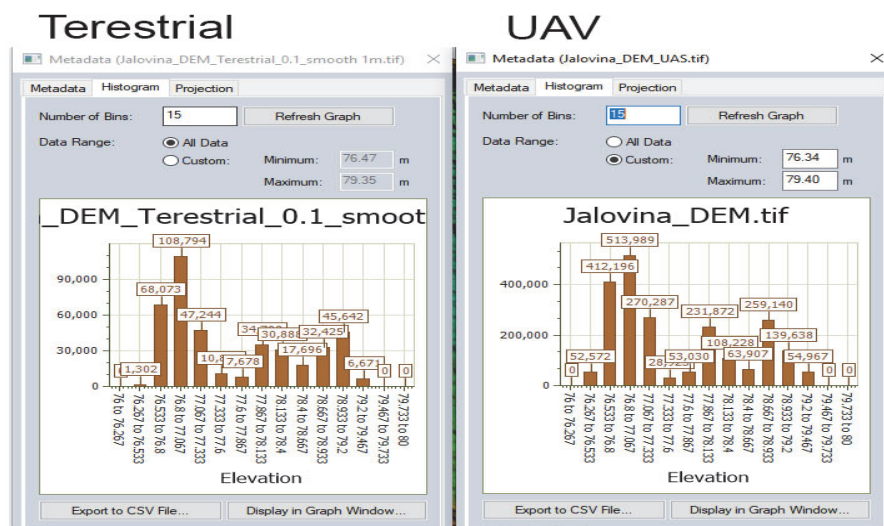
Konkretno problem sa vegetacijom nije imao uticaj na rezultat jer su takve površine van granica istraživanja ili u neposrednoj blizini pa su kao interesantan detalj ovdje prikazana, a njihovo eventualno prisustvo se određenim procedurama kao i šum kod vodenih površina može izolovati i umanjiti. Svakako kod 3D modelovanja terena, ovakva područja prouzrokuju smetnje i nepravilnosti pa je primjena procedura popravke preporuka, ukoliko je moguća i u što većoj mjeri.

Metoda analize poređenjem formiranog modela terena sa fotografijama i percepcijom realnosti zasnovan je isključivo na subjektivnom doživljaju osobe koja vrši inspekciju. Analiza kompleksnih oblika, velikih područja sa puno detalja predstavljao bi izuzetno zahtjevan poduhvat. Uvođenje simbologije i numerike, čak u kontekstu vizuelne inspekcije može u mnogome olakšati i umanjiti subjektivan uticaj u postupku analize. Jedan od načina prikaza i poređenja 3D modela terena jeste pomoću izohipsi (Slika 9).



Slika 9. Ulazni DEM rezolucije (a) 5 cm i (b) 50 cm i kreiranje izohipsi ekvidistancije 0.25 m

Na primjeru zbog kompleksnosti je ujedno i vizuelni pregled otežan, ali je očigledna podudarnost izohipsi uz izuzetno veću, moglo bi se reći i pretjeranu detaljnost i izlomljenost UAV modela izohipsi, dok se kod terestričkog modela uočava generalisanje koje je primijenjeno prilikom premjera na ovakav način. Obzirom da je izvorni 3D model UAV premjera u ovoj analizi u DEM strukturi, koja je prvobitno rezolucije 5 cm, njegovom konverzijom u izohipse dobio se veoma izlomljen izgled, pa je stoga moguće redukovati rezoluciju, radi lakšeg sagledavanja a ujedno i prilagoditi nivo detaljnosti kod prikaza površi terena ovakvog tipa.



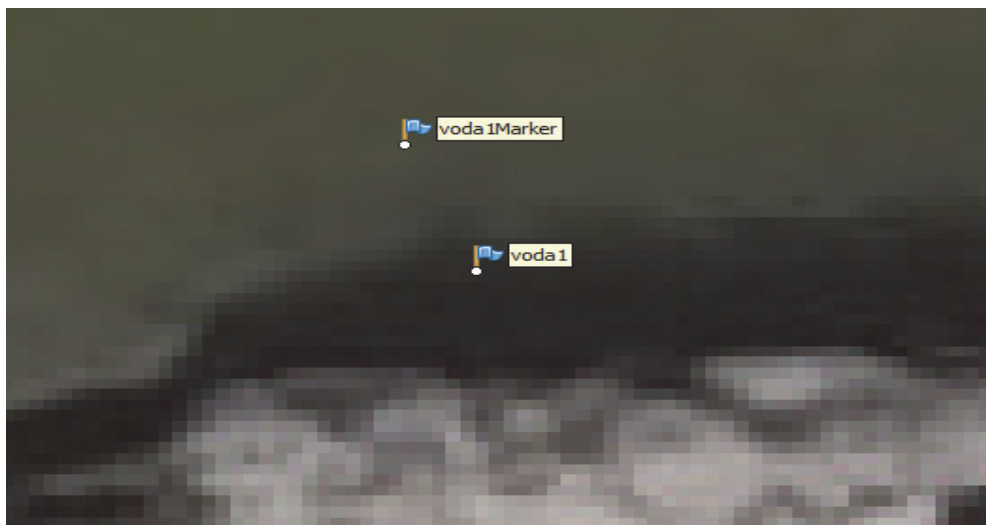
Slika 10. Poređenje histograma Terestričkog i UAV modela u DEM strukturi

