

IZMJERA SPELEOLOŠKIH OBJEKATA

Cave Surveying

SAŽETAK:

Čovjek je po svojoj prirodi znatiželjno biće s vrlo izraženim istraživačkim duhom. Da bi zadovoljio taj svoj istraživački poriv, nije potrebno ići na Mjesec ili udaljene planete. U našoj neposrednoj blizini postoje mnoga podzemna prostranstva koja čekaju da ih se otkrije. Glavni cilj speleoloških istraživanja je izmjera i prikaz speleoloških objekata. U radu su opisane metode izmjere speleoloških objekata koje su se koristile nekada kao i metode izmjere koje se koriste danas. Također je dan i pogled u budućnost, odnosno opisane su metode izmjere koje bi se mogle koristiti u skoroj budućnosti.

KLJUČNE RIJEČI: SPELEOLOGIJA, IZMJERA, ŠPILJA, JAMA, SLAM, LIDAR, FOTOGRAMetriJA

ABSTRACT:

A man is a curious creature with a very pronounced research spirit. To satisfy this research aspirations, it is not necessary to go to the Moon or distant planets. In our neighborhood there are many underground spaces waiting to be discovered. The main objective of speleological research is to survey and display speleological objects. The paper describes methods of surveying speleological objects that were used once as well as the survey methods used today. There is a look at the future, surveying methods that could be used in the near future are also described.

KEYWORDS: SPELEOLOGY, SURVEY, CAVE, PIT, SLAM, LIDAR, PHOTOGRAMMETRY

1. Uvod

Ljudi u Hrvatskoj često nisu svjesni činjenice da mogu istraživati potpuno neistražene krajeve u svom neposrednom susjedstvu. Potrebno je samo učlaniti se u neko od speleoloških društava i završiti speleološku školu, odnosno postati speleolog (slika 1). Na tisuće speleoloških objekata čeka da ih se otkrije.



Slika 1. Jedno od predavanja u speleološkoj školi u organizaciji Speleološkog odsjeka planinarskog društva Sveučilišta „Velebit“

Speleologija je skup aktivnosti kojima je cilj istraživanje špilja, jama, ponora, kaverni i drugih podzemnih krških fenomena (URL 1).

Špilja je speleološka pojava kojoj geomorfološka svojstva uvjetuju horizontalnije pružanje kanala (prema nekim definicijama ako je prosječni nagib kanala manji od 45°).

Jama je speleološka pojava s vertikalnijim pružanjem kanala (prosječni nagib kanala veći od 45°) (URL 2). U jame se speleolozi spuštaju pomoću užadi i sprava za spuštanje, odnosno penjanje.

Ponor je otvor ili sustav pukotina u propusnim stijenama u kojima se površinska tekućica gubi (ponire). Ovisno o naravi tekućica, postoje trajni i periodični ponori (URL 3).

Kaverne su podzemni krški oblici koji nemaju kontakt s površinom. Prema postanku kaverne se ne razlikuju od špilja i jama, osim što je ulaz u njih stvoren umjetnim putem odnosno djelovanjem čovjeka, najčešće tijekom izgradnje tunela ili istražnih radova u krškim područjima (URL 4).

Osim prirodnih postoje i umjetni speleološki objekti. Oni su nastali djelovanjem čovjeka. To su prvenst-

veno vojne utvrde, ali i razni prometni tuneli, rudnici, akvadukti i skloništa za sklanjanje od neprijatelja ili od prirodnih nepogoda.

U 21. stoljeću dolazi do značajnog razvoja speleološke djelatnosti te njezine uloge u kontekstu zaštite prirode i širokog spektra znanstvenih tema. Speleološki objekti postaju važan izvor informacija o prošlosti Zemlje, prepoznaje se njihova uloga u funkcioniranju ekosustava te dobivaju na značenju u edukativnim sadržajima (Rnjak i dr., 2017).

U speleološkim objektima nalaze se vrlo rijetke životinjske vrste. Zbog vrlo ograničenog područja rasprostranjenosti, gotovo 80 % podzemnih životinja su endemi Hrvatske (Ozimec i dr., 2009). Najpoznatiji stanovnici špilja su šišmiši i čovječje ribice, ali osim njih u špiljama obitavaju i pauzi, spužve, školjkaši, pijavice, skokuni, kornjaši i mnoga druga jedinstvena stvorenja (slika 2).



