

Inovativna primjena naprednih tehnologija daljinskih istraživanja za unaprjeđenje kartiranja stijenskog pokosa na graničnom prijelazu Gornji Brgat

Damjanović, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:013479>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski studij geološkog inženjerstva

INOVATIVNA PRIMJENA NAPREDNIH TEHNOLOGIJA
DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA ZA UNAPRJEĐENJE
KARTIRANJA STIJENSKOG POKOSA NA GRANIČNOM
PRIJELAZU GORNJI BRGAT

Diplomski rad

Vedran Damjanović
GI347

Zagreb, 2019.

INOVATIVNA PRIMJENA NAPREDNIH TEHNOLOGIJA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA ZA
UNAPRJEĐENJE KARTIRANJA STIJENSKOG POKOSA NA GRANIČNOM PRIJELAZU GORNJI
BRGAT

VEDRAN DAMJANOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Inženjerskogeološka kartiranja stijenskih pokosa predstavljaju inženjerski izazov budući da je zadatak inženjerskih geologa prikupiti što detaljnije podatke o najčešće heterogenim stijenskim masama, koji se osim toga, nalaze na visinama iznad dosega čovjeka koji provodi kartiranje. Ovo je osobito zahtjevan inženjerski posao kada se provodi u fazama građenja na gradilištima, kada se opetovano kartiraju otkopani dijelovi zasjeka u različitim vremenskim uvjetima i drugim vrlo nepovoljnim uvjetima gradilišta. Svrha ovoga rada bila je unaprjeđenje postupka kartiranja stijenskog pokosa razvojem metodologije koja je uključivala izradu digitalnih modela pokosa i provođenje postupka kartiranja koji bi omogućili bolji uvid u sve relevantne značajke stijenske mase, a koje nisu dostupne kada se primjenjuju tehnike tradicionalnog snimanja diskontinuiteta. U radu se opisuje metodologija koja se sastojala od: (a) metode preliminarnih terenskih istraživanja u svrhu pripreme za daljinska istraživanja i metode snimanja istraživanog područja bespilotnom letjelicom; (b) metode izrade oblaka točaka snimanog pokosa; i (c) metode ekstrakcije diskontinuiteta iz trodimenzionalnog digitalnog modela. Sve navedene metode primijenjene su na gradilištu stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat u fazi građenja jednog na najvećih zasjeka u Republici Hrvatskoj. Istraživanje se sastojalo od osam opetovanih ciklusa koji su se provodili u dinamici koja je bila u potpunosti prilagođena fazama iskopa i zaštite stijenske mase gradilišta u razdoblju od zime 2018. do zime/proljeća 2019. godine. Kao rezultat je u okviru ovog rada izrađeno osam digitalnih modela pokosa površine u rasponu od 99 do 1.357 m². Oblaci točaka variraju od 6.037.233 do 55.487.740 točaka po snimljenom modelu. Gustoće točaka su u rasponu od 4.449 do 460.549 točaka po m². Ovako snimljeni i generirani podaci omogućili su identifikaciju i mjerenje 133 diskontinuiteta u svim dijelovima zasjeka, čime su dobiveni reprezentativni podaci za karakterizaciju stijenske mase. U softveru *CloudCompare* također su izrađeni stereogrami na osnovi kojih je bilo moguće identificirati osnovne setove diskontinuiteta. Usporedba rezultata mjerenja na digitalnim modelima s podacima mjerenja na terenu geološkim kompasom, potvrdila je pretpostavljene prednosti primjene naprednih tehnika daljinskih istraživanja koje se očituju u tome što je moguće snimiti daleko više podataka, (16 mjerenja nasuprot 5 mjerenja na dijelu pokosa), te što je mjerenjima moguće obuhvatiti i dijelove stijenske mase koji su nedostupni za tradicionalna mjerenja (mjerenja se provode na cijeloj visini pokosa od 8 metara, nasuprot 2 metra koliko je dostupno kada se mjeri rukom). Na osnovi rezultata ovoga rada zaključuje se da je navedene metode fotogrametrijskog snimanja dronom i obrade podataka moguće također koristiti i u fazama praćenja iskopa, te da se time ovaj inženjerski postupak znatno unaprjeđuje u odnosu na tradicionalno primjenjivanje konvencionalne tehnike terenskog inženjerskogeološkog kartiranja.

Ključne riječi: stijenska masa, zasjek, diskontinuiteti, dron, fotogrametrija, oblak točaka

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 12 tablica, 18 slika i 15 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelji: dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas, redovita profesorica RGNF i dr. sc. Sanja Bernat Gazibara, postdoktorandica RGNF

Ocjenjivači: dr. sc. Snježana Mihalić Arbanas, redovita profesorica RGNF, dr. sc. Martin Krkač, docent RGNF, dr. sc. Željko Arbanas, redoviti profesor Građevinskog fakulteta u Rijeci

Datum obrane: 18. srpanj 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet

University of Zagreb

Graduate Engineer of Geology Thesis

Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

INNOVATIVE APPLICATION OF ADVANCED REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR
IMPROVEMENT OF ROCK CUT SLOPE MAPPING AT THE PERMANENT GORNJI BRGAT
BORDER CROSSING

VEDRAN DAMJANOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of Mineralogy, Petrology and Mineral deposits, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Engineering geological mapping of rock slopes represent engineering challenge because of the task of engineering geologist who needs to gather as much data of usually heterogeneous rock masses as possible, which in addition, are placed on heights beyond of the reach of a person who carries mapping. This is usually very demanding engineering task when it is carried out during construction phase, when excavated sections of rock cut slopes are repeatedly mapped in diverse weather conditions and unfavourable conditions on construction site. The purpose of this paper was improvement of the mapping process by developing methodology which included development of digital rock cut slope models and conduction of mapping that would provide better insight into all relevant rock mass characteristics which are not available by the use of conventional remote sensing techniques. The paper describes a methodology which consists of: (a) methods of preliminary field research for the purpose of preparation for remote sensing and methods of capturing investigation area by unmanned aircraft; (b) methods for generating 3D point cloud of rock cut slopes; (c) methods of discontinuity extraction from 3D digital model. All these methods were applied at the construction site of permanent border crossing Gornji Brgat during the construction phase of one of the biggest slopes in the Republic of Croatia. Research was consisted of eight recurring cycles that were carried out in pace which was fully adapted to excavation phases and rock mass protection. As a result, eight digital surface models of rock cut slope were generated with area ranging from 99 to 1,357 m². Data recorded and generated by this technique enabled identification and measurement of 133 discontinuities in all parts of the construction site, thus providing representative data for rock mass characterization. *CloudCompare* software also produced stereograms that made it possible to identify main discontinuity sets. Comparison of measurement results on digital metering data with field geological compass data confirms presumed advantages of advanced remote tracking techniques which show that it is possible to capture far more data (16 measurements vs. 5 measurements in rock cut slope). The measurements can also include rock masses that are unavailable for traditional measurements (measurements are carried out at a full height of 8 meters, compared to 2 meters as it is available when hand-measured).

Keywords: rock mass, cut, discontinuity, drone, photogrammetry, point cloud

Thesis contains: 39 pages, 12 tables, 18 figures, 15 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Snježana Mihalić Arbanas, Full Professor RGNF and PhD Sanja Bernat Gazibara, Postdoctoral researcher

Reviewers: PhD Snježana Mihalić Arbanas, Full Professor RGNF, PhD Martin Krkač, Assistant Professor RGNF, PhD Željko Arbanas, Full Professor of the Faculty of Civil Engineering of the University of Rijeka

Date of defence: July 18, 2019

Sadržaj rada

1. Uvod	1
2. Hipoteza i svrha rada	2
3. Teorijske osnove.....	2
4. Općenito o projektu	5
4.1. Prirodne značajke istraživane lokacije.....	5
4.2. Geotehnički projekt zasjeka.....	7
4.3. Inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja.....	9
5. Metode i plan rada	10
5.1. Metoda snimanja površine pokosa dronom	11
5.2. Metoda izrade oblaka točaka površine pokosa	14
5.3. Metoda ekstrakcije diskontinuiteta s digitalnog modela.....	16
5.4. Dinamika snimanja	18
6. Rezultati.....	19
6.1. Modeli površine pokosa.....	19
6.2. Diskontinuiteti na površini stijenske mase	22
7. Rasprava	30
7.1. Usporedba s podacima terenskih mjerenja	30
7.2. Mogućnost inovativne primjene u inženjerstvu.....	34
8. Zaključak	37
9. Literatura	38

Popis slika

Slika 4.1 Isječak Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Dubrovnik (Marković, 1971) s prikazom lokacije predmetnog zasjeka.....	6
Slika 4.2 Tehnički prikaz pogleda na zasjek na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat (Arbanas, 2019): (a) cijeli zasjek; (b) uvećani južni dio zasjeka; (c) uvećani sjeverni dio zasjeka).....	8
Slika 5.1 Dijagram toka izvođenja fotogrametrijskog snimanja, obrade modela i identifikacije diskontinuiteta	10
Slika 5.2 Fotografija snimljena dronom na gradilištu stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat s vidljive tri otkopane etaže, dvije torkretirane betonom i jedne zaštićene mrežom (gornja etaža).....	11
Slika 5.3 (a) GCP točka označena na zasjeku; (b) prikaz označene kontrolne točke na ekranu drona (datoteka IMG_61504.JPG); (c) pogled na generirani point cloud u softveru za obradu podataka u kojemu su zelenim linijama označena odstupanja od stvarnog položaja, prikazanog plavim točkama (korigirani položaji dobiveni su pomoću GPS-a)	13
Slika 5.4. Prikaz obrade u programu Pix4D, prvi korak čitanja EXIF podataka (a); popis fotografija i njihovih lokacija u WGS84 koordinatnom sustavu (b); odabir sustava HTRS96/TM za završni model (c); prikaz određenih lokacija u HTRS96/TM sustavu nakon prvog koraka (d); konačno generirani oblak točaka s naznačenim položajima kamera (zeleno kugle)(e).....	15
Slika 5.5 Koraci obrade u programu CloudCompare: (a) otvaranje .LAS datoteke; (b) odabir zone za određivanje orijentacije diskontinuiteta; (c) alat u programu CloudCompare „Compass“; (d) određivanje orijentacije diskontinuiteta; (e) orijentacije diskontinuiteta zajedno s Fisherovim srednjim vektorom u softveru Stereonet	17
Slika 6.1 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150 – 0+170 (model 3e_g_150-170)	20
Slika 6.2 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150 – 0+270 (model 3e_g_150-270)	20
Slika 6.3 Oblak točaka snimljen na 3. etaži na stacionaži 0+360 – 0+400 (model 3gd-360-400).....	20
Slika 6.4 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+240 – 0+265 (model e3_g_240-265)	20

Slika 6.5 Oblak točaka snimljen na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+280 – 0+380 (model 4e_d_280-380)	21
Slika 6.6 Oblak točaka snimljen na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+390 – 0+430 (model 4e_d_390-430)	21
Slika 6.7 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+270 – 0+370 (model 4e_g_270_370).....	21
Slika 7.1 Terenski dnevnik inženjerskog geologa koji prati iskop s podacima terenskog mjerenja orijentacija diskontinuiteta. Uz orijentacije su navedeni i brojevi foto-dokumentacije diskontinuiteta, kao npr oznaka br. 8974 koja se odnosi na diskontinuitet prikazan na slici 7.2.....	30
Slika 7.2 Konvencionalno inženjerskogeološko kartiranje diskontinuiteta na terenu geološkim kompasom. Orijehtacija izmjerenog diskontinuiteta je 330/57.	31
Slika 7.3 Trodimenzionalni oblak točaka s označenim mjestom mjerenja diskontinuiteta sa slike 7.2 (plavi krug). Orijehtacija izmjerenog diskontinuiteta je 337/78.	31
Slika 7.4 Prikaz mogućnosti dosega pogodnog za mjerenje orijentacije diskontinuiteta. Kraća linija predstavlja doseg rukom (približne visine oko 2 m), dulja linija predstavlja ukupnu visinu zasjeka na kojemu je potrebno identificirati diskontinuitete i izmjeriti njihove orijentacije	35

Popis tablica

Tablica 6.1 Osnovni podaci o modelima površine pokosa izrađenim na osnovi snimanja dronom na gradilištu zasjeka na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat	19
Tablica 6.2 Osnovni podaci o diskontinuitetima identificiranim na modelima površine pokosa izrađenim na osnovi snimanja dronom na gradilištu zasjeka na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat.....	22
Tablica 6.3 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150-0+170	23
Tablica 6.4 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150- 0+270	24
Tablica 6.5 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na 3. etaži na stacionaži 0+360-0+400	25
Tablica 6.6 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+240-0+265	26
Tablica 6.7 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+280+0+380.....	27
Tablica 6.8 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+390 -0+430	28
Tablica 6.9 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+270 -0+370	29
Tablica 7.1 Podatci o odstupanjima između terenskih mjerenja diskontinuiteta stijenske mase i mjerenja na modelu	32
Tablica 7.2 Podaci mjerenja orijentacija istog seta diskontinuiteta na tri digitalna modela trodimenzionalnih oblaka točaka. Ukupan broj mjerenja je 16.....	33
Tablica 7.3 Podaci mjerenja orijentacija istog seta diskontinuiteta na terenu. Ukupan broj mjerenja je 5	33

1. Uvod

Gradnja graničnih prijelaza općenito su značajni i veliki projekti na državnoj razini. Ovaj rad je izrađen u okviru inženjerskogeoloških istraživanja tijekom građenja stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat na granici Hrvatske sa susjednom Bosnom i Hercegovinom. Gradnja graničnog prijelaza uključivala je iskop jednog od najvećih zasjeka u Republici Hrvatskoj, jer njegova maksimalna visina doseže oko 45 metara, a širina samog zasjeka iznosi oko 450 metara. Budući da je zasjek građevina, gradnja ovako velike i značajne građevine u stijeni iziskivala je prikupljanje vrlo pouzdanih podataka o značajkama stijenske mase u kojoj je proveden iskop. Motivacija za izradu ovoga rada bila je eksperimentalna primjena naprednih tehnika daljinskih istraživanja za dobivanje što kvalitetnijih podataka o stijenskoj masi na osnovi kojih se provodilo interaktivno projektiranje u fazi građenja (Arbanas, 2008), kao i uobičajeno kartiranje stijenskog pokosa zasjeka u okviru nadzora građenja.

Inženjerskogeološka kartiranja stijenskih pokosa su standardni inženjerski postupci, a njima se bave inženjerski geolozi, inženjeri u domeni geološkog inženjerstva. U fazi građenja, pod ovim postupkom se podrazumijeva prikupljanje podataka o stijenskoj masi na terenu mjerenjem strukturno-geoloških značajki ili diskontinuiteta u stijenskoj masi. Tradicionalna metoda uključuje terenske obilaskе gradilišta od strane inženjera inženjerskogeološke struke, mjerenja orijentacije diskontinuiteta geološkim kompasom i naknadne obrade i analize podataka u kabinetu s izradom inženjerskogeološkog plana lica pokosa. Svrha ovoga rada bila je unaprjeđenje postupka kartiranja stijenskog pokosa razvojem metodologije koja je uključivala izradu digitalnih modela pokosa i provođenje postupka kartiranja koji bi omogućio bolji uvid u sve relevantne značajke stijenske mase, a koje nisu dostupne kada se primjenjuju tehnike tradicionalnog prikupljanja podataka o diskontinuitetima.