Prikaz različitih 3D modela učitanih u istom format, odnosno strukturi modela, daje mogućnost da se izvrši poređenje njihovih srodnih informacija, pa tako je moguće za lokaciju 2 „Jalovina“ učitati DEM modele za terestričko i UAV snimanje, pa uporediti njihove metapodatke u vidu histograma visina (Slika 10).

Ono što se iz prikaza histogramskih vrijednosti može zaključiti jeste da je raspodjela za dva modela približno ista, s tim što UAV model obiluje mnogo većom količinom podataka. Upravo grafički prikaz histograma, za razliku od prikaza modela izohipsama umanjuje uticaj pretjerane detaljnosti UAV modela u odnosu na terestrički, pa je interesantan kod vizuelne verifikacije modela.

3.2 Analiza pomoću kontrolnih tačaka (GCP)

Kod postupka georeferenciranja primjenom GCP tačaka, pojedine tačke koje se mogu smatrati prekobrojne u tom postupku, mogu se iskoristiti kao kontrolne tačke formiranog 3D modela terena (Rojgar i dr., 2019). Pored biranja GCP za kontrolne tačke, prilikom premjera je na dva mjesta koja su pod vodom na lokacijama 1 i 2., određena je i kota vode GPS mjerenjem, jer su na tim mjestima očekivane problematične situacije pa se prema ovoj proceduri može staviti marker zastavica u blizini tih mjesta (Slika 11).



Slika 11. Poređenje kote vode očitane na 3D modelu i utvrđene GPS mjerenjem

Za područje „1. Glavni kop“ uzeto je nekoliko kontrolnih tačaka na prethodno opisani način, a rezultati poređenja prikazani su u Tabeli 4.

Očigledno je da je u kontekstu horizontalnog položaja tačaka preciznost velika. Poređenjem visinskih kota koje su značajnije u kontekstu korišćenja 3D modela terena, uočljivo je da je najveće odstupanje kod tačke „K1“ koja se nalazi na samom obodu lokacije 1 „Glavni kop“ (Slika 12). Na ostalim tačkama odstupanja su iznad očekivane tačnosti, pa shodno tome može se smatrati da je formirani 3D model terena na osnovu ove analize zadovoljavajućeg kvaliteta. Poseban pravac razmatranja je za površine pod vodom, jer kao što je ranije rečeno to su područja sa visokim šumom na modelu.

Tabela 4

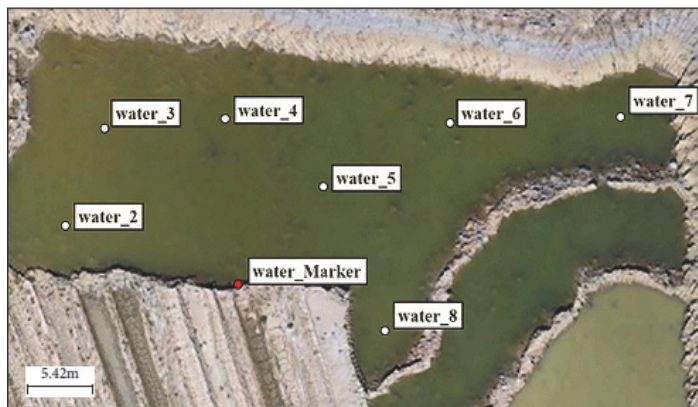
Koordinate kontrolnih tačaka određene GPS mjerenjem i očitavanjem na 3D modelu - i njihove razlike

"1. Glavni kop": kontrolne tačke									
ID	Istok <i>E</i> GPS (m)	Sjever <i>N</i> GPS (m)	Visina <i>H</i> GPS (m)	Istok <i>E</i> UAV 3D model (m)	Sjever <i>N</i> UAV 3D model (m)	Visina <i>H</i> UAV 3D model (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔH (m)
K1	7436695,12	5051084,29	77,22	7436695,14	5051084,27	76,98	0,019	0,014	0,237
K3	7436632,75	5051136,59	70,11	7436632,80	5051136,57	70,14	0,042	0,011	0,023
O4	7436627,22	5051183,44	70,09	7436627,25	5051183,43	70,11	0,034	0,010	0,021
water_1	-	-	69,92	-	-	69,97	-	-	0,045
Sredina							0,032	0,012	0,081



Slika 12. Glavni kop i prikaz kontrolnih tačaka

Tačka „water_1“ je na modelu očitana neposredno uz granicu sa zemljištem gdje je šum manji, a on raste krećući se ka središtu vodene površi. Obzirom da kota „ogledala“ vodene površi treba da je jednaka, shodno toj provjeri, obavljeno je očitavanje kota na različitim pozicijama (Slika 13).



