

Analiza hudourniških in erozijskih procesov z uporabo posnetkov brezpilotnih letalnikov

Analysis of Torrential and Erosion Processes by the Use of the Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

Milan KOBAL¹

Izvleček:

Kobal, M.: Analiza hudourniških in erozijskih procesov z uporabo posnetkov brezpilotnih letalnikov; Gozdarski vestnik, 77/2019, št. 1. V slovenščini z izvlečkom v angleščini, cit. lit. 23. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Brepilotni letalniki postajajo vedno pogosteje uporabljena tehnologija pri spremljanju hudourniških in erozijskih procesov. V članku je podrobneje predstavljena uporabnost brezpilotnih letalnikov za spremljanje hudourniških (območje Suhega potoka v Zadnji Trenti) in erozijskih procesov (skalni podor nad vasjo Belca). Snemanje smo izvedli z letalnikoma DJI Phantom 3 Pro ter DJI Mavic Air, talne kontrolne točke zajeli s sprejemnikom GNSS Leica Zeno 20 & Leica GG04 Smart Antenna, oblake točk pa izdelali v programu Pix4Dmapper. Točnost georeferenciranja oblakov točk je manjša od 0,016 m (RMSE). Nadmorska višina struge Suhega Potoka v Zadnji Trenti se je glede na leto 2014 zvišala na površini 1,01 ha (v povprečju za 0,31 m) ter glede na leto 2014 znižala na površini 1,31 ha (v povprečju za 0,39 m). Na podlagi razlike digitalnega modela reliefa pred podorom (DMR_0) ter po podoru (DMR_1) sklepamo, da se je na območju skalnega podora Belca skupno porušilo 27068,0 m³ skalnega materiala, in sicer na prvem mestu 18144 m³ in na drugem 8924,2 m³. Upoštevali smo le območja, kjer se je nadmorska višina znižala za več kot 0,1 m. Uporaba brezpilotnih letalnikov tako v raziskovalnem delu na področju proučevanja hudourniških in erozijskih procesov kot tudi pri ukrepanju in reševanju v primeru različnih naravnih nesreč postaja vedno bolj množična.

Ključne besede: brezpilotni letalniki, slikovno ujemanje, digitalni model reliefa, hudourniki, erozija

Abstract:

Kobal, M.: Analysis of Torrential and Erosion Processes by the Use of the Unmanned Aerial Vehicles UAV; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 77/2019, vol 1. In Slovenian, abstract in English, lit. quot. 23. Proofreading of the English text Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

The unmanned aerial vehicles technology is the technology that is becoming increasingly more important in monitoring torrential and erosion processes. Therefore, this article presents the use of unmanned aerial vehicles for monitoring both torrent flows (the area of Suhi potok torrent in Zadnja Trenta) and erosion processes (rockfall above the village Belca). Both study sites were surveyed using DJI Phantom 3 Pro and DJI Mavic Air, while GNSS receiver Leica Zeno 20 and Leica GG04 Smart Antenna were used for determining the locations of ground control points, and Pix4DMapper program was used for the point clouds extraction. The accuracy of the georeferenced point clouds was lower than 0.016 m (RMSE). The river-bed elevation of the Suhi potok torrent has increased by an area of 1.01 ha (on average by 0.31 m) and decreased by an area of 1.31 ha (on average by 0.39m) between years 2014 and 2018. Comparing the digital terrain models before (DMR_0) and after (DMR_1) the Belca rockfall, it can be concluded that 27068 m³ rock material was detached in the rockfall event; 18144 m³ in the first observed area, and 8924 m³ in the second observed area. We considered only areas where the change in elevation was larger than 0.1 m. The use of unmanned aerial vehicles is becoming more common both in studying torrential and erosion processes, as well as in planning protection measures and rescuing process in case of various natural hazards.

Key words: unmanned aerial vehicles, image matching, digital terrain model, torrent, erosion

¹ Doc. dr. M. K., Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. milan.kobal@bf.uni-lj.si

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Brezpilotni letalniki (imenovani tudi zrakoplovi, droni, kopterji, angl. *Unmanned Aerial Vehicle – UAV*) postajajo vedno dostopnejši, zmogljivost (tudi osebne) računalniške opreme za obdelavo zračnih posnetkov oz. slikovno ujemanje (angl. *Image Matching*) pa je vedno večja (Bitenc, 2014; Colomina in Molina, 2014). Kot taki so postali standardno orodje za zajem prostorskih podatkov, saj omogočajo zajem podatkov visokih prostorskih ločljivosti. Zaradi širokega nabora programskih orodij za obdelavo zajetih posnetkov je poenostavljeno izdelovanje 3D modelov reliefa, ortofoto posnetkov (Sotier in sod., 2015), različnih vegetacijskih indeksov (npr. NDVI) in kart temperatur površja. Tako ne preseneča dejstvo, da se uporaba teh tehnologij hitro uveljavlja med različnimi strokami (npr. geodezija, kmetijstvo, geologija), med drugim tudi v gozdarstvu (npr. Kobal, 2015).

V tujini se je uporaba brezpilotnih letalnikov v primeru naravnih nesreč zelo razširila, mogoče je zaslediti številne pozitivne primere proučavanja hudourniških in erozijskih procesov, kot so drobirski tokovi (npr. Wen in sod., 2011), snežni

plazovi (npr. Silvagni in sod., 2016), zemeljski plazovi (npr. Niethammer in sod., 2012; Peternel in sod., 2017), hudourniška erozija (npr. Flener in sod., 2013) in skalni podori (npr. Kobal, 2015). Številni od omenjenih procesov so značilni zlasti za visokogorska območja (Alpe), kar pomeni, da so tovrstna območja oddaljena, težko dostopna in tudi nevarna (Eisenbeiß, 2009; Sotier in sod., 2015).

