

Primljen / Received: 17.6.2015.

Ispravljen / Corrected: 29.3.2016.

Prihvaćen / Accepted: 15.4.2016.

Dostupno online / Available online: 10.5.2016.

# Primjena bespilotnih letjelica na prometnoj infrastrukturnoj mreži

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. [Danijela Jurić-Kačunić](#), dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
[djk@grad.hr](mailto:djk@grad.hr)



[Lovorka Librić](#), mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
[lilibric@grad.hr](mailto:lilibric@grad.hr)



[Marijan Car](#), dipl.ing.geod.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za geotehniku  
[mcar@grad.hr](mailto:mcar@grad.hr)

Pregledni rad

[Danijela Jurić Kačunić, Lovorka Librić, Marijan Car](#)

## Primjena bespilotnih letjelica na prometnoj infrastrukturnoj mreži

Učestale nagle klimatske promjene uzrokuju sve veću pojavu odrona na prometnoj infrastrukturnoj mreži. Primjenom bespilotnih letjelica mogu se dopuniti, poboljšati, pa čak i u potpunosti zamijeniti klasični načini kartiranja, određivanja volumena, poprečnih presjeka, slojnica i drugih parametara koji su potrebni za inženjerske analize odrona. U radu se prikazuju mogućnosti korištenja bespilotnih letjelica u ocjeni stanja prometne infrastrukturne mreže, ističući njihove prednosti i nedostatke. Prikazana je zakonska regulativa i znanstvenoistraživačke inicijative za primjenu bespilotnih letjelica.

### Ključne riječi:

odroni, bespilotne letjelice, prometna infrastruktura, oblak točaka, ortofoto karte

Subject review

[Danijela Jurić Kačunić, Lovorka Librić, Marijan Car](#)

## Application of unmanned aerial vehicles on transport infrastructure network

Frequent abrupt climate changes have been increasingly causing landslides on the transport infrastructure network. Traditional mapping methods, and methods for determining the volume, cross-sections, contours and other parameters needed in the rockfall engineering analysis, can be modified, improved, and even completely replaced, by means of unmanned aerial vehicles. The possibility of using drones for evaluating condition of the transport infrastructure network, with an emphasis on their advantages and disadvantages, is explored. The legislation and research initiatives for the use of drones are presented.

### Key words:

rockfalls, Unmanned Aerial Vehicles, transport infrastructure, point cloud, ortophoto maps

Übersichtsarbeit

[Danijela Jurić Kačunić, Lovorka Librić, Marijan Car](#)

## Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge im Verkehrsinfrastrukturnetz

Häufige kurzfristige Klimaveränderungen verursachen ein vermehrtes Auftreten von Erdrutschen im Verkehrsinfrastrukturnetz. Durch die Anwendung unbemannter Luftfahrzeuge können herkömmliche Vorgänge zur Kartierung und Ermittlung von Volumen, Querschnitten, Höhenlinien oder anderen Parametern zur technischen Analyse von Erdrutschgebieten ergänzt, verbessert oder sogar gänzlich ersetzt werden. In dieser Arbeit werden Möglichkeiten zur Anwendung unbemannter Luftfahrzeuge bei der Zustandsbeurteilung von Verkehrsinfrastrukturnetzen beschrieben und ihre Vor- und Nachteile erläutert. Rechtliche Vorschriften und Forschungsinitiativen zur Anwendung von unbemannten Luftfahrzeugen werden dargestellt.

### Schlüsselwörter:

Erdrutsch, unbemannter Luftfahrzeuge, Verkehrsinfrastruktur, Punktwolke, Ortophotokarte

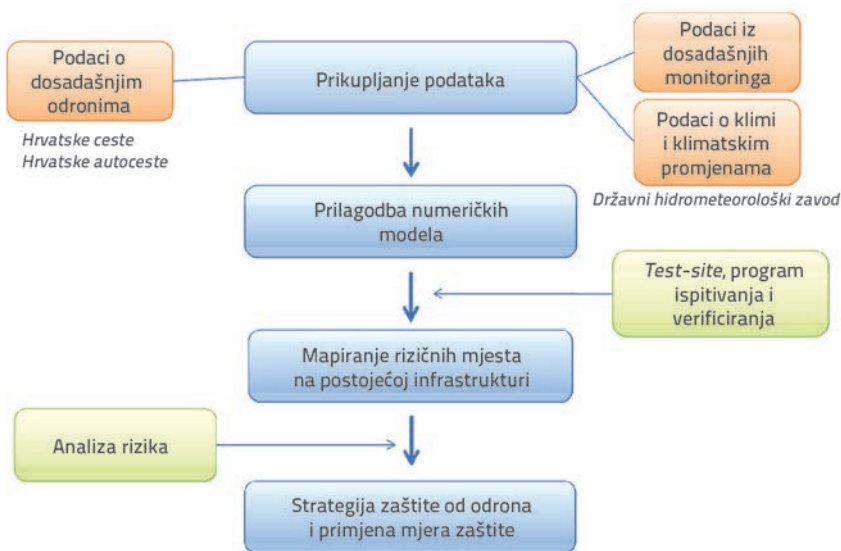
### 1. Uvod

Brze promjene klime, koje su se počele proučavati posljednjih 30 godina i čije posljedice se osjećaju u svim dijelovima svijeta, snažno se odražavaju i na sigurnost prometne infrastrukturne mreže. Vrijednost cestovne i željezničke infrastrukture samo u EU se procjenjuje na 9,7 trilijuna eura. Njihovo održavanje iziskuje deset puta manje sredstava od hitnih popravaka uzrokovanih odronima koji predstavljaju iznenadno odvajanje neovisnih stijenskih blokova ili dijela stijenske mase sa strmih pokosa [1]. Posebno jak utjecaj, zbog povećanja frekvencije odrona, klimatske promjene imaju na kosine i inženjerske usjeke koji služe prometnoj infrastrukturi [2]. Jedan od ključnih faktora koji kontrolira stabilnost odrona je voda. Voda se pri zagrijavanju širi, a zbog globalnog zatopljenja dolazi do otapanja polarnih ledenih ploča i ledenjaka. U kombinaciji tih dviju promjena dolazi do podizanja razine mora. Tako u nekim regijama sve češće dolazi do ekstremnih vremenskih uvjeta i kiša, dok se u drugim krajevima javljaju sve intenzivniji toplinski valovi i suše. Vruća i sušna ljeta uzrokovat će skupljanje i pucanje stijena te gubitak vegetacije, dok će za vrijeme intenzivnijih oborina doći do bujanja stijena, drugačijeg režima infiltracije, povišenih pornih pritisa, erozija i poplavlivanja. Očekuje se da će u idućim desetljećima ti učinci biti još intenzivniji.

Odroni predstavljaju veliku opasnost u područjima koja se odlikuju raznovrsnošću litostratigrafskog sastava tla, visokim stupnjem tektonske i seizmičke aktivnosti, složenim geološkim karakteristikama, različitim reljefnim obilježjima, nepovoljnim klimatskim uvjetima, razvijenom vodnom mrežom i značajnim antropogenim utjecajem na oblikovanje reljefa. Odroni manjih i većih razmjera učestala su pojava u Republici Hrvatskoj gdje 54 % kopnene površine prekriva krš. Hrvatska krška područja pripadaju tipu krša umjerenih širina (Dinaridi, Alpe, Pireneji, Apalachian gorje, gorja Australije itd.) koja se ističu debelim (i do 8 km) karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima, što uz naglašenu tektonsku razlomljenost utječe na podjednaku zastupljenost horizontalnih i vertikalnih oblika (speleoloških objekata) [3, 4]. U Hrvatskoj se krš pruža od Slovenije na sjeverozapadu do Crne Gore na jugoistoku, dok mu sjeverna granica ide južno od Karlovca prema istoku gdje prelazi u Bosnu i Hercegovinu [5, 6]. Veliki dio hrvatskih autocesta A1, A6 i A7, ukupne duljine 570 km, prolaze brdovitim terenom s brojnim krškim padinama urezanim u krškoj stijeni. Puno lošija situacija je na više od 2200 km državnih cesta te 2796 km željezničkih pruga gdje su padine još strmije bliže cesti i manje zaštićene. U tablici 1. dan je kratak pregled značajnijih odrona koji su se posljednjih godina dogodili na prometnicama u Hrvatskoj [7].

U Hrvatskoj ne postoji sustavno prikupljanje podataka o odronima koji mogu dati korisne informacije o veličini i frekvenciji odrona za potrebe projektiranja mjera zaštite od odrona u područjima koja su najugroženija. Isto tako u Hrvatskoj ne postoje smjernice za projektiranje sustava zaštite od odrona nego se slijede i usvajaju europska iskustva i standardi. Procjena rizika od odrona kod linijskih infrastrukturnih objekata kao što su državne ceste, autoceste i željeznice, najčešće se temelji na rezultatima bodovanja određenog broja parametara, za svaku odabranu lokaciju za koju je identificirana mogućnost pojave odrona. Dionica koja ima najveći zbroj bodova ima ujedno i najveći rizik od odrona [8].

Zbog specifičnosti krša u Hrvatskoj, potrebno je razviti metode za određivanje ulaznih parametara, formiranje baza podataka na temelju prijašnjih odrona te nove spoznaje temeljiti i verificirati *in situ* mjerenjima. Potrebno je razviti metodologiju klasifikacije stijenskih odrona u kršu koja će biti prilagođena značajkama procesa koji su važni u nastajanju ovog reljefnog tipa. Nužno je razviti strategiju zaštite od odrona koja bi iskoristila dostupne podatke o dosadašnjim odronima, klimi i klimatskim promjenama te iz tih podataka razvila smjernice za sustav zaštite od odrona koji bi odgovarao hrvatskom podneblju i geologiji (slika 1.).