Slika 13. Kontrola očitanih kota DSM sa kotama "ogledala" vode GPS mjerenjem (Pal i dr. 2020)

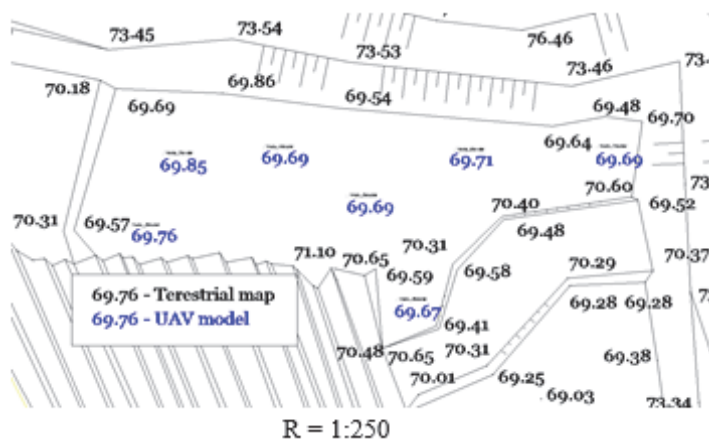
Vizuelnim pregledom modela, metapodataka i sl. uočljivo je da se na vodenim površima javlja povećan šum u podacima, pa je izvršena dodatna kontrola očitavanjem visina na modelu. Rezultati očitanih kota DSM (eng. *Digital Surface Model*) na osnovu UAV i kota "ogledala" vode određenim GPS mjerenjem, kao i njihovo poređenje odnosno razlike, prikazane su u Tabeli 5.

Tabela 5

Pregled očitanih visina tačaka i njihovih razlika

Tačka	Visina GPS (m)	Visina UAV (m)	ΔH (m)
water_2	69,92	69,76	0,16
water_3	69,92	69,85	0,07
water_4	69,92	69,69	0,23
water_5	69,92	69,69	0,23
water_6	69,92	69,71	0,21
water_7	69,92	69,69	0,23
water_8	69,92	69,67	0,25

Očigledno je da su površi terena pod vodom (dna) problematične sa stanovišta prikupljanja podataka UAV promjerom kao i kod većine drugih tehnika. Očitane vrijednosti modela se ne podudaraju sa kotama ogledala vode, koja su određena GPS mjerenjem, pa se postavlja pitanje koje su to visine, odnosno šta je algoritam programa, prilikom formiranja bloka snimaka odabrao za vezne referentne tačke. Poređenjem markiranih tačaka na vodenoj površi UAV modela i visinske predstave terena na karti terestričkog snimanja koje je obavljeno kada na tom terenu nije bilo vode, može se uočiti da ne postoji podudaranje vrijednosti, mada vrijednosti drastično ne odstupaju (Slika 14).

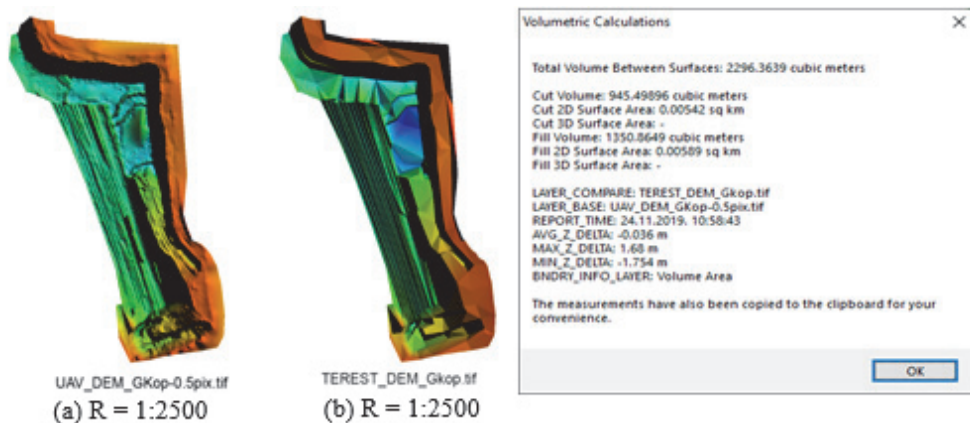


Slika 14. Poređenje markiranih tačaka (Pal i dr. 2020)

Može se smatrati da se na ovakvim površima 3D model UAV premjera formirao na dubini nižoj od površi „ogledala“ vode, ali obzirom na to da je terestričko snimanje izvršeno sa određenim stepenom generalisanja i nivoa detaljnosti, ova mjera podudarnosti se ne može u potpunosti definisati, već samo konstatovati da su ova područja obilježena kao nesigurna u kontekstu prikupljanja podataka UAV premjerom.

