



Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2014

zbornik del

20. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 29. januar 2015

UREDNIŠKI ODBOR

Miran Kuhar
Rudi Čop
Andrej Gosar
Mira Kobold
Martina Čarman
Matjaž Ličer
Polona Kralj
Jože Rakovec
Gregor Skok
Bojan Stopar
Polona Vreča

RECENZIJA

Jože Rakovec
Andrej Gosar
Rahela Žabkar
Miran Kuhar
Mitja Brilly
Dejan Grigillo
Katja Bajec
Simon Rusjan
Dalibor Radovan
Mihaela Triglav
Mojca Šraj

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, Ljubljana

Naklada: 80 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

550.3(497.4)(082)
528(497.4)(082)

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno srečanje (20 ; 2015 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2014 : zbornik del / 20. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 29. januar 2015 ; [organizator srečanja Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar ... et al.]. - Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2015

ISBN 978-961-6884-25-9

1. Kuhar, Miran 2. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana)
277357312

Predgovor

Letos je že dvajseto redno letno srečanje Slovenskega združenja geodetov in geofizikov. Naša srečanja omogočajo izmenjavo znanj in izkušenj ter odkrivanje novih rešitev.

Prispevki za letošnji zbornik del so že drugo leto predhodno strokovno pregledani in zato še na višjem nivoju. So bogati in zanimivi ne samo za ožjo stroko s področij znanj o planetu Zemlja, temveč tudi za uporabnike tega znanja. Kažejo na kakovost raziskovalnega dela pri nas. To je dobra osnova za naše nadaljnje delo, katerega smisel potrjujejo tudi naši mlajši sodelavci z njihovim uspešnim vključevanjem v raziskovalno delo.

Prispevki v letošnjem zborniku del so s področja geodezije, seizmologije in fizike notranjosti Zemlje, geomagnetizma in aeronomije, meteorologije in atmosfere znanosti, hidrologije, ter s področja raziskav kriosfere. Predvsem strokovnjaki s področja hidrologije se trudijo dati svoj prispevek k zmanjšanju škod, nastalih zaradi zadnjih poplav pri nas. V preteklem letu se je dvema obsežnima poplavama pri nas pridružil še močan žled. Poplave in plazovi v predhodnih letih ter ujme v preteklem letu so pokazale, da so za nas to že redni pojavi. Zato jih ne smemo več jemati le kot naravne katastrofe, temveč nekaj, kar zahteva sistematično reševanje ob sodelovanju večjega števila strokovnjakov s različnih področij.

V letošnjem letu bo od 22. 6. do 2. 7. 2015 v Pragi 26. generalna skupščina Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Generalna skupščina te mednarodne zveze se ponavlja vsake štiri leta in je letos v Evropi. Mednarodna zveza IUGG je bila ustanovljena leta 1919 in danes obsega osem različnih mednarodnih znanstvenih združenj s področij geodezije in geofizike. V to mednarodno zvezo je bilo naše združenje uradno vključeno pred enaindvajsetimi leti.

predsednik SZGG

ddr.Rudi Čop

Vsebina

Predgovor	3
Rudi Čop - Razelektritve v ionosferi.....	7
Stanka Šebela - Večletno merjenje tektonskih mikro premikov v kraških jamah	15
Matevž Menih, Nejc Bezak, Mojca Šraj - Vpliv podnebne spremenljivosti na rezultate verjetnostih analiz visokovodnih konic: primer vodomerne postaje Litija na reki Savi.....	23
Veronika Hladnik, Gregor Skok - Objektna analiza padavin iz satelitskih meritev, reanaliz ERA-Interim ter modela WRF na območju Evrope in Severnega Atlantika	35
M. Z. Božnar, B. Grašič, P. Mlakar, A.P. de Oliveira, J. Soares, D. Gradišar, J. Kocijan - Modeliranje difuznega sončnega obseva.....	45
Vasja Bric, Sandi Berk, Katja Oven, Mihalea Triglav Čekada - Aerofotografiranje in aerolasersko skeniranje Slovenije	57
Polona Pavlovčič Prešeren, Marjeta Korošec, Dejan Grigillo - Problematika geodetskih terenskih meritev z GNSS in simulacije vodostaja na podlagi DMR na delu Cerknškega jezera	73
Manca Petek, Mira Kobold, Mojca Šraj - Določanje kazalnikov nizkih pretokov – prikaz na primeru vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri	81
Tomaž Podobnikar, Balázs Székely - Morfometrične analize vršajev planeta Marsa – za uporabo na Zemlji.....	93
Manca Volk Bahun, Matija Zorn, Jaka Ortar, Miha Pavšek - Snežni plazovi in preventiva v Srednjih Karavankah	103
Mitja Brilly, Klaudija Sapač, Andrej Vidmar, Lidija Globevnik, Mira Kobold, Katarina Zabret, Maja Koprivšek, Matej Sečnik, Darko Anzeljc - Analiza poplavnega dogodka v maju 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne	115
Damir Deželjin, Rudi Čop - Prenos merilnih podatkov iz geomagnetnega observatorija po obstoječem komunikacijskem omrežju	127
Andrej Mihevc, Jasminko Mulaomerović - Erozija arheološkega najdišča v Dabarski pečini pri Sanskem mostu ob poplavi maja 2014*	133