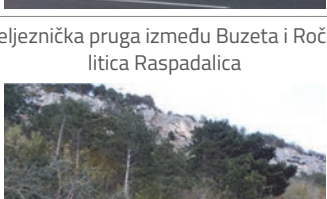
Slika 1. Razvoj strategije zaštite od odrona

## 2. Ocjena stanja infrastrukturne mreže

### 2.1. Ocjena stanja cestovne infrastrukturne mreže

Kontinuirane preglede, analize i ocjene stanja autocesta obavljaju ophodarska služba i Tehnička jedinica za održavanje uz prisutnost inženjera građevine i geologije. Radovi na održavanju, kao i sve one aktivnosti koje je potrebno poduzeti da bi radovi na održavanju i popravcima bili uspješni, propisani

Tablica 1. Primjeri odrona u Hrvatskoj [7]

Lokacija	Karakteristike			
	Volumen blokova	Vremenski uvjeti	Posljedice	Mjere zaštite
Stupica, D512 Makarska- Vrgorac 	najveći blokovi oko 100 i 250 m <sup>3</sup>	kiša	zatvoren promet za sva vozila zbog potrebe uklanjanja blokova koji su pali te izrade projektnog rješenja zaštite područja od budućih odrona	izrađen je projekt za zaštitu od odrona - prijelaz lokacije tunelom te zaštita predusjeka barijerama za zaštitu od odrona
Brljan, državna cesta Oklaj-Kistanje 	nema podataka	kiša i vjetar	dok nisu uklonjeni odronjeni blokovi, promet se odvijao jednim prometnim trakom	nisu poduzete mjere zaštite od odrona, iako su se manji odroni na ovom području događali i prije
Krilo Jesenice, Jadranska magistrala 	najveći blok oko 8 m <sup>3</sup>	kiša	materijalna šteta na autima, ljudi su ozlijeđeni, zatvorena prometnica	lokacija odrona stabilizirana je postavljanjem sustava čeličnih mreža, čelične užadi i sidara
čvor Oštrovica, autocesta Rijeka-Zagreb 	palo ukupno 60 m <sup>3</sup> kamenja	kiša	zatvoren izlaz u smjeru Rijeke prema Crikvenici i Krku za sva vozila	lokacija odrona stabilizirana je postavljanjem sustava čeličnih mreža, čelične užadi i sidara
željeznička pruga između Buzeta i Roča, litica Raspadalica 	najveći blok oko 12 m <sup>3</sup>	kiša	oštećeno 70 m pruge (izbijene tračnice za metar i pol), oštećena dva telefonska stupa, zatvorena pruga	nisu poduzete mjere zaštite od odrona iako su se manji odroni na ovom području događali i ranije

su Standardom redovnog održavanja autocesta. Osim Standarda redovnog održavanja autocesta, koristi se i Sustav gospodarenja objektima (SGO) koji se sastoji od procedura i metoda za prikupljanje i analizu podataka o objektima radi predviđanja njihovog stanja u budućnosti, procjene potreba

za održavanjem i dugoročnog planiranja odnosno upravljanja planskim sredstvima.

Ophodarska služba obavlja nadziranje prohodnosti i uporabivosti autocesta svakog dana od 0 do 24 sata u skladu s pravilnikom. Ophodnju može obavljati samo kvalificirana

i stručno osposobljena osoba (ophodar). Ophodar tijekom ophodnje nadzire stanje i prohodnost autoceste, izvanredne događaje, te meteorološke uvjete značajne za odvijanje prometa na autocesti. Voditelji Tehničkih jedinica i voditelji pravaca obavljaju redovan pregled stanja autoceste najmanje jedanput tjedno, dok poslovođa održavanja mora dionicu obići minimalno tri puta tjedno, a poželjno je svakodnevno (radnim danom od ponedjeljaka do petka). U periodu odmrzavanja, jakih kiša ili u drugim slučajevima kada je ugrožena stabilnost autoceste i sigurnost prometa (poplave, odroni, klizanje, vododerine i sl.), nadziranje prohodnosti i uporabivosti autoceste treba provoditi u skladu s procjenom ugroženosti autoceste. Postoje sezonski, godišnji, glavni i izvanredni pregledi.

Sezonski pregled provodi nadležna Tehnička jedinica za održavanje dva puta godišnje, u pravilu nakon zimskog razdoblja (ožujak - svibanj) i ujesen (rujan - studeni). Sezonski pregled je isključivo vizualni pregled ograničenog opsega (dostupnih elemenata) - usmjeren na provjeru stanja prometnih površina, konstrukcijskih elemenata građevine, donjeg ustroja i odvodnje, opreme i slično.

Godišnji pregled provodi nadležna Tehnička jedinica za održavanje uz prisutnost inženjera građevine i geologije (iz službe koja održava autocestu). Godišnji pregled obavezno obuhvaća vizualni pregled svih elemenata građevine. Izvještaj o godišnjem pregledu sadrži opis pregledanih dijelova građevine, vrstu i stupanj identificiranog oštećenja, te veličinu područja zahvaćenog oštećenjem s detaljnim opisom mjesta i fotografijama pojedinih oštećenja.

Glavne preglede građevina provodi tim stručnih osoba građevinske struke (ovlašteni građevinski inženjeri koji imaju najmanje pet godina iskustva u organizaciji i provedbi glavnih pregleda građevina). Koordinira ga voditelj tima koji je sa svojom stručnošću i iskustvom sposoban prilagoditi postupke istraživanja stanju na terenu te odgovarajuće tumačiti dobivene rezultate. Provode se jedanput u šest godina, prema unaprijed definiranom rasporedu.

Izvanredne preglede provode osobe koje mogu provoditi i glavne preglede. Opsega su kao i glavni pregledi uz mogućnost provedbe osnovnih istražnih radova (ako se utvrdi da je potrebno). Sadržaj i opseg izvanrednog pregleda ceste određuje upravitelj ceste koji imenuje povjerenstvo za obavljanje pregleda ceste.

## 2.2. Ocjena stanja željezničke infrastrukturne mreže

Kontinuirane preglede, analize i ocjene stanja željezničke pruge obavljaju čuvar ophodar i voditelj nadzorne grupe zajedno sa svojim pomoćnicima radi uočavanja bilo kakvih promjena koje mogu utjecati na sigurnost odvijanja prometa.

Čuvar pruge obilazi prugu svaki dan pješice. Na temelju svakodnevnog obilaska pruge čuvar ophodar vodi "Izvještaj o radu čuvara ophodara" za svaki mjesec u godini. U izvještaju se unose samo oni dani kada je došlo do određenih intervencija kao na primjer čišćenje zemlje iz žljebova, dojava ili popravljane

srušenih znakova, problemi sa skretnicama, dojava o odronu kamenja i slično.

Voditelj nadzorne grupe i njegovi pomoćnici obilaze prugu jednom mjesečno pješice, dva do tri puta mjesečno vožnjom na stroju, a u periodu od 1. lipnja do 30. rujna obavljaju dodatni pregled pruge TMD-om nekoliko puta mjesečno. Na temelju pregleda pruge voditelj nadzorne grupe i njegovi pomoćnici vode "Evidenciju mjesečnih pregleda i mjerenja pruge i pružnih postrojenja". U evidenciji se bilježe uočene pojave prilikom vizualnog pregleda pruge pješice, pregleda pruge na pružnom vozilu i sa TMD-a, pregleda pružnog pojasa radi protupožarne zaštite i vizualnog pregleda skretnica. U evidenciji treba stajati datum pojedinih pregleda te ime i prezime djelatnika koji je obavljao pregled ili mjerenje. Za svaki pojedini pregled daje se ocjena stanja pruge.

Uprava nadzornog središta također obavlja redovni pregled građevinskog infrastrukturnog podsustava jednom mjesečno vožnjom na stroju. Na temelju pregleda pruge Uprave nadzornog središta piše se "Izvješće o nepravilnosti prilikom pregleda pruge".

Za objekte i građevine za koje ne postoje propisani rokovi pregleda primjenjuje se Pravilnik 315 na osnovi kojega se obavljaju povremeni pregledi prema potrebama i mogućnostima, ovisno o opsegu ostalih poslova ili po dojava u očenim nepravilnostima na terenu. Pravilnik 315 se odnosi na održavanje donjeg ustroja pruga koji čine zemljani trup, mostovi i propusti, tuneli, kolodvorska postrojenja i objekti za zaštitu pruge od površinskih voda i atmosferskih utjecaja, a održavanje podrazumijeva vođenje tehničkih i drugih podataka, stalni nadzor, povremena pregledavanja, ispitivanja, poduzimanje mjera radi pravodobnog otkrivanja i otklanjanja nepravilnosti i oštećenja. U pravilniku 315 članak 7. odnosi se na usjeko. Točkom 4. članka 7. definiraju se postupci za lokacije za koje postoji stalna opasnost od odrona, točkom 9. postupanje u slučaju kosina koje se nalaze u materijalu neotpornom na atmosferske utjecaje, a točkom 10. propisuje se vođenje knjige evidencije za nestabilne kosine.

## 2.3. Dosadašnja iskustva u ocjeni stanja prometne infrastrukture

Neogodiv i hitan pristup analizi odrona kod linijskih infrastrukturnih objekata zahtijeva poznavanje geometrijskih i mehaničkih svojstava stijenskih pokosa i kamenih blokova. Mehanička svojstva stijenskih pokosa i kamenih blokova mogu se dobiti pomoću laboratorijskih i terenskih ispitivanja, dok se geometrijske karakteristike mogu dobiti jedino pomoću terenskih mjerenja.

