

UDK 528:528.7:624.131.537:629.73  
Pregledni znanstveni članak / Review

# Pregled postignuća uporabe materijala daljinskih opažanja s dronova za praćenje i detekciju stanja klizišta

Matej HANŽEK – Osijek<sup>1</sup>, Željko BAČIĆ, Zvonimir NEVISTIĆ – Zagreb<sup>2</sup>

*SAŽETAK. Tijekom protekla dva desetljeća bespilotne letjelice su postale jedna od osnovnih metoda opažanja klizišta. Rad daje pregled postignuća dosadašnjih materijala daljinskih opažanja s dronova za praćenje i detekciju klizišta. UAV (eng. unmanned aerial vehicle) uz sve svoje senzore i kombinaciju s drugim metodama opažanja omogućava praćenje i detekciju stanja klizišta. Pri opažanju prikupljaju se podaci o prostornim promjenama i vremenskoj dinamici te reakcijama klizišta. Pregledni rad opisuje uloge i metode različitih tipova bespilotnih letjelica i senzora RGB (eng. red, green, blue), LiDAR (eng. Light Detection and Ranging) i SAR (eng. Synthetic Aperture Radar). Opisuje se uloga UAV-a u mogućnostima prikupljanja podataka te kartiranja i modeliranja istih. Opisana je i uloga opažanja i podataka u hitnim scenarijima i mogućnosti automatske i poluautomatske detekcije pomoću algoritama strojnog učenja. Rasprava prikazuje usporedbu podataka prikupljenih različitih sensorima za izradu 3D modela klizišta kako bi se isti mogli pratiti s prostornom i vremenskom komponentom.*

*Ključne riječi: daljinska istraživanja, fotogrametrija, klizište, UAV, GNSS.*

## 1. Uvod

Zemljina površina podložna je promjenama koje uzrokuju različiti faktori (geodinamički, geološki, klimtološki i hidrološki faktori te djelovanje čovjeka), djelujući samostalno ili u međusobnim kombinacijama. Jedna od vidljivih promjena Zemljine površine su i klizišta. Klizište se definira kao pomicanje

<sup>1</sup> Matej Hanžek, mag. ing. geod. et geoinf., Graditeljsko-geodetska škola Osijek, Drinska 16a, HR-31000 Osijek, Hrvatska, e-mail: mhanzek@geof.hr

<sup>2</sup> prof. dr. sc. Željko Bačić, Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: zeljko.bacic@geof.unizg.hr  
dr. sc. Zvonimir Nevistić, Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: zvonimir.nevistic@geof.unizg.hr

mase stijena, krhotina ili zemlje niz padinu. Klizište može započeti polaganom deformacijom i površinskim puknućem tlak na strmoj padini, pri čemu nastaju površinska oštećenja. Nakon toga se kretanje Zemljine mase ubrzava, raspada i raste, a tok postaje lavina (Hungri i dr. 2014). Klizišta su vrsta masovnog otpada, koja označava svako pomicanje tla i stijena nizbrdo pod izravnim utjecajem gravitacije (URL 1). Površinska eridibilnost tla događa se kao rezultat raznih problema kao što su krčenje šuma, povećanje potrošnje zbog sve veće populacije i nekontrolirano korištenje zemljišta (Nadim i dr. 2006).

Klizišta, iako najčešće lokalnog karaktera, uzrokuju velike materijalne štete i nerijetko ugrožavaju ljudske živote, pogotovo u urbaniziranim područjima. Da bi se takve situacije izbjegle, dijelovi Zemljine površine koji su detektirani kao potencijalno ili aktivno klizište opažaju se različitim postupcima i instrumentima u svrhu praćenja pomaka tla. Uz ekonomsku i materijalnu štetu klizišta utječu i na zdravlje ljudi i kvalitetu života zbog čega je potrebno uključiti sve raspoložive senzore kako bi se ona mogla pratiti neovisno o veličini. Uz utjecaje na zdravlje ljudi zbog smrtnih slučajeva i ozljeda uzrokovanih klizištima, kvaliteta života opada zbog financijskih gubitaka i uništavanja imovine pogotovo u područjima koja su slabo razvijena.

Zbog svih navedenih razloga vrši se integracija svih dostupnih senzora s različitim načinima prikupljanja podataka kako bi se povećala sigurnost ljudi. Klizišta se smatraju prirodnim katastrofama, a u takvim situacijama potrebno je raditi brzo i s ograničenim mogućnostima i nerijetko beskontaktno što omogućuje besposadna letjelica opremljena sensorima odnosno besposadni leteći sustav (UAS eng. unmanned aircraft system). Za rad s UAS-om nije potreban veliki prostor za polijetanje moguće je doći blizu klizišta što omogućuje veliki broj podataka u kratkom vremenu što udovoljava svim problemima s prikupljanjem podataka nakon pojave klizišta. Stanje Zemljine površine i njezinog pokrova ne omogućava lak pristup području ugroze stoga se koriste bespilotne letjelice za opažanje. Sve je veća primjena UAV u inženjerskim poslovima zbog male veličine, niske cijene, lake uporabe, male mase i jednostavne integracije sa sensorima poput IMU (eng. inertial measurement unit) i GNSS (eng. global navigation satellite system) uz zadovoljavajuću prostornu rezoluciju. Pomoću UAS moguće je izraditi DEM (eng. Digital elevation model) koji služi za proučavanje horizontalnog i vertikalnog pomaka terena ili pomoću oblaka točaka kod kojega se nakon usporedbe stanja prije i poslije mogu uočiti pomaci i deformacije.

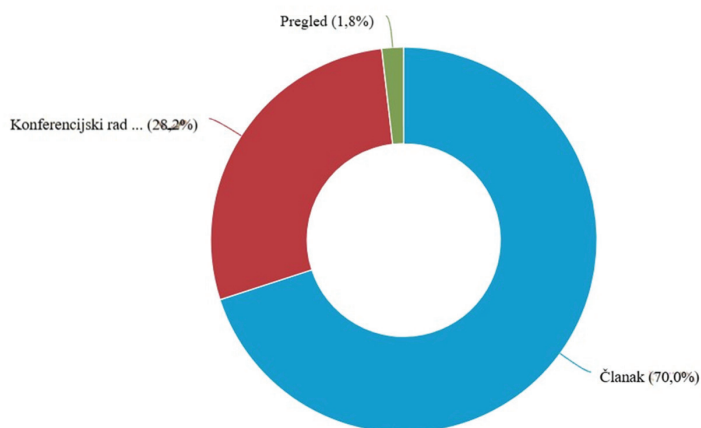
Cilj ovoga rada je rada je izvršiti pregled publikacija i sadržaja publikacija koje se odnose na opažanje klizišta pomoću UAS. U pregledu publikacija fokus je na primjeni dronova pri praćenju i predikciji klizišta te koja je točnost i pouzdanost pri opažanju postignuta. Svi podaci se moraju obraditi stoga će se uz rezultate praćenja proučiti i moguća rješenja odnosno modeli predikcije.

## 2. Materijali

Pojam UAV i klizišta je pretražen u Scopus bazi podataka. Pronađeno je 255 radova koji se odnose na predmetno područje od kojih najveći dio čine radovi s konferencija njih 154, 97 članaka te 4 pregledna rada. Broj radova je grafički prikazan na slici 1. Kriteriji za radove su zajedničko pojavljivanje u

ključnim riječima rada te da je rad članak, pregledni rad ili rad na konferenciji. Područje u kojemu se mora nalaziti rad ograničeno je na informatiku, ekologiju i inženjerske radove. Obzirom na to da je ovo pregledni rad druge kombinacije ključnih riječi nisu korištene kako bi pregled publikacija bio fokusiran na što uže predmetno područje.

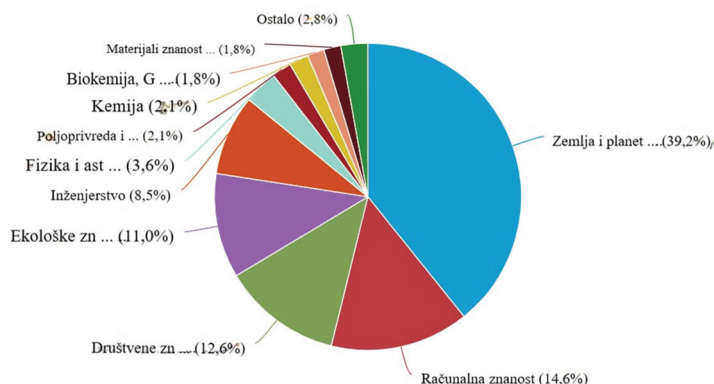
#### Dokumenti po vrsti



Slika 1. Prikaz tipa objavljenih radova izražen postotcima (URL 2).