Postupak kartiranja stijenskih pokosa na digitalnim modelima površine stijenske mase je uobičajen u fazama geotehničkih istraživanja kao podloga za izradu projektne dokumentacije. Međutim, opetovana snimanja otkopanih dijelova zasjeka i kartiranje diskontinuiteta tijekom građenja, pri čemu je vrlo specifična dinamika snimanja i obrade podataka, koja mora pratiti tijek gradnje, predstavlja inovaciju u geološkom i geotehničkom inženjerstvu. U ovom radu se opisuju metode koje su primijenjene za inženjerskogeološka kartiranja tijekom građenja zasjeka na gradilištu predmetnog graničnog prijelaza. Rezultati istraživanja potvrdili su mogućnost unaprjeđenja inženjerskog postupka kartiranja stijenskog pokosa primjenom fotogrametrijskog snimanja dronom.

2. Hipoteza i svrha rada

Svrha ovoga rada bila je unaprjeđenje postupka kartiranja stijenskog pokosa razvojem metodologije koja je uključivala izradu digitalnih modela pokosa i provođenje postupka kartiranja koji bi omogućio bolji uvid u sve relevantne značajke stijenske mase, a koje nisu dostupne kada se primjenjuju tehnike tradicionalnog snimanja.

Hipoteze rada bile su:

1. Fotogrametrijsko snimanje bespilotnom letjelicom iz zraka omogućava izradu modela površine pokosa visoke rezolucije za primjenu u detaljnim geotehničkim istraživanjima.
2. Trodimenzionalni oblak točaka visoke gustoće, dobiven fotogrametrijskim snimanjem bespilotnom letjelicom iz zraka, omogućava detaljno i precizno kartiranje diskontinuiteta stijenske mase.
3. Izvedeni model površine pokosa i određeni setovi diskontinuiteta predstavljaju reprezentativni ulazni podatak za geostatičke analize stabilnosti pokosa.

3. Teorijske osnove

Kartiranje stijenskih pokosa provodi se u svrhu geostrukturne karakterizacije stijenske mase koja se sastoji od kvantitativnog opisa diskontinuiteta (pukotina, rasjeda, slojevitosti, kalavosti) i čvrstoće stijenske stijene. Opis diskontinuiteta uključuje navođenje orijentacije, postojanosti, razmaka, ispune, hrapavosti, otvora i broja setova diskontinuiteta (Priest, 1993). Karakterizacija stijenske mase može se izvesti na temelju podataka prikupljenih: 1) na izdanku; 2) iz jezgre/bušotine; 3) na modelu dobivenom fotogrametrijskim ili laserskim snimanjem.

Tradicionalno geostrukturno istraživanje izdanka ili opis jezgre i bušotine izvodi se klinometrijskim kompasom. Pri tome se mjeri kut nagiba i smjer nagiba diskontinuiteta i to prislanjanjem plohe kompasa izravno na diskontinuitet. Poteškoće mjerenja klinometrijskim kompasom su dugotrajna i vremenski zahtjevna izvođenja mjerenja, nepristupačnost dijela izdanka stijene, uključivo i opasnosti po onoga koji mjeri zbog odronjavanja s površine pokosa stijene, kao i prisutnost magnetskih tijela ruda koja onemogućavaju mjerenja.

U današnje vrijeme moguće je provesti geostrukturnu analizu koristeći tehnike daljinskih istraživanja pri čemu se za izradu digitalnih modela površine stijenske mase najčešće koriste tri tehnike: LIDAR (*engl. Light Detection and Ranging*) (Rosser et al., 2005), fotogrametrijske tehnike (Wickens & Barton, 1971; ISRM, 1978; Hanenberg, 2008) te vidljivi, kratkovalni, srednji i toplinski infracrveni spektar (Hunt, 1977, Salisbury et al., 1989, Cooper et al., 2002). Provođenje geostrukturne karakterizacije stijenske mase mjerenjem diskontinuiteta na digitalnim modelima rješava poteškoće tradicionalnih tehnika vezane za zahtjevnost mjerenja, jer omogućava veliki broj mjerenja u kratkom vremenu na nepristupačnim izdancima stijene.

Geostrukturna analiza na digitalnim modelima površine stijenske mase omogućava opis orijentacije diskontinuiteta s dva parametra: kutom nagiba (koji predstavlja inklinaciju najstrmije deklinacije na površini mjereno od horizontale), te smjerom nagiba (kut otklona od sjevera izmjeren u smjeru kazaljke na satu). Orijetacije diskontinuiteta moguće je prikazati i grupirati na rozeta dijagramu ili na stereogramu. Rozeta dijagrami prikazuju relativnu učestalost smjera nagiba podijeljenu radijalnim razmakom (obično 10° , za ukupno 36 dijelova dijagrama). Budući da rozeta dijagram ne uzima u obzir nagib, korištenje rozeta dijagrama je rjeđe. Stereogram prikazuje projekciju sjecišta između hemisfere (gornje ili donje) i vektora koji je opisan kao kut nagiba i kut smjera nagiba. Stereogrami se najčešće koriste za prikaz orijentacija ploha u geologiji i inženjerstvu, kako u strukturnoj geologiji i tektonici, tako i za primjene u analizama stabilnosti kosina. Koristi se nekoliko metoda projekcije za prikaz orijentacija geoloških ploha na stereogramima. Za utvrđivanje distribucije većeg broja ploha na stereogramu najčešće se koristi Fisherova distribucija (Fisher, 1953).

Daljinsko snimanje površine stijenske mase tehnikama fotogrametrije podrazumijeva snimanje dva para fotografija, koje se nazivaju stereoparovi. Obradom stereoparova dobiva se 3D model korištenjem umjetnog stereoskopskog vida, koji reproducira binokularni način ljudskog gledanja, omogućen zahvaljujući dvjema slikama iz različitih kutova gledanja. Fotogrametrijski proces imitira način obrade slika kao kod ljudskog vida, pri čemu je ljudsko oko zamijenjeno stereokamerama i proizvodi iluziju dubine iz dva para fotografija. Fotogrametrija je bila prva daljinska metoda koja je rezultirala stvarnim 3D prikazima. Kod fotogrametrijskih daljinskih snimanja udaljenosti variraju od metarskih do kilometarskih, tako da su ove tehnike pogodne za veliki broj tehničkih, industrijskih i znanstvenih primjena.

Fotogrametrijski snimane površine variraju od većih dijelova Zemljine površine do malih objekata, kao što su dijelovi za industrijske strojeve, povijesne zgrade ili ljudsko tijelo.

Korištenje digitalnih kamera visokih performansi na bespilotnim letjelicama doživjelo je zamah u novije vrijeme. Korištenje digitalne kamere na dronu učinilo je aerofotogrametriju primjenjivu za određivanje značajki stijenske mase, kako na prirodnim padinama, tako i na umjetnim pokosima, tj. zasjecima. Rezultati fotogrametrije svrstavaju se u tri kategorije, a odnose se na korake kojima su snimljene fotografije, te izrađeni računalni modeli i karte. Prvi proizvod koji se odnosi na fotografije površine može biti rezultat jednog stereopara ili pak mozaik više stereoparova. Računalni modeli uključuju modele koji predstavljaju površinu istraživanog objekta, a mogu biti u obliku mreže, oblaka točaka ili DEM-a. Izrada ovih modela iziskuje postojanje kontrolnih točaka na tlu (*engl. Ground Control Point, GCP*) s poznatim koordinatama u geografskom koordinatnom sustavu te podatke o nagibu i usmjerenju kamere. Posljednji proizvod izrađuje se pomoću softvera za 3D topografsko modeliranje.

Razvoj softvera uvelike je povećao kvalitetu i mogućnosti izvođenja digitalne fotogrametrije, omogućavajući triangulaciju digitalnih fotografija koja je koristan alat za velike površine. Danas se triangulacija izvodi preklapanjem područja s velikim brojem fotografija. Fotogrametrija „struktura u pokretu“ (*engl. Structure for Motion*) razvijena je od autora Westoby et al. (2012) kako bi omogućila obradu velikog broja fotografija i korištenje fotogrametrije iz blizine za široka područja. Ona djeluje na istim principima kao i tradicionalna stereoskopska fotogrametrija, ali se od nje temeljno razlikuje u geometriji prostora, položajima kamere i orijentaciji.

4. Općenito o projektu

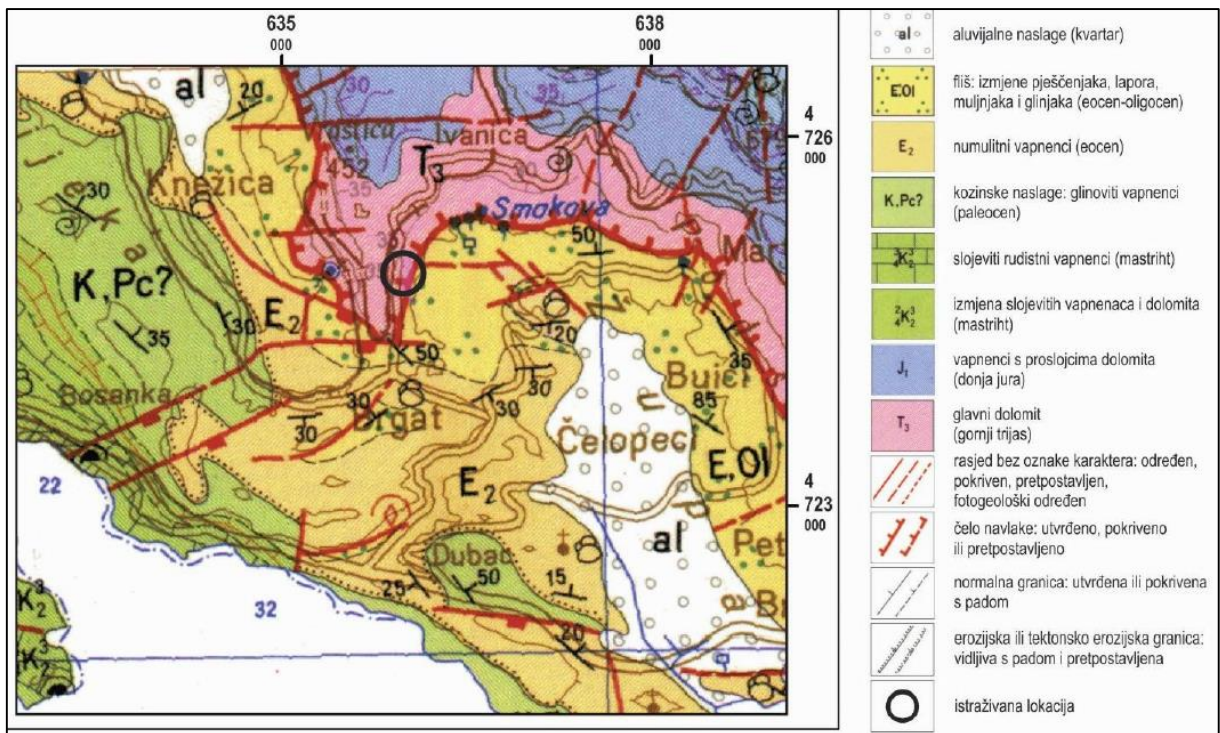
Zasjek na kojemu su provedena istraživanja za ovaj rad predstavlja najzahtjevniji dio građevine formalno nazvane „Stalni granični prijelaz za međunarodni promet putnika i roba u cestovnom prometu Gornji Brgat“. U okviru građenja ove vrlo složene građevine od državnog značenja, predviđen je iskop jednog od najviših zasjeka u Republici Hrvatskoj, za koji je bilo nužno izraditi geotehničke projekte, glavni projekt i izvedbeni projekt. Geotehnička i inženjerskogeološka istraživanja koja prethode izradi geotehničkih projekata, te definiraju uvjete građenja (inženjerskogeološke i geotehničke uvjete) i značajno utječu na projekt građevine, ovise o prirodnim značajkama područja i o vrsti i složenosti same građevine. Stoga se u ovom poglavlju opisuju prirodne značajke istraživane lokacije, te se daju osnovni podaci o geotehničkom projektu i istražnim radovima.

4.1. Prirodne značajke istraživane lokacije

Prirodne značajke lokacije, relevantne za utvrđivanje inženjerskogeoloških uvjeta, su značajke stijena/tala, geomorfološki uvjeti, aktivni geomorfološki procesi i hidrološki/hidroteološki uvjeti. Gradilište predmetnog zasjeka smješteno je na padini koja se nalazi u Dubrovačko-neretvanskoj županiji, uz državnu cestu DC 223 Granični prijelaz Gornji Brgat – Dubac, približno 500 m zračne udaljenosti jugozapadno od graničnog prijelaza Gornji Brgat . Pružanje padine na kojoj je projektiran predmetni zasjek je sjever-jug, a nagnuta je prema istoku s prosječnim kutom od 30°.

Geološkom kartiranjem terena i uvidom u Osnovnu geološku kartu (OGK) SFRJ M 1:100.000 – list Dubrovnik (Marković, 1971) utvrđeno je da je matična stijena na istraživanoj lokaciji glavni dolomit gornjotrijaske starosti (T3). Općenito, na istraživanoj lokaciji slojevitost gornjotrijaskih naslaga je slabo uočljiva, a izmjereni položaj slojeva iznosi 243/27. Geološka građa šire okolice predmetne lokacije prikazana je na isječku OGK na slici 4.1.

Naslage matične stijene glavnog dolomita u inženjerskom smislu predstavljaju stijenu. Naslage matične stijene mjestimično su prekrivene recentnim površinskim naslagama od kojih su na istraživanoj lokaciji prisutne deluvijalne i koluvijalne naslage ($Q_{d/k}$), odnosno naslage nastale kao posljedica transporta niz padinu pod utjecajem površinskog spiranja i gravitacije.