Uporabo brezpilotnih letalnikov v primeru ukrepanja ob naravnih nesrečah lahko razdelimo v tri skupine (Giordan in sod., 2017): a) opazovanje reliefa pred dogodkom in po njem, b) ukrepanje v primeru izrednih dogodkov (reševanje, evakuacija) ter c) ocenjevanje povzročene škode po naravnem dogodku. Pri tem brezpilotni letalniki nudijo nove možnosti kartiranja na lokalnih in regionalnih ravneh, s čimer se v primerjavi s terenskimi metodami pospeši zajem podatkov, zmanjša finančni vložek snemanja in izboljša varnost pri zajemu terenskih podatkov. Namen prispevka je prikazati možnosti in omejitve opazovanja reliefa pred naravnim dogodkom in po njem oz. spremljanje hudourniških in erozijskih procesov z uporabo slikovnega ujemanja posnetkov brezpilotnih letalnikov. Kot primer spremljanja hudourniških procesov smo izbrali



Slika 1: Območje Suhega potoka v Zadnji Trenti (vir: Geodetska uprava RS, 2016)

Figure 1: Area of Suhi potok torrent in Zadnja Trenta (Source: The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, 2016)

območje Suhega potoka v Zadnji Trenti (Slika 1), kot primer erozijskih procesov pa skalni podor nad vasjo Belca (Slika 2), ki je nastal v začetku februarja 2018.

2 METODE

2 METHODS

2.1 Opis objektov raziskave

2.1 Description of research objects

2.1.1 Suhi potok v Zadnji Trenti

2.1.1 Suhi potok torrent in Zadnja Trenta

Zadnja Trenta je zgornji del ledeniške doline Trente, ki se razprostira od Koče pri izviru Soče do zatrepa pod pobočji Jalovca, Velikega, Srednjega in Zadnjega Pelca, pobočji Velike Dnine, Srebrnjaka, Trentskega Pelca, Plešivca in Ušje. Po dnu doline je občasno prisoten hudournik Suhi potok, ki se izliva v reko Sočo (Trošt, 2010). V zgornjem delu potok teče po širokem prodišču, del katerega je bil izbran kot testni objekt za izdelavo te raziskave in predstavlja zaplavec zaplavne pregrade.

2.1.2 Skalni podor Belca

2.1.2 Belca rockfall

Nad naseljem Belca se je 4. 2. 2018 sprožil skalni podor, katerega material se je odložil po pobočju nad hudournikom Belca, samo strugo pa je doseglo le nekaj skalnih gmot. Območje je podorno zelo aktivno, saj so se že sprožali tovrstni skalni podori. Leta 1961 je plaz zasul zgrajeno gozdno cesto, ki jo poleti množično uporabljajo kolesarji, kmetje po njej vodijo živino v planine, predvsem pa je nujno potrebna prometnica za spravilo lesa. Gozdovi na tem območju so v lasti zasebnikov (Ahačič, 2018).

2.2 Zajem posnetkov in snemanje talnih kontrolnih točk

2.2 Acquisition of recordings and recording of ground control points

Na območju Suhega potoka v Zadnji Trenti (Slika 1) smo snemali 13. 5. 2018. Zajem multispektralnih posnetkov (kamera: Sequoia_4.0_1280x960) smo opravili z letalnikom DJI Phantom 3 Pro, in sicer z višine 30 m. Skupno smo zajeli 5128 posnetkov, leteli



Slika 2: Območje skalnega podora Belca (vir: Geodetska uprava RS, 2016)

Figure 2: Area of Belca rockfall (Source: The Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, 2016)

pa smo prostoročno (brez načrtovanja leta). Nad naseljem Belca (Slika 2) smo snemali 6. 5. 2018. Zajem posnetkov RGB (kamera: FC2103_4.5_4056x3040) smo opravili z letalnikom DJI Mavic Air z višine 80 m. Skupno smo zajeli 292 posnetkov, ki so jih prav tako zajeli med prostoročnim letom.

V obeh primerih smo talne kontrolne točke (GCP) posneli s sprejemnikom GNSS Leica Zeno 20 & Leica GG04 Smart Antenna (Preglednici 1 in 2). Leta sta bila najavljena in opravljena skladno z

veljavno zakonodajo. Od Zavoda Triglavski Narodni Park imamo soglasje za znanstvene raziskave.

2.3 Izdelava 3D oblaka točk

2.3 Generation of 3D point cloud

Oblake točk smo iz posnetkov izdelali v programu Pix4Dmapper. Za Suhi potok v Zadnji Trenti smo iz posnetkov zelenega spektra svetlobe izdelali oblak točk z gostoto 640 točk/m³ (Slika 3) ter rastrsko karto vegetacijskega indeksa NDVI (angl.

Preglednica 1: Točnost georeferenciranja oblaka točk glede na posamezne talne kontrolne točke – Suhi potok v Zadnji Trenti

Table 1: Accuracy of the georeferenced point cloud with regard to the individual ground control points – Suhi potok torrent in Zadnja Trenta

Talna kontrolna točka	x [m]	y [m]	z [m]
1 (3D)	0,005	0,000	0,005
2 (3D)	-0,022	0,011	-0,022
3 (3D)	-0,024	-0,016	-0,001
4 (3D)	0,004	-0,009	0,003
5 (3D)	0,026	-0,021	0,048
6 (3D)	0,013	0,013	-0,037
7 (3D)	0,013	-0,012	0,000
8 (3D)	-0,006	-0,014	0,023
9 (3D)	0,006	0,021	0,007
10 (3D)	-0,011	0,029	0,018
11 (3D)	-0,002	-0,014	0,005
12 (3D)	0,005	-0,008	0,019
13 (3D)	-0,007	0,014	-0,010
14 (3D)	0,014	0,013	-0,025
15 (3D)	0,005	0,000	0,005
16 (3D)	-0,022	0,011	-0,022
17 (3D)	-0,024	-0,016	-0,001
Povprečje [m]	0,000	0,000	0,002
RMSE [m]	0,013	0,015	0,020

Preglednica 2: Točnost georeferenciranja oblaka točk glede na posamezne talne kontrolne točke – skalni podor Belca

Table 2: Accuracy of the georeferenced point cloud with regard to individual ground control points – Belca rockfall

Talna kontrolna točka	x [m]	y [m]	z [m]
1 (3D)	-0.001	-0.011	-0.018
2 (3D)	0.007	0.027	-0.029
3 (3D)	-0.002	0.004	-0.018
4 (3D)	-0.003	0.020	0.023
5 (3D)	-0.001	-0.037	0.004
Povprečje [m]	0.000	0.0003	-0.000
RMSE [m]	0.004	0.023	0.020

Normalized difference vegetation index) z velikostjo slikovne celice 2,35 cm. Točnost georeferenciranja je znašala 0,016 m (RMSE) – točnost posameznih talnih kontrolnih točk je podrobneje prikazana v Preglednici 1.