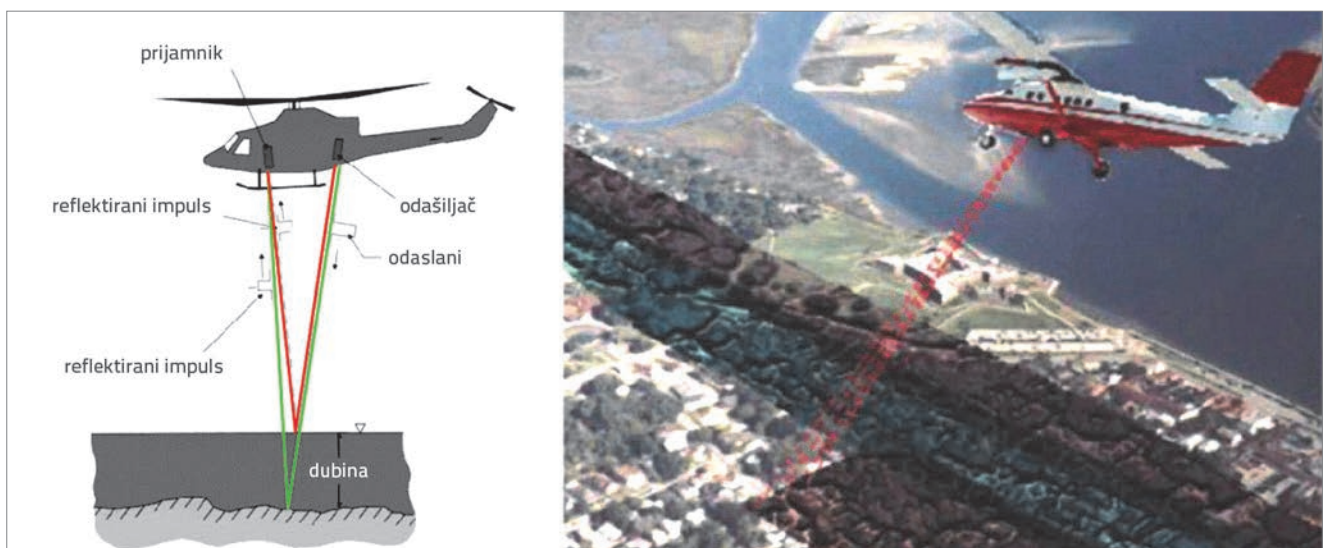
Zbog nepristupačnosti terena, izravno mjerenje nagiba površina može biti vrlo otežano a u nekim slučajevima i opasno. Jedan od mogućih načina je geološko-alpinističko kartiranje potencijalno nestabilnih blokova te određivanje volumena kamenog bloka kao što je to prikazano na slici 2. Takav posao mogu obavljati samo osobe specijalizirane za izvođenje opasnih radova.



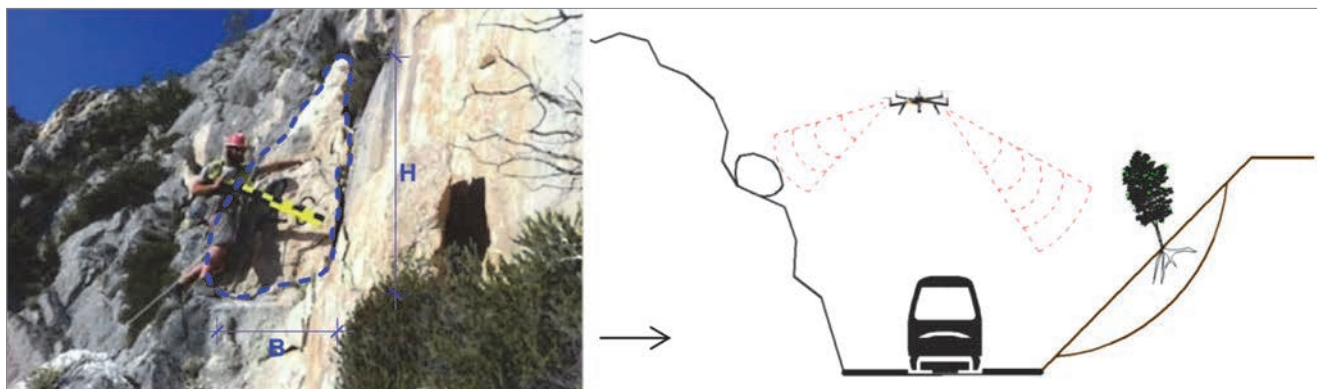
Slika 2. Geološko-alpinističko kartiranje potencijalno nestabilnih blokova na cesti D512 Makarska - Ravča

Vizualni pregledi terena na ovakvim lokacijama kao i prikupljanje 3D podataka klasičnim geodetskim metodama može rezultirati nepotpunim i nedovoljno detaljnim prikazom terena, jer je za njihovo kvalitetno opisivanje potrebna velika količina mjerenih podataka koje nije moguće prikupiti bez direktnog kontakta s objektom izmjere [9]. S obzirom na razvoj tehnologije, u drugoj polovini 20. stoljeća razvojem fotogrametrije došlo je do velikih promjena u načinu prikupljanja podataka. Velik napredak postignut je razvojem laserskog skeniranja koji omogućava automatizirano prikupljanje velike količine podataka. Lasersko skeniranje ili "3D lasersko skeniranje" poznato je pod nazivom LiDAR (eng. *Light Detection and Ranging*). Temelji se na poznavanju brzine svjetlosti i uskom koherentnom snopu laserske zrake koju

uređaj emitira u prostor. Zraka (impuls) se brzinom svjetlosti reflektira od objekta i vraća u prijatelj uređaja. Uređaj mjeri vremenski interval potreban da impuls stigne od senzora do prepreke i vrati se natrag. Iz izmjerene vremena izračuna se udaljenost. Nakon što je izmjeren prvi impuls, skener pomoću rotirajućeg ogledala ili zakretanjem kućišta odašilje drugi impuls malo horizontalno (ili vertikalno, ovisno o vrsti skenera) u odnosu na prethodni impuls. Vrijednost kutnog pomaka za svaku točku izmjere u odnosu na ishodišnu točku dobiva se zbrajanjem prethodno izvedenih, konstantnih pomaka [10]. Na osnovi izmjerenih udaljenosti i poznatih prostornih kutova mogu se odrediti koordinate x, y i z. Proces se ponavlja tisuću puta u sekundi čime se dobivaju vrijednosti udaljenosti za



Slika 3. Princip laserskog skeniranja iz zraka (ALS), [11]



Slika 4. Zamjena klasičnog načina određivanja volumena stijenskih blokova daljinskim mjerenjem primjenom bespilotne letjelice

milijun točaka promatranog objekta koje tvore oblak točaka. Konačan rezultat je točan i precizan 3D model prostora iz kojeg se onda može odrediti orijentacija, duljina, razmak, hrapavost diskontinuiteta i veličina bloka.

Postoje dvije tehnologije laserskog skeniranja: lasersko skeniranje sa zemlje (eng. *Terrestrial Laser Scanning* - TLS) i lasersko skeniranje iz zraka (eng. *Airborne Laser Scanning* - ALS). Princip rada ALS-a je da zrakoplov s pričvršćenim skenerom prelijeće područje koje je potrebno snimiti. Kako bi se dobila snimka cijelog područja, potrebno je unaprijed, ovisno o vidnom kutu skenera i visini leta, odrediti širinu pojasa (niz) snimanja te po potrebi područje preletjeti nekoliko puta s potrebnim brojem nizova (slika 3.). Kako bi se omogućilo pokrivanje cjelokupnog područja snimanja i izjednačenje svih nizova u bloku, visinski i položajno, između nizova treba ostaviti preklap [11]. Za određivanje prostornih koordinata pojedine izmjerene točke primjenjuje se polarna metoda.

Za razliku od laserskog skeniranja sa zemlje, ALS skener služi za precizno mapiranje na većem području, što omogućuje izradu strukturne analize na regionalnoj razini bez ulaska u opasnu zonu i to na mnogo brži i sigurniji način. Također se mogu odrediti ulazni podaci za procjenu rizika od odrona pomoću sustava RHR (eng. *Rockfall Hazard Rating System*), kao što su orijentacija diskontinuiteta, veličina bloka, geometrija pokosa, pozicija bloka [8].

ALS se može koristiti u situacijama teško pristupačnog terena, za područja koja zbog visoke temperature ili nepovoljne koncentracije štetnih plinova nisu pogodna za boravak ljudi, a prilikom snimanja prometnica snimanje se može obaviti bez zaustavljanja prometa. Međutim, njegova cijena je još uvijek vrlo visoka i potrebno je stručno osoblje ne samo za proces snimanja i obrade podataka nego i za upravljanje avionom ili helikopterom. Umjesto aviona ili helikoptera za dobivanje snimaka daljinskim istraživanjem mogu se koristiti bespilotne letjelice koje mogu smanjiti opseg terenskog rada, uštedjeti vrijeme ali i novac. Primjenom bespilotnih letjelica u velikoj se mjeri mogu dopuniti, poboljšati, pa čak i u potpunosti zamijeniti klasični načini kartiranja, određivanja volumena, poprečnih presjeka, slojnice i drugih parametara koji su potrebni za inženjerske analize. Na slici 4. prikazan je primjer kako se klasičan način određivanja

volumena kamenog bloka može vrlo jednostavno zamijeniti upotrebom bespilotne letjelice.