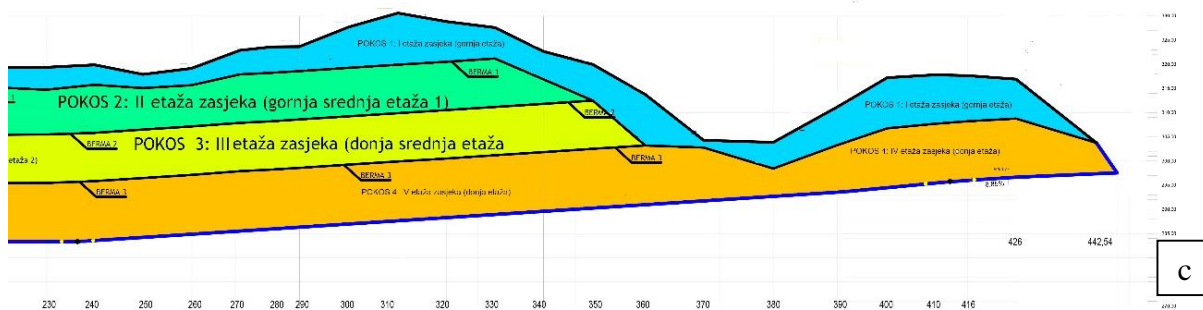
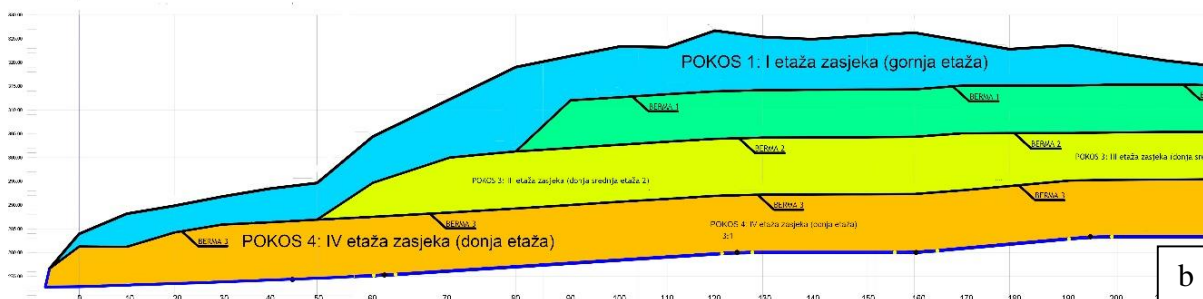
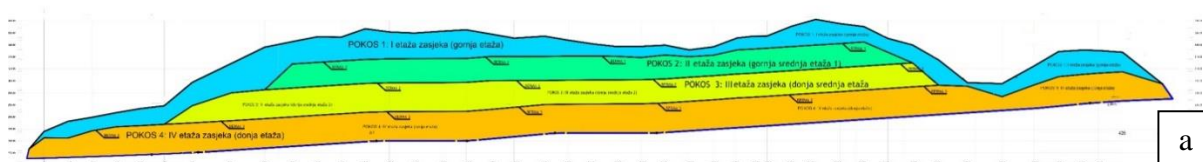
Slika 4.1 Isječak Osnovne geološke karte SFRJ M 1:100.000 – list Dubrovnik (Marković, 1971) s prikazom lokacije predmetnog zasjeka

Prema Marković (1975) matičnu stijenu – glavni dolomit čine dobro uslojeni i pločasti dolomiti sive boje. Mjestimično se pojavljuju proslojci dolomitičnih breča i vapnenaca. Dolomiti su uglavnom kasnodijagenetski, ksenotipne mozaične strukture u kojoj veličina zrna varira od 0,1 do 0,5 mm. Maksimalna debljina ovih naslaga iznosi oko 350 m. Istraživano područje nalazi se na granici između tektonskih jedinica Dubrovačkog para-autohtona i tektonske jedinice zapadno od Slivničkog rasjeda, tj. u krovini navlake Visokog krša uz njezino čelo (Marković, 1975). Pružanje čela navlake je generalno SZ-JI, s vergencijom prema JZ i s prosječnim kutom nagiba od oko 30°, a na području istraživanja zbog blagog kuta nagiba, pružanje čela navlake se mijenja u SI-JZ s vergencijom prema JI.

4.2. Geotehnički projekt zasjeka

Iskop predmetnog zasjeka predviđen je u okviru glavnog građevinskog projekta pod nazivom: „Projekt izgradnje prometnih površina s površinskom odvodnjom stalnog graničnog prijelaza za međunarodni promet putnika i roba u cestovnom prometu Gornji Brgat“ (Krešić, 2017). Izmjene i dopune originalnog projekta iz rujna 2017. objavljene su u siječnju 2019. godine.

Predmetni stijenski pokos planiran je u zapadnom dijelu lokacije, a izvedbom pokosa osigurava se potrebna širina platoa za granični prijelaz. Maksimalna visina pokosa je 45 m, a maksimalna duljina je približno 450 m (slika 4.2). Cjelokupan zasjek biti će izveden u dolomitima gornjotrijaske starosti (T₃), a sastojat će se od ukupno četiri etaže visine od 10 do 12 m. Mjere zaštite stijenskog pokosa su iskop pokosa u vertikalnim etažama (4 etaže), u vertikalnim i horizontalnim radnim etažama, zaštite pokosa šesterokutnom pocinčanom mrežom za zaštitu od odrona, zaštite pokosa dvoslojnim armiranim betonom i samobušivim štapnim sidrima na generalnom rasteru 2,5 x 2,5 m, te izvedbom armiranobetonskih vertikalnih rebara u visini najniže etaže iskopa. Pozicije pojedinim mjera zaštite prikazane su na grafičkim priložima, a detaljni tehnički uvjeti izvođenja radova i program kontrole i osiguranja kvalitete prikazani su u geotehničkom projektu Arbanas (2019).



Slika 4.2 Tehnički prikaz pogleda na zasjek na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat (Arbanas, 2019): (a) cijeli zasjek; (b) uvećani južni dio zasjeka; (c) uvećani sjeverni dio zasjeka).

4.3. Inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja

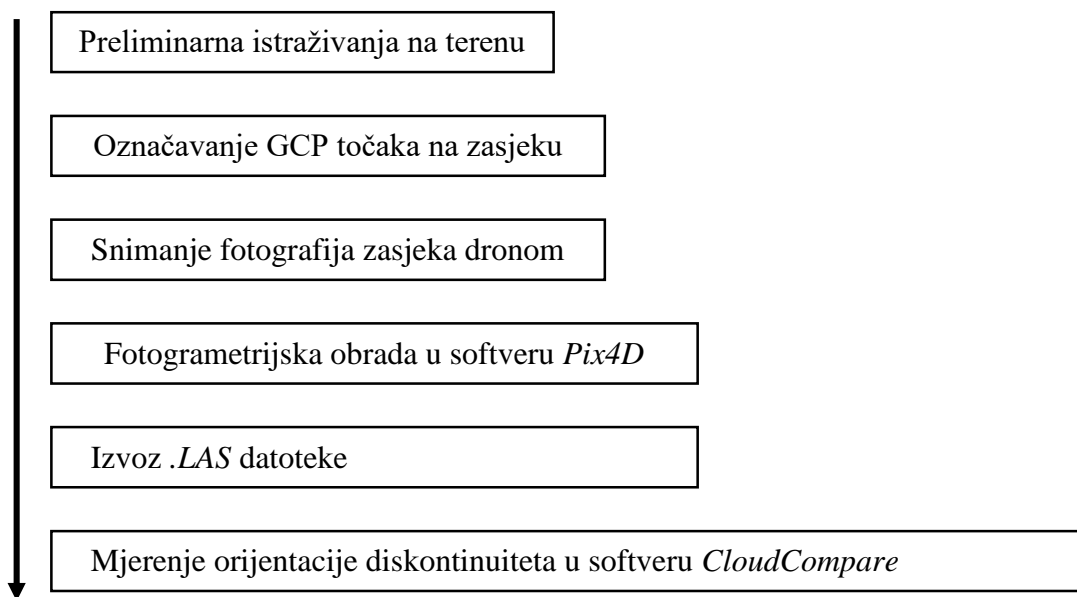
Inženjerskogeološka istraživanja i geotehnička istraživanja za građevine kao što je predmetni zasjek na gradilištu graničnog prijelaza Gornji Brgat uobičajeno se provode u nekoliko faza i to: (1) u fazi izrade projektne dokumentacije; (2) u fazi građenja.

U fazi izrade projektne dokumentacije provode se opsežna geotehnička istraživanja koja obuhvaćaju geodetska mjerenja, inženjerskogeološko kartiranje, istraživačko bušenje s *in situ* i laboratorijska ispitivanja uzoraka materijala tla i stijena i geofizička ispitivanja. Inženjerskogeološka kartiranja koja se provode u ovoj fazi uobičajeno se koriste tehnikama daljinskih istraživanja, radi prikupljanja većeg broja podataka i radi nepristupačnosti dijelova istraživanog terena. Kao rezultat ovih istraživanja daju se prognozni modeli podzemlja s pretpostavljenim kvalitetama stijenske mase na temelju pretpostavljenih diskontinuiteta u stijenskoj masi.

Za razliku od opsežnih istraživanja za izradu projektne dokumentacije, u fazi građenja inženjerski geolog provodi nužno praćenje iskopa kartiranjem površine otkopane stijenske mase tijekom kojega se snimaju litološke promjene i raspucanost stijenske mase. U ovoj fazi od velike je važnosti snimanje diskontinuiteta u stijenskoj masi koje se uobičajeno provodi identifikacijom značajnih setova diskontinuiteta i mjerenjem njihove orijentacije. Budući da je u inženjerstvu uobičajena tehnika mjerenja diskontinuiteta geološkim kompasom, na gradilištu graničnog prijelaza Gornji Brgat ovu vrstu istraživanja kontinuirano provodi inženjer iz tvrtke „*Geosonda d.o.o.*“. Istovremeno je uvedena i alternativna metoda snimanja diskontinuiteta na površini stijenske mase bespilotnom letjelicom opisana u ovom radu.

5. Metode i plan rada

U ovom poglavlju opisana je metodologija kartiranja stijenskog pokosa primijenjena na gradilištu stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat, u kojoj su korištene napredne tehnologije fotogrametrijskog snimanja dronom. Kao što je prikazano na slici 5.1, opisana metodologija obuhvaćala je primjenu sljedećih metoda: (a) metode preliminarnih terenskih istraživanja u svrhu pripreme za daljinska istraživanja i metode snimanja istraživanog područja bespilotnom letjelicom; (b) metode izrade oblaka točaka snimanog pokosa; i (c) metode ekstrakcije diskontinuiteta iz trodimenzionalnog digitalnog modela. Svaka od navedenih metoda detaljnije je opisana u nastavku ovog poglavlja.



Slika 5.1 Dijagram toka izvođenja fotogrametrijskog snimanja, obrade modela i identifikacije diskontinuiteta

Niz standardnih postupaka sa slici 5.1, od preliminarnih istraživanja na terenu sa snimanjima bespilotnom letjelicom, do izdvajanja diskontinuiteta u računalnom programu *CloudCompare*, ponavljan je ukupno osam puta. Svi postupci provedeni su kontinuirano tijekom iskopa zasjeka, a za potrebe praćenja iskopa i snimanja stvarnog stanja. Na zasjeku prikazanom na slici 5.2 vidljive su tri otkopane etaže prosječne duljine od 150 m do 350 m. Navedeni postupci provedeni su osam puta u razdoblju od studenog 2018. do travnja 2019. godine, pri čemu je prosječna duljina obuhvata jednog snimanja jedne etaže iznosila približno 100 m, budući je snimanje pratilo dinamiku iskopa. Dinamika snimanja bila je u potpunosti prilagođena dinamici građenja. Budući da je i sama dinamika snimanja od presudnog značenja za inovativnu primjenu u ovoj fazi gradnje, ona je također opisana u zasebnom poglavlju.



Slika 5.2 Fotografija snimljena dronom na gradilištu stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat s vidljive tri otkopane etaže, dvije torkretirane betonom i jedne zaštićene mrežom (gornja etaža)

5.1. Metoda snimanja površine pokosa dronom

Metoda snimanja dronom se sastoji od dvije faze i to faze preliminarnih istraživanja, koja služe kao priprema za snimanje kamerom, te faze samog snimanja na terenu. U preliminarnoj fazi za snimanje dronom bilo je potrebno na snimanom dijelu zasjeka označiti kontrolne točke, GCP, za što je bila nužna pomoć geodeta. Obično su na terenu, prije snimanja dronom, označene po tri do četiri točke na površini zasjeka na svakom snimanom dijelu (slika 5.3a) na način da ih se kasnije moglo označiti i na slikama. U računalnom programu za izradu modela na fotografiji je označena GCP točka (slika 5.3b), te je za nju upisana njezina geodetski određena lokacija. Ovime su zadovoljeni zahtjevi softvera za minimalno tri kontrolne točke.

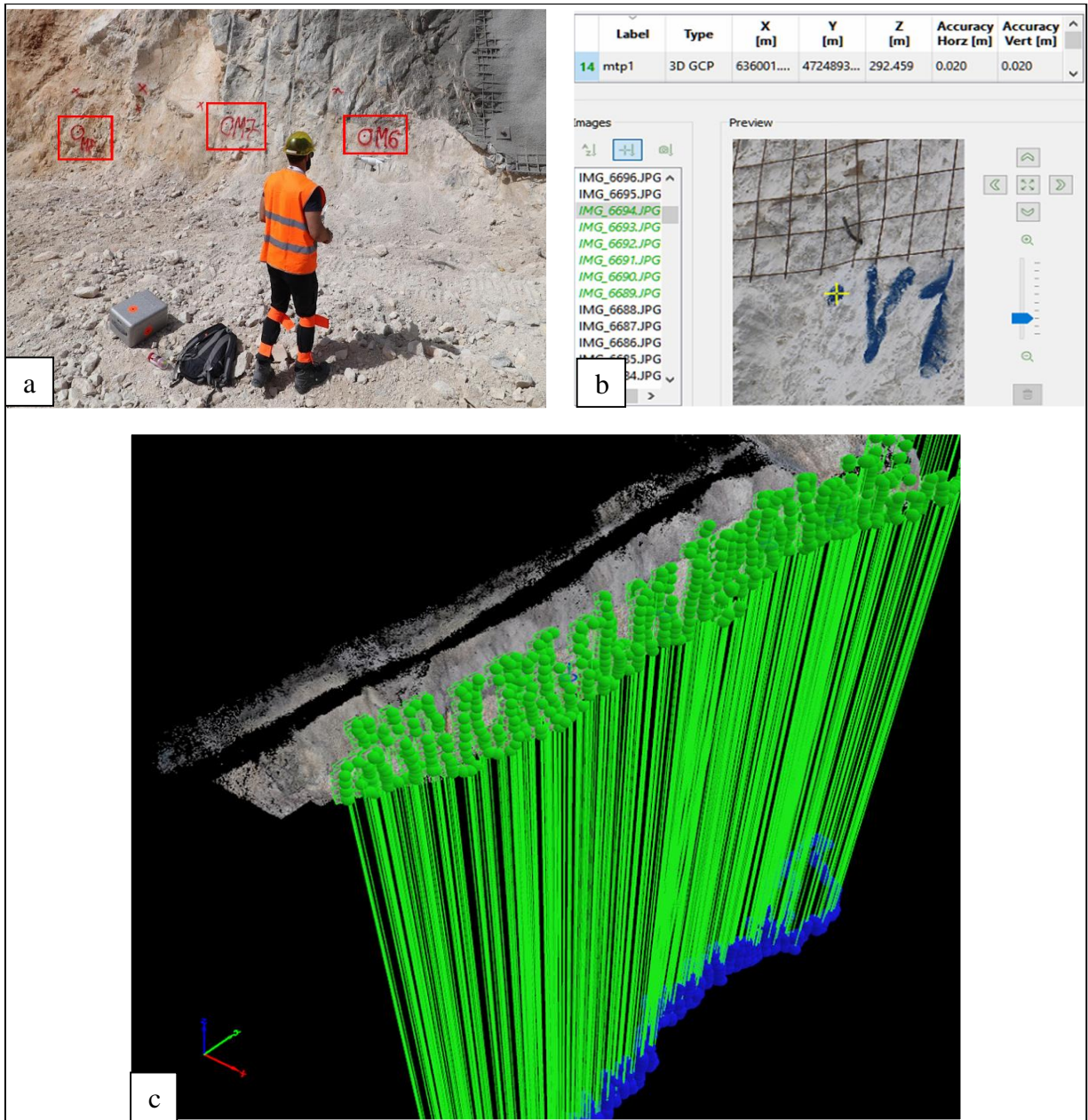
Također, postoji i cijeli niz drugih nužnih zahtjeva softvera za izradu modela, detaljnije opisanih u Federico (2019). Ovdje se sažeto navode sljedeći zahtjevi: nužno je uzeti u obzir minimalno tri GCP-a za rekonstrukciju; svaki od GCP-a treba biti označen na najmanje dvije slike; preporučuje se minimalni broj od pet GCP-ova; pet do deset GCP-ova je obično dovoljno, čak i za velike projekte, jer više GCP-ova ne doprinose značajno

povećanju točnosti.; u slučajevima da je topografija područja složena, više GCP-ova će omogućiti precizniju rekonstrukciju; preporučuje se koristiti najmanje pet GCP-ova, od kojih je svaki identificiran na pet slika, jer minimizira mjerne netočnosti i pomaže otkriti pogreške koje se mogu pojaviti prilikom umetanja GCP-a; GCP-ovi trebaju biti ravnomjerno postavljeni na području snimanja kako bi se smanjila pogreška u mjerilu i orijentaciji; nije dozvoljeno postavljati GCP-ove na rubovima područja, jer će oni biti vidljivi samo u nekoliko slika.