Za skalni podor Belca smo iz posnetkov RGB izdelali oblak točk z gostoto 1591 točk/m³ ter pravi ortofoto TOF (angl. *True Orthophoto*) z velikostjo slikovne celice 2,25 cm. Točnost georeferenciranja je znašala 0,015 m (RMSE) – točnost posameznih talnih kontrolnih točk je podrobneje prikazana v Preglednici 2.

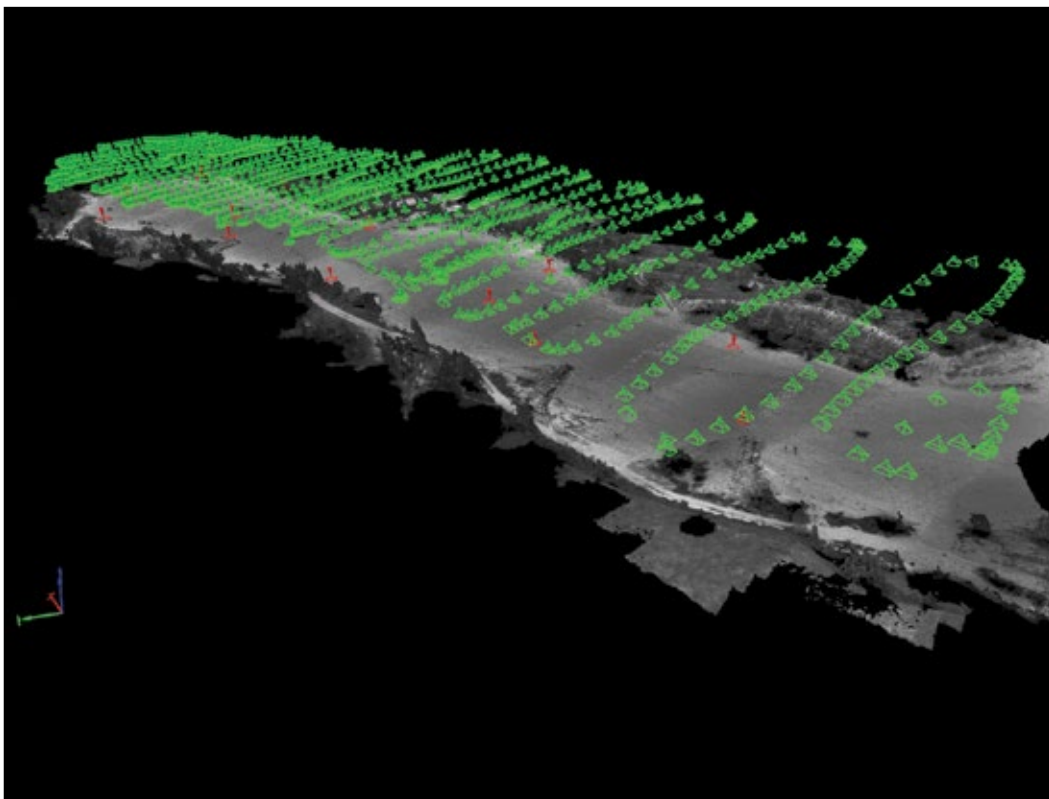
2.4 Izdelava digitalnega modela reliefa in izračun razlik

2.4 Generation of the digital relief model and calculation of differences

Pred začetkom obdelave smo oblake točk v programu CloudCompare poravnali na isto ravnino z orodjem *Cloud Registration*. Kot referenčni oblak smo izbrali georeferenciran in klasificiran oblak točk (GKOT) iz leta 2014, ki izvira iz podatkov laserskega skeniranja površja Slovenije (Bric in sod., 2015) in je prosto dostopen na spletnem portalu eVode (<http://www.evode.gov.si/>). Oba oblaka točk iz leta 2018 smo premaknili, in sicer smo za registracijo uporabili algoritem ICP (angl.

Iterative Closest Point - ICP), kjer smo omogočili zavračanje oddaljenih korespondenčnih parov točk. To pomeni, da smo pri registraciji obeh oblakov točk zavrnilo tiste pare korespondenčnih točk, ki so zelo oddaljene. Algoritem ICP postopoma najde najboljšo mogočo poravnavo med dvema oblakoma točk tako, da iterativno preverja oceno transformacije med dvema oblakoma. Postopek se ponavlja, dokler oblaka ne dosežeta dovolj dobre poravnave oz. dokler ni doseženo nastavljeno število ponovitev. V našem primeru smo postopek ponovili 1000-krat.

Ko sta bila oblaka točk iz leta 2018 poravnana na isto ravnino kot oblaka točk iz leta 2014, smo v programu ArcMap 10.5 izdelali digitalne modele reliefa z velikostjo slikovne celice 0,5 m. Za informacijo o začetnem stanju reliefa smo uporabili digitalni model reliefa (DMR_0), ki smo ga izdelali iz podatkov laserskega skeniranja površja Slovenije iz leta 2014. Za stanje po dogodku oz. končnem stanju reliefa pa smo uporabili digitalni model reliefa (DMR_1), ki smo ga izdelali iz slikovnega ujemanja posnetkov brezpilotnih letalnikov iz leta 2018. Količino porušenega materiala oz. območje nanašanja ter odnašanja smo izračunali kot razliko v reliefu pred (DMR_0) ter reliefu po (DMR_1) dogodku.



Slika 3: Oblak točk območja Suhega potoka v Zadnji Trenti. Z zelenimi kvadrati so označena mesta posnetih fotografij, rdeči stožci pa predstavljajo talne kontrolne točke.

Figure 3: Point cloud of the Suhi potok area in Zadnja Trenta. The locations of the recorded photos are marked with green squares, red cones represent ground control points.