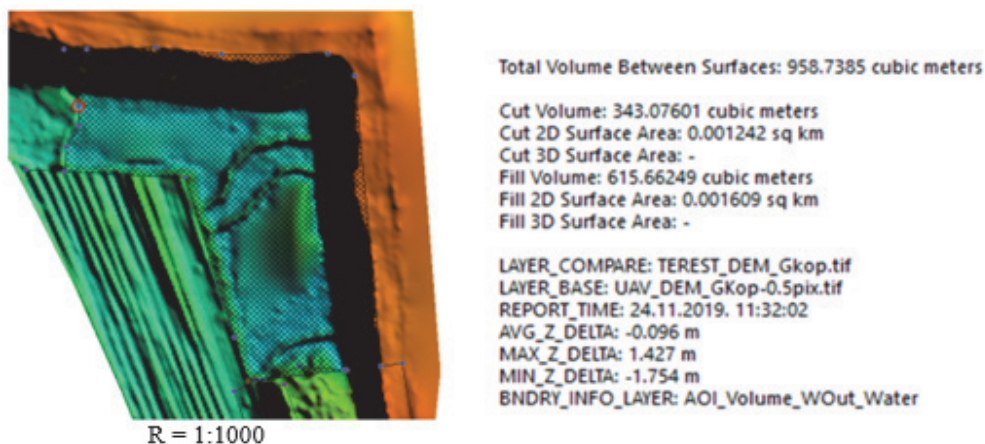
3.3 Računanje kubature

Kao i u prethodnim analizama i kod ove će se smatrati da je DMT terestričkog premjera uslovno tačan model. Računanje kubature se vrši u programskom paketu „Global Mapper“ koji je pogodan za uporedne analize više modela. Obzirom da se obavlja uporedna analiza dva digitalna modela identičnog terena, odnosno na lokaciji 1 „Glavnog kopa“ u jednakom i egzaktnom vremenskom trenutku, korišćena je ista struktura modela. Naime, modeli terestričkog i UAV premjera su reprezentovali teren u približno jednakim granicama, ali prilikom definisanja procesa kalkulacije kubature, pristup je bio takav da se ona sprovede u identičnoj granici obuhvata za oba modela. Rezolucija DEM modela fotogrametrijskog premjera je kao i kod vizuelne verifikacije modela pomoću izohipsi redukovana na 50 cm. Preciznije od toga bilo bi bespotrebno obzirom da je terestrički model grublje detaljnosti, shodno sprovedenom generalisanju sadržaja. Rezultati računanja kubature (volumetrije) dva modela terena zasnovanih na UAV i terestričkim podacima za lokaciju 1 „Glavni kop“, prikazani su na Slici 15.



Slika 15. Volumetrijske razlike (a) UAV modela i (b) terestričkog modela za lokaciju 1 "Glavni kop"

Dobijena volumetrijska razlika iznosi 2296 m^3 , gdje je terestrički model uzet kao referentni, a UAV model kao uporedni. Razlika kubature je raspoređena na: iskop 945 m^3 i nasip 1351 m^3 . Pritom, analize su ukazale na problematičnost modela u dijelu pod vodenim površima, pa je urađena dodatna kalkulacija samo u granicama tih površi (Slika 16).



Slika 16. Kontrola UAV modela terena u zoni pod vodenim površima - lokacija 1 "Glavni kop"

Volumetrijska razlika na području pod vodom iznosi 959 m^3 . Površina obuhvata potpunog računanja iznosi 11350 m^2 , dok je pod vodenom površi 2860 m^2 , što je približno 25% površine. Učešće razlike kubature je oko 40% što dokazuje prethodne konstatacije da na površima pod vodom nije dobijen adekvatan model. Što se tiče ostatka područja na posmatranoj lokaciji 1 „Glavni kop“ koja nije pod vodom, iznosi 8490 m^2 i na nju se odnosi ostatak volumetrijske razlike od 1337 m^3 . Pravljenjem količnika kubature i površine na koju je sračunata ne razmatrajući da li je u pitanju iskop ili nasip, dobija se prosječna visinska razlika modela od 16 cm što se može smatrati korektnim rezultatom obzirom na karakteristike tla na testiranoj lokaciji. Takođe, za sve tri predmetne lokacije obavljena je uporedna volumetrijska analiza i rezultati su dati u Tabeli 6.