### 3. Primjena bespilotnih letjelica

Bespilotna letjelica (eng. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV), popularnijega i češćega naziva dron (slika 5.), letjelica je ili zrakoplov bez posade, koja se može nadzirati na daljinu pomoću daljinskog upravljača ili letjeti samostalno uporabom unaprijed programiranog plana leta [12]. Iako su primarno razvijene za vojne potrebe, bespilotne letjelice su s vremenom našle svoju široku primjenu u znanstvenim i gospodarskim granama. Na temelju veličine, težine, vremena leta, udaljenosti i visini leta UVS International definira tri glavne kategorije dronova: taktički, strateški te dronovi s posebnom namjenom [13].



Slika 5. Bespilotna letjelica iznad željezničke pruge

Razvojem GNSS-a (eng. *Global Navigation Satellite System*), INS-a (eng. *Inertial Navigation System*), digitalnih kamera te različitih mobilnih mjernih senzora, izbor bespilotnih letjelica, s prilagođenom opremom za različite namjene, opravdava ekonomske ali i ostale zahtjeve za kvalitetno prikupljanje podataka iz zraka. Osnovni zahtjevi koje bespilotne letjelice moraju zadovoljavati da bi se mogle koristiti za snimanje terena jesu: izvođenje planiranog leta definiranog prije samog snimanja, mogućnost nošenja opreme za snimanje i navigaciju,

autonomija leta kao i mogućnost apsorpiranja vibracija te ostalih vanjskih utjecaja prilikom samog leta [14]. S velikim rasponom različitih senzora kojima se mogu opremiti - od različitih kamera visokih rezolucija za snimanje fotografija i videa, termografskih i multispektralnih kamera, detektora plinova pa sve do različitih mobilnih laserskih skenera - dronovi postaju idealan alat za prikupljanje topografskih odnosno prostornih podataka pomoću kojih se uz korištenje određenih algoritama mogu izraditi različiti 3D modeli objekta ili terena. Bespilotne letjelice već su se pokazale kao vrlo korisne prilikom praćenja širenja požara ili poplava, otkrivanja unesrećenih na teško pristupačnim lokacijama, nadzora prometa i infrastrukture, nadzora industrijskih objekata i njihovih kritičnih mjesta, nadzora državnih granica itd., gdje se njihovom primjenom u vrlo kratkom periodu prikupljaju podaci koji mogu u velikoj mjeri pomoći prilikom donošenja ključnih odluka.

### 3.1. Primjena bespilotnih letjelica na europskoj i svjetskoj prometnoj infrastrukturnoj mreži

Unatoč različitim pristupima zakonskoj regulativi vezanoj za primjenu bespilotnih letjelica u Europi i svijetu, posljednjih godina se primjećuje značajan porast njihove primjene na cestovnoj i željezničkoj infrastrukturnoj mreži.

Za potrebe monitoringa sporog kretanja klizišta Super-Sauze u Francuskoj, Niethammer i dr. [15] primijenili su bespilotnu letjelicu opremljenu digitalnom kamerom i pokazali njenu konkurentnost u odnosu na druge metode daljinskog mapiranja klizišta. Sličnu primjenu prikazali su Carvalaj i dr. [16] snimanjem klizišta duž nasipa autoceste u pokrajini Almeria u Španjolskoj. Primjenu kod rekonstrukcije autoceste u Friedewaldu u Njemačkoj prikazali su Siebert i Teizer [17]. Upotrebu bespilotnih letjelica za potrebe projektiranja sanacija klizišta i odrona na cestovnoj i željezničkoj infrastrukturi prikazali su Kovačević i dr. [18].

Nizozemska željeznička kompanija ProRail [19] koristi bespilotne letjelice opremljene infracrvenim sensorima kako bi provjeravala funkcioniranje sustava grijanja na skretnicama svojih tračnica. Network Rail, tvrtka koja upravlja željeznicama u Ujedinjenom Kraljevstvu, potpisala je u prosincu 2014. okvirni sporazum sa četiri tvrtke za usluge snimanja bespilotnim letjelicama radi poboljšano održavanja linija i povećanja efikasnosti radnika uz istovremeno smanjenje količine rada na visinama koje se često zahtijeva. Osim toga, slikama koje se dobiju snimanjima redovito će se ažurirati karte prikupljene kroz ORBIS projekt (eng. *Offering Rail Better Information Services*) [20] kojim će se omogućiti formiranje 3D modela i izvlačenje poprečnih presjeka iz snimaka, o čemu će više riječi biti u idućem poglavlju. Zanimljiva primjena dolazi iz Njemačke. Naime, nacionalna željeznička kompanija Deutsche Bahn [21] odlučila je primijeniti bespilotne letjelice u borbi protiv grafita na svojoj infrastrukturi. Francuska željeznička kompanija SNCF [22] istražuje mogućnosti bespilotnih letjelica za sprečavanje krađe bakra iz kabela duž željezničke pruge.

Značajnu ulogu u istraživanju primjene bespilotnih letjelica u prometnoj infrastrukturi USA ima FAA (Federal Aviation Administration) [23]. Preko državnih odjela za transport SDOT (eng. *State Department of Transportation*) financirana su i publicirana istraživanja u više saveznih država poput Arkanzasa [24], Georgie [25], North Caroline [26], Ohia [27], Utaha [28], Washingtona [29] i West Virginie [30].

Najveća sjevernoamerička željeznička kompanija Union Pacific, u čijoj je nadležnosti oko 52.000 km željezničkih linija [31], razmatra mogućnosti primjene bespilotnih letjelica koje bi prethodile ljudskom djelovanju te samim time optimizirale radove pregledanja željezničke infrastrukture upućujući na značajnije fenomene. Međutim, druga najveća sjevernoamerička željeznička kompanija, BNSF Railway Co., koja upravlja približno jednakim brojem kilometara željezničkih pruga kao i Union Pacific, otišla je korak dalje te je u ožujku 2015. dobivena suglasnost od *Federal Aviation Administration* (FAA) za korištenje bespilotnih letjelica, u trogodišnjem periodu, za pregled infrastrukture i radova na željeznicama [32].

### 3.2. Dobivanje 3D modela

Za dobivanje trodimenzionalnog modela terena ili nekog objekta potrebno je snimiti veći broj fotografija čitavog prostora s međusobnim uzdužnim i poprečnim preklapanjem. Glavni je zadatak računalnog programa povezati te fotografije u jedinstvenu cjelinu te generirati oblak točaka primjenom sljedećih koraka:

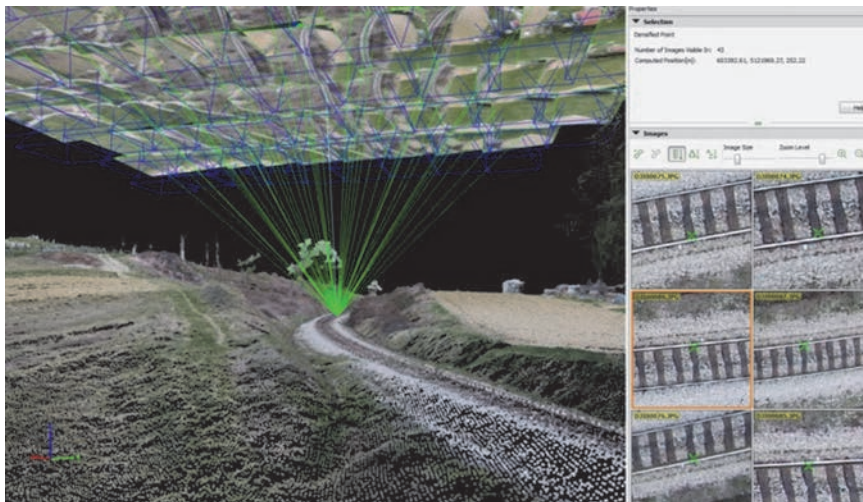
1. pronalaženjem sličnosti među fotografijama
2. izvođenjem SfM (engl. *Structure from Motion*) algoritma
3. georeferenciranjem
4. završnom obradom i popravljanjem prikaza.

#### 3.2.1. Pronalaženje sličnosti među fotografijama

Prvi korak za dobivanje 3D modela, prema Snavelyu [33], obuhvaća pronalaženje zajedničkih 2D piksela između snimljenih fotografija. Svaki skup piksela koji se podudara iz usporedbe više fotografija omogućava dobivanje jedne 3D točke u prostoru (slika 6.). Povezivanje piksela odvija se na način da se pronađu i povežu objekti na paru fotografija, koji se nakon toga povezuju s istim objektima na ostalim fotografijama tvoreći model na osnovi kojeg se pomoću algoritma generira oblak točaka. Ako se sa  $F(l)$  označi skup objekata pronađenih na fotografiji  $l$ , za svaki par fotografija  $l$  i  $j$  sustav razmatra svaki dio objekta  $f \in F(l)$  i traži njegovu najbližu okolinu  $f_{nn} \in F(j)$ :

$$f_{nn} = \arg \min_{f' \in F(j)} \|f - f'\|_2 \quad (1)$$

a nakon što su svi parovi slika povezani, traže se veze između većeg broja slika. Primjerice, ako se objekt  $f_1 \in F(l_1)$  poklapa s objektom  $f_2 \in F(l_2)$  i objektom  $f_3 \in F(l_3)$ , zajedno se grupiraju u niz  $\{f_1, f_2, f_3\}$ . Ti nizovi su pronađeni ispitivanjem svakog objekta  $f$  u svakoj fotografiji, a postupak traje sve dok se na svim fotografijama ne pronađu svi objekti koji se podudaraju.