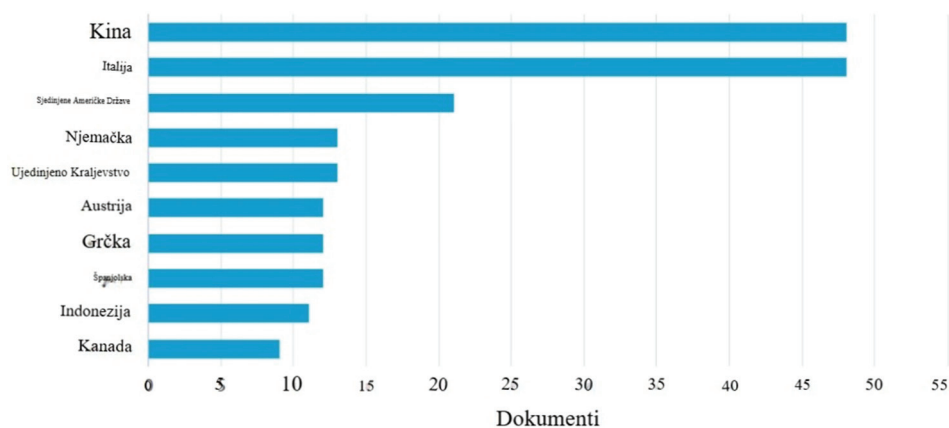
Najveći broj radova je iz područja planetarnih znanosti, društvenih znanosti, informatike i znanosti o okolišu koje su prikazane na slici 2. Pojmovi koji se vežu na predmetnu pretragu protežu se kroz veliki broj ostalih polja znanosti, ali u količinama koje su minimalne.

#### Dokumenti po predmetnim područjima



Slika 2. Prikaz članaka po područjima na koje se odnosi izraženo u postotcima (URL 2).

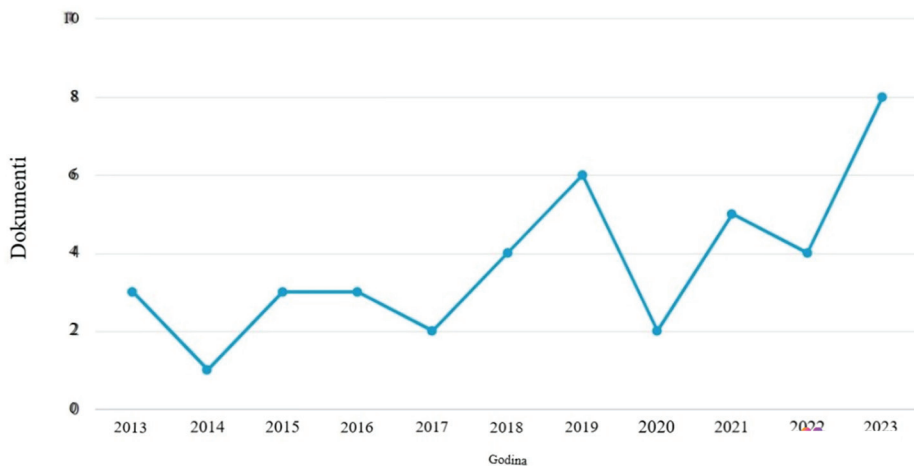
Praćenje i detekcija klizišta s dronovima i različitim senzorima u fazi je ekspanzije i istraživanja stoga ne postoji veliki broj radova kao pri nekim općenitijim pojmovima i temama. Najveći broj radova objavljen je 2021. godine dok je nešto manji broj objavljen u naredne dvije godine. Obzirom na broj radova to nije značajan pad broja istraživanje već na istraživanje utječe i broj klizišta koja su se pojavila i na kojem području. Područje istraživanja u ovome radu nije ograničeno nego su se u obzir uzeli radovi područja cijelog svijeta koji pripadaju temi. Najviše radova je s područja Kine, koja kao i u velikom broju znanstvenih područja ulaže puno u proučavanje i znanost općenito, dok s europskog tla prednjači Italija. Države koje se bave istraživanjem ove teme za sobom povlače činjenicu da je nekolicina aktivnih klizišta na tom području poput Indonezije koja je posvetila veliku pažnju ovoj temi u odnosu na ostale grane znanosti.



Slika 3. Prikaz broja dokumenata po državama (URL 2).

Pri čitanju radova u obzir su uzeti kriteriji koji se vežu na vrijeme publikacije rada, predmetno područje i relevantnost teme obzirom na tip rada radilo se o istraživačkom ili preglednom radu. Uz tek nedavni porast znanstvenih radova na temu može se pripisati i sve veća ekspanzija i razvoj različitih proizvođača dronova s različitim specifikacijama koje mogu utjecati na široku primjenu. Široka primjena dronova i pojava klizišta zbog velikog djelovanja čovjeka očekuje se da će biti učestalija stoga u budućnosti je moguće očekivati i sve intenzivnije proučavanje ove teme.

Dokumenti po godinama







Slika 4. Prikaz broja objavljenih članaka po godinama koje uključuju i pojam UAS (URL 3).

Uz pojam UAV veže se i pojam UAS – Unmanned Aircraft Systems koji se odnosi na letjelice koje sadrže senzore na sebi dok se UAV veže samo na letjelicu bez ikakvih dodataka. Broj radova u Scopus bazi radova koji sadrže pojam UAS uz pojmove UAV i klizišta je 44 i u porastu je što ukazuje na sve veću ulogu u znanstvenim istraživanjima i praktičnoj primjeni, a prikazan je na slici 4. Područje istraživanja nije ograničeno već se odnosi na sve radove iz svih znanstvenih područja koji sadrže navedene ključne pojmove.

### 3. Tehnika opažanja UAV-om

#### 3.1. Tipovi UAV-a

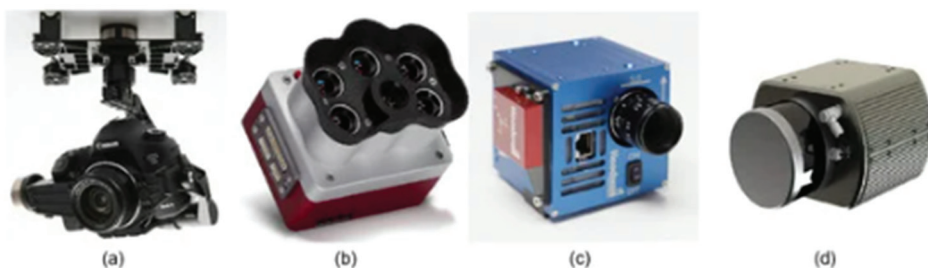
Razvoj različitih tipova UAV doveo je do širokog spektra dronova s različitim specifikacijama i različitih proizvođača. UAV se koriste u različite svrhe, ali ih se sve može podijeliti na fizičke karakteristike i karakteristike pri letenju. Obzirom na veličinu i tip UAV-a oni mogu nositi terete i po nekoliko stotina kilograma te letjeti na visini i do nekoliko kilometara. Dijele se na letjelice s fiksiranim krilima, letjelice s rotacijskim krilima – helikoptere i multikoptere te letjelice s hibridnim krilima i prikazane su na slici 5. Letjelice s fiksiranim krilima prilagođenije su područjima s manjim nagibom, koriste se za kartiranje klizišta zbog svojih mogućnosti opažanja velikog područja u jednom letu. Multikopteri su korisniji u područjima s velikim nagibom i složenim terenima gdje je potrebna detaljnija izmjera. U najširoj komercijalnoj uporabi nalaze se multikopteri zbog svoje praktičnosti. Letjelice s hibridnim krilima kombiniraju značajke letjelica s fiksiranim krilima i letjelice s rotacijskim krilima.