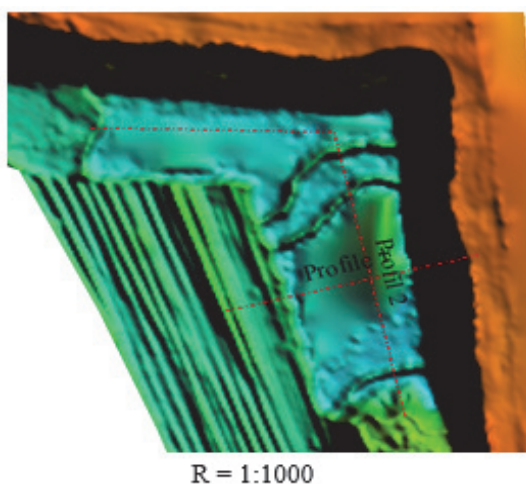
Tabela 6
Volumetrijske kalkulacije između terestričkog i UAV modela

Specifikacija računanja zapremine						
Lokacija	Ukupna zapremina između površi [m ³]	CUT zapremina [m ³]	FILL zapremina [m ³]	Ukupna površina [m ²]	Površ pod vodom [%]	
1. „Glavni kop“	2296	945	1351	11350	25	
2. „Jalovina“	182	112	70	4115	0	
3. „Sjeverno-istočni kop“	1992	1364	628	8650	30	

Iz Tabele 6, vidi se da na lokaciji 2 „Jalovina“ na kome nema vodenih površi ili drugih smetnji, volumetrijska razlika između terestričkog i UAV modela je mala, pa se može zaključiti da su dva modela gotovo identična. Nasuprot toj lokaciji druge dvije na kojima postoje vodene površi su opterećene određenim razlikama u volumetriji, koje su za sada povezane sa problematičnim smetnjama u UAV podacima, uz konstataciju da te razlike potiču upravo od nepravilnosti podataka nad tim vodenim površima i relativno manje razlike na ostatku područja. Shodno tome kvantitativna analiza volumetrijskim kalkulacijama nam je potvrdila kvalitete UAV modela terena uz potvrdu postojanja smetnji u dijelu sa vodenim površima.

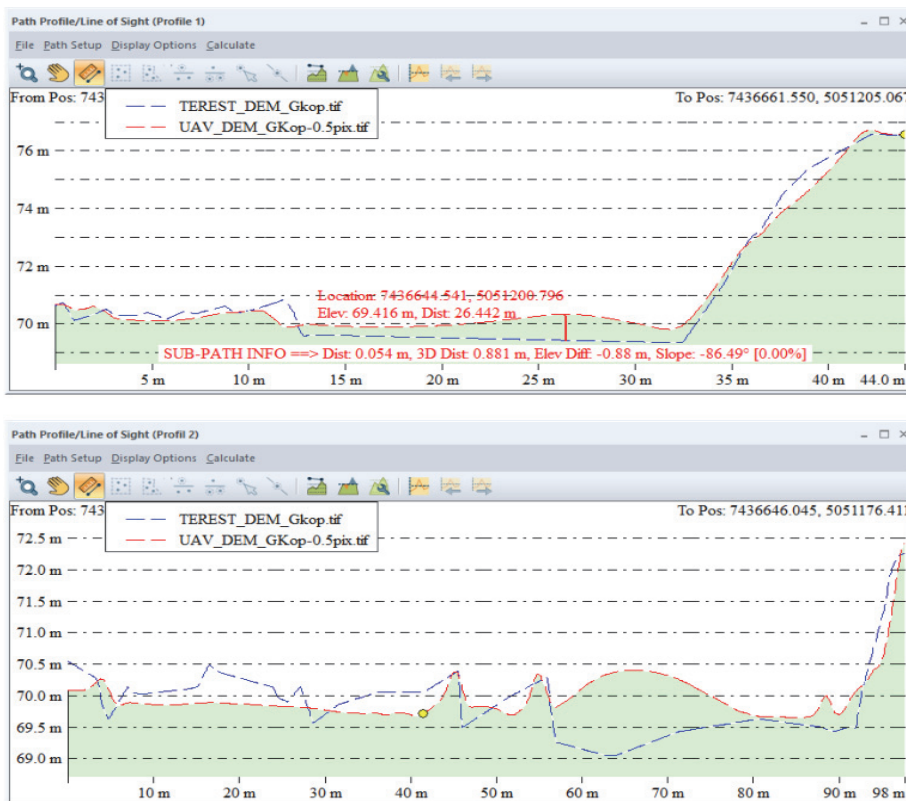
3.4 Analiza poprečnim i podužnim profilima terena