Slika 2. Životinjski svijet u speleološkim objektima

U špiljama postoje brojni arheološki i paleontološki nalazi (slika 3).



Slika 3. Arheološki i paleontološki nalazi u špiljama

2. Topografsko snimanje speleoloških objekata

Primarni cilj speleološkog istraživanja je topografsko snimanje špilje ili jame na temelju istraživanja te mjerenja dimenzija i pružanja špiljskih kanala.

Izmjera speleoloških objekata do današnjih dana uglavnom se temeljila na polarnoj metodi. U speleološkom objektu se razvija poligonski vlak pri čemu se za mjerenje horizontalnih kutova koristi kompas, za mjerenje visinskih kutova koristi se padomjer (klinometar) dok se za mjerenje duljina koristi vrpca ili laserski daljinomjer (slika 4).



Slika 4. Mjerni pribor koji se koristi za izmjeru speleoloških objekata

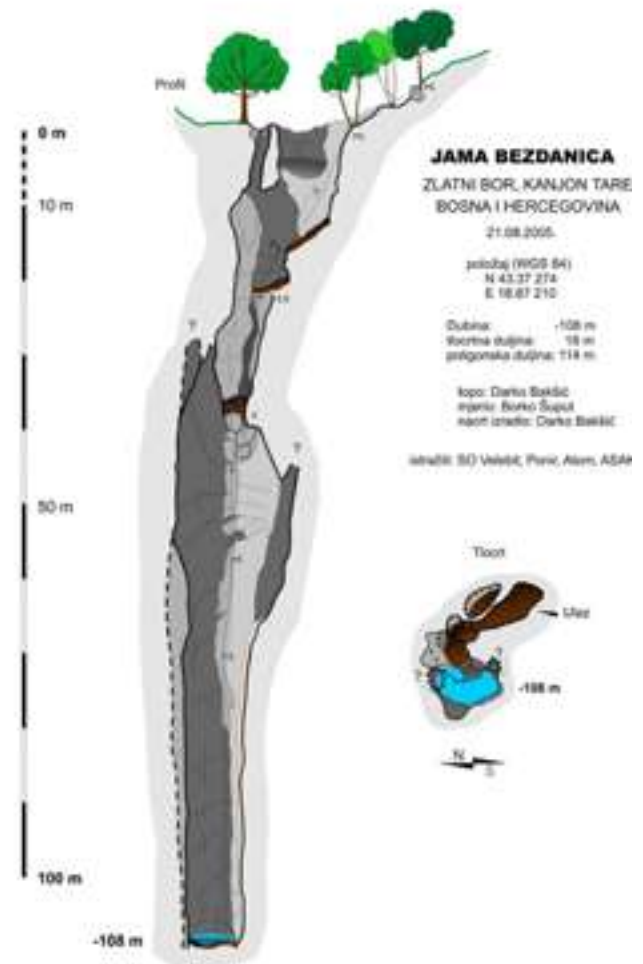
Topografskim snimanjem se trodimenzionalni speleološki objekt prikazuje u dvije dimenzije. Projekcijom u horizontalnu ravninu dobiva se tlocrt, dok se za visinski prikaz koristi razvijeni profil iz kojega se gleda duljina odnosno dubina speleološkog objekta.

Elementi poligonskih vlakova se zapisuju na plastičiranom milimetarskom papiru na kojem se direktno na terenu iscrtavaju tlocrt i profil. To su takozvane radne skice (slika 5).



Slika 5. Izrada radne skice

Te radne skice su se naknadno precrtavale tušem „u fino“ i tako su nastajali finalni tlocrt i profil nekog speleološkog objekta. Razvojem računalne tehnologije umjesto tuša i papira počeli su se koristiti računalni programi kao što su Compass (URL 5) ili Speleoliti (URL 6). U njih se unose elementi poligonskih vlakova i skenirani radni nacrti. Za naknadnu digitalnu grafičku obradu koriste se neki od programa kao što su CorelDRAW, Adobe Illustrator, Inkscape ili AutoCAD. U konačnici se dobije digitalni tlocrt i profil poput ovoga na slici 6.