3 REZULTATI

3 RESULTS

3.1 Geomorfologija struge suhega potoka v zadnji trenti

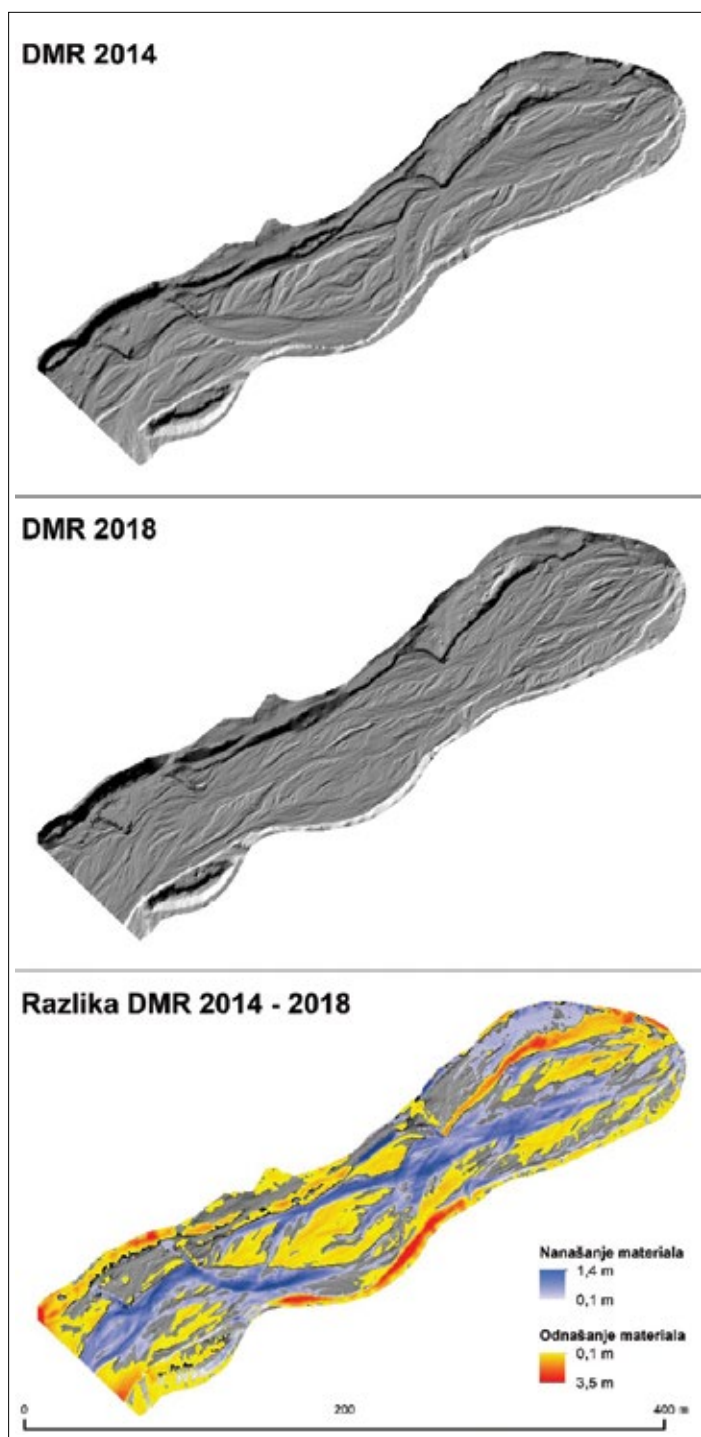
3.1 Geomorphology of the suhi potok riverbed in zadnja trenta

Območje analize spremembe geomorfologije struge Suhega potoka v Zadnji Trenti obsega 3,54 ha (Slika 4). Nadmorska višina struge se je glede na leto 2014 zvišala (nanašanje materiala) na površini 1,01 ha, in sicer v povprečju za 0,31 m, kar je 3345 m³ materiala. Nadmorska višina struge se je glede na leto 2014 znižala (odnašanje materiala) na površini 1,31 ha, in sicer v povprečju za 0,39 m, kar je 5067 m³ materiala. Upoštevali smo le območja, kjer se je nadmorska višina znižala oziroma zvišala za več kot 0,1 m.

3.2 Skalni podor belca

3.2 Belca rockfall

Na podlagi razlike digitalnega modela reliefa pred podorom (DMR_0) ter po njem (DMR_1) lahko sklepamo, da je na območju skalnega podora Belca porušitev nastala na dveh mestih. Velikost prvega mesta odloma znaša 1077 m², velikost drugega mesta odloma pa 745 m². Skupno se je porušilo 27068 m³ skalnega materiala, in sicer na prvem mestu 18144 m³, na drugem pa 8924 m³. Na prvem mestu odloma se je v povprečju nadmorska višina znižala za 16,8 m (največ za 42,7 m), na drugem pa v povprečju za 12,0 m (največ za 31,2 m). Upoštevali smo le območja, kjer se je nadmorska višina znižala za več kot 0,1 m (Slika 5).



Slika 4: Sprememba struge Suhega potoka v Zadnji Trenti med letoma 2014 in 2018. Zgoraj senčen relief iz leta 2014, v sredini senčen relief iz leta 2018 ter razlika v modelu reliefa.

Figure 4: Modification of Suhi potok river-bed in Zadnja Trenta between the years 2014 and 2018. Above a shaded relief of 2014, in the middle a shaded relief of 2018 and the difference in the relief model.