U prethodnom poglavlju razmatrana je kvantitativna volumetrijska analiza između 3D modela terena terestričkog i UAV premjera, rezultujući ponovnom potvrdom kvaliteta UAV podataka za modelovanje kao i prisustva smetnji na područjima pod vodom. Kao i kod analize volumetrijskim kalkulacijama i ovdje se posmatraju dva modela istog područja na osnovu različitih izvora podataka. Generisanje profila je realizovano u istom programu kao i volumetrijske kalkulacije.



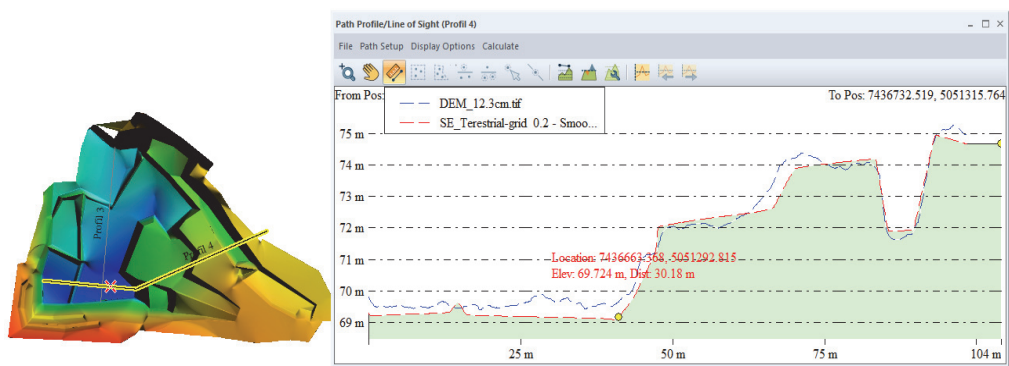
Slika 17. Pozicije test profila na površima pod vodom

Usljedi višestruke potvrde odstupanja dva modela i ovdje se prvo razmatra oblast pod vodom, pa su tako na lokaciji 1 „Glavni kop“ na tim mjestima postavljene uzdužne i poprečne profilne linije (Slika 17). Za svaku profilnu liniju se potom može generisati pregled profila kao što je prikazano na Slici 18. Generisanje izgleda poprečnih (Slika 18 - gore) i podužnih profila (Slika 18 - dole) na području pod vodom. Crvenom linijom je prikazan 3D model zasnovan na UAV premjeru a plavom na osnovu terestričkog premjera. Na osnovu generisanih profilnih izgleda za oba profila uočljivo je odstupanje dva modela u predjelu pod vodom, gdje čak na „Profil 2“ ta razlika ide i do 1,6 m (između 55 m i 80 m udaljenosti od početka profila), što apsolutno nema veze sa realnom površi i još jednom je dokazano da UAV premjer na područjima prekrivenim vodom ne daje dobre rezultate modelovanja.