GPC-ove su snimali geodeti totalnom stanicom s preciznošću od nekoliko milimetara. Točke su odabrane uglavnom pri dnu zaszeka u visini koju je moguće dosegnuti sprejom za označavanje.

Prema specifikacijama korištenog drona, GPS i GNSS sustav pozicioniranja u dronu ima odstupanje od 10 metara. Najveće odstupanje drona događa se duž Z osi WGS84 koordinatnog sustava, a često se premašuje i do 10 metara u lokaciji konačno generiranog modela ukoliko njegova geodetska lokacija nije ispravljena GCP-ovima. Upotreba GCP-ova s precizno određenim koordinatama je stoga osobito važna da se spriječi odstupanje konačnog generiranog modela, kakvo je prikazano na slici 5.3c.

Korišteni dron ima kameru od 20 megapiksela s fokalnom duljinom od 8,8 mm. Ovakve specifikacije omogućuju izradu modela s velikim brojem točaka u trodimenzionalnom modelu zbog velike rezolucije fotografija koje program obrađuje te iz kojih može generirati gusti oblak točaka. Različiti dijelovi zaszeka snimani su s 250-1 000 fotografija, ovisno o površini zaszeka. Pri tome je najvažnije bilo preklapanje fotografija, jer što je veći postotak preklopa dvije fotografije, softver brže može odrediti sličnosti između dva preklapanja, što u konačnici omogućuje izradu gušćeg i preciznijeg oblaka točaka.



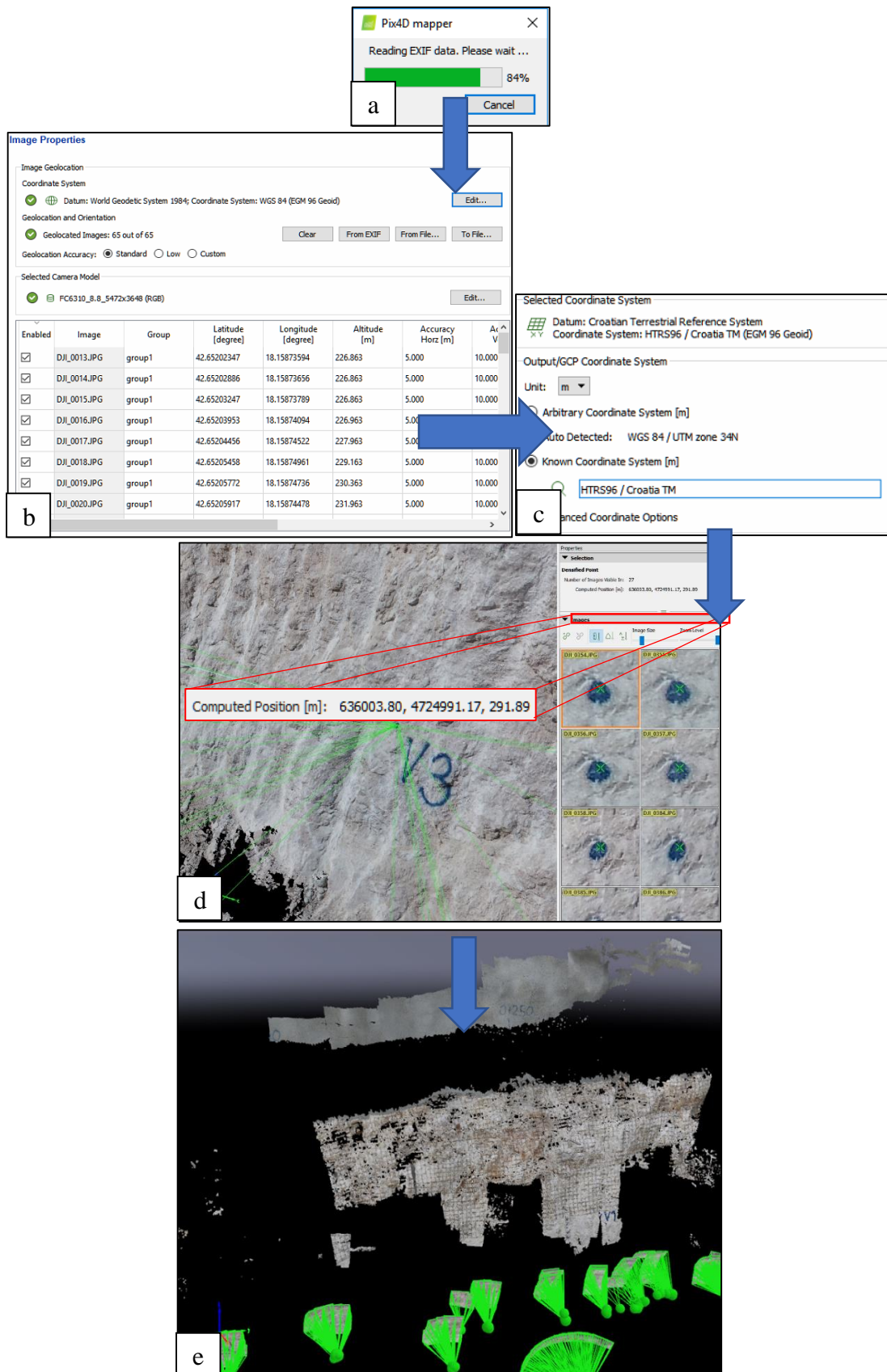
Slika 5.3 (a) GCP točka označena na zasjeku; (b) prikaz označene kontrolne točke na ekranu drona (datoteka *IMG_61504.JPG*); (c) pogled na generirani *point cloud* u softveru za obradu podataka u kojemu su zelenim linijama označena odstupanja od stvarnog položaja, prikazanog plavim točkama (korigirani položaji dobiveni su pomoću GPS-a)

5.2. Metoda izrade oblaka točkaka površine pokosa

Za izradu ovog rada korišten je računalni program *Pix4D* kojim su fotografije snimljene iz drona transformirane u trodimenzionalni oblak točkaka. Fotografije su najprije uvezene u softver u obliku *EXIF* podataka (slika 5.4a) koji sadrže različite metapodatke svake fotografije, uključivo i podatak o geolokaciji, kao i one o veličini senzora, važnog zbog određivanja pravilnog mjerila fotografije. Podaci o lokaciji su koordinate u WGS84 koordinatnom sustavu, definirane za svaku fotografiju (slika 5.4b). Također je potrebno odabrati koordinatni sustav u kojem će model biti izvezen, a u ovom radu je korišten HTRS96/TM koordinatni sustav za Republiku Hrvatsku (slika 5.4c).

Odabrani su i parametri vezani za detaljnost obrade koje će program koristiti kroz tri koraka obrade: početna obrada, oblak točkaka i mreža te digitalni model površine (*engl. Digital Surface Model, DSM*). Ovi parametri uvjetuju brzinu rada računalnog programa. U ovom radu najčešće su odabrani parametri za najvišu kvalitetu u svim koracima, kako bi krajnji rezultat bio model visoke preciznosti. U prvom koraku odabrane su najviše postavke koje se odnose na postupak međusobne korelacije fotografija u prostoru budući da je to uvjet za pravilnu izradu točno geopozicioniranog modela.

Nakon prvog koraka program generira *Tie Pointove* odnosno točke za oblike površine stijenske mase koji su snimljeni na više fotografija iz različitih kutova (slika 5.4d). Ovi *Tie Pointovi* služe za provjeru kvalitete izvedbe prvog koraka. Naime, oblak *Tie Pointova* s velikim brojem točkaka koje se nalaze na nasumičnim mjestima pokazatelj je loše kvalitete obrade u prvom koraku. Suprotno tome oblak *Tie Pointova* koji predstavljaju površinu modela pokazatelj je vrlo dobrog preklapanja fotografija tijekom snimanja i obrade u prvom koraku obrade računalnim programom *Pix4D*. Ukoliko je program generirao oblak *Tie Pointova* zadovoljavajuće kvalitete, u drugom koraku izrađuje se završni oblak točkaka (Slika 5.4e) koji se potom kao *.LAS* datoteka može obrađivati u drugim programima za obradu prostornih podataka.

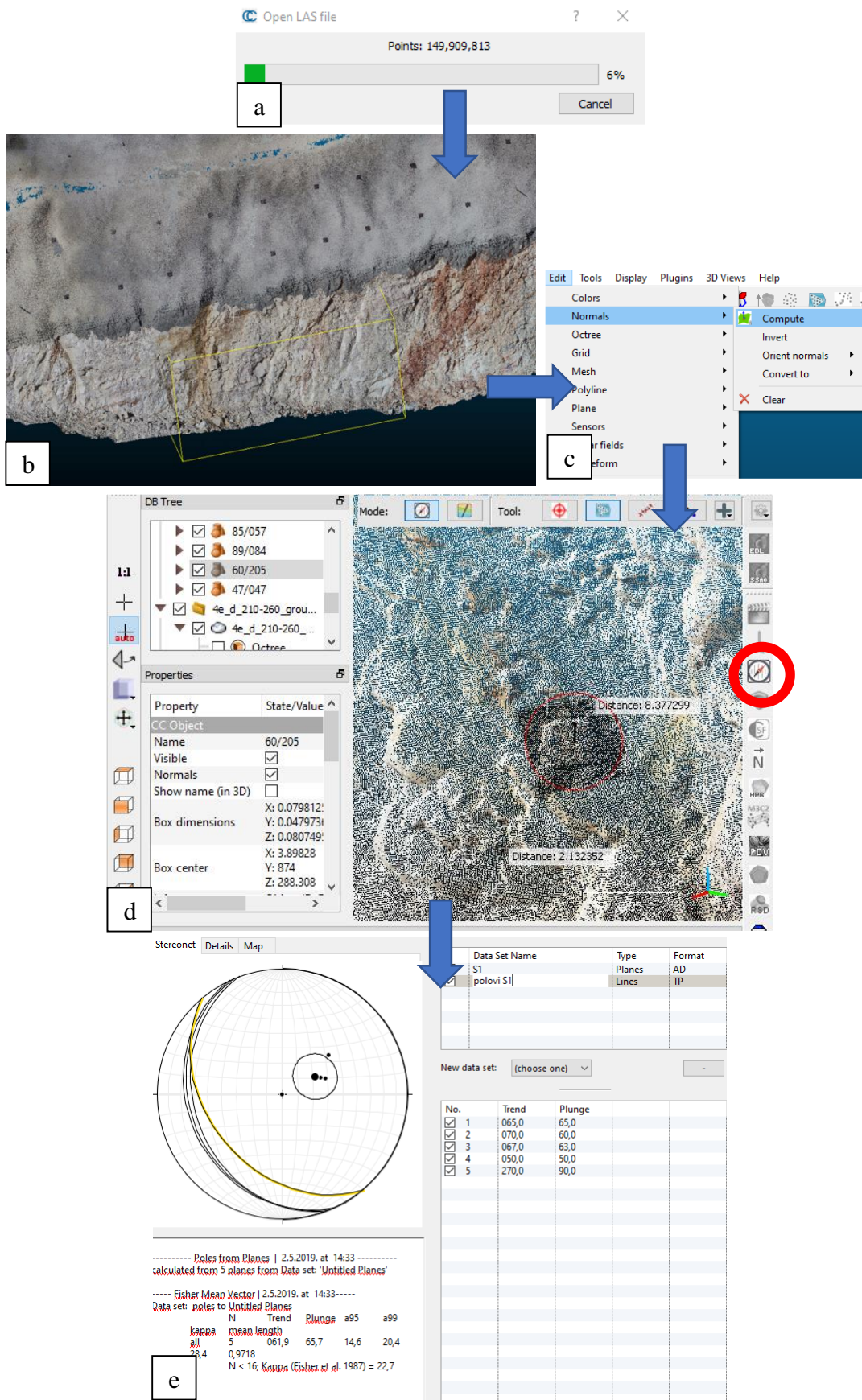


Slika 5.4. Prikaz obrade u programu Pix4D, prvi korak čitanja EXIF podataka (a); popis fotografija i njihovih lokacija u WGS84 koordinatnom sustavu (b); odabir sustava HTRS96/TM za završni model (c); prikaz određenih lokacija u HTRS96/TM sustavu nakon prvog koraka (d); konačno generirani oblak točaka s naznačenim položajima kamera (zelene kugle)(e)

5.3. Metoda ekstrakcije diskontinuiteta s digitalnog modela

Završni oblak točaka iz softvera *Pix4D* uvozi se u softver *CloudCompare* u kojemu se provodi ekstrakcija diskontinuiteta vidljivih na površini stijenske mase zasjeka. Softver *CloudCompare* ima mogućnost uvoza oblaka točaka kao i mreža. U ovom poglavlju se prikazuje metoda ekstrakcije diskontinuiteta iz oblaka točaka, koja je provedena na osam digitalnih modela zasjeka, a kao ogledni primjer odabran je dio zasjeka na kojemu su dobro vidljive plohe diskontinuiteta. Dobra vidljivost plohe površine stijenske mase i ploha diskontinuiteta uvjetovana je gustoćom točaka po centimetru kvadratnom. Na primjer, ploha od svega desetak kvadratnih centimetara s velikom gustoćom točaka od desetak točaka po centimetru kvadratnom smatra se kvalitetnom plohom s obzirom na mogućnost određivanja njezine orijentacije. Budući da je sniman cijeli zasjek približnih prosječnih dimenzija 450*45 m, uključivo i dijelovi koji su prekriven torkretiranim betonom, za analizu diskontinuiteta odabrani su samo dijelovi na kojima su jasno vidljivi diskontinuiteti.