Krilo	Rotorsko krilo	Rotorsko krilo	Hibridno krilo
<p>Učinkovito pokrivanje velikih područja, dulja izdržljivost leta</p> <p>Ne može lebdjeti; ne može održavati visinu iznad tla (AGL); potrebno otvoreno područje za polijetanje i slijetanje</p>  <p><b>CropCam</b></p> <p>Brzina leta: ~60 km/h Težina pri letu: 2,7 kg Maksimalno trajanje: 30m</p>	<p><b>Helikopter</b></p> <p>Visoka učinkovitost, sposoban lebdjeti i raditi detaljne inspekcije iz blizine</p> <p>Mehanički složen</p>  <p><b>Vapor 55</b></p> <p>Brzina leta: 0–54 km/h Nošivost: &lt;10 kg Maks. hover teme: 45min</p>	<p><b>Višekopter</b></p> <p>Velika upravljivost, jednostavan za korištenje</p>  <p><b>DJI Phantom 4</b></p> <p>Brzina leta: 0–68 km/h Težina pri letu: 1,4 kg Maks. hover teme: 25min</p>	<p>Kombinira vertikalno polijetanje/slijetanje (VTOL) s učinkovitošću fiksnog krila, prilagodljiv raznim terenima</p> <p>Složeniji dizajn i upravljanje, potencijalno veći trošak</p>  <p><b>JOUAV CW-15</b></p> <p>Brzina 0–61 km/h Porjantai: &lt;3 kg Maks. prča 180min</p>

Slika 5. Prednosti i nedostaci različitih tipova UAV (Sun i dr. 2024).

### 3.2. Senzori UAV-a

Zbog specifičnosti svakoga zadatka i potrebe za detaljnim opažanjem integracija dodatnih senzora može biti od kritične važnosti. Senzori koji se integriraju s UAV-om dijele se na senzore za prikupljanje snimaka i senzore za prikupljanje trodimenzionalnih informacija i prikazani su na slici 6. Za prikupljanje snimaka koriste se RGB kamere, termalne infracrvene kamere, multispektralne kamere i hiperspektralne kamere dok za akviziciju trodimenzionalnih podataka terena se koristi LiDAR i SAR tehnologija.



Slika 6. Senzori koji se integriraju s UAV-om, a) RGB kamera, b) multispektralne kamere, c) hiperspektralne kamere, d) LIDAR (Zhang i Zhu 2024).

RGB kamera je senzor koji se najčešće koristi kod opažanja UAV-om. Kamere su kreirane za opažanje valnih duljina vidljivog svjetla. Naziv RGB su dobile zbog osjetljivosti na primarne boje crvenu, zelenu i plavu. RGB kamera se koristi pri opažanju velikih područja, a rezolucija snimaka ovisna je o rezoluciji senzora. Sensori opažaju u crvenom, zelenom i plavom spektru dok se obrada snimaka vrši u nekom od programa za fotogrametrijsku obradu podataka. Za specifične zadatke koji se najčešće odnose na vegetaciju potrebno je koristiti multispektralne kamere koje opažaju pojaseve nevidljive ljudskom oku dijela elektromagnetskog spektra. Multispektralne kamere smatraju se naprednim RGB kamerama jer detaljnije opažaju više pojaseva elektromagnetskog spektra. Hiperspektralni senzori jedni su od najsloženijih tehnologija spektralnog opažanja koje se koristi za veliki broj namjena. Trenutno nisu u širokoj uporabi kao drugi spektralni senzori zbog vrlo visoke cijene opreme, zahtijevaju veliku nosivost UAV-a i složene operativne postupke (URL 4). Termalne infracrvene kamere rade na temelju detekcije emitirane termalne radijacije, gdje toplije površine emitiraju više infracrvene radijacije u odnosu na hladnije objekte (Robles-Kelly i Huynh 2012). Područja klizišta su geološki nestabilna i dinamična, a termalne kamere se koriste za praćenje termalnih anomalija koje su nevidljive ljudskom oku. Podaci prikupljeni termalnim kamerama niže su rezolucije i za opažanje njima potrebno je biti bliže objektu.

LiDAR je metoda daljinskog istraživanja za opažanje Zemljine površine. Mjeri domet u obliku lasera s impulsima koji u kombinaciji s podacima skenera i GPS prijavnika pruža trodimenzionalne informacije o predmetnom području. Sastoji se od lasera, skenera i GNSS prijavnika. Na temelju prikupljenih podataka podaci se računaju na temelju potrebnog vremena za put signala i brzine svjetlosti. Najveća prednost LiDAR-a u odnosu na ostale metode mjerenja je visoka preciznost prikupljanja podataka o visini u okolini kojoj je teško pristupiti i gdje vidljivost može biti ograničena. LiDAR senzori se posljednjih godina sve više koriste u raznim područjima uglavnom zbog tehnološke dostupnosti i rasprostranjenosti diljem svijeta. Ostale tehnike generiranja oblaka točaka, poput fotogrametrije, ograničene su jer ovise o parametrima povezanim sa slikama poput osvjetljenja, meteoroloških uvjeta i dr. (Tan i dr. 2022). Konfiguracije instrumenta unutar LiDAR instrumenta je već postavio proizvođač i mogu biti ograničene mogućnosti da budu specijalizirane za potrebe korisnika (Del Savio i dr. 2022).

SAR je metoda prikupljanja podataka koja mjeri količinu reflektirane energije emitiranog pulsa energije nakon interakcije s Zemljinom površinom. SAR metoda je aktivna što znači da slika nastaje nakon interakcije emitiranog pulsa s predmetnim područjem. Radar sa sintetičkom aperturom – SAR vrši kontinuirano skeniranje tijekom jednog prolaska duž jednog ravnog dijela rute. Tijekom kretanja radar obavlja niz mjerenja, koja se na kraju obrađuju odgovarajućim algoritmima za generiranje jedne slike (Stecz i Gromada 2020). UAV platforme imaju neka ograničenja kada se koristi SAR metoda. Jedan od najvažnijih je neželjena odstupanja od nominalne trajektorije leta koja može uzrokovati defokusiranje, geometrijska izobličenja ili fazne pogreške SAR slike (Lort i dr. 2018).

### 3.3. Proizvodi UAS-a za praćenje klizišta

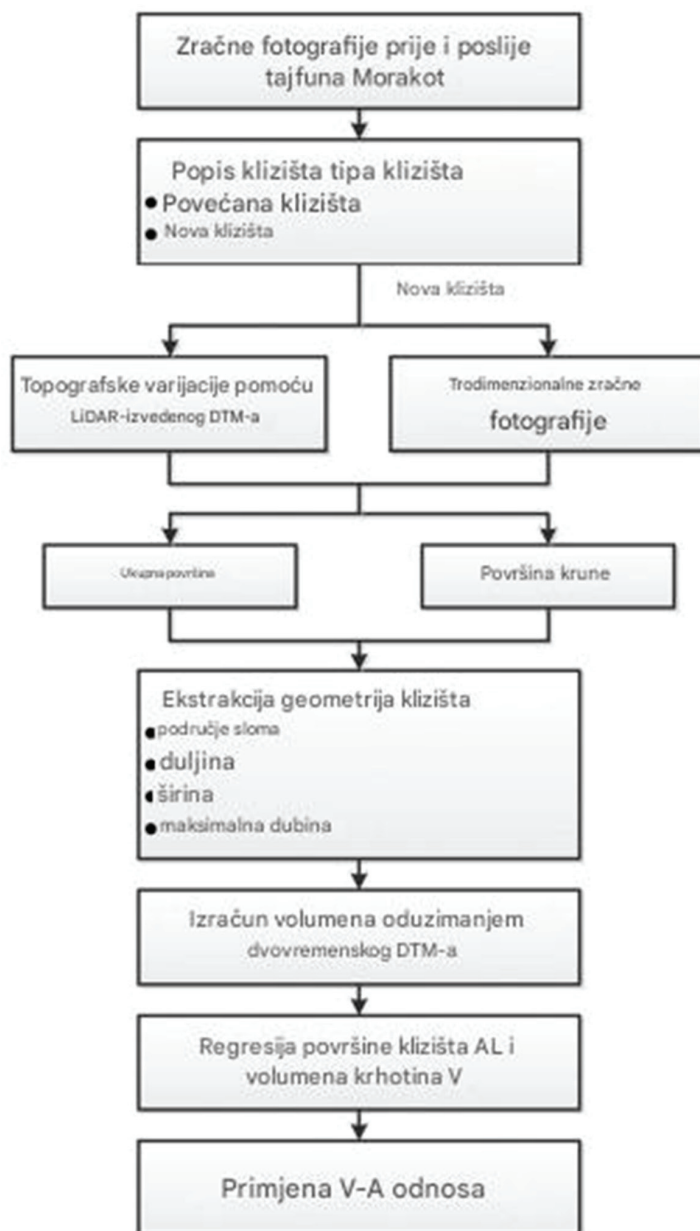
Osim kontinuiranog sustava praćenja u stvarnom vremenu, znanja o kinematici klizišta mogu se steći različitim tehnikama praćenja, koje se razlikuju prema metodi mjerenja (Jakopec i dr. 2022). Produkti za praćenje klizišta koji postoje ovisno o metodi mjerenja i korištenom instrumentariju mogu biti: snimke UAS-a, rekonstrukcija modela klizišta i otkrivanje promjena klizišta na temelju viševremenskih 3D modela. Iz navedenih moguće je izraditi Digitalni model terena, Digitalni model visina i Digitalni model površine.