Slika 6. Podudaranje piksela s različitih fotografija

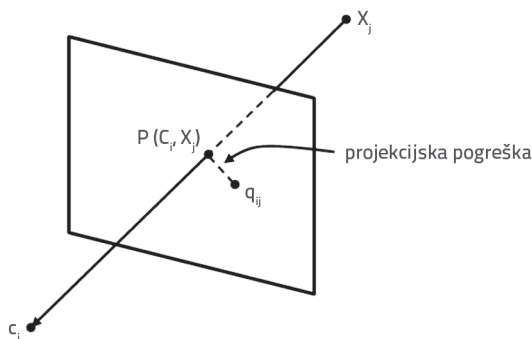
### 3.2.2. Izvođenje SfM algoritma

Sljedeći korak je provođenje SfM (engl. *Structure from Motion*) algoritma koji preko nizova točaka, određenih u prethodnom koraku, procjenjuje geometriju objekta pronalazeći trodimenzionalne koordinate točaka koje, kad su povezane preko jednadžbi perspektivne projekcije, najbolje odgovaraju označenim nizovima [33, 34]. Za svaki niz točaka  $j$  geometrija je definirana trodimenzionalnim točkama  $X_j$ . Parametar  $q_{ij}$  iz izraza (2) predstavlja izmjerene pozicije traka (linije snimanja)  $j$  na fotografiji koji je najčešće nepoznat, jer nisu svi trakovi vidljivi na svim fotografijama. Problem se rješava traženjem zajedničkih rješenja za kameru i parametre snimanog područja kako bi se odredile što bolje pozicije traka. Za  $n$  pogleda i  $m$  trakova objektivna funkcija  $g$  ima oblik dan izrazom (2):

$$g(C, X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \left\| q_{ij} - P(C_i, X_j) \right\|^2 \tag{2}$$

gdje je:  $w_{ij}$  - indikator varijable.

Ako je  $w_{ij} = 1$ , tada fotoaparat "promatra" niz  $j$ . Izraz  $q_{ij} - P(C_i, X_j)$  zove se projekcijska pogreška niza  $j$  u fotoaparatu (slika 7).



Slika 7. Projekcijska pogreška [15]

Prema slici 6., ako se trodimenzionalna točka  $X_j$  projicira u fotoaparat  $C_i$ , tada projekcijska pogreška predstavlja razliku udaljenosti između projicirane točke  $P(C_i, X_j)$  i promatrane točke  $q_{ij}$ , a objektivna funkcija  $g$  sumu kvadrata projekcijskih pogrešaka "otežanih" indikatorom varijable. Osnovni cilj SfM algoritma je pronalaženje parametara kamere i snimanog područja koji minimaliziraju tu objektivnu funkciju [34].

Slike snimljene iz zraka trebale bi imati veliki broj zajedničkih točaka, što znači da bi morala postojati određena udaljenost između projekcijskih središta prilikom fotografiranja kako bi se dvije ili više fotografija moglo povezati u trodimenzionalni objekt [35]. Prilikom

snimanja mora se voditi računa o potrebnom uzdužnom i poprečnom preklapanju snimki koji iznosi 60 % za uzdužni te 30 % za poprečni preklap. Daljnjom obradom nizova SfM algoritmom poboljšava se model (postupak kojim se prepoznaju grube pogreške u povezivanju točaka te njihovo izbacivanje iz modela, kako ne bi utjecali na konačni rezultat), te konverzija žarišne daljine fotoaparata (parametri potrebni za konverziju su žarišna daljina, veličina CCD senzora te veličina fotografije u pikselima).

### 3.2.3. Georeferenciranje

SfM algoritam prikazuje koordinate dobivenih točaka u koordinatnom sustavu u kojem je planiran let, što je najčešće WGS84 koordinatni sustav kojemu je ishodište u središtu zemljanih masa i koji je referentni koordinatni sustav za GPS satelite. Iako je takav prikaz dobar za vizualizaciju snimanog područja, on se mora georeferencirati ako ga se želi smjestiti na kartu ili plan službenog koordinatnog sustava. Nakon što su poznate minimalno 3 identične točke u oba sustava (lokalnom od fotoaparata te državnom ili svjetskom sustavu) može se, među ostalima, koristiti Helmertova 7-parametarska transformacija koordinata koja ima oblik:

$$X_{\text{GLOBALNI}} = c + \mu R X_{\text{LOKALNI}} \tag{3}$$

gdje su:

$X_{\text{GLOBALNI}}$  - koordinate točke u državnom ili svjetskom koordinatnom sustavu

$X_{\text{LOKALNI}}$  - koordinate točke u sustavu koji je kreiran u SfM algoritmu

$\mu$  - faktor mjerila

$R$  - matrica rotacije

$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$  - vektor translacije



### 3.2.4. Završna obrada i popravljavanje prikaza

Nakon georeferenciranja, mogu se provesti i dodatni koraci kako bi se poboljšali izlazni rezultati. Da bi se uklonila pojava tzv. lažnih točaka, nastalih uslijed lošeg povezivanja ili loše prikazane geometrije, potrebno je izbaciti one točke koje su vidljive na manje od tri fotografije. Nakon toga, radi pročišćavanja geometrije točaka, traže se fotografije koje registriju manje od 16 točaka te se i one izbacuju iz procesa izrade modela. SfM algoritam radi točno ako su sve fotografije prilikom ubacivanja u izradu modela u odnosu kakvom su bile i u trenutku same ekspozicije (orijentirane portretno ili pejzažno) te je potrebna dodatna analiza kako bi se moglo procijeniti je li neka fotografija krivo orijentirana.

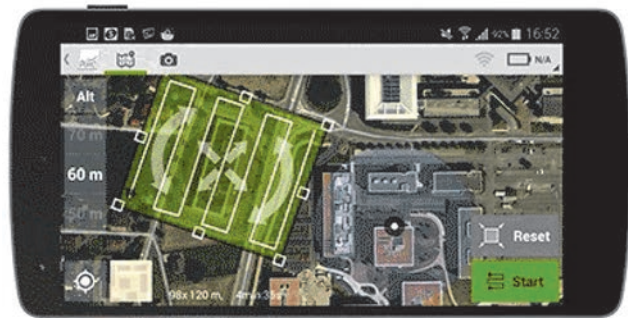
### 3.3. Oblak točaka

Konačni rezultat navedenog postupka je oblak točaka koji predstavlja skup točaka u nekom koordinatnom sustavu. U trodimenzionalnom koordinatnom sustavu te su točke definirane koordinatama X, Y i Z, a najčešće predstavljaju vanjsku površinu objekta. Osim koordinata, oblak točaka sadrži i podatke o rasvjeti, vremenu snimanja i boji svake točke unutar oblaka. Primjer oblaka točaka prikazan je na slici 8 na lokaciji kamenoloma Mali Čardak kraj Perušića.

### 3.4. Primjena 3D modela u inženjerske svrhe

Prilikom dolaska na predmetnu lokaciju, na mobilni ili tablet uređaj koji je bežičnom vezom povezan s bespilotnom letjelicom

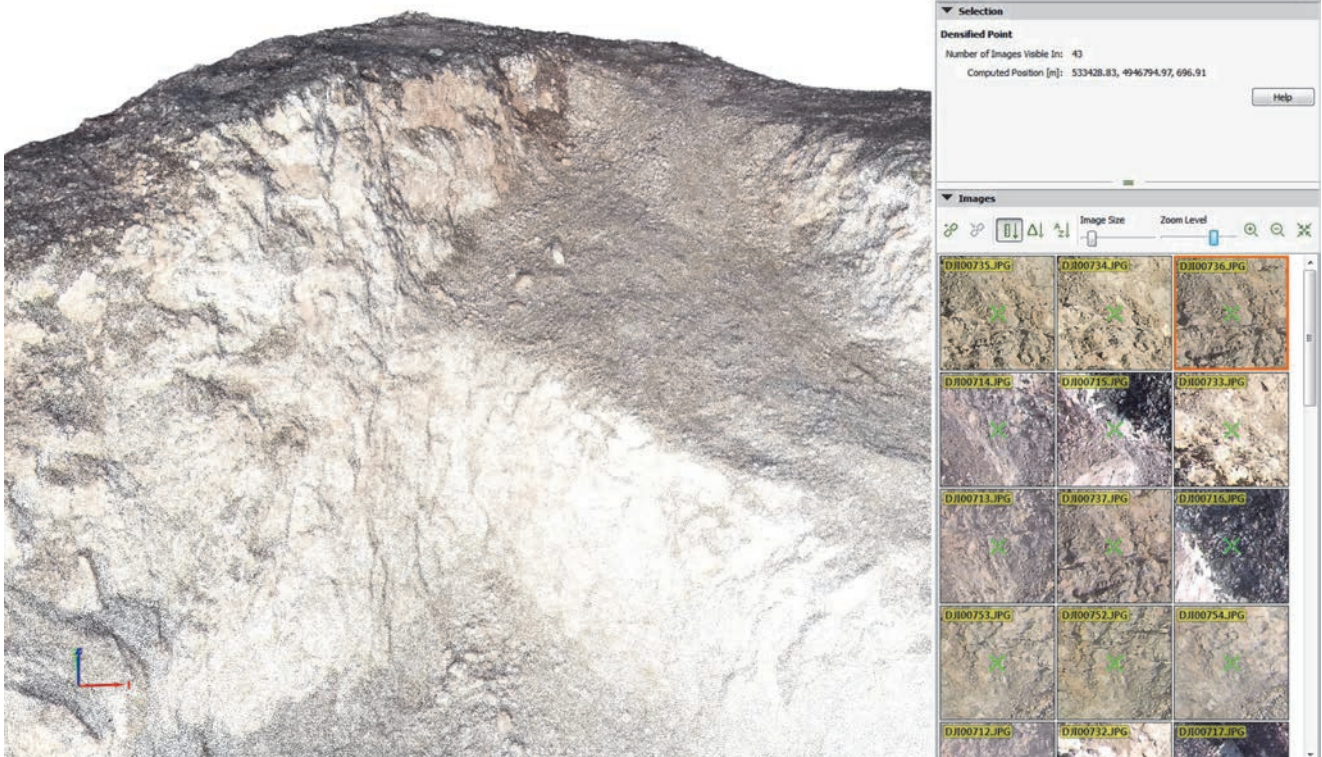
i preko kojeg imamo prikaz vidnog polja kamere u realnom vremenu, učita se karta širega područja koje se želi snimiti (Slika 9).