4 RAZPRAVA

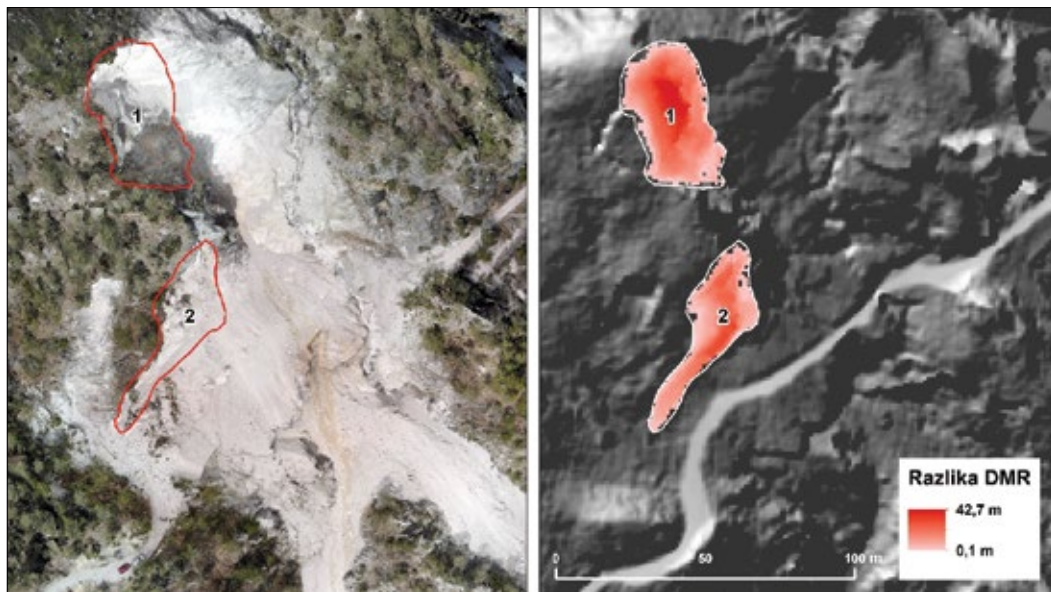
4 DISCUSSION

Ko govorimo o spremljanju hudourniških in erozijskih procesov z uporabo slikovnega ujemanja posnetkov brezпилotnih letalnikov, govorimo o več zaporednih fazah dela, ki jih je treba opraviti, preden imamo na voljo podatke, na podlagi katerih lahko za določeno območje (z neko verjetnostjo) sklepamo na intenzivnost hudourniških in erozijskih procesov. Najprej potrebujemo a) brezпилotni letalnik, na katerega je b) nameščen senzor za zajem posnetkov (npr. kamera RGB, multispektralna kamera). Praviloma sledi zajem talnih kontrolnih točk na terenu, za kar potrebujemo c) natančen sprejemnik GNSS (natančnost 1 cm). Natančen sprejemnik GNSS je pri dražjih letalnikih lahko že vgrajen v sam letalnik zato zajem kontrolnih talnih točk v tem primeru ni potreben. Ko imamo na voljo posnetke, sledi njihova obdelava v programskem orodju za slikovno ujemanje (npr. Pix4Dmapper, AgiSoft, 3D Survey), kjer kot glavni rezultat procesiranja pridobimo 3D oblak točk, pravi ortofoto (TOF) ter digitalni model reliefa (DMR). Ker ta programska orodja ne omogočajo algebre na rastrskih kartah,

potrebujemo še e) okolje GIS (npr. ArcGIS, QGIS, R), v katerem rastrske karte obdelamo in izračunamo, npr. spremembe rečne struge v določenem časovnem obdobju.

Uporaba brezпилotnih letalnikov tako v raziskovalnem delu na področju preučevanja hudourniških in erozijskih procesov kot tudi pri ukrepanju in reševanju v primeru različnih naravnih nesreč postaja vedno bolj množična. Zaradi vsesplošnega razvoja na tem področju (npr. lažji materiali, bolj vzdržljive baterije, zmogljivejši mikroprocesorji v samih letalnikih) se njihova uporaba širi iz lokalne ravni na regionalno, in trenutno je v Sloveniji največja omejitev zakonska ureditev letenja z brezпилotnimi zrakoplovi (Uradni list RS, št. 52/16), ki preprečuje letenje, če pilot letalnika ne vidi (t.i. letenje izven vidnega polja).

Izpostaviti velja uporabo brezпилotnih letalnikov v primeru težko dostopnih območij oziroma na območjih, kjer je bila dostopna infrastruktura poškodovana (Danzi in sod., 2012; Kobal, 2015; Giordan in sod., 2015; Car in sod., 2016; Buil in sod., 2016; Gomez in Purdie, 2016; Saroglou in sod., 2017). Z njihovo uporabo je mogoče nadgraditi ali celo popolnoma nadomestiti tradicionalne metode kartiranja območja naravnih nesreč (npr.



Slika 5: Območje skalnega podora Belca s prikazanima mestoma odloma (levo) ter prikazano razliko v DMR (desno)

Figure 5: Area of the Belca rockfall with shown detachment location (left) and shown difference in DMR (right).

skalnih podorov, zemeljskih plazov), računanja prečnih profilov nestabilnih pobočij in drugih parametrov, ki so potrebni za analizo nevarnosti nastanka skalnega podora (Car in sod., 2016).

Pomembna prednost pri uporabi brezpilotnih letalnikov v hudourništvu je zagotovo cenovna ugodnost. Po prvotnem nakupu brezpilotnega letalnika, dodatnih senzorjev, natančnega sprejemnika GNSS (praviloma najdražja investicija) ter programske opreme so stroški zajema posnetkov v primerjavi s klasičnimi snemanji (helikopterska in letalska snemanja) znatno manjši, saj je strošek le operater na terenu. Posledično lahko ciljno območje posnamemo večkrat (periodično snemanje) in tako v krajših časovnih razmakih spremljamo razvoj pobočnega procesa (Kobal, 2015).

Videoposnetki visoke prostorske in časovne ločljivosti (npr. 4K, 60 fps) in fotografije območij nevarnosti proženja ter potencialno ogroženih območij so na voljo takoj (v realnem času) brez dodatne obdelave posnetkov in so tako koristni kot takojšnja podpora pri odločanju in oblikovanju evakuacijskih in sanacijskih načrtov (Danzi in sod., 2012; Giordan in sod., 2015; Car in sod., 2016; Buil in sod., 2016; Gomez in Purdie, 2016; Saroglou in sod., 2017).