Slika 6. Digitalni tlocrt i profil jame

Za razliku od ranije opisanih „klasičnih“ metoda, u današnje vrijeme se češće za izmjeru speleoloških objekata koriste laserski daljinomjeri koji u sebi imaju integrirani elektronski kompas i padomjer, te mogu pohranjivati podatke o kutovima i duljinama u internu memoriju i prenositi ih putem bluetooth tehnologije do mobitela ili tableta (slika 7). Najčešće se u tu svrhu koristi sustav DistoX (URL 7).



Slika 7. Sustav DistoX za digitalnu izmjeru speleoloških objekata

Prednost ovakve metode izmjere je smanjenje pogrešaka tijekom očitavanja, zapisivanja i prepisivanja podataka. Na taj način se, osim povećane točnosti, ubrzava rad na terenu kao i naknadna obrada podataka. Za terensku izmjeru koriste se programi PocketTopo (URL 8) ili TopoDroid (URL 9), a za naknadnu obradu Therion (URL 10).

Gledano s geodetskog aspekta za izmjeru speleoloških objekata nije potrebna velika točnost (preciznost mjerenih kutova je oko 1°), ali je potrebno uložiti puno vremena i truda kako bi se izmjerili i prikazali ti zahtjevni objekti. Mnogi detalji iz trodimenzionalne stvarnosti gube se projiciranjem u ravninu.

3. Trodimenzionalna izmjera špilja u Hrvatskoj

U geodeziji se u današnje vrijeme sve više koristi i trodimenzionalna izmjera, koja se prvenstveno bazira na fotogrametriji ili laserskom skeniranju. Fotogrametrija je trenutno jeftinija odnosno dostupnija metoda. Moguće je pomoću jeftinog fotoaparata i besplatnog softvera poput VisualSFM (URL 11) ili COLMAP (URL 12) dobiti 3D modele zadovoljavajuće kvalitete (Maljković, 2017). Upotrebom komercijalnih softvera poput Pix4D (URL 13), Agisoft PhotoScan (URL 14) ili 3Dsurvey (URL 15) mogu se dobiti još bolji rezultati (Tkalec, 2016). Tako je pomoću softvera 3Dsurvey dobiven jedan prilično kvalitetan 3D model špilje Vindije (URL 16). Primjena fotogrametrije u speleologiji može dati dobre rezultate,

ali je za njihovo postizanje potrebno uložiti puno vremena i truda i ti dobri rezultati ograničeni su uglavnom na manja i dobro osvijetljena područja.

U novije vrijeme pojavile su se prilično jeftine 360° kamere koje mogu unijeti neke promjene, ali i dalje ostaje problem s rasvjetom, odnosno pojavom sjena i rekonstrukcijom velikog broja fotografija.

Puno bolji senzor za izmjeru speleoloških objekata je laserski skener ili lidar. Razlog zbog kojega se laserski skeneri ne primjenjuju u većoj mjeri za izmjeru u speleologiji je njihova cijena koja je znatno veća od budžeta kojim raspolažu speleološka društva. Iz tog razloga lasersko skeniranje se u Hrvatskoj koristilo uglavnom za izmjeru manjih i turistički atraktivnih špilja poput Donje Cerovačke (Turković, 2016), Đulinog ponora (Miljković, 2016), utvrđene špilje Kuća (Kordić i dr., 2012) i špilje Golubinke (Majetić, 2015) (slike 8 i 9).