UAV pruža snimke koje su prikupljene iz ptičje perspektive čija se prvobitna zadaća mogućnost karakterizacije klizišta i procjena rizika. Snimke bespilotnih letjelica prikupljene pomoću optičkih senzora pružaju velike količine podataka određene rezolucije ovisno o kameri (Chen i dr. 2020). Točnost prikupljanja podataka izražena je pomoću GSD-a (eng. ground sample distance), koji označava udaljenost između dvaju piksela na terenu. Međutim, u studijama klizišta situacija postaje složenija zbog varijacija u nadmorskoj visini unutar vidnog polja, različitih kutova nagiba bespilotnih letjelica i razmatranja fluktuacije razine iznad tla koja se u određenim slučajevima ne može zanemariti (Sun i dr. 2024).

Rekonstrukcija modela klizišta dopušta 3D prikaz objekta što je vrlo bitno zbog vertikalnih komponenti koje sadrži klizište. LIDAR brzo i efektivno prikuplja informacije o površinskim značajkama snimanog objekta i predstavlja ih u obliku oblaka točaka (Pan i dr. 2019). Vizualni pregled klizišta predstavlja izvrstan alat za kartiranje klizišta. Kao što ne postoji fiksna metodologija za takav pristup bez terenskog obilaska, neke geološke strukture mogu oponašati strukture klizišta zbog čega je potrebno kombinirati metodologije kako bi vizualizacija bila ispravna. Najvažniji aspekt je sposobnost otkrivanja pokretanja klizišta prije katastrofalnih posljedica (Jaboyedoff i Derron 2020). Kvalitetne snimke pri snimanju bespilotnom letjelicom ovise o kvaliteti kamere, visini leta koja utječe na veličinu piksela snimke i nagibu kamere koja mora biti prilagođena ovisno o objektu. Kontrolne točke su točke poznatih koordinata koje služe za uklapanje prikupljenih snimaka u referentni koordinatni sustav. Točke se mogu opažati GNSS metodom nakon čega se identificiraju na snimkama unutar softvera i pridodaju im se opažane koordinate. Snimke se u referentni koordinatni sustav uklapaju pomoću kontrolnih točaka čija distribucija mora biti na terenu pravilna kako bi raspored veznih točaka bio gust i ne bi došlo do rupa u snimkama (Luhmann i Robson 2011). U fotogrametriji kontrolne točke moraju biti široko i ravnomjerno raspoređene po cijelom bloku, posebno prema njegovoj periferiji (Martínez-Carricondo i dr. 2018). Rekonstrukcija modela pomoću UAS snimaka nudi isplativu i učinkovitu alternativu za generiranje detaljnih topografskih informacija bez potrebe za složenim mjerenjima (Carivick i dr. 2016).

Za razumijevanje klizišta i procjenu opasnosti potrebno je razumijeti klizište što se može postići praćenjem kroz vrijeme. 3D modeli visoke rezolucije potrebni su zbog kompleksnosti klizišta koji se može sastojati od područja akumulacije, područja cirkulacije i područja izvora (Sun i dr. 2024). 3D modeli objekata prikupljeni u različitom vremenskom periodu mogu se spojiti na različite načine:

oblak na oblak, oblak na mrežu točaka i usporedba oblak točaka različitih modela, a dijagram obrade podataka prikazan je na slici 7.



Slika 7. Dijagram procesa obrade podataka klizišta (Tseng i dr. 2013).

Visoko automatiziran tijek rada uklanja vegetacije i povezuje površinske promjene izvedene iz oblaka točaka izravno na geomorfološki značajne klase objekata i na pojedinačne objekte (Mayr i dr. 2020).

### 3.4. Primjena UAS-a za praćenje klizišta

Sposobnost brojnih točkastih mjerenja pomaka preko tijela klizišta omogućuju otkrivanje i kartiranje deformacije aktivne padine (Righini i dr. 2012). Kartiranje klizišta sastoji se od identifikacije dijela Zemljine površine na kojoj je moguće da se dogodi pomak uz sve popratne pojave, klizišta je moguće kartirati na različite načine koji su prikazani na slici 8.



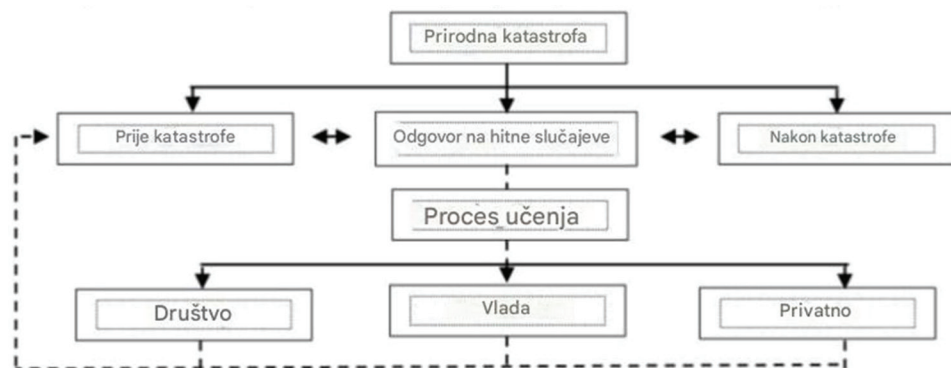
Slika 8. Sustavi koji se koriste za kartiranje klizišta prema tipovima senzora, mogućim tehnikama obrade i dostupnim rezultatima (Hussain i dr. 2022).

Klizišta karakteriziraju pukotine, škrape, tekture i mikrooblici terena koji su jedinstveni za svaki slučaj. Svi navedeni elementi su osnova kako bi se mogla shvatiti dinamika klizišta.

Uz opis klizišta nakon njegove pojave potrebno je i kartirati područja na koja se sumnja da bi mogla biti osjetljiva na klizišta. Karta osjetljivosti na klizišta uzima u obzir gdje se klizišta pojavljuju i što ih uzrokuje poput nagiba, vrsta tla i utjecaja toka vode na predmetnom području (URL 5). Kartiranje područja osjetljivog na klizište je ne samo kako bi se utvrdili čimbenici koji su najviše utjecali na pojavu klizišta u području već i procijeniti relativni doprinos svakog faktora za pojavu klizišta (Wubalem 2021). Izrada karte osjetljivosti određenog područja na klizištu koristan je alat u upravljanju opasnostima od klizišta jer pokazuje stupanj osjetljivosti područja na pojavu klizišta (Mersha i Meten 2020).

U hitnim slučajevima potrebno je reagirati brzo i precizno što bespilotna letjelica omogućuje svojim snimkama visoke rezolucije i lakim prikupljanjem podataka. Strategija ne može biti jedinstvena jer je svaki slučaj zaseban zbog svojih značajki stoga je bitno iz svakoga izvući pouke, a proces učenja prikazan je na slici 9. Dok se razvija strategija za hitne slučajeve na klizištima velikih razmjera, integracija u postojeći sustav je važno pitanje koje ne samo da može smanjiti administrativne troškove već i može i povećati prihvaćanje od strane stanovnika (Tsai i dr. 2021). Procesi strategije u hitnim slučajevima uključuju uspostavu sustava ranog upozoravanja, razvoj planova evakuacije, pružanje

hitnih skloništa i zaliha, operacije spašavanja, pomoć pogođenim zajednicama i obnova infrastrukture, između mnogih drugih postupaka usmjerenih na smanjenje ovih opasnosti (Varol i Derin Cengiz 2023).



Slika 9. Proces učenja kod hitnih slučajeva za upravljanje katastrofama (Faturahman 2018).