Na slici 5.5 prikazan je odabrani primjer oblaka točaka s približno $150 \cdot 10^6$ točaka u modelu, tj. LAS datoteci (slika 5.5a). Na ovom modelu odabran je dio s jasno vidljivim diskontinuitetima, označen žutim kvadrom na slici 5.5b. Također, za identifikaciju diskontinuiteta na modelu površine stijenske mase, također je važno odabrati upravo područje s diskontinuitetima veće površine. U slijedećem koraku provodi se postupak određivanja normala (slika 5.5c) kojim se ujedno ploham diskontinuiteta definira orijentacija u HTRS96/TM koordinatnom sustavu. Alat unutar programa *CloudCompare* „*Compass*“ (slika 5.5d) primjenjuje se za određivanje orijentacije za odabranu grupu točaka koja predstavlja jednu plohu, pri čemu ovaj alat odabranu grupu točaka aproksimira ravnom plohom i određuje njezinu orijentaciju. Na osnovi podataka o orijentacijama diskontinuiteta, izrađuje se stereogram u računalnom programu *Stereonet*. Na stereogramu se prikazuju sve plohe diskontinuiteta izmjerenih orijentacija koje se prikazuju u stereografskoj projekciji. Također se prikazuje i srednja vrijednosti orijentacije izračunate Fischerovom metodom srednjeg vektora (slika 5.5e). U posljednjem koraku, identificirani diskontinuiteti, odnosno setovi diskontinuiteta, prikazani su u različitim bojama na digitalnom modelu površine zasjeka, kako bi se mogao vidjeti i njihov položaj na kosini. Ovaj postupak proveden je u softveru *CloudCompare*.



Slika 5.5 Koraci obrade u programu CloudCompare: (a) otvaranje .LAS datoteke; (b) odabir zone za određivanje orijentacije diskontinuiteta; (c) alat u programu CloudCompare „Compass“; (d) određivanje orijentacije diskontinuiteta; (e) orijentacije diskontinuiteta zajedno s Fisherovim srednjim vektorom u softveru Stereonet

5.4. Dinamika snimanja

Nakon predanog zahtjeva za fotogrametrijskim snimanjem određenog dijela zasjeka na graničnom prijelazu, uslijedila je priprema za odlazak na teren. To je uključivalo komunikaciju sa nadzornim inženjerom koji je bio upućen u točnu dinamiku radova na gradilištu kako bi bilo sigurno da je zasjek spreman za snimanje.

Snimanje se izvodilo nakon što bi se dio zasjeka prvo odminirao, a potom očistio od minirane stijene. Vremenski okvir u kojem je bilo moguće izvesti snimanje traženog dijela zasjeka bio vrlo kratak i strogo definiran građevinskim radovima. Naime snimanja je bilo potrebno provesti nakon odvoza otkopanog ili odminiranog materijala, a prije nego što bi se krenulo sa postavljenjem sidra i mreža, odnosno torkretiranja.

Tek dolaskom na gradilište bilo je moguće procijeniti je li moguće izvoditi snimanje dronom ili fotoaparatom, obzirom na vrlo promjenjive vremenske uvjete koji su vladali u vrijeme zimskih i proljetnih mjeseci gradnje. Snimanje dronom bilo je moguće izvoditi samo ukoliko bi brzina vjetra bila niža od 50 km/h, bez naleta jakog vjetra veće brzine te ukoliko ne bi bilo oborina koje onemogućavaju snimanje dronom.

6. Rezultati

U ovom poglavlju prikazani su rezultati kartiranja stijenskog pokosa na gradilištu zasjeka stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat. Budući da su za kartiranje korištene napredne tehnologije fotogrametrijskog snimanja dronom, prikaz rezultata se sastoji od dva dijela: osam modela površine pokosa snimanih kontinuirano tijekom iskopa zasjeka; i orijentacija diskontinuiteta identificiranih na osam digitalnih modela površina pokosa.

6.1. Modeli površine pokosa

Kao rezultat snimanja dronom u razdoblju od studenog 2018. do travnja 2019. godine izrađeno je osam oblaka točaka čije osnovne značajke su navedene u tablici 6.1. Površina snimanih dijelova pokosa varira u rasponu od 99 do 1.357 m², a oblaci točaka variraju od 6.037.233 do 55.487.740 točaka po snimljenom modelu. Gustoće točaka su u rasponu od 4.449 do 460.549 točaka po m². Modeli oblaka točaka izvedeni su u obliku LAS datoteka, a prikazani su na slikama 6.1–6.8. Vidljivo je da digitalni modeli prikazuju dijelove zasjeka različite duljine i visine, što je odraz potreba i mogućnosti snimanja, prilagođenih dinamici građenja. Svi prikazani snimljeni dijelovi zasjeka nalaze se na 2., 3. i 4. etaži između stacionaža 0+90 i 0+430 (slika 5.2).

Tablica 6.1 Osnovni podaci o modelima površine pokosa izrađenim na osnovi snimanja dronom na gradilištu zasjeka na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat

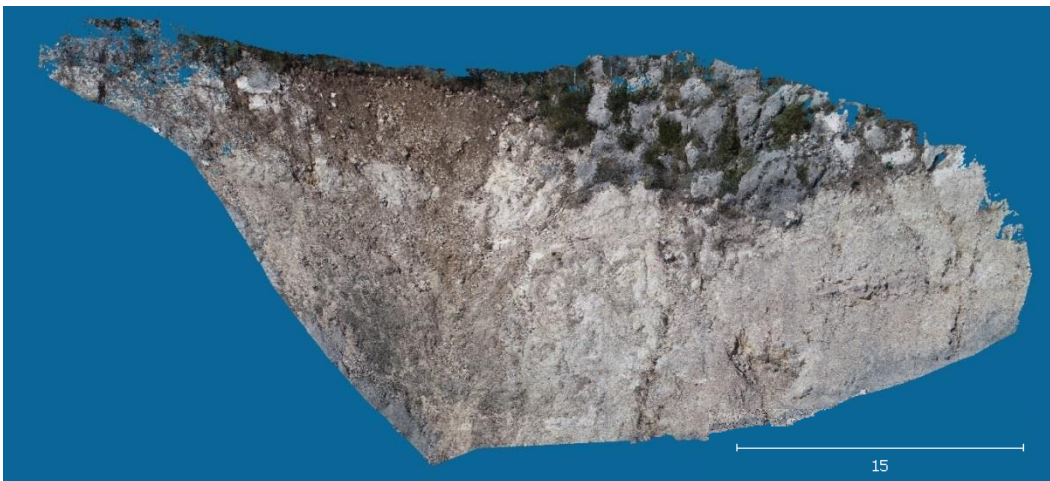
Naziv oblaka točaka	Duljina i visina (m x m)	Površina (m ²)	Broj točaka	Gustoća (točaka/m ²)
3e_g_150-170	22,0 x 4,5	99,0	28.466.593	287.541
3e_g_150-270	135 x 6,5	877,5	55.487.740	63.234
3gd-360-400	46,0 x 29,5	1.357,0	6.037.233	4.449
e3_g_240-265	30 x 3,5	105,0	48.357.647	460.549
4e_d_280-380	106 x 8,5	901,0	45.042.254	49.991
4e_d_390-430	28 x 7	196,0	52.775.145	269.261
4e_g_270_370	96,5 x 7	675,5	47.889.214	70.894



Slika 6.1 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150 – 0+170 (model 3e_g_150-170)



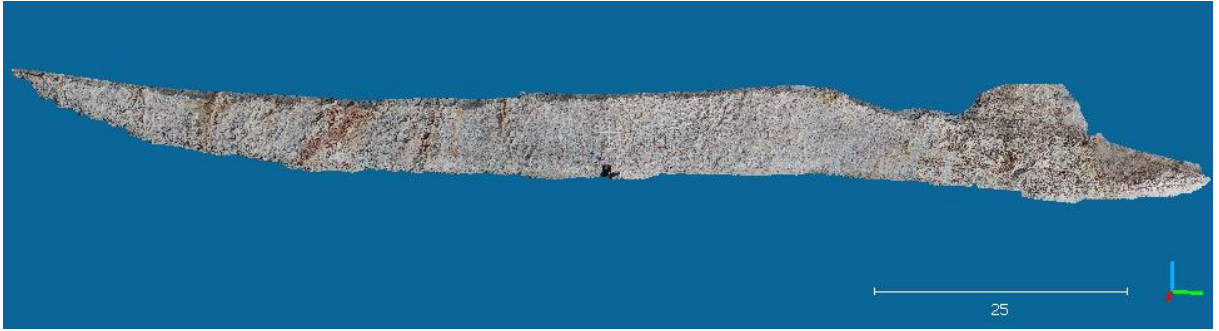
Slika 6.2 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150 – 0+270 (model 3e_g_150-270)



Slika 6.3 Oblak točaka snimljen na 3. etaži na stacionaži 0+360 – 0+400 (model 3gd-360-400)



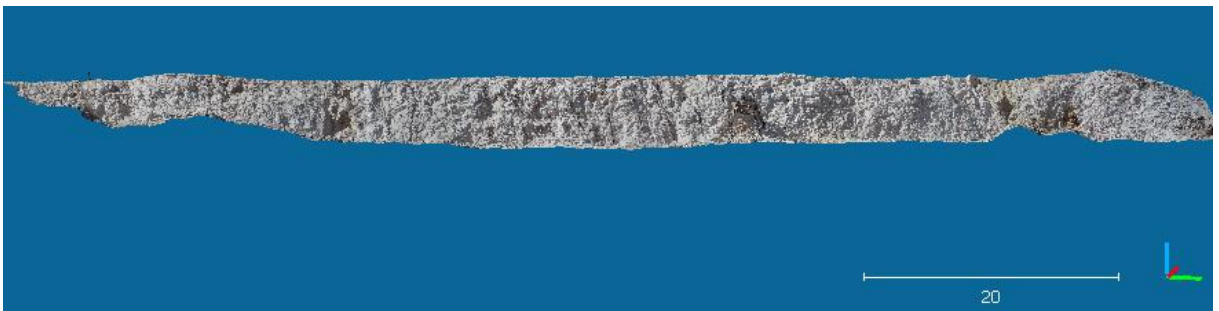
Slika 6.4 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+240 – 0+265 (model e3_g_240-265)



Slika 6.5 Oblak točaka snimljen na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+280 – 0+380 (model 4e_d_280-380)



Slika 6.6 Oblak točaka snimljen na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+390 – 0+430 (model 4e_d_390-430)



Slika 6.7 Oblak točaka snimljen na gornjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+270 – 0+370 (model 4e_g_270_370)

6.2. Diskontinuiteti na površini stijenske mase

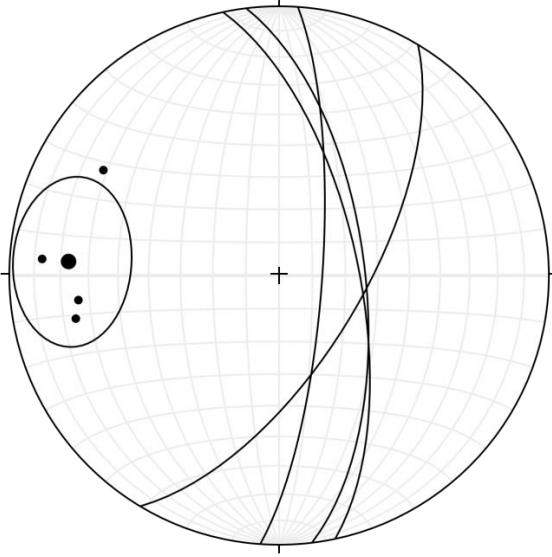
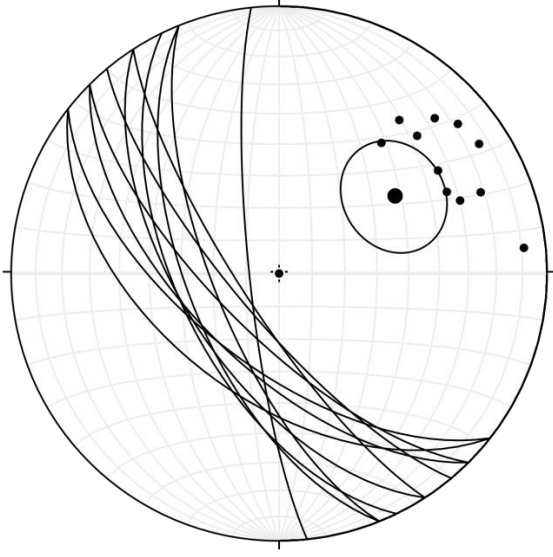
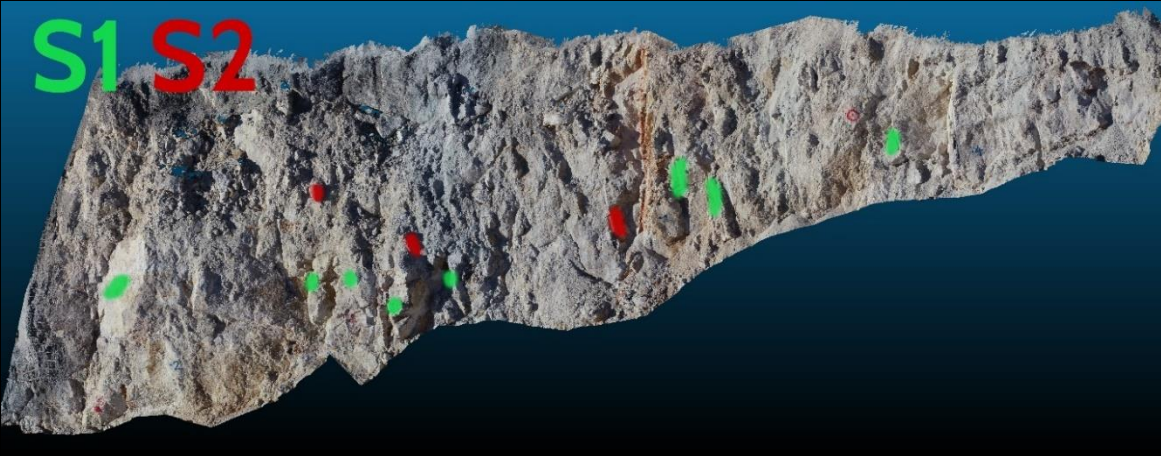
Diskontinuiteti na površini stijenske mase identificirani su na digitalnim modelima površina pokosa na način da je provedena interpretacija diskontinuiteta za svaki od osam snimljenih modela zasebno. U tablici 6.2 prikazane su prosječne vrijednosti snimljenih setova diskontinuiteta. Ukupno su na trodimenzionalnim modelima izmjerene 133 orijentacije diskontinuiteta, te je izdvojeno 17 setova diskontinuiteta na svih 7 oblaka točaka.