Slika 8. Mjerljivi 3D model špilje Golubinke



Slika 9. Mjerenje špilje 3D laserskim skenerom (lijevo), oblak točaka špilje (desno)

Veliki nedostatak pri izmjeri speleoloških objekata je nemogućnost korištenja GNSS tehnologije za precizno apsolutno pozicioniranje. Rješenje toga problema moguće je primjenom istovremenog određivanja pozicije i kartiranja, tj. SLAM tehnologije. Postoje komercijalna SLAM rješenja poput GeoSLAM (URL 17) (slika 10), LiBackpack (URL 18), PX-80 (URL 19), HERON (URL 20), Kaarta (URL 21), Hovermap (URL 22) i mnoga druga. Većinom se ova rješenja baziraju na Velodyneovim senzorima

VLP-16, HDL-32E, HDL-64E ili VLS-128 čije se cijene kreću od 4000 \$ do visokih 80 000 \$. Zanimljivo je napomenuti da postoje i besplatna Laser Odometry and Mapping (LOAM) rješenja sa Velodyneovim sensorima (URL 23).

Jeftini senzori poput solid-statelidara predstavljaju budućnost izmjere speleoloških objekata. Kompanije poput Innoviz (URL 24), Quanergy (URL 25), AEye (URL 26), LeddarTech (URL 27) i mnoge druge rade na prototipovima koji su sve manjih dimenzija i grade se tvornice koje će omogućiti njihovu masovnu proizvodnju i značajni pad cijena (Portner-Špehar 2019).



Slika 10. GeoSLAM pri mjerenju špilja

4. Zaključak

U današnje vrijeme sve se više špilja uređuje za posjetitelje i speleološki turizam uzima maha. Neki posjećuju špilje iz znatiželje ili kako bi vidjeli neke od znamenitosti, dok drugi bivaju pokrenuti svojim avanturističkim duhom. Boravak u speleološkim objektima u većini slučajeva je vrlo zdrav. U špiljama prevladava konstantna temperatura koja odgovara prosječnoj godišnjoj temperaturi na ulazu. Osim toga zrak u špiljama je obogaćen negativnim ionima te je vrlo čist, ima dosta vlage te nema alergena, stoga se preporučuje osobama s alergijama da što više borave u špiljama. Ovaj način korištenja speleoloških objekata je u vidu speleoterapije. Speleoterapija je „metoda koja se bazira na doziranom boravku pacijenata u posebno odabranim špiljama, a služi za tretman kroničnih i alergijskih respiratornih poremećaja“ (URL 28).

Istraživanje speleoloških objekata zadovoljava ljudsku potrebu za otkrivanjem novog i nepoznatog, osim toga boravak u prirodi i na čistom zraku djeluje opuštajuće. Budući da povjeravaju svoje živote jedan drugome, među istraživačima se razvija vrlo jaki osjećaj pripadnosti. Česta su druženja ispred

špilje uz vatru i muziku što u ljudima pobuđuje vrlo pozitivne emocije (slika 11). Ljudi su na sličan način živjeli milijunima godina prije i vjerojatno je u genima ostao zapisan takav način života.



Slika 11. Druženje uz vatru (lijevo) i istraživanje (desno)

Glavni cilj speleoloških istraživanja je izmjera i prikaz speleoloških objekata. Do sada je to bio vrlo zahtjevan zadatak, koji je iziskivao puno uloženog truda i vremena. U skoroj budućnosti se očekuje trodimenzionalna izmjera i prikaz koji će se bazirati prvenstveno na lidar sensorima i tehnologiji SLAM/LOAM za dobivanje geometrije dok će se za dobivanje teksture koristiti RGB ili termalne fotografije koje će se prikupljati pomoću širokokutnih ili 360° kamera. Na taj bi se način znatno smanjilo vrijeme prikupljanja podataka na terenu te bi se dobio puno točniji i detaljniji prikaz. Vrijeme kada će ta tehnologija postati dostupna speleološkim društvima vrlo je blizu.

LITERATURA

Kordić, B., Đapo, A., Pribičević, B., (2012), Application of Terrestrial Laser Scanning in the Preservation of Fortified Caves. Proceedings of the FIG Working Week 2012: Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. CheeHai Teo (ur.). Rim: FIG, 2012.

Majetić, I., (2015), 3D modeliranje i vizualizacija podzemne špilje iz oblaka točaka, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
Maljković, P., (2017), Izrada 3D modela Tehničkog muzeja u Zagrebu pomoću programa Visual SFM, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
http://bib.irb.hr/datoteka/988156.Izrada_3D_modela_Tehnickog_muzeja_u_Zagrebu_pomou_programa_VisualSFM_konacna_verzija.pdf.