Utjecaj loših vremenskih uvjeta se pojavljuje kao negativna strana korištenja UAV-a kod situacija procjene rizika. Drugi faktor koji može biti prepreka je domet UAV-a koji može varirati ovisno o lokaciji. UAS kod hitnih slučajeva doprinosi očuvanju ljudskih života sa svim svojim prednostima i nedostacima.

Tablica 1. Primjena različitih metoda opažanja u praćenju klizišta.

Metoda prikupljanja podataka	Opis	Primjena
GNSS	Precizno pozicioniranje stalnih točaka	Praćenje pomaka u stvarnom vremenu
LiDAR	Lasersko skeniranje iz zraka	Detaljan DMT i oblak točaka
Dron + fotogrametrija	Izrada ortofota i 3D modela	Brza analiza promjena
SAR	Velike površine, povremeno snimanje	Dugoročno praćenje deformacija

Tablica 1 prikazuje primjene različitih metoda prikupljanja podataka navedenih u ovom poglavlju. Podatke je potrebno kombinirati ovisno o predmetnom području, veličini i vrsti klizišta.

## 4. Rezultati i rasprava

Pri praćenju i detekciji klizišta potrebno je detektirati statičke karakteristike i praćenje promjena kroz vrijeme na klizištu. Promatranje statičkih komponenti uključuje karakterizaciju i kartiranje klizišta dok dinamičko praćenje

se odnosi na promatranje promjena u pukotinama i promjena na površinama pomoću podataka iz različitih vremenskih sesija. Podatke je moguće prikupiti na različite načine ovisno o produktu koji se želi izraditi. Za promatranje statičkih karakteristika koriste se satelitske snimke i podaci prikupljeni GNSS metodom dok za izradu 3D modela se koriste preklopi avio snimaka i podaci prikupljeni LIDAR-om. Glavni kriteriji za izbor vrste podataka koji će se koristiti pri praćenju i detekciji su: potrebno vrijeme za izmjeru, troškovi izmjere i točnost prikupljenih podataka. Usporedba različitih vrsta podataka će se temeljiti na navedenim glavnim kriterijima. Uz kombinaciju sve tri metode korištene u četvrtom poglavlju postižu se rezultati centimetarske točnosti. Obzirom na kompleksnost pojedinih klizišta određene dijelove istih potrebno je dodatno analizirati. Stoga se uz opažanje kompletnog klizišta kombiniranje metoda koristi se kako bi se određene dijelove predmetnog područja veličine do 1 m poput pukotina i pomaka sedimenata opažalo dodatno te omogućilo dodatnu analizu.

#### 4.1. UAV snimke

UAV snimke neovisno o kojoj vrsti letjelice se radi pruža prednosti svoje male težine, jeftini su, male veličine i jednostavne uporabe. Mobilne platforme za mjerenje prikupljaju snimke iz ptičje perspektive koje karakteriziraju klizišta. Prednosti snimaka pomoću UAV-a je karakterizacija morfoloških osobina specifičnih za svako klizište na temelju RGB zračnih snimaka (Li i dr. 2024, Mercuri i dr. 2024). Snimke je moguće dobiti brzo i efikasno bez potrebe za približavanjem pogođenom području. Uz detekciju klizišta razvijaju se analize mehanizama deformacija (Li i dr. 2025, Sandirc i dr. 2023, Cui i dr. 2025), analize karakteristika i stabilnosti (Li i dr. 2024) te geometrijskih promjena (Pasternak i dr. 2024, Ahmad i dr. 2024) nevisno o dubini predmetnog područja. Strojno učenje omogućuje automatsku detekciju na velikim područjima što je bitno zbog potrebe za reakcijom hitnih službi (Kutpanova i dr. 2025). Na temelju snimaka izrađuju se algoritmi za automatsku detekciju (Deng i dr. 2024) kako samih klizišta tako i pratećih pojava poput odrona. Slike se analiziraju različitim metodama strojnog učenja (Yang i dr. 2022, Maggiori i dr. 2017, Liu i Elrahman 2018) koje mogu biti temeljene na regiji ili regresiji (Teo i dr. 2023) s različitim algoritmima.

#### 4.2. GNSS metoda

GNSS metoda mjerenja i prijemnici se primjenjuju kod geodetskog praćenja objekata (Šegina i dr. 2020, Notti i dr. 2020) odnosno u ovom slučaju dinamike klizišta (Dai i dr. 2024). Obzirom na visoke cijene GNSS prijmnika, a veliku mogućnost štete na nesigurnom području koriste se jeftini (Hamza i dr. 2023) jednofrekventni ili dvofrekventni prijemnici i kalibrirane višepojasne GNSS antene. Jednofrekventne antene koriste se za monitoring klizišta (Komac i dr. 2015, Carlà i dr. 2019) kroz duži period vremena i mogu se lako koristiti u kombinaciji s drugim izvorima podataka. Podaci se prikupljaju pomoću PPP servisa

koji pruža centimetarsku točnost što zadovoljava predmetni zadatak. Prijamnici se postavljaju u mrežu točaka (Li i dr. 2023, Yang i dr. 2023) na predmetnom području na temelju kojih se prilagođavaju duljine baznih linija i period opažanja i prijenosa podataka na temelju kojih se izrađuju modeli (Chen i dr. 2023). Dvofrekventni prijamnici (Parizia i dr. 2024) podatke mogu prikupljati pomoću statičkih relativnih metoda ili PPP metoda (Hamza i dr. 2020, Hamza i dr. 2021). Mogu se detektirati pomaci veličine nekoliko milimetara (Alemdag i dr. 2024, Xi i dr. 2024), te je poželjno koristiti metode koje prate periodične pomake (Chen i dr. 2023) kako bi bilo moguće bolje objasniti dinamiku klizišta. Podaci se prikupljaju pomoću prijamnika i šalju u glavnu stanicu u kojoj se vrši NTRIP metoda obrade podataka. Podaci se obrađuju na temelju numeričke analize. Pri opažanju koriste se prijamnici niske cijene zbog velike opasnosti od moguće štete, ali koji također omogućuju podatke centimetarske točnosti i kontinuirano opažanje.

### 4.3. LiDAR

LiDAR se koristi za izradu visokopreciznih digitalnih modela terena koji čine 3D predstavu terena. Obzirom na sve veći razvitak LiDAR tehnologije i njezine primjene u praksi raste i broj publikacija koje se odnose različite mogućnosti primjene pri detekciji klizišta. Podaci se obrađuju pomoću oblaka točaka čija točnost ovisi o poziciji i vrsti senzora na instrumentu, a može se kretati od metarske do milimetarske točnosti. Ključne informacije o klizištu su veličina područja koje je obuhvatilo klizište, volumen materijala koji se pokrenuo i kasnija moguća evolucija širenja klizišta (Chang i dr. 2010). Razvijanjem LiDAR tehnologije povećanja se točnost opisivanja i mikrodijelova klizišta poput pukotina manjih od 1 m (He i dr. 2025, Micu i dr. 2023) i pratećih pojava poput odrona i sl. (Noël i Nordang 2025, Minervino Amodio i dr. 2024, Ambrosino i dr. 2023) te također pomaka sedimenata (Tunncliffe i dr. 2024) povezanih s klizištima. Za određivanje istih potrebno je odrediti mehanizme praćenja (Li i dr. 2025) koji su specifični za svaku pojedinu lokaciju. U sadašnjosti pri analiziranju i detekciji koristi se i umjetna inteligencija (Alam i dr. 2024, Maxwell i dr. 2021) i tehnike strojnog učenja (Barbarella i dr. 2021, Al-Najjar i dr. 2021) pomoću koje se može provoditi automatska (Li i dr. 2023) ili poluautomatska (Zangana i dr. 2024) detekcija klizišta. Tehnologija obrade podataka i izrade modela i grafičkih prikaza je razvijena, LiDAR se razvija u smjeru izrade multitemporalnih modela i izrade baze podataka klizišta (Létal i dr. 2025, Ritonga i dr. 2022, Glenn i dr. 2010).

Uz općeniti opis različitih senzora prikazan u ovom poglavlju, tablica 2 prikazuje usporedbu senzora za prikupljanje navedenih u ovom radu po kriterijima rezolucije snimaka, prednosti, nedostataka i cijene.

Tablica 2. Usporedba senzora za prikupljanje podataka.