Tablica 6.2 Osnovni podaci o diskontinuitetima identificiranim na modelima površine pokosa izrađenim na osnovi snimanja dronom na gradilištu zasjeka na stalnom graničnom prijelazu Gornji Brgat

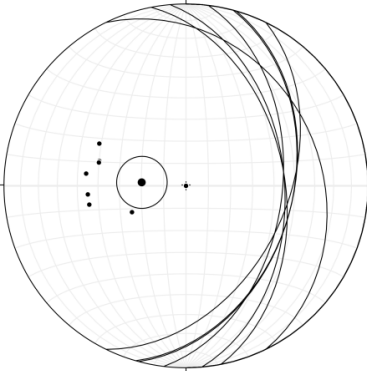
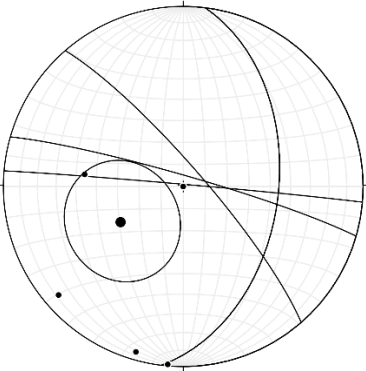
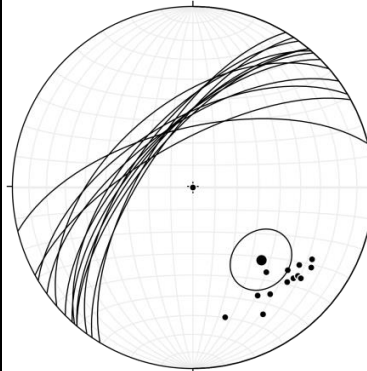

Naziv oblaka točaka	Etaža / stacionaža	Setovi diskontinuiteta		
		Oznaka seta	Prosječna orijentacija	Broj mjerenja
3e_g_150-170	3. etaža / 0+150-0+170	S1	274/24	4
		S2	56/24	11
3e_g_150-270	3. etaža / 0+150-0+270	S1	274/70	7
		S2	240/57	3
		S3	136/44	13
3gd-360-400	3. etaža / 0+360-0+400	S1	322/45	3
		S2	24/60	2
e3_g_240-265	3. etaža / 0+240-0+265	S1	140/40	13
		S2	32/48	8
		S3	15/72	4
4e_d_280-380	4. etaža / 0+280-0+380	S1	173/49	19
		S2	28/22	11
		S3	141/20	11
4e_d_390-430	4. etaža / 0+390-0+430	S1	322/45	3
		S2	24/60	2
4e_g_270_370	4. etaža / 0+270-0+370	S1	318/11	5
		S2	48/29	3

U nastavku su prikazane sve pojedinačne izmjerene orijentacije diskontinuiteta za svaki pojedini model zasebno (tablica 6.3-6.9). Uz podatke o orijentacijama, dani su i grafički prikazi na stereogramima, a također su označeni izmjerene diskontinuiteti i na oblaku točaka.

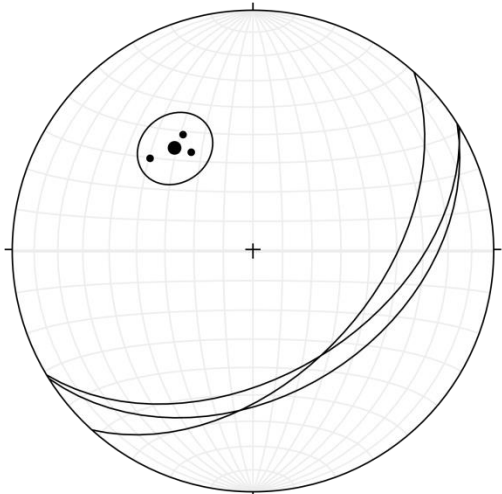
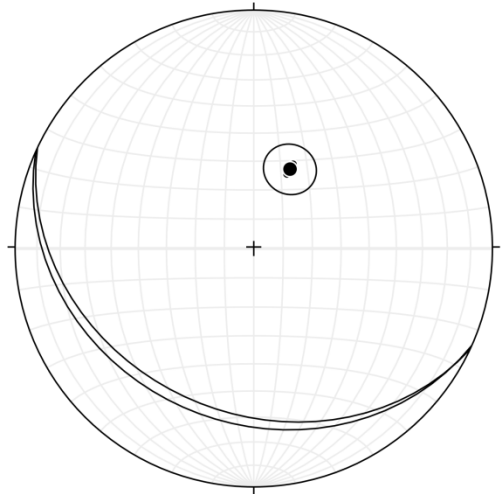
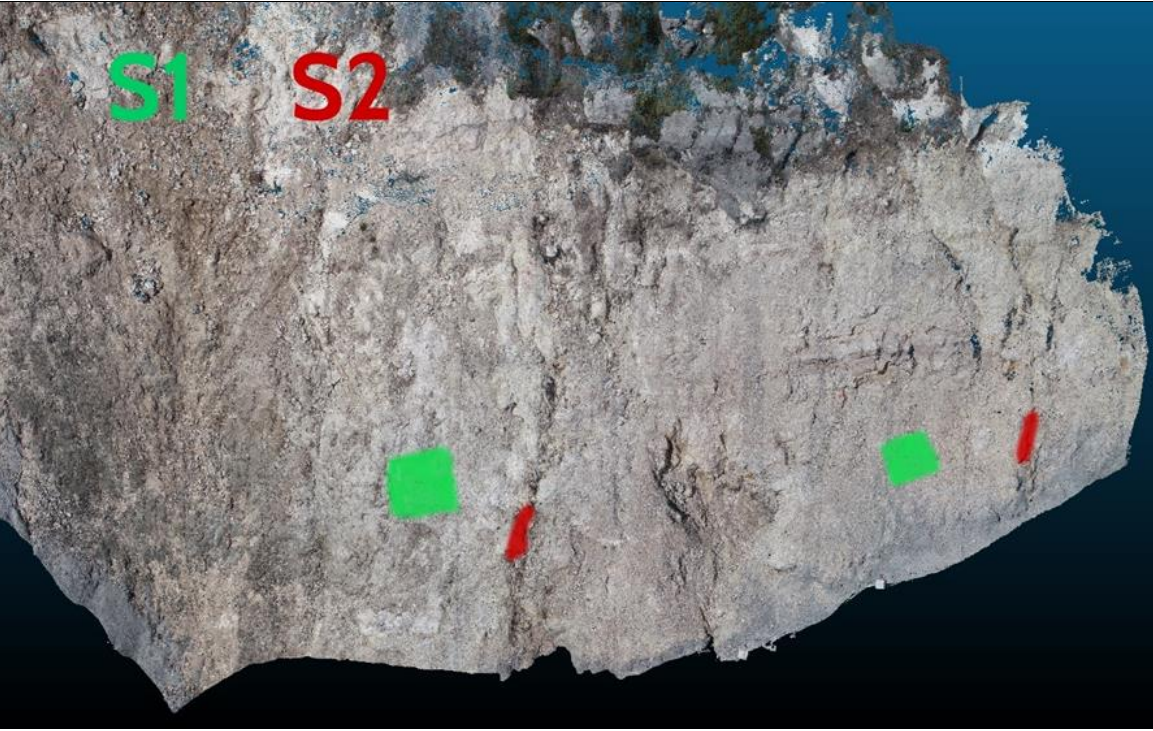
Tablica 6.3 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150-0+170

SETOVI DISKONTINUITETA		
Etaža	3	
Stacionaža	0+150-0+170	
Oznaka seta		
S1	S2	
Stereogram	Stereogram	
		
	Fisherov srednji vektor = 274/24	
	Fisherov srednji vektor = 56/24	
Orijentacije setova diskontinuiteta		
353/64	158/70	128/52
348/66	135/62	154/59
31/70	140/76	147/60
4/68	147/78	128/62
	158/62	135/71
	174/81	
Oblak točaka s označenim setovima		
		

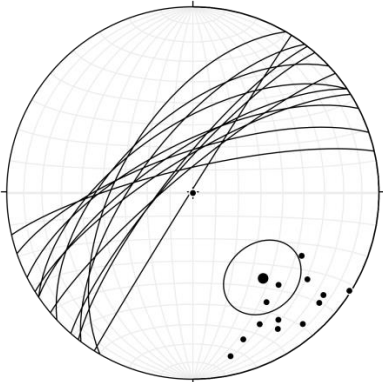
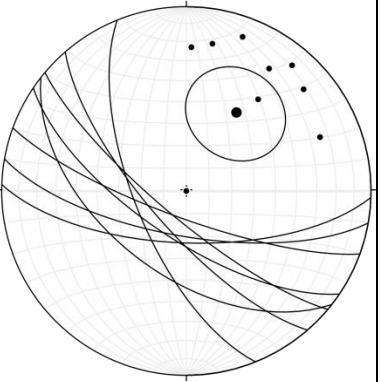
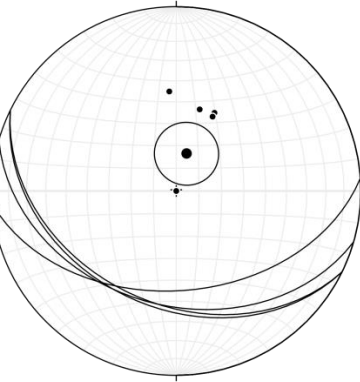
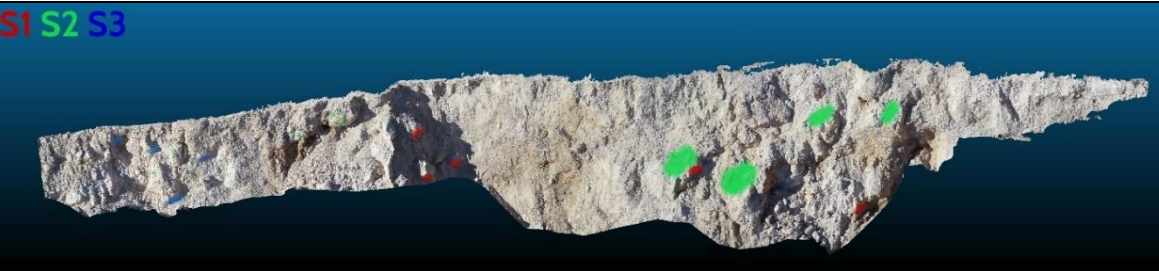
Tablica 6.4 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+150- 0+270

SETOVI DISKONTINUITETA					
Etaža			3		
Stacionaža			0+150-0+270		
Oznaka seta					
S1		S2		S3	
Stereogram		Stereogram		Stereogram	
 <p>Fisherov srednji vektor = 274/70</p>		 <p>Fisherov srednji vektor = 240/57</p>		 <p>Fisherov srednji vektor = 136/44</p>	
Orijentacije setova diskontinuiteta					
16/41	334/27	319/81		234/62	222/64
349/45	15/41	286/85		221/59	211/66
355/45	7/46	275/89		225/63	214/68
26/44				229/52	220/65
				216/62	220/67
				256/63	241/69
				239/59	
Oblak točaka s označenim setovima					
					

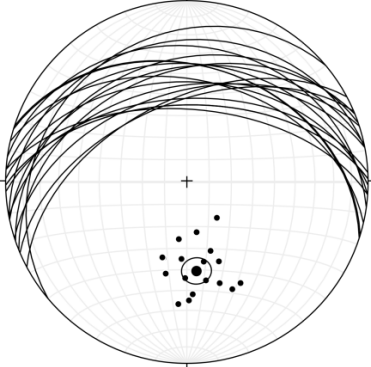
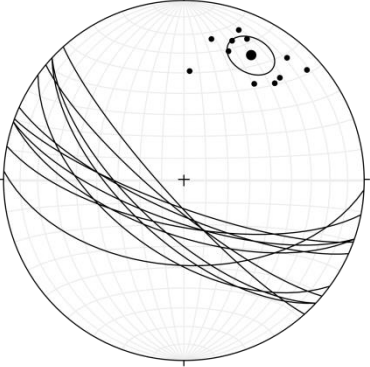
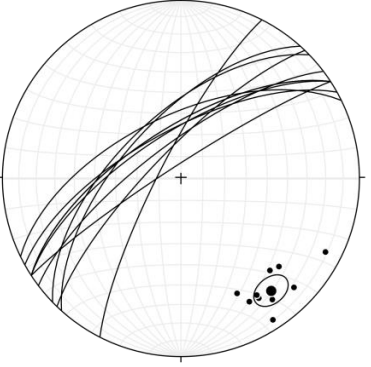
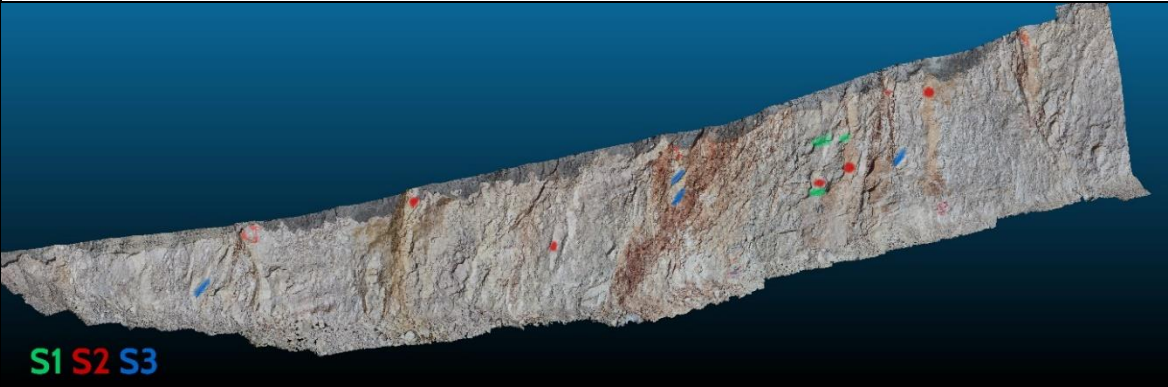
Tablica 6.5 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na 3. etaži na stacionaži 0+360-0+400

SETOVI DISKONTINUITETA	
Etaža	3
Stacionaža	0+360-0+400
Oznaka seta	
S1	S2
Stereogram	Stereogram
 <p>Fisherov srednji vektor = 322/45</p>	 <p>Fisherov srednji vektor = 24/60</p>
Orijentacije setova diskontinuiteta	
59/47	114/28
42/48	115/32
58/40	
Oblak točaka s označenim setovima	
	

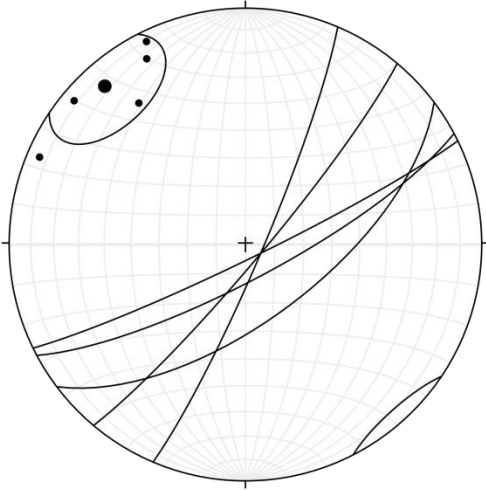
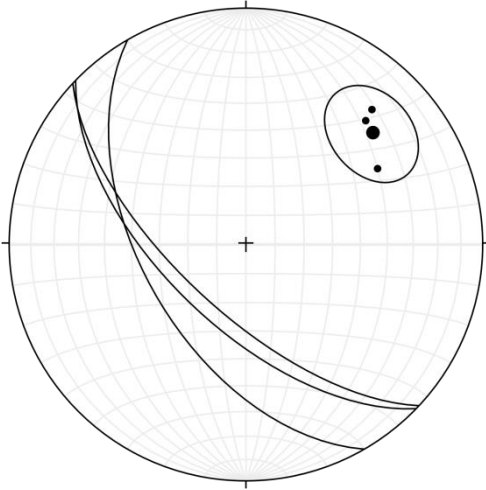
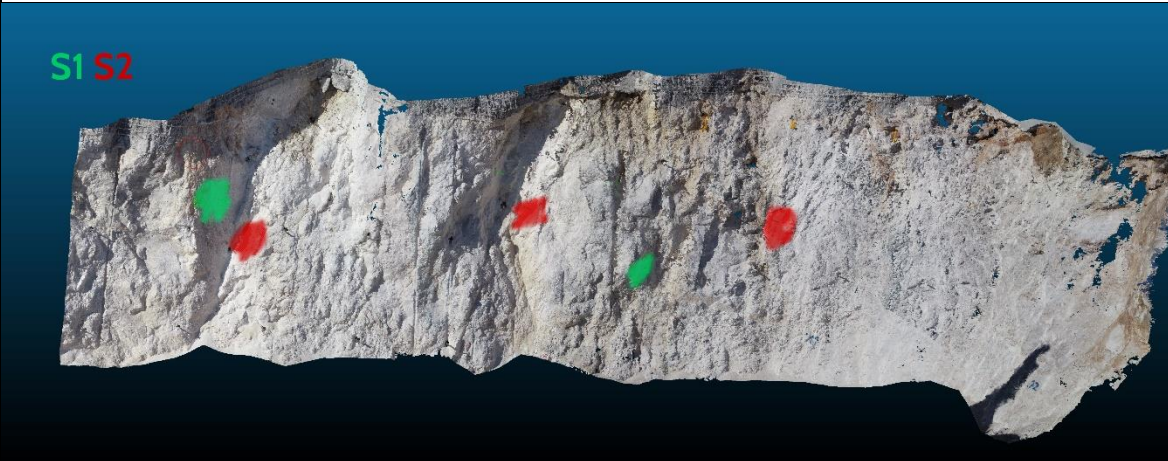
Tablica 6.6 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 3. etaže na stacionaži 0+240-0+265