Kot največja omejitev uporabe brezpilotnih letalnikov je zagotovo njihova nosilnost. Tako smo lahko omejeni pri izbiri želenega senzorja (npr. lidar, visokofrekvenčne kamere), ki bi ga želeli namestiti na brezpilotni letalnik, vendar se tudi na tem področju že pojavljajo nove rešitve, npr. YellowScan Surveyor Ultra, ki tehta 1,7 kg (skupaj z baterijo) in omogoča zajem 600.000 odbojev na sekundo (pri letenju 50 m nad terenom s hitrostjo letenja 8 m/s znaša gostota 100 točk/m²) (YellowScan, 2018).

Uporaba brezpilotnih letalnikov je omejena tudi v ekstremnih vremenskih razmerah. Medtem ko zaradi hitrosti gibanja, ki jo lahko brezpilotnih letalniki dosežejo (npr. DJI Mavic Air 68,4 km/h), je šibak veter manjša ovira pri snemanju nepremičnih objektov (vendar pa so zaradi nagibanja problematična drevesa), je nemogoče snemati v meglenem in deževnem vremenu. V odmaknjenih in zaprtih območjih (kar so pogosto predeli hudourniških in erozijskih procesov) se lahko soočamo še s težavami slabega signala GNSS,

težavnega postavljanja talnih kontrolnih točk in določanja primernih območij za pristajanje oziroma vzletanje (Danzi in sod., 2012; Kobal, 2015; Giordan in sod., 2015; Sotier in sod., 2015; Car in sod., 2016; Buil in sod., 2016; Gomez in Purdie, 2016; Saroglou in sod., 2017).

Glede na izkušnje, ki jih imamo pri spremljanju hudourniških in erozijskih procesov s pomočjo brezpilotnih letalnikov, lahko trdimo, da se bo uporaba brezpilotnih letalnikov, tako v kombinaciji z različnimi pasivnimi (npr. kamere RGB, multisprtalne kamere, termo kamere) kot tudi aktivnimi senzorji (npr. lidar), samo še stopnjevala. To pričajo številne raziskave v tujini (npr. Wen in sod., 2011; Silvagni in sod., 2016; Niethammer in sod., 2012; Flener in sod., 2013), žal pa so tovrstne raziskave v Sloveniji redke (npr. Kobal, 2015; Peternel in sod., 2017).

5 POVZETEK

Brepilotni letalniki postajajo vedno dostopnejši, zmogljivost (tudi osebne) računalniške opreme za obdelavo posnetkov oz. slikovno ujemanje pa je vedno večja. Kot taki so postali standardno orodje za zajem prostorskih podatkov, saj omogočajo zajem podatkov velikih prostorskih ločljivosti. V tujini se je uporaba brezpilotnih letalnikov v primeru naravnih nesreč zelo razširila, mogoče je zaslediti številne pozitivne primere proučevanja hudourniških in erozijskih procesov, kot so drobirski tokovi, snežni in zemeljski plazovi, hudourniki in skalni podori.

V primeru naravnih nesreč lahko uporabo brezpilotnih letalnikov razdelimo v tri skupine: a) opazovanje reliefa pred dogodku in po njem, b) ukrepanje v primeru izrednih dogodkov (reševanje, evakuacija) ter c) ocenjevanje povzročene škode zaradi naravnega dogodka. Pri tem brezpilotni letalniki nudijo nove možnosti kartiranja na lokalnih in regionalni ravni, s čimer se v primerjavi s terenskimi metodami pospeši zajem podatkov, zmanjša finančni vložek snemanja, izboljša pa se tudi varnost pri zajemu terenskih podatkov. Namen prispevka je prikazati možnosti in omejitve opazovanja reliefa pred dogodkom in po njem oz. spremljanje hudourniških in erozijskih procesov z uporabo slikovnega ujemanja posnetkov brezpilotnih letalnikov.

Na območju Suhlega potoka v Zadnji Trenti smo snemanje opravili z multispektralno kamero (Sequoia_4.0_1280x960), nameščeno na letalniku DJI Phantom 3 Pro. Nad naseljem Belca smo snemanje opravili s kamero FC2103_4.5_4056x3040, ki je vgrajena v letalniku DJI Mavic Air. Talne kontrolne točke smo posneli s sprejemnikom GNSS Leica Zeno 20 & Leica GG04 Smart Antenna. Leta sta bila najavljena in opravljena skladno z veljavno zakonodajo, prav tako smo od Zavoda Triglavski Narodni Park če to ni v uradnem imenu, je z malo začetnico pridobili soglasje za znanstvene raziskave. Oblake točk smo iz posnetkov izdelali v programu Pi x 4Dmapper. Za Suhi potok v Zadnji Trenti smo iz posnetkov zelenega spektra svetlobe izdelali oblak točk z gostoto 640 točk/m³. Točnost georeferenciranja je znašala 0,016 m (RMSE). Za skalni podor Belca smo iz posnetkov RGB izdelali oblak točk z gostoto 1591 točk/m³. Točnost georeferenciranja je znašala 0,015 m (RMSE). Oblake točk smo pred začetkom obdelave v programu CloudCompare poravnali na isto ravnino z orodjem *Cloud Registration*. Kot referenčni oblak smo izbrali georeferenciran in klasificiran oblak točk (GKOT) iz leta 2014, ki izvira iz podatkov laserskega skeniranja površja Slovenije. Oblak točk iz leta 2018 smo ustrezno premaknili, in sicer smo za registracijo uporabili algoritem ICP (angl. *Iterative Closest Point* - ICP), kjer smo omogočili zavračanje oddaljenih korepondenčnih parov točk. V programu ArcMap 10.5 smo izdelali digitalne modele reliefa z velikostjo slikovne celice 0,5 m. Za informacijo o začetnem stanju reliefa smo uporabili digitalni model reliefa (DMR_0), ki smo ga izdelali iz podatkov laserskega skeniranja površja Slovenije iz leta 2014. Za stanje po dogodku oz. končnem stanju reliefa pa smo uporabili digitalni model reliefa (DMR_1), ki smo ga izdelali iz slikovnega ujemanja posnetkov brezpilotnih letalnikov iz leta 2018. Količino porušenega materiala oz. območje nanašanja ter odnašanja smo izračunali kot razliko v reliefu pred (DMR_0) ter reliefu po (DMR_1) dogodku.