Senzor	Prostorna rezolucija Očekivana točnost detekcije klizišta	Prednosti	Nedostaci	Cijena
RGB kamera (UAV)	<10 cm 10–20 cm	lako prepoznati vizualne promjene, laka obrada i interpretacija podataka, jeftino	ne vidi se ispod vegetacije, osjetljiv na sjene, male informacije o termalnim promjenama	1000 – 4000 €
LiDAR	2–5 cm 1–5 cm	vrlo precizna izmjera promjena na terenu, izmjera pukotina i manjih pojava na klizištu	skupi senzori, zahtjevnija obrada podataka	20 000– 90 000 €
Multispektralna kamera	20–50 cm 20–50 cm	lakša klasifikacija vegetacije i prikaz stanja vegetacije, bolja pri pojavi sjena u odnosu na RGB	ograničena spektralna rezolucija	5000– 15 000 €
Hiperspektralna kamera	50–100 cm 97% preciznost detekcije (koristi se u kombinaciji s drugim sensorima)	razlikuje materijale, korisno pri otkrivanju novih rizičnih područja ili klizišta	velika količina podataka, niža prostorna rezolucija, zahtjeva dobru kalibraciju	30 000–150 000 €
Termalna kamera	10–50 cm 1–5 °C	detektira promjene temperature i vlage što je mogući predznak pojave klizišta	samo površinska temperatura, interpretacija podataka kompleksna	2000– 6000 €

Cijena se odnosi na prosječnu cijenu senzora koji zadovoljavaju točnost i kvalitetu podataka za detekciju klizišta na tržištu na državnoj razini. Podaci o prostornoj rezoluciji, očekivanoj točnosti prednosti i manjima UAV-a (Albanwan i dr. 2024), LiDAR-a (Jaboyedoff i dr. 2012), multispektralne kamere (Shahabi i dr. 2021, Furukawa i dr. 2021), hiperspektralne (Chengming i dr. 2019) i termalne kamere (Ma i dr. 2020) prikupljene su kroz čitavu literaturu navedenu u radu i predstavljaju trenutno opće stanje pri detekciji klizišta. Nijedan senzor ne pruža idealno rješenje, već se moraju kombinirati različiti senzori kako bi se maksimalno efektivno kako financijski tako i precizno klizište detektiralo, a svako klizište je specifično zbog mogućih različitih uvjeta na terenu i vrste klizišta.

## 5. Zaključak

Pregled metoda za detekciju i praćenje klizišta naglašava značajne doprinose svake od metoda LiDAR-a, UAV-a i GNSS u današnjici. Metode opisane u radu služe za promatranje i detekciju statičkih karakteristika i dinamičkih pomaka. Isti se mogu promatrati u dugom ili kratkom vremenskom periodu ovisno o potrebama predmetnog područja i aktivnosti klizišta. Kod klizišta je moguće doći do naglih poremećaja i aktivacije klizišta ili su potrebna opažanja u dugom periodu kod predmetnih područja koja predstavljaju opasnost po okolinu, ali su pomaci malog iznosa. Svi načini opažanja podržani su instrumentima koji omogućuju rezultate visoke razlučivosti određene točnosti, ovisno o uvjetima na terenu i dostupnim sensorima što omogućuje zadovoljavajuće vremenske i prostorne podatke. Uz opažanje pomaka i osobina svi podaci imaju ključnu ulogu u strategijama za hitne slučajeve. Stvaraju se baze podataka i multi-temporalni modeli za duga periodička praćenja i same mehanizme praćenja. Razvijanjem instrumentarija moguće je i opažati geološke karakteristike povezane s pojavom klizišta na malim dijelovima klizišta. Na tim malim dijelovima klizišta mogu se promatrati specifični pomaci sedimenata, odroni i sl. Prikupljeni podaci upotpunjavaju se i razvijaju upotrebom umjetne inteligencije i tehnikama strojnog učenja, dok detekcija na temelju podataka može biti automatska ili poluatomska. Zaključno sve tri metode sa svojim proizvodima omogućuju bolje razumijevanje statičkih i dinamičkih karakteristika klizišta s zadovoljavajućom točnosti dok se metoda prikupljanja podataka prilagođava predmetnom području i zadatku. Obzirom na tehnološki razvoj i integraciju različitih tipova podataka s metodama strojnog učenja i upotrebom umjetne inteligencije ključno je posjedovati baze podataka i modele za detekciju klizišta kako bi se omogućili brzi odgovori na hitne slučajeve i povećala primjena navedenih metoda u istraživanju i detekciji klizišta.

## Literatura

- Ahmad, N., Shafique, M., Hussain, M. L., Islam, F., Tariq, A., Soufan, W. (2024): Characterization and Geomorphic Change Detection of Landslides Using UAV Multi-Temporal Imagery in the Himalayas, Pakistan, *Land*, 13, 904.
- Alam, M. J. B., Manzano, L. S., Debnath, R., Ahmed, A. A. (2024): Monitoring Slope Movement and Soil Hydrologic Behavior Using IoT and AI Technologies: A Systematic Review, *Hydrology*, 11, 111.
- Albanwan, H., Qin, R., Liu, J.-K. (2024): Remote Sensing-Based 3D Assessment of Landslides: A Review of the Data, Methods, and Applications, *Remote Sens.*, 16, 455.
- Alemdag, S., Yalvaç, S., Bjelotomić Oršulić, O., Kara, O., Zeybek, H. İ., Bostanci, H. T., Markovinović, D. (2024): Monitoring Surface Deformations in a Fossil Landslide Zone and Identifying Potential Failure Mechanisms: A Case Study of Gümüşhane State Hospital, *Sensors*, 24, 4995.

- Al-Najjar, H. A. H., Pradhan, B., Kalantar, B., Sameen, M. I., Santosh, M., Alamri, A. (2021): Landslide Susceptibility Modeling: An Integrated Novel Method Based on Machine Learning Feature Transformation, *Remote Sens.*, 13, 3281.
- Ambrosino, A., Di Benedetto, A., Fiani, M. (2023): LiDAR Data and HRSI to Evaluate the Mitigating Effect of Forests into Rockfall Risk Analysis Using SOM: Mt San Liberatore Case Study, *Remote Sens.*, 15, 4523.
- Barbarella, M., Di Benedetto, A., Fiani, M. (2021): Application of Supervised Machine Learning Technique on LiDAR Data for Monitoring Coastal Land Evolution, *Remote Sens.*, 13, 4782.
- Carlà, T., Tofani, V., Lombardi, L., Raspini, F., Bianchini, S., Bertolo, D., Thuegaz, P., Casagli, N. (2019): Combination of GNSS, Satellite InSAR, and GBInSAR Remote Sensing Monitoring to Improve the Understanding of a Large Landslide in High Alpine Environment, *Geomorphology*, 335.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., Quincey, D. J. (2016): *Structure from Motion in the Geosciences*, John Wiley & Sons, Hoboken, NY, USA.
- Chang, K., Chan, Y., Chen, R., Hsieh, Y.-C. (2010): Existing large-scale landslides assessment by means of LiDAR data: Example from Tatun volcanic area, northern Taiwan, AGU Fall Meeting Abstracts.
- Chengming, Y., Yao, L., Peng, C., Li, L., Saeid, P., Marcato, J. (2019): Landslide Detection of Hyperspectral Remote Sensing Data Based on Deep Learning With Constrains, in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12 (12), 5047–5060.
- Chen, H., Lu, T., Huang, J., He, X., Yu, K., Sun, X., Ma, X., Huang, Z. (2023): An Improved VMD-LSTM Model for Time-Varying GNSS Time Series Prediction with Temporally Correlated Noise, *Remote Sens.*, 15, 3694.
- Chen, S., Xiang, C., Kang, Q., Zhong, W., Zhou, Y. and Liu, K. (2020): Accurate landslide detection leveraging UAV-based aerial remote sensing, *IET Commun.*, 14, 2434–2441.
- Chen, Z., Huang, G., Xie, W., Zhang, Y., Wang, L. (2023): GNSS Real-Time Warning Technology for Expansive Soil Landslide – A Case in Ningming Demonstration Area, *Remote Sens.*, 15, 2772.
- Cui, F., Xiong, C., Wu, Q., Zhou, Y., Hou, C., Fan, L., Liu, M., Xu, H., Pan, X. (2025): Dynamic mechanism triggering the catastrophic Xinjing Landslide in Alxa, Inner Mongolia, *Engineering Geology*, 346.
- Dai, L., Jia, C., Chen, L., Zhang, Q., Chen, W. (2024): Development Characteristics and Reactivation Mechanism of a Large-Scale Ancient Landslide in Reservoir Area, *Appl. Sci.*, 14, 3107.
- Del Savio, A. A., Luna Torres, A., Chicchón Apaza, M. A., Vergara Olivera, M. A., Llimpe Rojas, S. R., Urday Ibarra, G. T., Reyes Ñique, J. L., Macedo Arevalo, R. I. (2022): Integrating a LiDAR Sensor in a UAV Platform to Obtain a Georeferenced Point Cloud, *Appl. Sci.*, 12, 12838.
- Deng, B., Xu, Q., Dong, X., Li, W., Wu, M., Ju, Y., He, Q. (2024): Automatic Method for Detecting Deformation Cracks in Landslides Based on Multidimensional Information Fusion, *Remote Sens.*, 16, 4075.