SETOVI DISKONTINUITETA					
Etaža			3		
Stacionaža			0+240-0+265		
Oznaka seta					
S1		S2		S3	
Stereogram		Stereogram		Stereogram	
					
Fisherov srednji vektor = 140/40		Fisherov srednji vektor = 32/48		Fisherov srednji vektor = 15/72	
Orijentacije setova diskontinuiteta					
243/68	210/57	139/73	128/53	106/38	86/45
227/57	217/66	92/67	100/70	116/39	116/37
236/60	251/72	158/67	124/69		
236/71	218/78	130/78	110/78		
230/81	221/79				
257/79	238/75				
212/89					
Oblak točaka s označenim setovima					
					

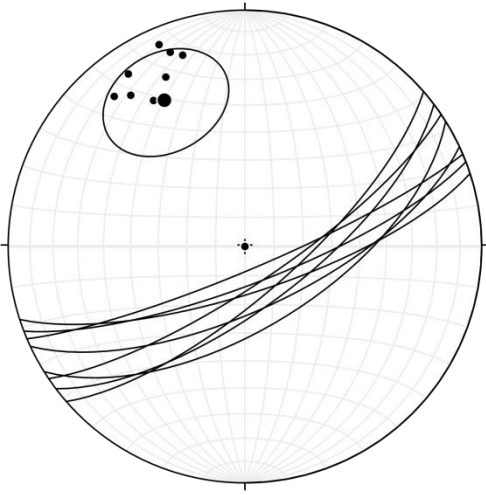
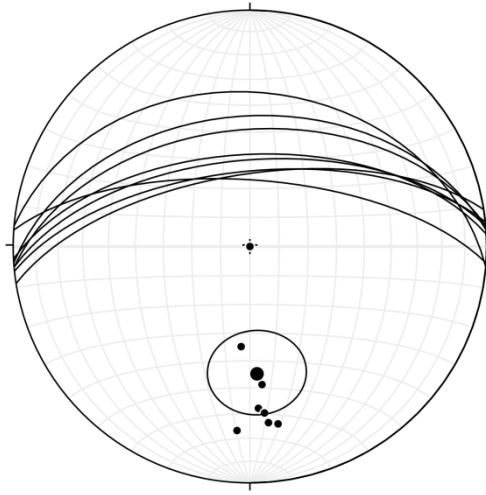
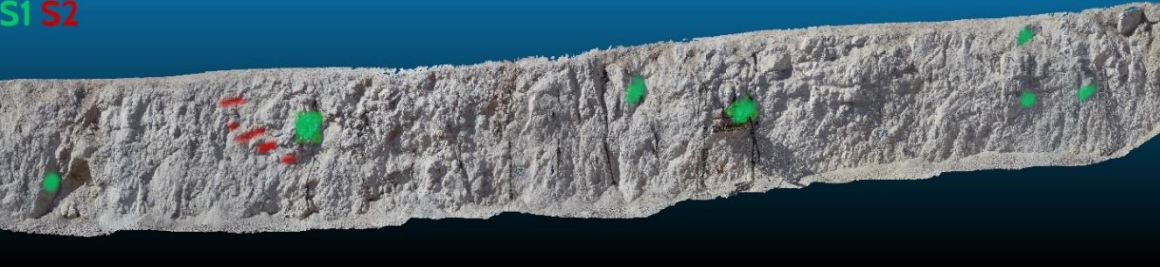
Tablica 6.7 Setovi diskontinuiteta S1, S2 i S3 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+280-0+380

SETOVI DISKONTINUITETA					
Etaža			4		
Stacionaža			0+280-0+380		
Oznaka seta					
S1		S2		S3	
Stereogram		Stereogram		Stereogram	
					
Fisherov srednji vektor = 173/49		Fisherov srednji vektor = 28/22		Fisherov srednji vektor = 141/20	
Orijentacije setova diskontinuiteta					
259/23	230/21	126/56	109/71	222/63	237/67
287/36	274/57	101/69	93/51	224/77	237/69
283/43	247/54	138/81	133/63	207/80	237/84
248/39	259/46	109/65	114/75	226/61	241/68
267/52	274/35	133/67	110/78	244/61	237/67
242/53	269/55	130/78		233/74	
258/37	288/36				
269/55	251/33				
271/44	278/26				
252/49					
Oblak točaka s označenim setovima					
					
<p>S1 S2 S3</p>					

Tablica 6.8 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na donjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+390 -0+430

SETOVI DISKONTINUITETA			
Etaža		4	
Stacionaža		0+390-0+430	
Oznaka seta			
S1		S2	
Stereogram		Stereogram	
 <p>Fisherov srednji vektor = 318/11</p>		 <p>Fisherov srednji vektor = 48/29</p>	
Orijentacije setova diskontinuiteta			
62/78	40/84	150/54	134/62
23/84	53/64	133/67	
64/85			
Oblak točaka s označenim setovima			
			

Tablica 6.9 Setovi diskontinuiteta S1 i S2 identificirani na oblaku točaka površine pokosa na gornjem dijelu 4. etaže na stacionaži 0+270 -0+370

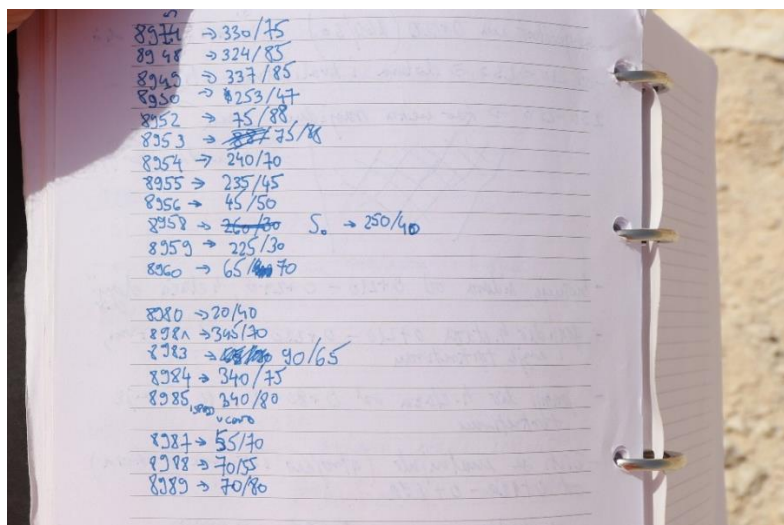
SETOVI DISKONTINUITETA			
Etaža		4	
Stacionaža		0+270-0+370	
Oznaka seta			
S1		S2	
Stereogram		Stereogram	
 <p>Fisherov srednji vektor = 331/30</p>		 <p>Fisherov srednji vektor = 176/45</p>	
Orijentacije setova diskontinuiteta			
56/77	65/68	264/64	265/49
53/69	58/62	275/35	266/44
49/73	72/74	274/67	261/65
69/77	67/82	267/58	265/60
Oblak točaka s označenim setovima			
			

7. Rasprava

U ovom poglavlju se daje usporedba podataka kartiranja stijenskog pokosa primjenom naprednih tehnologija daljinskih istraživanja, u kojima se mjerenja diskontinuiteta provode na digitalnim modelima snimljenim dronom, s podacima kartiranja tradicionalnim inženjerskogeološkim metodama mjerenja diskontinuiteta na terenu, što se uobičajeno koristi u inženjerskoj praksi u Hrvatskoj i u svijetu. Osim toga, raspravlja se o prednostima i ograničenjima inovativne primjene opisane metodologije za unaprjeđenje standardnog inženjerskog postupka kartiranja stijenskih pokosa, a sve na osnovi iskustva stečenih u ovom istraživanju na gradilištu zasjeka stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat.

7.1. Usporedba s podacima terenskih mjerenja

Podaci o diskontinuitetima identificiranim na digitalnim modelima površine stijenskih pokosa, dobiveni računalnom obradom fotografija snimljenih iz drona, uspoređeni su s podacima mjerenja diskontinuiteta na terenu koje je prikupio inženjerski geolog u okviru inženjerskog zadatka praćenja iskopa. On je provodio mjerenja konvencionalnom metodom kartiranja diskontinuiteta u okviru koje vizualnim pregledom površine stijenske mase identificira diskontinuitete na terenu, te ih mjeri geološkim kompasom i na taj način prikuplja podatke o njihovoj orijentaciji (kao što je detaljnije opisano u poglavlju 3). Podatci klasično izmjerenih orijentacija diskontinuiteta upisuju se u terenski dnevnik (slika 7.1), uz foto-dokumentaciju s gradilišta (slika 7.2).



Slika 7.1 Terenski dnevnik inženjerskog geologa koji prati iskop s podacima terenskog mjerenja orijentacija diskontinuiteta. Uz orijentacije su navedeni i brojevi foto-dokumentacije diskontinuiteta, kao npr. oznaka br. 8974 koja se odnosi na diskontinuitet prikazan na slici 7.2

Usporedba podataka o orijentacijama diskontinuiteta koje je izmjerio inženjerski geolog na terenu i rezultata dobivenih inovativnim metodama kartiranja diskontinuiteta na trodimenzionalnom oblaku točaka provedena je na modelu zasljeke na 4. etaži između stacionaža 0+210-0+260 (slika 7.3). Podatci o odstupanjima između terenskih mjerenja i mjerenja na modelu prikazani su u tablici 7.1



Slika 7.2 Konvencionalno inženjerskogeološko kartiranje diskontinuiteta na terenu geološkim kompasom. Orijentacija izmjerenog diskontinuiteta je 330/57.



Slika 7.3 Trodimenzionalni oblak točaka s označenim mjestom mjerenja diskontinuiteta sa slike 7.2 (plavi krug). Orijentacija izmjerenog diskontinuiteta je 337/78.

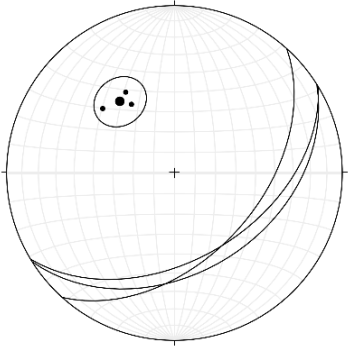
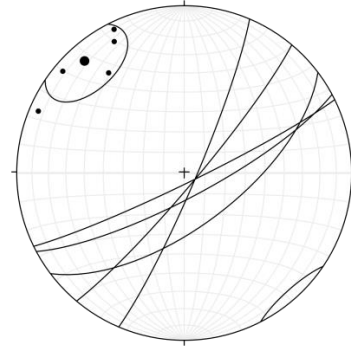
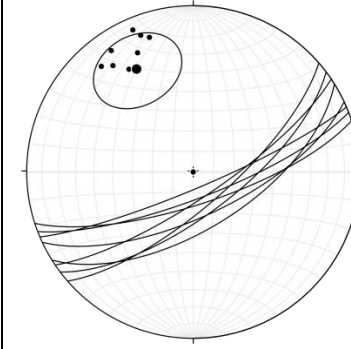
Tablica 7.1 Podatci o odstupanjima između terenskih mjerenja diskontinuiteta stijenske mase i mjerenja na modelu

SETOVI DISKONTINUITETA		
Etaža	4	
Stacionaža	210-260	
Orijentacije setova diskontinuiteta		
Podaci mjerenja na terenu	Podaci mjerenja na modelu	Pogreška (%/%)
330/75	337/78	2,1/4
324/85	322/88	0,6/3,5
337/85	58/85	
253/47	243/51	8,5/6,4
75/88	82/87	9,3/1,1
75/88	74/77	1,3/12,5
240/70	238/74	0,8/5,7
235/45	235/51	0/13,3
45/50	47/49	4,4/2,0
250/40	244/37	2,4/7,5
225/30	230/31	2,2/3,3
65/70	68/64	4,6/8,6
Najmanje odstupanje		0/1,1
Najveće odstupanje		9,3/12,5

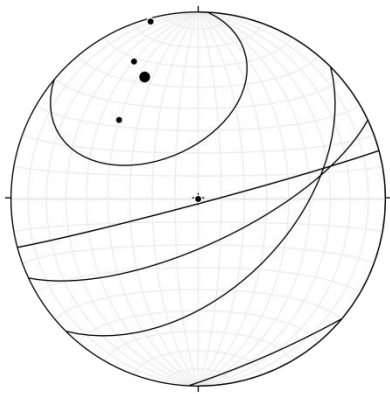
Usporedbom mjerenja provedenih na terenu ručno geološkim kompasom i mjerenja softverskim alatom *Compass* u računalnom programu *CloudCompare*, vidljivo je da su razlike u orijentacijama najčešće manje od 5%, pri čemu najveće odstupanje iznosi 12,5%. Ovakvo odstupanje može se protumačiti na više načina. Primjerice, mogući razlog je neprecizno očitavanje s geološkog kompasa koje je najčešće dodatno otežano ukoliko se diskontinuitet nalazi na visini iznad visine očiju, jer je tada potrebno očitati orijentaciju na kompasu korištenjem ogledala, a tada je moguće samo grubo procijeniti položaj magnetne igle.

Kao primjer za prikaz usporedbe rezultata mjerenja, izdvojen je set diskontinuiteta koji se često ponavlja na 4. i 3. etaži, a za koji Fischerov srednji vektor iznosi **322/45** za oblak točaka na trećoj etaži, stacionaži 0+360-0+400 (tablica 6.5), zatim **318/11** za oblak točaka na četvrtoj etaži na stacionaži 0+390-0+430 (tablica 6.8) te **331/30** za oblak točaka na četvrtoj etaži na stacionaži 0+270-0+370 (tablica 6.9). Srednja vrijednosti svih mjerenja orijentacije na tri oblaka točaka iznosi 324/29 (tablica 7.2). Na terenu je određena orijentacija ovog diskontinuiteta na temelju pet mjerenja, a iznosila je 336/30 (tablica 7.3). Uspoređujući rezultate terenskih mjerenja s mjerenjima na digitalnim modelima, vidljivo je da je da orijentacije očitane na terenu na svega pet mjerenja odgovaraju orijentacijama određenim na višestruko većem uzorku od 16 mjerenja na modelima.

Tablica 7.2 Podaci mjerenja orijentacija istog seta diskontinuiteta na tri digitalna modela trodimenzionalnih oblaka točaka. Ukupan broj mjerenja je 16.