Miljković, M., (2016), Lasersko skeniranje, 3D modeliranje i vizualizacija Đulinog ponora, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. https://bib.irb.hr/datoteka/914555.Lasersko_skeniranje_3D_modeliranje_i_vizualizacija_ulinog_ponora.pdf.

Ozimec R., Bedek J., Gottstein S., Jalžić B., Slapnik R., Štamol V., Bilandžija H., Dražina T., Kletečki E., Komerički A., Lukić M., Pavlek M., (2009), Crvena knjiga špiljske faune Hrvatske. Ministarstvo kulture, Zagreb: Državni zavod za zaštitu prirode, 371 str.

Portner-Špehar, T., (2019), Solid state lidar kao senzor za izmjeru, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, http://bib.irb.hr/datoteka/988990.Solid_state_lidar_kao_senzor_za_izmjeru.pdf.

Rnjak, G (ur.) i dr., (2017), Speleologija, PDS Velebit, HPS, HGSS, SD Velebit, Zagreb.

Tkalec, K., (2016), Geodetska izmjera i 3D prikaz špilje Vindije, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

https://bib.irb.hr/datoteka/988228.Geodetska_izmjera_i_3D_prikaz_pilje_Vindije.pdf.

Turković, D., (2016), Geodetska izmjera i prikaz turističkog dijela Donje Cerovačke, diplomski rad, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

http://bib.irb.hr/datoteka/914569.Geodetska_izmjera_i_prikaz_turistikog_dijela_Donje_Cerovake_pilje.pdf.

POPIS URL-ova

URL 1: HPS – Komisija za speleologiju, <https://www.hps.hr/specijalisticke-djelatnosti/speleologija/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 2: Hrvatski speleološki poslužitelj, <http://speleologija.hr/uvod-u-speleologiju>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 3: Ponor, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49409>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 4: Kaverne, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaverne>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 5: Compass Cave survey software, <http://www.fountainware.com/compass/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 6: Speleoliti, <http://www.speleo.net/speleoliti/index-en.html>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 7: DistoX, <https://paperless.bheeb.ch/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 8: PocketTopo, <https://paperless.bheeb.ch/Pocket-Topo13.html>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 9: TopoDroid, <https://sites.google.com/site/speleo-apps/home/topodroid>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 10: Therion, <https://therion.speleo.sk/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 11: VisualSFM, <http://ccwu.me/vsfm/>, pristupljeno (12. 3. 2019.).

URL 12: COLMAP, <https://colmap.github.io/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 13: Pix4D, <https://cloud.pix4d.com/store/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 14: AgisoftPhotoScan, <https://www.agisoft.com/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 15: 3Dsurvey, <http://www.3dsurvey.si/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 16: 3D model of Vindija Cave, <https://www.youtube.com/watch?v=qQgWbykgMbc>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 17: GeoSLAM, <https://geoslam.com/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 18: Green Valley LiBackpack, <https://greenvalleyintl.com/hardware/libackpack/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 19: Paracosm PX-80, <http://labs.paracosm.io/px-80-overview>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 20: GexcelHERON, <https://gexcel.it/en/solutions/heron-mobile-mapping>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 21: Kaarta, <http://www.kaarta.com/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 22: Emesent-Hovermap, <https://emesent.io/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 23: Laser Odometry and Mapping (Loam), https://github.com/laboshin/loam_velodyne, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 24: Innoviz, <https://innoviz.tech/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 25: Quanergy, <https://quanergy.com/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 26: AEye, <https://www.aeye.ai/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 27: LeddarTech, <https://leddartech.com/>, (pristupljeno 12. 3. 2019.).

URL 28: Paar, D., (n.d.): Speleoterapija – kroz špilju do zdravlja, www.speleologija.eu, (<http://speleologija.eu/znanost/speleoterapija/index.html>), (pristupljeno 12. 3. 2019.).

AUTORI | AUTHORS

Izv. prof. dr. sc. Almin ĐAPO, dipl. ing., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: adapo@geof.hr.

Doc. dr. sc. Loris REDOVNIKOVIC, dipl. ing., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: lredovnikovic@geof.hr.