Slika 9. Učitana karta lokacije na pametnom telefonu ili tabletu

Na učitanoj karti odrede se točne dimenzije prostora koji želimo detaljno kartirati, tj. orijentaciju zone leta, visinu leta te brzinu leta ako se radi o snimanju topografskog sadržaja približno položenog odnosno horizontalnog terena. Na taj su se način definirali svi potrebni parametri za samostalni let bespilotne letjelice koja može krenuti u prikupljanje podataka. Odabirom takvih parametara automatski se generira plan leta, a točke na kojima će fotoaparatus nošen bespilotnom letjelicom snimiti fotografije unaprijed su programirane. Nakon završenog snimanja bespilotna letjelica samostalno se vraća na poziciju odakle je i krenula.

Ako se radi o lokaciji koja je u većem nagibu, odnosno teren je vertikaln i strm, prelazi se na slobodni način leta, a snimanje



Slika 8. Oblak točaka na lokaciji kamenoloma Mali Čardak kraj Perušića

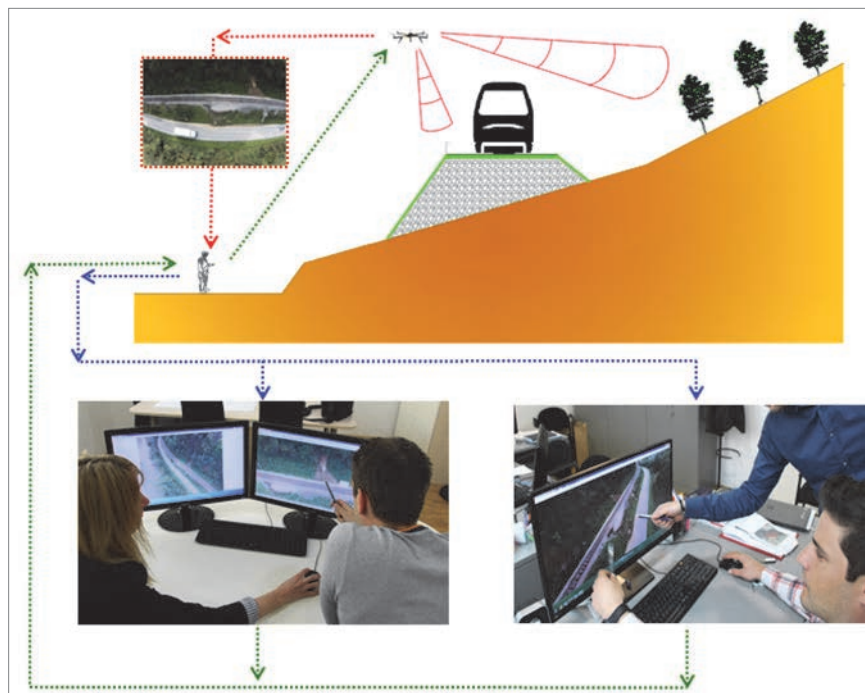
fotografija obavlja se preko unaprijed definiranih prostornih promjena položaja kamere (horizontalnih i vertikalnih) koja je povezana s GPS antenom bespilotne letjelice. Kada se radi o takvom načinu snimanja, iskustvo i znanje operatera bespilotne letjelice dolazi do punog izražaja. Nakon završenog snimanja počinje preuzimanje geolociranih fotografija i svih ostalih parametara potrebnih za orijentaciju snimaka kakve su bile u trenutku ekspozicije. Učitavanjem takvih snimaka u softver za obradu fotografija dobije se prikaz leta bespilotne letjelice te pozicija svake fotografije koja je snimljena (slika 10.). Na slici 9. prikazan je primjer snimanja željezničkog usjeka Doljan u km 80+830 pruge R201 Zaprešić-Čakovec, između kolodvora Novi Marof - Turčin, gdje je u jednom dijelu došlo do klizanja tla. Na primjeru ovog usjeka bit će prikazana metodologija dobivanja 3D modela iz fotografija, kao i poprečnih presjeka i volumena. Računalni program korišten u ovom slučaju je Pix4Dmapper, specijaliziran za obradu fotografija prikupljenih bespilotnim letjelicama [36].



Slika 12. Ortofoto karta iz fotografija snimljenih bespilotnom letjelicom



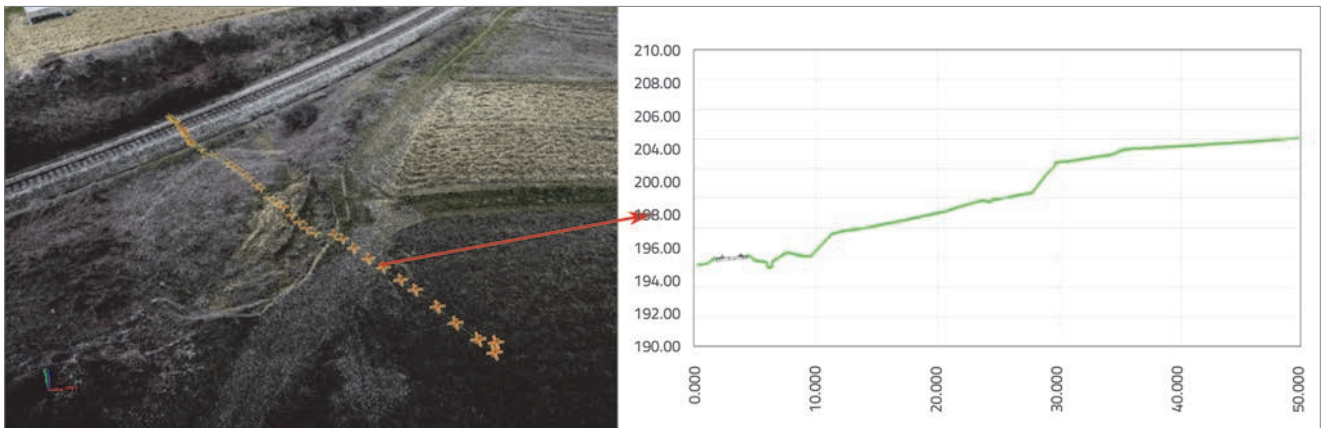
Slika 10. Prikaz leta bespilotne letjelice te pozicija fotografiranja



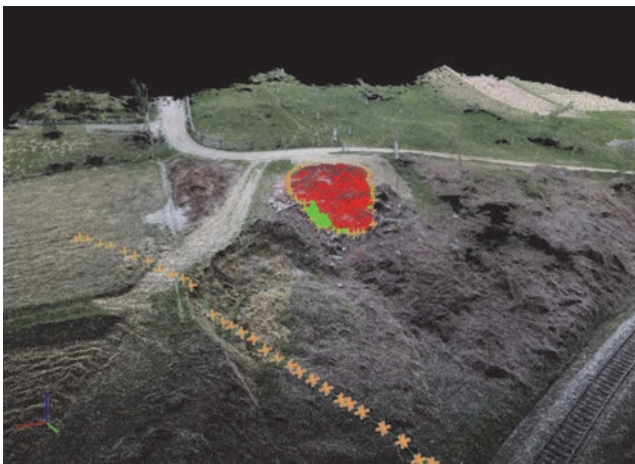
Slika 11. Interaktivni postupak ocjene stanja prometne infrastrukture [19]

Jedna od potencijalnih prednosti primjene bespilotnih letjelica jest u mogućnosti interaktivne ocjene stanja prometne infrastrukture [37]. U tom slučaju, kako je prikazano na slici 11., za vizualnu ocjenu stanja potrebno je na terenu imati operatera koji upravlja bespilotnom letjelicom. Operater na svom zaslonu u svakom trenutku vidi sliku koju snima bespilotna letjelica, koju onda u realnom vremenu može dijeliti s osobama na drugim lokacijama (uređi, kabineti, laboratoriji), tako da i oni vide ono što dron snima. Na taj način više osoba aktivno sudjeluje u postupku promatranja nasipa ili potencijalnog odrona. Pri tome osobe koje sjede u uredu mogu bitno staloženije i detaljnije razmotriti lokaciju i uočiti problem te operatera na terenu navoditi što bi trebalo dodatno snimiti, za razliku od operatera na terenu koji paralelno mora upravljati dronom, snimati fotografije i uočavati potencijalne probleme na lokaciji. Ovisno o jačini procesora računala te njegovih grafičkih performansi, nakon relativno kratkog vremena obrade, može se dobiti spomenuti 3D prikaz terena u obliku oblaka točaka ili ortofoto karte (slika 12.).