- Faturahman, B. M. (2018): Strategy of Emergency Response of Flood and Landslide Disaster in Pacitan Regency, *Jurnal Ilmu Administrasi: Media Pengembangan Ilmu dan Praktek Administrasi*.
- Furukawa, F., Laneng, L. A., Ando, H., Yoshimura, N., Kaneko, M., Morimoto, J. (2021): Comparison of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Vegetation Coverage Changes on a Landslide Area, *Drones*, 5, 97.
- Glenn, N., Spaete, L., Shrestha, R., O'Leary, P., Thackray, G., Chadwick, J. (2010): Landslide Monitoring with Multi-Temporal Airborne LiDAR, *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Sterle, O. (2021): Performance Evaluation of Low-Cost Multi-Frequency GNSS Receivers and Antennas for Displacement Detection, *Appl. Sci.*, 11, 6666.
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., Sterle, O. (2020): Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes, *Sensors*, 20, 4375.
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., Pavlovčič-Prešeren, P. (2023): A Cost-Effective GNSS Solution for Continuous Monitoring of Landslides, *Remote Sens.*, 15, 2287.
- He, Q., Dong, X., Li, H., Deng, B., Sima, J. (2025): A Micro-Topography Enhancement Method for DEMs: Advancing Geological Hazard Identification, *Remote Sens.*, 17, 920.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update, *Landslides*, 11, 2, 167–194.
- Hussain, Y., Schlögel, R., Innocenti, A., Hamza, O., Iannucci, R., Martino, S., Havenith, H.-B. (2022): Review on the Geophysical and UAV-Based Methods Applied to Landslides, *Remote Sens.*, 14, 4564.
- Jaboyedoff, M., Derron, M. H. (2020): Landslide analysis using laser scanners, *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, 23, 207–230.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review, *Nat Hazards*, 61, 5–28.
- Jakopec, I., Marendić, A., Grgac, I. (2022): A Novel Approach to Landslide Monitoring based on Unmanned Aerial System Photogrammetry, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37 (5), 83–101.
- Komac, M., Holley, R., Mahapatra, P., van der Marel, H., Bavec, M. (2015): Coupling of GPS/GNSS and Radar Interferometric Data for a 3D Surface Displacement Monitoring of Landslides, *Landslides*, 12, 241–257.
- Kutpanova, Z., Kadhim, M., Zheng, X., Zhakiyev, N. (2025): Multi-UAV path planning for multiple emergency payloads delivery in natural disaster scenarios, *Journal of Electronic Science and Technology*, 23.
- Létal, A., Klimes, J., Šandric, I. (2025): Building landslide inventory with LiDAR data and deep learning, *Earth Observation Applications to Landslide Mapping, Monitoring and Modeling*, Elsevier, 297–311.
- Li, D., Tang, X., Tu, Z., Fang, C., Ju, Y. (2023): Automatic Detection of Forested

- Landslides: A Case Study in Jiuzhaigou County, China, *Remote Sens.*, 15, 3850.
- Li, M., Xiu, Z., Han, J., Meng, F., Wang, F., Ji, H. (2024): Characterization and Stability Analysis of Rock Mass Discontinuities in Layered Slopes: A Case Study from Fushun West Open-Pit Mine, *Appl. Sci.*, 14, 11330.
- Li, X., Guo, C., Chen, W., Wei, P., Jin, F., Yan, Y., Liu, G. (2025): Deformation Mechanisms and Rainfall Lag Effects of Deep-Seated Ancient Landslides in High-Mountain Regions: A Case Study of the Zhongxinrong Landslide, Upper Jinsha River, *Remote Sens.*, 17, 687.
- Li, Z., Ma, Y., Liu, J., Liu, Y., Ren, W., Zhao, Q. (2023): Short-Term Rainfall Forecasting by Combining BP-NN Algorithm and GNSS Technique for Landslide-Prone Areas, *Atmosphere*, 14, 1309.
- Li, Z.-H., Shi, A.-C., Xiao, H.-X., Niu, Z.-H., Jiang, N., Li, H.-B., Hu, Y.-X. (2024): Robust Landslide Recognition Using UAV Datasets: A Case Study in Baihetan Reservoir, *Remote Sens.*, 16, 2558.
- Liu, T., Elrahman, A. (2018): Comparing fully convolutional networks, random forest, support vector machine, and patch-based deep convolutional neural networks for object-based wetland mapping using images from small unmanned aircraft system, *GISci. Remote Sens.*, 55, 243–264.
- Luhmann, T., Robson, S. (2011): *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*, Cdr ed., Whittles Publishing, Dunbeath, UK.
- Lort, M., Aguasca, A., López-Martínez, C., Marín, T. M. (2018): Initial Evaluation of SAR Capabilities in UAV Multicopter Platforms, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11 (1), 127–140.
- Ma, J., Niu, X., Liu, X., Wang, Y., Wen, T., Zhang, J. (2020): Thermal Infrared Imagery Integrated with Terrestrial Laser Scanning and Particle Tracking Velocimetry for Characterization of Landslide Model Failure, *Sensors*, 20, 219.
- Maggiori, E., Tarabalka, Y., Charpiat, G., Alliez, P. (2017): Convolutional neural networks for large-scale remote-sensing image classification, *Remote Sens.*, 55, 645–657.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F. J. (2018): Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 72, 1–10.
- Maxwell, A. E., Sharma, M., Donaldson, K. A. (2021): Explainable Boosting Machines for Slope Failure Spatial Predictive Modeling, *Remote Sens.*, 13, 4991.
- Maxwell, A. E., Sharma, M., Kite, J. S., Donaldson, K. A., Maynard, S. M., Malay, C. M. (2021): Assessing the Generalization of Machine Learning-Based Slope Failure Prediction to New Geographic Extents, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 10, 293.
- Mayr, A., Rutzinger, M., Geitner C. (2020): Multitemporal analysis of objects in 3d point clouds for landslide monitoring, *The International Archives of*

- the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2, 2018 ISPRS TC II Mid-term Symposium “Towards Photogrammetry 2020”, 4–7 June 2018, Riva del Garda, Italy.
- Mercuri, M., Biondino, D., Ciurleo, M., Cofone, G., Conforti, M., Gullà, G., Stellato, M. C., Borrelli, L. (2024): The Use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for First-Failure Landslide Detection, *GeoHazards*, 5, 683–699.
- Mersha, T., Meten, M. (2020): GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia, *Geoenviron Disasters*, 7, 20.
- Micu, M., Vasile, M., Miron, F., Onaca, A., Sirbu, F. (2023); Skyline Drones Team. Deciphering Complex Morphology and Structural Connectivity of High-Magnitude Deep-Seated Landslides via Airborne Laser Scanning: A Case Study in the Vrancea Seismic Region, Romanian Carpathians, *Remote Sens.*, 15, 5286.
- Minervino Amodio, A., Corrado, G., Gallo, I. G., Gioia, D., Schiattarella, M., Vitale, V., Robustelli, G. (2024): Three-Dimensional Rockslide Analysis Using Unmanned Aerial Vehicle and LiDAR: The Castrocucco Case Study, Southern Italy, *Remote Sens.*, 16, 2235.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., et al. (2006): Global landslide and avalanche hotspots, *Landslides*, 3, 159–173.
- Noël, F., Nordang, S. F. (2025): Quantitative Rockfall Hazard Assessment of the Norwegian Road Network and Residences at an Indicative Level from Simulated Trajectories, *Remote Sens.*, 17, 819.
- Notti, D., Cina, A., Manzano, A., Colombo, A., Bendea, I. H., Mollo, P., Giordan, D. (2020): Low-Cost GNSS Solution for Continuous Monitoring of Slope Instabilities Applied to Madonna Del Sasso Sanctuary (NW Italy), *Sensors*, 20, 289.
- Pan, Y., Han, Y., Wang, L., Chen, J., Meng, H., Wang, G., Zhang, Z., Wang, S. (2019): 3D Reconstruction of Ground Crops Based on Airborne LiDAR Technology, *IFAC-PapersOnLine*, 52 (24), 35–40.
- Parizia, F., Roberti, G., Clague, J. J., Alberto, W., Giardino, M., Ward, B., Perotti, L. (2024): Landslide Deposit Erosion and Reworking Documented by Geomatic Surveys at Mount Meager, BC, Canada, *Remote Sens.*, 16, 1599.
- Pasternak, G., Pasternak, K., Koda, E., Ogrodnik, P. (2024): Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Monitoring the Geometric Changes of Reclaimed Landfills, *Sensors*, 24, 7247.
- Righini, G., Pancioli, V., Casagli, N. (2012): Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer Interferometry (PSI), *International Journal of Remote Sensing*, 33 (7), 2068–2096.
- Ritonga, R., Gomi, T., Sidle, R., Arata, Y., Noviandi, R. (2022): Small size but densely distributed: Insights from a LiDAR-based manual inventory of the recent earthquake-induced landslides case in Japan.
- Robles-Kelly, A., Huynh, C. P. (2012): *Imaging Spectroscopy for Scene Analysis*, Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, Germany.