Območje analize spremembe geomorfologije struge Suhlega potoka v Zadnji Trenti obsega 3,54 ha. Nadmorska višina struge se je glede na leto 2014 zvišala (nanašanje materiala) na površini 1,01 ha, in sicer v povprečju za 0,31 m. Nadmorska

višina struge se je glede na leto 2014 znižala na površini 1,31 ha, in sicer v povprečju za 0,39 m. Upoštevali smo le območja, kjer se je nadmorska višina znižala oziroma zvišala za več kot 0,1 m.

Na podlagi razlike digitalnega modela reliefa pred podorom (DMR_0) ter po njem (DMR_1) lahko sklepamo, da je na območju skalnega podora Belca porušitev nastala na dveh mestih. Velikost prvega mesta odloma znaša 1077 m², velikost drugega pa 745 m². Skupno se je porušilo 27068,0 m³ skalnega materiala. Upoštevali smo le območja, kjer se je nadmorska višina znižala za več kot 0,1 m.

Uporaba brezpilotnih letalnikov tako v raziskovalnem delu na področju proučevanja hudourniških in erozijskih procesov kot tudi pri ukrepanju in reševanju v primeru različnih naravnih nesreč postaja vedno bolj množična. Izpostaviti velja uporabo brezpilotnih letalnikov v primeru težko dostopnih območij oziroma na območjih, kjer je bila dostopna infrastruktura poškodovana. Pomembna prednost uporabe brezpilotnih letalnikov v hudourništvu je zagotovo cenovna ugodnost. Po prvotnem nakupu brezpilotnega letalnika, dodatnih senzorjev, natančnega sprejemnika GNSS (praviloma najdražja investicija) ter programske opreme so stroški zajema posnetkov v primerjavi s klasičnimi snemanji (helikopterska in letalska snemanja) znatno manjši, saj je strošek le operater na terenu. Videoposnetki velike prostorske in časovne ločljivosti ter fotografije območij nevarnosti proženja in potencialno ogroženih območij so na voljo takoj (v realnem času) brez dodatne obdelave posnetkov. Tako so koristni kot takojšnja podpora pri odločanju in oblikovanju evakuacijskih ter sanacijskih načrtov.

Kot največja omejitev uporabe brezpilotnih letalnikov je zagotovo njihova nosilnost. Tako smo lahko omejeni pri izbiri zelenega senzorja (npr. lidar, visokofrekvenčne kamere), ki bi ga želeli namestiti na brezpilotni letalnik. Uporaba brezpilotnih letalnikov je omejena tudi v ekstremnih vremenskih razmerah. V odmaknjenih in zaprtih območjih (kar predeli hudourniških in erozijskih procesov pogosto so) se lahko soočamo še s težavami slabega signala GNSS, težavnega postavljanja talnih kontrolnih točk in določanja primernih območij za pristajanje oziroma vzletanje.

5 SUMMARY

Unmanned aerial vehicles are becoming more and more accessible as the capacity of computer equipment (including personal computers) that is needed for processing aerial images and obtaining spatial data is increasing and since they can provide high resolution data. In many countries the use of unmanned aerial vehicles in the events of natural hazards has widened and it is used for studying several torrential and erosion processes, such as debris flows, avalanches and landslides, torrential flows and rockfalls.

The use of unmanned aerial vehicles in the events of natural hazards can be divided into three groups: a) the observation of surface before and after the event, b) the use in emergency events (rescuing, evacuation), and c) the assessment of damage caused by a natural event. In doing so, unmanned aerial vehicles offer a new way of mapping at local and regional level, thus by accelerating the surveying process compared to the traditional field methods, by reducing the financial input of the data extraction, and by improving the safety conditions for acquisition of field data. The purpose of this article is to illustrate the possibilities and limitations of surface observation before and after the rockfall event, and to monitoring of torrential and erosion processes by using image matching of aerial images obtained by unmanned aerial vehicle.

In the first study area of torrential flow Suhi Potok in Zadnja Trenta, the surveying was performed using the multispectral camera (Sequoia_4.0_1280x960) that was installed on the DJI Phantom 3 Pro vehicle. In the second study area of rockfall Belca, above the settlement Belca, the surveying was done using the FC2103_4.5_4056x3040 camera which was installed on the DJI Mavic Air vehicle. The locations of ground control points were captured using GNSS receiver Leica Zeno 20 and Leica GG04 Smart Antenna. All flights were announced and carried out in accordance with the legal requirements, and the consent for scientific research in the area of Triglav National Park has also been obtained. Point clouds were extracted based on the aerial images in Pix4DMapper. For the area of Suhi Potok torrent a cloud of pixels with density

of 1591 points/m³ has been obtained from the shots of the green light spectrum. The georeferencing accuracy was 0.016 m (RMSE). For the area of Belca rockfall a point cloud with density of 1591 points/m³ has been obtained from the RGB images. The georeferencing accuracy was 0.015 m (RMSE). Before comparing point clouds from two time periods in CloudCompare, the clouds were placed on the same plane by using a tool Cloud Registration. As reference cloud, a georeferenced and classified point cloud (GKOT) from year 2014 was selected, which originates from laser surface scanning of whole Slovenia. The point cloud from the year 2018 was correspondently shifted, namely the ICP algorithm (Iterative Closest Point) was used for registration, whereby the rejection of remote correspondence pair of points was allowed. Digital terrain models with an image cell size of 0.5 m were created in ArcMap 10.5 environment. The digital terrain model from 2014 (taken from surface laser scanning of Slovenia) was considered as the initial state of the surface (DMR_0), and the digital terrain model from 2018 was taken as the state of surface after the event (created from image matching of the unmanned aerial vehicles in 2018). The quantity of detached material from rockfall slope, and the quantity of deposited and removed material from river-bed, were calculated as the difference in the surface elevation before (DMR_0) and after (DMR_1) the event.

The analysed area of Suhi potok torrent has shown the change in the geomorphology of the torrent elevation by an area of 3.54 ha. The elevation of river-bed has increased compared to the year 2014 (the deposition of material) jointly in 1.01 ha of the torrent area, on average by 0.31 ± 0.003 m. The elevation of river-bed had decreased compared to year 2014 jointly in 1.31 ha of the torrent area, on average by 0.39 ± 0.003 m. Only the changes in elevation larger than 0.1 m were considered in this analysis.