Na dobivenom oblaku točaka i ortofoto karti, koji su u potpunosti mjerljivi, mogu se definirati poprečni presjeci (slika 13.), izračunati volumeni (slika 14.) koji se zatim mogu prenijeti u CAD programe korištene u većini struka vezanih za kartiranje i projektiranje.

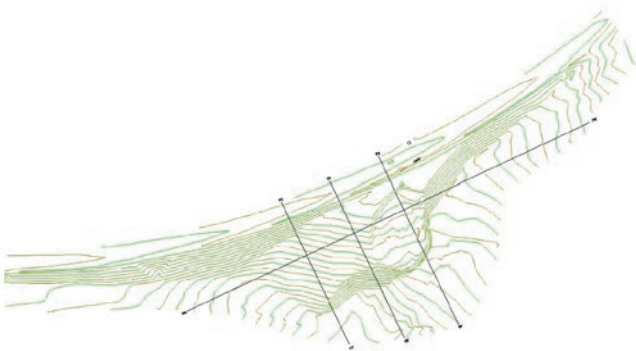


Slika 13. Određivanje poprečnih presjeka na lokaciji usjeka Doljani



Slika 14. Računanje volumena na lokaciji usjeka Doljani

Nakon prenošenja u CAD ili GIS program, jednostavno se iz oblaka točaka mogu stvarati plohe pomoću TIN (engl. *Triangulated Irregular Network*) algoritma, a iz tih ploha slojnice na udaljenosti ekvidistanciji po želji korisnika (slika 15.).



Slika 15. Slojnice iz TIN modela usjeka Doljani

### 3.5. Prednosti i nedostaci bespilotnih letjelica

Prednosti su bespilotnih letjelica: mogućnost različitih prilagodbi potrebama korisnika, mogućnost istraživanja i snimanja teško

pristupačnih područja, a u slučaju neispravnosti ili pada letjelice život pilota nije ugrožen. Neki od nedostataka su veliki troškovi proizvodnje i održavanja, veliki troškovi u slučaju pada ili oštećenja letjelice, nemogućnost primjene u svim vremenskim uvjetima te činjenica da pogreška u upravljanju letjelicom može dovesti do pada, što osim štete na tlu može imati kao posljedicu i ljudske žrtve.

Niskobudžetnim bespilotnim letjelicama opremljenim fotografskom kamerom moguće je postići kvalitetu fotogrametrijske izmjere. Velika prilagodljivost u pogledu postignute točnosti izmjere, velika učinkovitost te visok stupanj automatizacije upućuju na odabir fotogrametrijske metode izmjere, koja se standardno koristi već dugi niz godina. Pojavom niskobudžetnih bespilotnih letjelica opremljenih digitalnom kamerom postaju dostupne fotogrametrijske metode izmjere širokom krugu korisnika. Iako takve letjelice nedvojbeno imaju visok mjerni potencijal, one su prije svega razvijene za rekreativno letenje te snimanje filmova i fotografija za osobnu upotrebu, bez pretenzija da se koriste za mjerenja. Snimanjem pomoću niskobudžetnih bespilotnih sustava u nizovima i blokovima s odgovarajućim uzdužnim i poprečnim preklapom između snimki dobiva se slikovni materijal, koji se naknadno obrađuje prema fotogrametrijskim principima, ali dopunjenim algoritmima koji su prilagođeni upravo ograničenjima niskobudžetnih bespilotnih letjelica. Izmjeru je moguće provesti primjenom metode slikovnih korelacija, koja omogućuje automatsko pronalaženje homolognih detalja u području preklopa susjednih snimki, te samim tim fotogrametrijsku rekonstrukciju. Radiometrijskim manipulacijama nad digitalnom slikom moguće je povećati pouzdanost fotogrametrijske izmjere na područjima neizražajne teksture kao što su šljunak i trava. Rezultat je trodimenzionalni računalni model prometne infrastrukture i njene neposredne okoline.

Posebno značenje imaju najnovija istraživanja točnosti primjene bespilotnih letjelica u mapiranju na većem području i određivanju volumena odlagališta zemljanih materijala i otvorenih rudnika. Draeyer i Strecha [38] i Strecha [39] pokazali su da se primjenom bespilotne letjelice može postići točnost mjerenja volumena odlagališta zemljanog materijala od 2 do 3 % u odnosu na GNSS

(eng. *Global Navigation Satellite System*) i 0,1 % u odnosu na LiDAR (eng. *Light Detection and Ranging*). Cryderman i dr [40] proveli su slična istraživanja i dobili točnost mjerenja volumena zemljanog materijala od 0,7 % u odnosu na GNSS. Wang i dr. [41] usporedili su mjerenja volumena otvorenog rudnika pomoću bespilotne letjelice i LiDAR-a i dobili razliku od 1,5 %.

#### 4. Zakonska regulativa vezana za primjenu bespilotnih letjelica

Primjenom bespilotnih letjelica ne može se zaobići pitanje legalnosti njihove uporabe na određenim područjima. Dok je u većini država ovo još "sivo" područje, neke države imaju jasno uređena pravila i smjernice za primjenu bespilotnih letjelica. To, u pravilu, propisuje mjerodavno tijelo, kao što je Federal Aviation Administration (FAA) [42] na području SAD-a ili Civil Aviation Authority (CAA) [43] za područje Velike Britanije.

Uzimajući u obzir potrebu da se primjena bespilotnih letjelica mora regulirati, Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (CCAA) [44] objavila je u siječnju 2015. nacrt *Pravilnika o sustavima bespilotnih zrakoplova*, koji je nakon određenih prilagodbi nadopunjen i službeno objavljen u Narodnim novinama broj 49/15 u svibnju 2015. [45]. Tim se Pravilnikom, prema CCAA, propisuju *opći, tehnički i operativni uvjeti za sigurnu uporabu bespilotnih zrakoplova, sustava bespilotnih zrakoplova i zrakoplovnih modela te uvjeti kojima moraju udovoljavati osobe koje sudjeluju u upravljanju tim zrakoplovima i sustavima*. Odredbe Pravilnika se ne primjenjuju na bespilotne letjelice koje ne mogu postići kinetičku energiju veću od 79 J, gdje će relevantna brzina za izračun najveće kinetičke energije koju može postići



Slika 16. Države koje sudjeluju u provedbi DESTINATION RAIL projekta s prikazom faktora koji utječu na postojeću željezničku infrastrukturu [2-4]

neka bespilotna letjelica, s obzirom na svoju masu, biti najveća brzina koju ta bespilotna letjelica može postići (konačna brzina padanja ili najveća brzina kontroliranog leta, što je veće). Prema članku 3. Pravilnika, bespilotne letjelice kojima se izvode letačke operacije dijele se u tri klase s obzirom na njihovu operativnu masu, a prema članku 4. klasifikacija područja letenja u odnosu na izgrađenost, naseljenost i prisutnost ljudi dijeli se u četiri klase. Na temelju toga, definirane su kategorije letačkih operacija povezane s razinom rizika koji njihovo izvođenje predstavlja za okolinu (tablica 2.), gdje su za svaku kategoriju definirani operativni i tehnički zahtjevi za izvođenje letačkih operacija.

Tablica 2. Kategorije letačkih operacija prema Pravilniku [23]

Klasa sustava bespilotnog zrakoplova	Klasa područja izvođenja letenja			
	I Neizgrađeno područje	II Izgrađeno nenaseljeno područje	III Nenaseljeno područje	IV Gusto nenaseljeno područje
5 OM <sup>(1)</sup> < 5 kg	A	A	B	C
25 5 ≤ OM < 25 kg	A	B	C	D
150 25 ≤ OM ≤ 150 kg	B	C	D	D

Napomena (1): OM - operativna masa bespilotnog zrakoplova

#### 5. Znanstvenoistraživačke inicijative za primjenu bespilotnih letjelica

Primjena bespilotnih letjelica na prometnoj infrastrukturnoj mreži zasigurno će u budućnosti imati uzlazni trend. To potvrđuje i projekt DESTINATION RAIL financiran od Europske unije u sklopu programa Obzor 2020 (Horizon 2020) [46]. Projekt je dio programa *I2I Intelligent Infrastructure* koji se odnosi na "pametnu", "user-friendly" željezničku infrastrukturu. U

projektu sudjeluje 15 partnera iz 9 europskih zemalja koji su pripadnici znanstvenoistraživačkih institucija, malih i srednjih poduzetništava, konzultantskih tvrtki i institucija zaduženih za upravljanje željeznicama. Iz Hrvatske na projektu sudjeluje Zavod za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu kao znanstvenoistraživačka institucija i HŽ Infrastruktura d.o.o. kao institucija odgovorna za upravljanje željeznicama. Na slici 16. označene su države koje sudjeluju u provedbi projekta te prikazani neki faktori koji utječu na postojeću željezničku infrastrukturu kao što su odroni, klizišta, potresi, ispiranje materijala željezničkih nasipa, poplavljanje željeznica itd.

Osnovna je ideja projekta osmisлити alat, tzv. FACT (eng. *Find - Analyse - Classify - Treat*, tj. pronađi - analiziraj - klasificiraj - tretiraj) koji će osobama zaduženima za upravljanje željezničkom infrastrukturuom pružiti rješenja za kvalitetniju raspodjelu financijskih resursa potrebnih za sanaciju željezničke infrastrukture.

Mogućnosti primjene bespilotnih letjelica na željezničkoj infrastrukturi istraživat će se kroz radnu grupu "Find", gdje će se bespilotne letjelice koristiti u sklopu vizualne ocjene stanja željezničke infrastrukture i detektiranju fenomena koji mogu imati negativan utjecaj na odvijanje prometa. Isto tako razvit će se program koji će omogućiti transformaciju digitalnih podataka te njihovu izravnu primjenu u računalnim programima za analize stabilnosti i naponsko-deformacijske analize.