- Şandric, I., Irimia, R., Ilinca, V., Chiţu, Z., Gheuca, I. (2023): Using UAV Time Series to Estimate Landslides' Kinematics Uncertainties, Case Study: Chirleşti Earthflow, Romania, *Remote Sens.*, 15, 2161.
- Shahabi, H., Rahimzad, M., Tavakkoli Piralilou, S., Ghorbanzadeh, O., Homayouni, S., Blaschke, T., Lim, S., Ghamisi, P. (2021): Unsupervised Deep Learning for Landslide Detection from Multispectral Sentinel-2 Imagery, *Remote Sens.*, 13, 4698.
- Stecz, W., Gromada, K. (2020): UAV Mission Planning with SAR Application, *Sensors*, 20, 1080.
- Sun, J., Yuan, G., Song, L., Zhang, H. (2024): Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review, *Drones*, 8, 30.
- Šegina, E., Peternel, T., Urbančič, T., Realini, E., Zupan, M., Jež, J., Caldera, S., Gatti, A., Tagliaferro, G., Consoli, A., et al. (2020): Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System, *Remote Sens.*, 12, 3375.
- Tan, Y., Li, G., Cai, R., Ma, J., Wang, M. (2022): Mapping and modelling defect data from UAV captured images to BIM for building external wall inspection, *Autom. Constr.*, 139, 104284.
- Teo, T. A., Fu, Y. J., Li, K. W., Weng, M. C., Yang, C. M. (2023): Comparison between image- and surface-derived displacement fields for landslide monitoring using an unmanned aerial vehicle, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116.
- Tsai, Y.-J., Syu, F.-T., Shieh, C.-L., Chung, C.-R., Lin, S.-S., Yin, H.-Y. (2021): Framework of Emergency Response System for Potential Large-Scale Landslide in Taiwan, *Water*, 13, 712.
- Tseng, C. M., Weei Lin, C., Stark, C. P., Kin Liu, J., Yuan Fei, L., Chung Hsieh, Y. (2013): Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation, *Earth Surf. Process. Landforms*, 38, 1587–1601.
- Tunncliffe, J., Howarth, J., Massey, Ch. (2024): Controls on fluvial sediment evacuation following an earthquake-triggered landslide: Observations from LiDAR time series, *Science advances*.
- Varol, N., Derin Cengiz, L. (2023): An Overview of Landslide Management: Scope, Difficulties, Limitations with Future Directions and Opportunities, *Afet Ve Risk Dergisi*, 6 (2), 609–621.
- Wubalem, A. (2021): Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia, *Geoenvirom Disasters*, 8, 1.
- Xi, K., Tao, P., Niu, Z., Zhu, X., Duan, Y., Ke, T., Zhang, Z. (2024): Three-Dimensional Deformation Estimation from Multi-Temporal Real-Scene Models for Landslide Monitoring, *Remote Sens.*, 16, 2705.
- Yang, B., Guo, Z., Wang, L., He, J., Xia, B., Vakily, S. (2023): Updated Global Navigation Satellite System Observations and Attention-Based Convolutional Neural Network–Long Short-Term Memory Network

Deep Learning Algorithms to Predict Landslide Spatiotemporal Displacement, *Remote Sens.*, 15, 4971.

Yang, K., Li, W., Yang, X., Zhang, L. (2022): Improving Landslide Recognition on UAV Data through Transfer Learning, *Appl. Sci.*, 12, 10121.

Zangana, I., Bell, R., Drăguț, L., Sirbu, F., Schrott, L. (2024): Semi-Automatic Mapping of Forest-Covered Landslides Using Geographic Object-Based Image Analysis, Jena, Germany.

Zhang, Z., Zhu, L. (2023): A Review on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing: Platforms, Sensors, Data Processing Methods, and Applications, *Drones*, 7, 398.

### Mrežne adrese

URL 1: USGS, <https://www.usgs.gov/faqs/what-landslide-and-what-causes-one>, (29. 12. 2023.).

URL 2: Scopus, <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plff&src=s&sid=02b10564c3e02e321c8cef9dfc36d570&sot=a&sdt=a&cluster=scosubjabbr%2c%22EART%22%2ct%2c%22ENGI%22%2ct%2c%22COMP%22%2ct%2c%22ENVI%22%2ct%2bscosubtype%2c%22ar%22%2ct%2c%22cp%22%2ct%2c%22cr%22%2ct%2c%22re%22%2ct%2bscoexactkeywords%2c%22Unmanned+Aerial+Vehicles+%28UAV%29%22%2ct%2c%22Landslides%22%2ct%2c%22Landslide%22%2ct%2bscolang%2c%22English%22%2ct%2bscofreetoread%2c%22all%22%2ct&sl=32&s=TITLE-ABSKEY%28uav+and+landslide%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>, (4. 1. 2024.).

URL 3: Scopus, <https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=2505ccb8877379b71a33d953b55c7b18&sot=a&sdt=a&cluster=scoexactkeywords%2c%22Unmanned+Aerial+Vehicles+%28UAV%29%22%2ct%2c%22Landslides%22%2ct%2c%22Landslide%22%2ct%2c%22UAS%22%2ct%2c%22Unmanned+Aerial+Systems%22%2ct%2c%22Unmanned+Aircraft+System%22%2ct&sl=40&s=TITLE-ABS-KEY%28uas+AND+UAV+AND+LANDSLIDE%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results0>, (28. 5. 2024.).

URL 4: University of Florida, <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE565>, (9. 3. 2024.).

URL 5: Geological Survey Ireland, <https://www.gsi.ie/en-ie/programmes-and-projects/geohazards/projects/Pages/Landslide-Susceptibility-Mapping.aspx>, (23. 3. 2024.).

# Overview of Achievements in the Use of Remote Sensing Material from UAV for Monitoring and Detecting the State of Landslides

*ABSTRACT.* Over the past two decades, unmanned aerial vehicles have become one of the basic methods of landslide observation. The paper provides an overview of the achievements of the current remote sensing materials from drones for landslide monitoring and detection. UAVs, with all their sensors and in combination with other observation methods, enable the monitoring and detection of landslide conditions. During observation, data on spatial changes and temporal dynamics, as well as the reactions of landslides and geological structures over time, are collected. The review paper describes the roles and methods of different types of unmanned aerial vehicles and RGB, LIDAR and SAR sensors. The role of UAVs in the possibilities of data collection, mapping and modeling is described. The data enable the monitoring of spatial evolution over time, which more closely depicts the dynamic processes of landslides. The role of observations and data in emergency scenarios and the possibilities of automatic and semi-automatic detection using machine learning algorithms are also described. The discussion describes the need to combine different observation methods in order to create 3D models of landslides as soon as possible after their occurrence and so that they can be monitored with spatial and temporal components.

*Keywords:* remote sensing, photogrammetry, landslide, UAV, GNSS.

*Primljeno / Received:* 2025-06-24

*Prihvaćeno / Accepted:* 2025-10-23