Based on the differences between digital terrain model before the rockfall (DMR_0) and after the rockfall (DMR_1), it can be concluded that the collapse of material occurred in two locations at the rockfall Belca site. The site of an area of first collapsed location is 1077 m², while the size of the second location is 745 m². Altogether,

27068.0 m³ material was detached from the slope. Only the changes in elevation larger than 0.1 m were considered in this analysis.

The use of unmanned aerial vehicles is becoming more common both in studying torrential and erosion processes, as well as in planning protection measures and rescuing process in case of various natural hazards. Their use is especially valuable in the case of remote and hardly accessible areas or where the infrastructure has been damaged due to the event. An important advantage of their use is definitely from the financial prospective. After the initial purchase of an unmanned aerial vehicle, additional expenses due to sensors, precise GNSS receivers (usually the most expensive investment) and software are usually much lower compared with the classical surveying techniques (helicopter and airborne surveying). The only cost is the operator on the field. Another advantage is that the high-accuracy video recordings and images of the study sites are available in real-time with no additional processing requirements and can be therefore used as immediate support in deciding and designing the evacuation plans.

The greatest disadvantage of the unmanned aerial vehicles is their bearing strength. This means that we are limited in choosing which sensors (etc. lidar, high frequency cameras) can be installed on the vehicle. The use of vehicles is also limited in extreme weather conditions. In remote and enclosed areas (as the torrential and erosion processes frequently are) there may also be problems with poor GNSS signal, issues with ground control point determination, and by finding the suitable take-off and landing areas of the vehicles.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENT

Delo je nastalo v okviru projektov Interreg Alpine Space RockTheAlps (ASP462) ter GreenRisk4ALPs (ASP635).

7 VIRI

7 REFERENCES

- Ahačič M. 2018. Nad Belco se je sprožil plaz. Gorenjski Glas, Kranjska Gora / torek, 6. februar 2018 / 22:02. <http://www.gorenjskiglas.si/article/20180206/C/180209846/1005/nad-belco-se-je-sprozil-plaz>
- Bitenc M. J. 2014. Brezpilotni letalniki – od igrače do večnamenskih robotov. Geodetski vestnik, 58, 1: 155–158.
- Bric V., Berk S., Oven K., Triglav Čekada M. 2015. Aerofotografiranje in aerolasersko skeniranje Slovenije. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014. Ljubljana: Geodetski inštitut Slovenije
- Buil F., Núñez-Andrés M. A., Lantada N., Prades A., 2016. Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2016), IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 44, 042023: 1–7.
- Car M., Jurić Kačunić D., Linrić L. 2016. Volume measurements of rockfalls using Unmanned Aerial Vehicles. CETRA 2016, 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure.
- Colomina I., Molina P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92: 79–97.
- Danzi M., di Crescenzo G., Ramondini M., Santo A. 2012. Use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for photogrammetric surveys in rockfall instability studies. Rendiconti online della società geologica Italiana, 20: 1–3.
- Eisenbeiß H. 2009. UAV Photogrammetry. Diss. ETH. No. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Switzerland, Mitteilungen Nr. 105: 203 str.
- Flener C., Vaaja M., Jaakkola A., Krooks A., Kaartinen H., Kukko A., Kasvi E., Hyypä H., Hyypä J., Alho P. 2013. Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-Photography. Remote Sensing, 5: 6382–6407.
- Geodetska uprava RS. 2016. Digitalni ortofoto posnetki (dof05).
- Giordan D., Manconi A., Facello A., Baldo M., dell'Anese F., Allasia P., Dutto F. 2015. Brief Communication: The use of an unmanned aerial vehicle in a rockfall emergency scenario. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15: 163–169.

- Giordan D., Manconi A., Remondino F., Nex F. 2017. Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8, 1: 1–4.
- Gomez C., Purdie H. 2016. UAV-based Photogrammetry and Geocomputing for Hazards and Disaster Risk Monitoring – A Review. *Geoenvironmental Disasters*, 3, 23: 1–11.
- Kobal M. 2015. Rockfall monitoring by the combination of LiDAR and Unmanned Aerial Vehicle technology. EUFORIA, European Forest Research and Innovation Area, The final EUFORINNO conference 31st August – 4th September 2015, Rogla, Slovenia. Programme and Book of Abstracts: 63.
- Niethammer U., James M. R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig W. 2012. UAV-based remote sensing of the Super Sauze landslide: evaluation and results. *Engineering Geology*, 128: 2–11.
- Peternel T, Kumelj S, Oštir K, Komac M. 2017. Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements. *Landslides*, 14: 395–406.
- Saroglou C., Asteriou P., Zekkos D., Tsiambaos G., Clark M., Manousakis J. 2017. UAV-enabled reconnaissance and trajectory modelling in a co-seismic rockfall in Lefkada. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 29: 1–30.
- Silvagni M., Tonoli A., Zenerino E., Chiaberge M. 2016. Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8, 1: 1–16.
- Sotier B., Adams M., Lechner V. 2015. UAV-based Natural Hazard Management in High-Alpine Terrain – Case Studies from Austria. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-13611-4.
- Trošt N. 2010. Gradivo za delavnico Lepote Slovenije – dolina Soče. Center vseživljenjskega učenja Gorenjska. Ljudska univerza Jesenice. Radovljica. lu-jesenice.net/cvzu/gradivo_tvzu_lu_jesenice/gradivo_soca.docx
- Uredba o sistemih brezпилotnih zrakoplovov (Uradni list RS, št. 52/16 in 81/16 – popr.)
- Wen Q., He H., Wang X., Wu W., Wang L., Xu F., Wang P., Tang T., Lei Y. 2011. UAV remote sensing hazard assessment in Zhouqu Debris Flow Disaster, *Proceedings of SPIE European Remote Sensing*, ISBN 9780819488022, Prague, Czech Republic, September, 2011
- YellowScan. 2018. <https://www.yellowscan-lidar.com/products/yellowscan-surveyor-ultra> (datum: 22. 6. 2018).