MJERENJE NA MODELU				
Etaža				
3		4		4
Stacionaža				
0+360-0+400		0+390-0+430		0+270-0+370
Stereogram s modela		Stereogram s modela		Stereogram s modela
				
Fisherov srednji vektor = 322/45		Fisherov srednji vektor = 318/11		Fisherov srednji vektor = 331/30
Fisherov srednji vektor tri seta diskontinuiteta = 324/29				
Orijentacije setova diskontinuiteta				
59/47	62/78	40/84	56/77	65/68
42/48	23/84	53/64	53/69	58/62
58/40	64/85		49/73	72/74
			69/77	67/82

Tablica 7.3 Podaci mjerenja orijentacija istog seta diskontinuiteta na terenu. Ukupan broj mjerenja je 5

TERENSKO MJERENJE	
Stereogram s terena  Fisherov srednji vektor = 336/30	Orijentacija
	75/88
	75/88
	45/50
	65/70

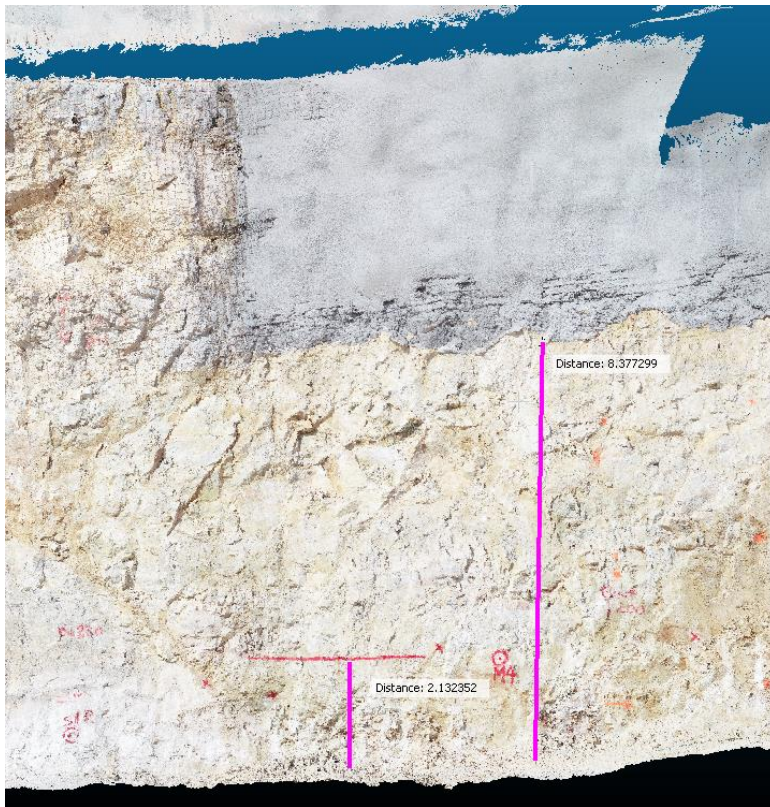
7.2 Mogućnost inovativne primjene u inženjerstvu

Mogućnost inovativne primjene naprednih tehnologija snimanja dronom za unaprjeđenje kartiranja stijenskih pokosa u geotehničkom inženjerstvu prvenstveno ovisi o: (a) točnosti i reprezentativnosti rezultata mjerenja; (b) prednostima i ograničenjima opisane metodologije u kontekstu gradilišta i specifične dinamike radova, koja je izuzetno promjenjiva i podložna objektivnim i subjektivnim utjecajima, kao što su vremenske prilike ili ljudski faktor. U tom smisli ovdje se iznose iskustva s konkretnog gradilišta zasjeka stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat, a koja proizlaze iz istraživanja opisanog u ovom radu.

Osnovna prednost primjene daljinskih istraživanja, odnosno mjerenja diskontinuiteta na površini stijenske mase na digitalnim modelima pokosa je veća točnost izmjerenih podataka o orijentacijama diskontinuiteta, kao i mogućnost mjerenja diskontinuiteta u svim dijelovima stijenske mase, uključivo i nedostupne visoke dijelove. Naime, prilikom očitavanja diskontinuiteta u računalnom programu, model je moguće različito orijentirati i time prilagoditi pogled na model iz kojeg se može odabrati ploha za mjerenje orijentacije na bilo kojem mjestu na oblaku točaka. Osim toga, značajno ograničenje kod konvencionalnog mjerenja kompasom je to što je doseg mjerenja ograničen na plohe koje je moguće dohvatiti rukama, što je najčešće do visine od 2 m od dna pokosa, kao što je prikazano na slici 7.4 na kojoj je crvenim markirnim sprejem označena crvena linija na zasjeku na najvišem dijelu koji je bilo moguće doseći rukom. Ta visina iznosi svega dva metra što je samo četvrtina ukupne visine zasjeka na kojemu je potrebno identificirati i izmjeriti diskontinuitete, jer je zasjek visok osam metara. Proizlazi da su mjerenja ograničena na samo $\frac{1}{4}$ visine pokosa. Pri tome je važno napomenuti da sva očitavanja iznad razine očiju traže aproksimaciju položaja magnetne igle, čime se značajno umanjuje točnost podataka mjerenja na ovim visinama. Nasuprot tome, korištenje digitalnih modela i očitavanja orijentacije diskontinuiteta u računalnom programu omogućuje mjerenje točaka u svim dijelovima modela što omogućava da se za pojedini set odrede i one orijentacije diskontinuiteta koje inače ne bi mogle biti izmjerene na terenu zbog navedenih ograničenja.

Broj mjerenja na digitalnim modelima može biti i znatno veći od broja koji je prikazan u ovom radu, no za određivanje orijentacije ovdje su uzete samo najbolje vidljive plohe, što veće i pravilnije. Nasuprot tome, mjerenja geološkim kompasom se provede pomoću vrlo male plohe kompasa koja se prislanja uz diskontinuitet, čime je teško provesti

mjerenje reprezentativne orijentacije valovite ili neravne plohe diskontinuiteta. Pogrešku je moguće umanjiti korištenjem neke druge veće pomoćne ravne plohe, kao što je bilježnica koja se podmeće ispod kompasa. Velika prednost metoda mjerenja orijentacije diskontinuiteta iz digitalnih modela je ta što je moguće kontrolirati koji dio površine diskontinuiteta će biti korišten za određivanje orijentacije, pa se za neravne plohe uzima veća površina da se dobije srednja reprezentativna orijentacija diskontinuiteta.



Slika 7.4 Prikaz mogućnosti dosega pogodnog za mjerenje orijentacije diskontinuiteta. Kraća linija predstavlja doseg rukom (približne visine oko 2 m), dulja linija predstavlja ukupnu visinu zasjeke na kojemu je potrebno identificirati diskontinuitete i izmjeriti njihove orijentacije

Gledano u kontekstu gradilišta, prednost primijenjene metodologije je što mjerenja diskontinuiteta na modelima snimljenim dronom također predstavljaju brz i precizan način dobivanja ulaznih podataka za interaktivno projektiranje koje projektant zasjeke kontinuirano provodi tijekom građenja. Naime, mjerenje velikog broja orijentacija diskontinuiteta u različitim dijelovima stijenske mase doprinosi pouzdanosti podataka o stijenskoj masi, što je od ključne važnosti za praćenje stabilnosti pokosa za vrijeme iskopa, odnosno za analize stabilnosti stijenske mase. Za stabilnost su važne što točnije i reprezentativnije određene orijentacije setova diskontinuiteta budući da pojedini setovi diskontinuiteta ili kombinacije setova diskontinuiteta mogu dovesti do određenog tipa sloma u stijeni (planarni, klinasti, prevrtanje). Ukoliko je podatak o orijentacijama dostupan

geotehničaru za analizu još za vrijeme iskopa i prije izvođenja mjera zaštite (sidra, torkeretirani beton i mreža), moguće je iste korigirati s obzirom na novootkriveno stanje stijenske mase na osnovi položaja diskontinuiteta mjerenih na iskopu. Navedeno je također presudan faktor i za sigurnost ljudi i strojeva na terenu kao i za kasniju stabilnost same građevine.

Vezano za specifičnu dinamiku gradilišta, snimanje dronom izvodilo se nakon što je dobiven zahtjev za snimanjem od strane projektanta. Projektant zahtijeva snimanje zasjeka u trenutku kada je stijenska masa otvorena (odminirana, a sav materijal iskopa odstranjen), a prije zaštite stijenske mase mrežom ili torkretiranim betonom. Snimanje se zbog toga izvodilo u izrazito kratkom vremenskom intervalu, između dva procesa građenja, tako da je na raspolaganju za snimanje bilo najčešće samo jedan do dva dana. Budući da sam snimanja provodio samostalno, odnosno putovao od Zagreba do gradilišta u zaleđu Mlina kod Dubrovnika, stekao sam uvid u važnost koordinacije različitih sudionika građenja (projektant, nadzor, voditelj gradilišta, geodet, mineri, kopači, bageristi, prijevoznici i drugi) kako bi se uskladile složene radnje mnogih sudionika na gradilištu.

Na samom gradilištu, također je česti problem bila i prašina u zraku ili prašina koja je prekrivala površinu stijene budući da se na različitim dijelovima gradilišta izvode različite faze građenja među kojima i ona sa bušenjem stijene za ugradnju sidara. Zbog toga, kod dolaska na teren i prije snimanja bilo je potrebno zaustaviti sve eventualno započete radove na dijelu koji je bilo potrebno snimati, ali i one koji bi eventualno mogli stvarati probleme zbog prašine u zraku.

Osobiti problem često su predstavljale i vremenski uvjeti. Snimanje je izvođeno kroz dva godišnja doba, zimu i proljeće. Tijekom zime postojale su brojne poteškoće u snimanju dronom. Dron korišten u za snimanja modela u ovom radu nije predviđen za upotrebu u kišnim uvjetima ili uvjetima sa snijegom što je zimi na graničnom prijelazu Gornji Brgat bio čest problem. Zbog takvih okolnosti bilo je potrebno odlučiti u dogovoru s projektantom je li moguće odgoditi snimanje dok se uvjeti ne poboljšaju ili je bilo nužno kartirati zasjek na konvencionalan način upotrebom fotografija i mjerenja diskontinuiteta geološkim kompasom.

8. Zaključak

Metodologija inženjerskogeološkog kartiranja stijenske mase obuhvaća primjenu niza metoda koje su primijenjene na gradilištu stalnog graničnog prijelaza Gornji Brgat tijekom zime 2018. i zime/proljeća 2019. godine: (a) metode preliminarnih terenskih istraživanja u svrhu pripreme za daljinska istraživanja i metode snimanja istraživanog područja bespilotnom letjelicom ; (b) metode izrade oblaka točaka snimanog pokosa; i (c) metode ekstrakcije diskontinuiteta iz trodimenzionalnog digitalnog modela. Primjenom ove metodologije izrađeno je ukupno osam digitalnih modela otkopanih dijelova zasjeka, koji su snimljeni neposredno nakon iskopa i neposredno prije zaštite mrežama ili torkretom. Usprkos dinamici koja je bila prisutna na gradilištu, kao i vremenskim i drugim otegotnim okolnostima za fotogrametrijsko snimanje dronom, u okviru ovog rada izrađeni su digitalni modeli vrlo visoke kvalitete sljedećih osnovnih karakteristika. Površina snimanih dijelova pokosa varirala je u rasponu od 99 do 1.357 m², a izrađeni oblaci točaka variraju od 6.037.233 do 55.487.740 točaka po snimljenom modelu. Gustoće točaka su u rasponu od 4.449 do 460.549 točaka po m². Ovako snimljeni i generirani podaci omogućili su identifikaciju i mjerenje 133 diskontinuiteta u svim dijelovima zasjeka, čime su dobiveni reprezentativni podaci za karakterizaciju stijenske mase. U softveru *CloudCompare* također su izrađeni stereogrami na osnovi kojih je bilo moguće identificirati osnovne setove diskontinuiteta.

Usporedba rezultata mjerenja na digitalnim modelima s podacima mjerenja na terenu geološkim kompasom, potvrdila je pretpostavljene prednosti primjene naprednih tehnika daljinskih istraživanja koje se očituju u tome što je moguće snimiti daleko više podataka (npr. 16 mjerenja nasuprot 5 mjerenja na analiziranom dijelu pokosa), te što je mjerenjima moguće obuhvatiti i dijelove stijenske mase koji su nedostupni za tradicionalna mjerenja (mjerenja se provode na cijeloj visini pokosa od 8 metara, nasuprot 2 metra koliko je dostupno kada se mjeri ručno).

Opisana metodologija, primijenjena u fazi implementacijskog inženjerskogeološkog istraživanja na gradilištu jednog od najvećih zasjeka u Republici Hrvatskoj, kao i rezultati istraživanja provedenog u okviru ovog rada potvrdili su da je navedene metode fotogrametrijskog snimanja dronom i obrade podataka moguće također koristiti i u fazama praćenja iskopa, te da se time ovaj inženjerski postupak znatno unaprjeđuje u odnosu na tradicionalno primjenjivanje konvencionalne tehnike terenskog inženjerskogeološkog kartiranja. Ovaj doprinos odražava se i na području geotehničkog istraživanja, a krajnje dobiti se odražavaju na pouzdanije projektiranje u građenju, odnosno iskopu zasjeka.

9. Literatura

Arbanas, Ž. (2008): Projektiranje u stijenskim masama. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 171 p.

Arbanas, Ž. (2019): Geotehnički projekt zaštite pokosa na stalnom graničnom prijelazu za međunarodni promet putnika i roba u cestovnom prometu Gornji Brgat. Građevinski projekt, glavni projekt – izmjene i dopune. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.

Fisher, R. A. (1953): Dispersion on a sphere. Proc. R. Soc. Lond. A., 217(1130): 295-305.

Friedl, M.A., McIver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., Schaaf, C. (2002.): Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sensing of Environment, 83(1-2): 287-302.

Haneberg, W. C. (2008): Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(4): 457-469.

Hunt, G. R. (1977): Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared . Geophysics, 42(3): 501-513.

ISMR, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test (1979): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, 15: 319-368.

Krešić, B. (2017): Geotehnički projekt izgradnje zaštite pokosa zasjeka stalnog graničnog prijelaza za međunarodni promet putnika i roba u cestovnom prometu Gornji Brgat. Građevinski projekt, glavni projekt. IPZ-NISKOGRADNJA d.o.o., Zagreb.

Marković, S. (1971): Osnovna geološka karta, 1:100.000, list Dubrovnik. Savezni geološki zavod, Beograd, 35 p.

Marković, S. (1975): Osnovna geološka karta 1:100.000, tumač za list Dubrovnik. Savezni geološki zavod, Beograd, 35 p.

Priest, S. D. (1993): Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London, 472 p.

Rosser, N. J., Petley, D. N., Lim, M., Dunning, S. A., & Allison, R. J. (2005): Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38(4): 363-375.

Salisbury, J. W., & Walter, L. S. (1989): Thermal infrared (2.5-13.5 μm) spectroscopic remote sensing of igneous rock types on particulate planetary surfaces. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7): 9192-9202.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., & Reynolds, J.M. (2012): Structure-from Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179: 300- 314.

Wickens, E.H., & Barton, N.R. (1971): The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes. The Photogrammetric Record, 7(37): 46-54.

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557489>