## 6. Zaključak

Primjenom bespilotnih letjelica u velikoj se mjeri mogu dopuniti, poboljšati, pa čak i u potpunosti zamijeniti klasični načini kartiranja, određivanja volumena, poprečnih presjeka, slojnica i drugih parametara koji su potrebni za inženjerske analize, što je vrlo korisno kad su posrijedi strmi i visoki usjeci te druge teško pristupačne lokacije na kojima provedba klasičnog snimanja može biti čak i opasna. Osim očiglednih prednosti primjene bespilotnih letjelica, postoje određena ograničenja s aspekta nedostataka same metode, ali i zakonske regulative. Naime, u Hrvatskoj je omdedavno na snazi *Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova* kojim se regulira primjena bespilotnih letjelica. S obzirom na potencijal koje bespilotne letjelice imaju u primjeni na prometnoj infrastrukturi, sve se više znanstvenoistraživačkih projekata bavi ovom tematikom. Jedan od njih je i projekt DESTINATION RAIL koji financira Europska unija u sklopu programa Obzor 2020 (Horizon 2020).

## Zahvala

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru znanstvenog projekta "Decision Support Tool for Rail Infrastructure Managers - DESTINATIONRAIL", br. 636285, koji je financirala Europska unija u sklopu programa Obzor 2020 (Horizon 2020).

## LITERATURA

- [1] Kovačević, M.S., Marčić, D., Bačić, M.: Current and future trends of geotechnical engineering in Croatia. Future Trends in Civil Engineering, (ur. Cerić, A., Lakušić, S.), Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Zagreb, pp. 37-60, 2014.
- [2] Kovačević, M.S., Mirčeta A., Librić, L.: The Stupica Tunnel - Rockfall Protection, Road and Rail Infrastructure II, Proceedings of Conference CETRA 2012, Dubrovnik, pp. 798-796, 2012.
- [3] Marčić, D., Cerić, A. Kovačević, M.S.: Selection of a Field Testing Method for Karst Rock Mass Deformability by Multi Criteria Decision Analysis, Journal of Civil Engineering and Management, 19, pp 195-205, 2013., <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.743927>
- [4] Garašić M., Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D.: Investigation and remediation of the cavern in the vrata tunnel on the Zagreb - Rijeka highway (Croatia), Acta carsologica, 39 (2010), pp. 61-77., <http://dx.doi.org/10.3986/ac.v39i1.113>
- [5] Kovačević, M.S., Jurić-Kačunić, D., Simović, R.: Određivanje modula deformacije karbonatnih stijena u hrvatskom kršu, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 1, pp. 35-41.
- [6] Jurić-Kačunić, D, Arapov, I., Kovačević, M.S.: Novi pristup određivanju krutosti karbonatnih stijena u hrvatskom kršu, GRAĐEVINAR, 63 (2011) 2, pp.177-185.
- [7] Kovačević, M.S., Mirčeta, A., Librić, L.: Numeričko modeliranje stijenskih odrona, Sabor hrvatskih graditelja, Graditeljstvo-poluga razvoja, Cavtat, 2012.
- [8] Librić, L., Bačić, M., Kovačević, M.S.: A Framework for Risk Management in Rockfall Protection, Engineering Geology for Society and Territory - vol.2 Landslide Processes, Torino, 2014.
- [9] Librić, L., Car, M., Kovačević, M.S.: Methods of surveying in rockfall protection, Road and Rail Infrastructure III, Proceedings of Conference CETRA 2014, Split, pp. 617-622, 2014.
- [10] Matijević, H., Roić, M.: Terestrički laserski skaneri, Geodetski list, 79 (2002) 3, pp. 171-187.
- [11] Gajski, D.: Osnove laserskog skeniranja iz zraka, Ekscentar, 10 (2007), pp. 16-22.
- [12] Vallet, J, Panissod, F., Strecha, C., Tracol, M.: Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet "UAV", UAV-g conference, Zurich, Switzerland. 2011.
- [13] UVS International, [uvs-international.org](http://uvs-international.org)
- [14] Kolarek, M.: Bespilotne letjelice za potrebe fotogrametrije: Ekscentar, 12 (2010), pp. 70-73.
- [15] Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J., Joswig, W.: UAV-based remote sensing of the Super Sauze landslide: evaluation and results. Engineering Geology 128, 2-11. 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- [16] Carvajal, F., Agüera, F., Pérez, M.: Surveying a landslide in a road embankment using unmanned aerial vehicle photogrammetry. International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22: 201-206, 2011.

- [17] Siebert, S., Teizer, J.: Mobile 3D Mapping for Surveying Earthwork Projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System, *Automation in Construction*, 41 (2014), pp. 1-14, 2014.
- [18] Kovačević, M.S., Jurić Kačunić, D., Car, M., Bačić, M.: Suvremene geodetske i geofizičke metode ispitivanja tla i stijena, *Izazovi u graditeljstvu 2*, Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera, pp. 287-315, 2014.
- [19] [www.secureinair.nl](http://www.secureinair.nl)
- [20] [www.railtechnologymagazine.com](http://www.railtechnologymagazine.com)
- [21] [www.spiegel.de](http://www.spiegel.de)
- [22] [www.personal-drones.net](http://www.personal-drones.net)
- [23] Karan, E., Christmann, C., Gheisari, M., Irizarry, J., Johnson, E.: A Comprehensive Matrix of Unmanned Aerial Systems Requirements for Potential Applications within a Department of Transportation. *Construction Research Congress 2014*: pp. 964-973. 2014., <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413517.099>
- [24] Frierson, T.: Use of Unmanned Aerial Vehicle for AHTD Applications: "Studying Visual Aids to Assist in Corridor Analysis", *Arkansas State Highway and Transportation Department*, 2013.
- [25] Irizarry, J., Johnson, E.N.: Feasibility Study to Determine the Economic and Operational Benefits of Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), *Georgia Department of Transportation*, 2014.
- [26] Estes, C.: Unmanned Aircraft Use in North Carolina: Report to the Joint Legislative Oversight Committee on Information Technology, Joint Legislative Transportation Oversight Committee Fiscal Research Division, State of North Carolina Office of Information Technology Services, 2014.
- [27] Judson, F.: The Ohio Department of Transportation and Unmanned Aircraft Systems, *LiDAR Magazine*, Vol. 3, No. 5, 2013.
- [28] Barfuss, S., Jensen, A., Clemens, S.: Evaluation and Development of Unmanned Aircraft (UAV) for UDOT Needs, *Utah Department of Transportation*, 2012.
- [29] McCormack, E.D.: The Use of Small Unmanned Aircraft by the Washington State Department of Transportation, *Washington State Department of Transportation*, 2008.
- [30] Gu, Y.: Evaluation of Remote Sensing Aerial Systems in Existing Transportation Practices, *Department of Transportation Research and Innovative Technology Administration, Division of Highways, West Virginia Department of Transportation Highway*, 2009.
- [31] [www.bloomberg.com](http://www.bloomberg.com)
- [32] [www.railwayage.com](http://www.railwayage.com)
- [33] Snavelly, K.N.: Scene reconstruction and visualization from internet photo collections, PhD thesis, 210 p. *University of Washington*, 2008.
- [34] Mahović, M.: Generiranje oblaka točaka iz fotografija pomoću računalnih programa Photosynth i Photofly, *Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu*, 2010.
- [35] Pomaska, G.: Utilization of photosynth point cloud for 3D object reconstruction, *22nd CIPA Symposium, Kyoto*, 2009.
- [36] Pix4D SA, [www.pix4d.com](http://www.pix4d.com)
- [37] Jurić-Kačunić, D., Bačić, M., Kovačević, M.S.: Ocjena stanja željezničkih nasipa pomoću georadarskih ispitivanja, *Dani prometnica 2015: Kvaliteta prometne infrastrukture - ključ razvoja gospodarstva*, Lakušić, Stjepan (ur.). Zagreb: Zavod za prometnice, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015., pp. 171-202.
- [38] Draeyer, B., Strecha, C.: White paper: How accurate are UAV surveying methods? Pix4D, Available from: <https://support.pix4d.com/entries/40219303-How-accurate-are-UAV-surveying-methods>, 2014.
- [39] Strecha, C.: The rayCloud-a vision beyond the point cloud. *FIG Congress 2014, Engaging the challenges-enhancing the relevance*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
- [40] Cryderman, C., Bill Mah, S., Shufletoski, A.: Evaluation of UAV Photogrammetric Accuracy for Mapping and Earthworks Computations, *GEOMATICA*, 68 (2014) 4, pp. 309-317.
- [41] Wang, Q., Wu, L., Chen, S., Shu, D., Xu, Z., Li, F., Wang, R.: Accuracy evaluation of 3D geometry from low-attitude UAV images: a case study at Zijin Mine. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-4*, 2014, *ISPRS Technical Commission IV Symposium, Suzhou, China*, 2014.
- [42] Federal Aviation Administration (FAA), [www.faa.gov](http://www.faa.gov)
- [43] Civil Aviation Authority (CAA), [www.caa.co.uk](http://www.caa.co.uk)
- [44] Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo (CCAA), [www.ccaa.hr](http://www.ccaa.hr)
- [45] Ministarstvo pomorstva, prometa i infrastrukture Republike Hrvatske: Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova, *Narodne Novine* 49/15, 2015.
- [46] DESTINATION RAIL, [www.destinationrail.eu](http://www.destinationrail.eu)