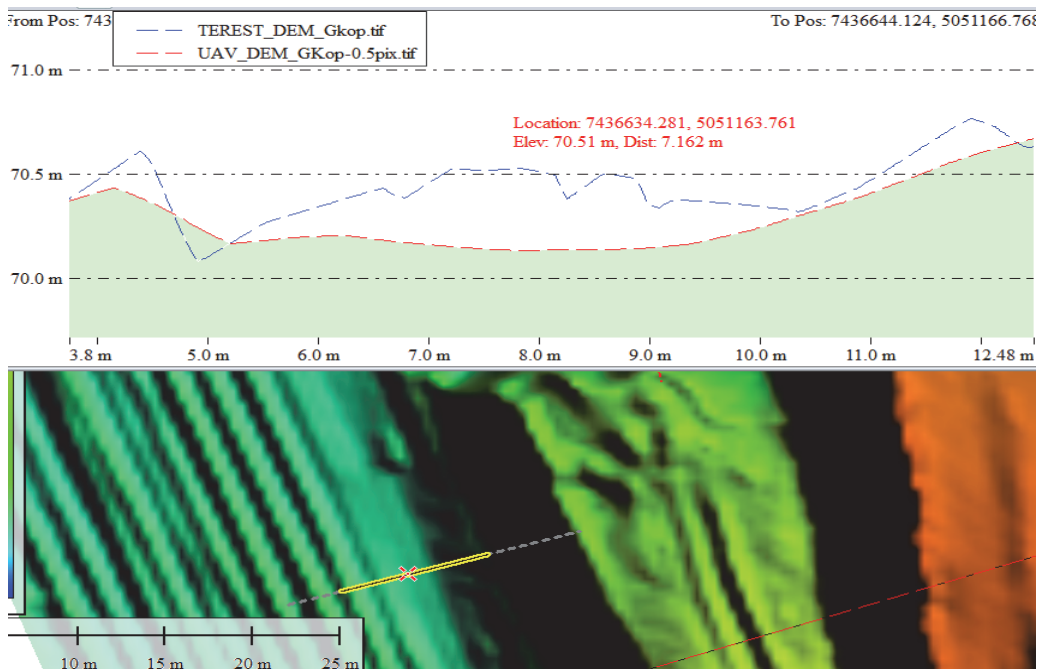
Slika 18. Lokacija 1 „Glavni kop“

Potvrda prethodnog zaključka je dobijena i na lokaciji 3 „Sjevero-istočni kop“, gdje se razlika dva modela opet javlja u djelu površi pod vodom, dok je u ostalim predjelima dobra podudarnost dva modela (Slika 19). Uočavaju se odstupanja 3D modela u dijelovima sa vodenim površima koja iznose i do 40 m profilne linije.



Slika 19. Lokacija 3 "Sjevero-istočni kop"

Takođe, prilikom analize profila terena na pojedinim mjestima je uočena razlika između dva modela koja ukazuje da je na tom predjelu izvršen dodatni iskop, obzirom da je postojao vremenski raskorak između dva premjera (terestričkog i UAV) u periodu od 20 dana (Slika 20).



Slika 20. Razlika između dva modela u predjelu gdje je zemljišna (glinska) površ

Ovo upotpunjuje prethodnu volumetrijsku analizu koja je ukazivala na određena odstupanja izvan područja pod vodom. Na isti način su analizirani modeli sve tri lokacije istraživanja i izvedeni isti zaključci da se digitalni modeli terena kao i u prethodnim analizama podudaraju, osim u predjelima UAV modela gdje se reprezentuje vodena površ.

4 ZAKLJUČAK

Razvoj digitalne fotogrametrije primjenom savremenih platformi UAV sistema, posljednjih godina stvorilo je uslove za primjenu i ispitivanje njegove primjene kod složenih reljefnih oblika. Na osnovu toga izabran je lokalitet površinskog rudnika gline na kome su se prethodno sprovodili premjeri, a sve u cilju preciznijeg praćenja promjena konfiguracije terena i izvođenja određenih operacija (računanje kubatura). Postojanje terestričkih modela je usvojeno kao referentni podatak, odnosno uslovno tačan model i u radu se samo opisno obrađuje u uvodnom dijelu praktičnog rada, kako zbog obima, tako i zbog težišta na UAV modelu terena. Obzirom da je na lokalitetu površinskog kopa gline višegodišnjim praćenjem promjena formiran model podataka u digitalnoj formi, u radu je omogućena uporedna analiza 3D modela.

Osnovni cilj je bio utvrditi da li 3D model može da kvalitetom zadovolji primjenu u geodeziji i inženjerskim poslovima (praćenje promjena terena, računanje kubatura, projektovanje). Kao referentni i uslovno tačan model usvojen je model formiran u prethodnom periodu terestričkim metodama. Prikazane su standardne procedure analize počev od vizuelnih do numeričkih, a zasnovane su generalno na uporednoj analizi UAV modela sa terestričkim modelom. Ono što su analize pokazale ujedno se moglo i pretpostaviti, a vezano je prvenstveno za vodene površi. Obzirom da većina metoda premjera identifikuje ovakve površi kao problematične za premjer, tako je i ovdje bilo za očekivati isto to. Bez dodatnog premjera nekom drugom metodom, na primjer, terestričkom ukoliko su manje dubine ili ponovnim UAV premjerom nakon isušivanja ne može se pouzdano utvrditi kvalitet modela pod vodom. Iako je prilikom premjera, uočeno da to nisu prevelike dubine (najviše 50 cm), njihov uticaj je prisutan i shodno namjeni bi trebalo odlučivati o mjerama dopune 3D modela. Takođe, na područjima istraživanja bilo je veoma malo prisustva niske vegetacije, tako da značajniji uticaj na tačnost modela nije postojao osim što je u radu objašnjeno kako se mogu ovakve pojave na modelu tretirati (klasifikacija, ručno brisanje i sl.).

Pored ocjene tačnosti, osnovna ideja u radu odnosila se na analizu podataka UAV modela (praćenje promjena tokom vremena, računanje kubatura, prikaz terena). Takođe, ukazano je na veliki značaj primjene kontrolnih tačaka GCP, jer pored njihove uloge kod modelovanja i transformacije snimaka u željeni koordinatni sistem, one se mogu koristiti i za kontrolu kvaliteta formiranog modela. I na kraju, dat je odgovor na postavljenu hipotezu: da li mogu da se koriste podaci UAV premjera za inženjerske poslove, poređenjem sa terestričkim modelom, bio je potvrđan. U svim analizama rezultati su pokazali dovoljno pouzdan 3D model (centimetarski precizan i kvalitetan 3D model), izuzimajući djelomično kod jednolikih površi sa nejasnim detaljima (voda, vegetacija).

LITERATURA

Autodesk (2018). *Products, 3D CAD SOFTWARE, AutoCAD Civil 3D*. Dostupno na: <http://www.autodesk.com>. Pristupljeno: 28.08.2019.

Ceylan, A., Karabork, H., Ekozoglu, I. (2011). An analysis of bathymetric changes in Altınapa reservoir. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 6(2), 15-24. Dostupno na: <http://www.ubm.ro/sites/CJEES/viewTopic.php?topicId=152>. Pristupljeno: 20.08.2021.

Cucchiaro, S., Fallu, D., Zhang, H., Walsh, K., Van Oost, K., Brown, A., Tarolli, P. (2020). Multiplatform-SfM and TLS Data Fusion for Monitoring Agricultural Terraces in Complex Topographic and Landcover Conditions. *Remote Sensing*, 12(12), 1946. doi: 10.3390/rs12121946.

Jae, Y., Dong, K., Eun, L., Seung, S. (2020). Determining the Optimal Number of Ground Control Points for Varying Study Sites through Accuracy Evaluation of Unmanned Aerial System-Based 3D Point Clouds and Digital Surface Models. *Drones* 4(3), 49. doi:10.3390/drones4030049.

Leitão, J., Moy, M., Scheidegger, A., Rieckermann, J. (2016). Assessing the quality of 3D models obtained from UAV images for overland flow modelling in urban areas. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(4), 1637–1653. doi:10.5194/hess-20-1637-2016.X.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling - principles and methodology*. Florida, USA: CRC Press.

Mukherjee, S., Joshi, P.K., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R.D., Mukhopadhyay, A. (2013). Evaluation of vertical accuracy of open source digital elevation model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21, 205-217. doi:10.1016/j.jag.2012.09.004.

Nyimili, P., Hande, D., Dursun, S., Turan, E. (2016). Structure from Motion (SfM) - Approaches and Applications. U: *International scientific conference on applied sciences*. Antalya, Turska.

Oštir, K., Mulahusić, A. (2014). *Daljinska istraživanja*. Sarajevo: Univerzitet u Sarajevo, Građevinski fakultet.

Pal, A., Borisov, M., Vulić, M. (2020). Modeling and analysis of digital surface models using high-resolution UAV images. *Acta Geotechnica Slovenica* 17(1), 46-55. doi:10.18690/actageotechslov.17.1.46-55.2020

Rojgar, I., Qubad, H. (2019). Accuracy Assessment of UAV photogrammetry for Large Scale Topographic Mapping. U: *Fifth International Engineering Conference on Developments in Civil & Computer Engineering Applications 2019 - (IEC2019)*. Erbil, Irak.

Sebastian, O., Irene, M., Klaus, P., Johannes, R. (2012). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing* 4(11), 3390-3416. doi: 10.3390/rs4113390

Wierzbicki, D., Nienaltowski M. (2019). Accuracy Analysis of a 3D Model of Excavation, Created from Images Acquired with an Action Camera from Low Altitudes. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 8(83). doi:10.3390/ijgi8020083.

Zhou, X., Koch, T., Kurz, F., Fraundorfer, F., Reinartz, P. (2017). Automatic UAV Image Geo-Registration by Matching UAV Images to Georeferenced Image Data. *Remote Sensing* 9(4), 376. doi: 10.3390/rs9040376

Autori:

Prof. dr. Mirko Borisov, dipl. inž. geod.

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Republika Srbija
E-mail: mborisov@uns.ac.rs

MSc Radovan Simić, dipl. inž. geod.

Geodetska kompanija "AŠ"
Novi Sad
Republika Srbija
E-mail: rashasimic@gmail.com

MSc Vladimir M. Petrović, dipl. geogr.

Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Centar za ekologiju i tehnouekonomiku
Njegoševa 12, 11000 Beograd
Republika Srbija,
E-mail: petrovic@ihtm.bg.ac.rs

Prof. dr. Miroljub Milinčić, dipl. geogr.

Univerzitet u Beogradu, Geografski fakultet
Studentski trg 3/3, 11000 Beograd
Republika Srbija
E-mail: miroljub.milincic@gef.bg.ac.rs