* razširjeni povzetek

Razelektritve v ionosferi

Rudi Čop¹

Povzetek

Vpliv vesolja na Zemljo je poleg sončnega obseva, vpada meteorjev, oblakov in polarnih sijev v mezosferi okoli magnetnih polov viden še kot sij svetlobe v ionosferi in razelektritve v njej. V članku je predstavljeno tlenje svetlobe v ionosferi in zaradi tega tlenja vidno zaznavanje težnostnih valov v zgornjih plasteh ozračja. Osnovni načini razelektritev v ionosferi TLE (Transient Luminous Event) so razloženi na poenostavljen način: da strele med robovi oblakov in tlemi inducirajo električno napetost tudi v ionosferi. Močne vremenske nevihte v troposferi so generatorji električnih tokov v atmosferi in vplivajo tudi na zgornje plasti ozračja. Raziskave teh pojavov so uspešne šele v zadnjih dveh desetletjih z razvojem ustreznih merilnih instrumentov in s pomočjo vesoljske tehnike.

Ključne besede: ionosfera, sij svetlobe v atmosferi, razelektritve v ionosferi

Key words: ionosphere, atmospheric light glow, electric discharges in ionosphere

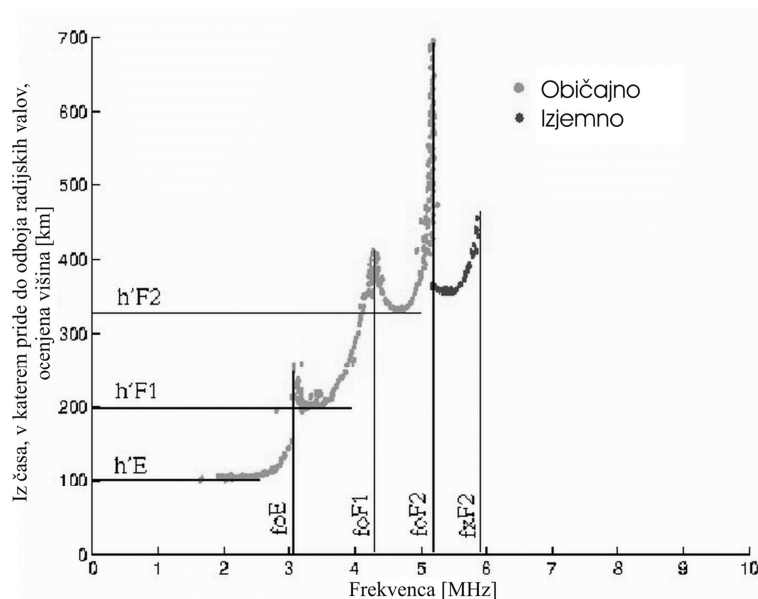
Ionosfera

Ionosfera se razprostira na višini od 50 do 1000 km v zemeljski atmosferi in predstavlja manj kot en odstotek vse njene materije. Sestavlja jo več plasti, od katerih se odbijajo radijski valovi (IUPAC, 1997; Handbook, 1985; Anderson & Fuller-Rowell, 1999). Čim višje so te plasti, tem toplejše so. Zaradi ionizirajočega sevanja Sonca, ki ionizira molekule zraka pri ustrezno nizkem zračnem tlaku, je ionosfera sestavljena iz hladne plazme. V njej obstajajo prosti elektroni ob naelektrenih ionih, ki se le počasi rekombinirajo. Zaradi naelektrenih delcev v ionosferi nastajajo v zgornjih plasteh atmosfere tudi električni tokovi.

Najnižja plast ionosfere je plast D, ki sega od okoli 50 km do okoli 90 km nad zemeljsko površino. Nanjo najbolj vplivajo visoko energijski žarki X, ki jih seva Sonce. Ionosferska plast E je med 90 in 150 km iznad zemeljske površine in nastaja zaradi sončevih žarkov X daljše valovne dolžine. Nad 150 km je ionosferska plast F, ki doseže največjo koncentracijo prostih elektronov v zgornji plasti F, v plasti F2 na višini okoli 600 km. Ta plast je ionizirana predvsem zaradi sončevih ekstremnih ultravijoličnih žarkov. Vrh ionosfere je na višini 1000 km, vendar ni prave razmejitve med njo ter višje ležečo plazmosfero in magnetosfero. Okoli zemeljskih magnetnih polov je močan izvor ionizacije sončni veter, ki v ionosferi ustvarja polarni sij.

Plasti ionosfere D in E odbijata dolge in srednje radijske valove in zato omogočata radijske komunikacije na velike razdalje. Kratki radijski valovi se odbijajo od ionosferske plasti F (Slika 1). Ultra kratki radijski valovi, mikrovalovi in svetloba imajo prekratko valovno dolžino, da bi se odbijali od ionosfere. Pri prehodu te vrste elektromagnetnih valov se v njej le lomijo. Tako odboj radijskih valov kot lom mikrovalov v ionosferi je odvisen od njenih zelo spremenljivih lastnosti, ki so pod vplivom izvorov njene ionizacije: sevanja Sonca in jakosti sončnega vetra. Zato se lastnosti ionosfere preko dneva in skozi letne čase ciklično spreminjajo, prav tako pa preko celotnega enajstletnega cikla sončeve aktivnosti.

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje/Sicciole



Slika 1 - Tipični ionogram vertikalnega radijskega sondiranja ionosfere (Bamford, 2000). Označene so višine posameznih plasti ionosfere za običajne kritične frekvence in za dodatno izjemno kritično frekvenco f_xF2 sloja F2

V ionosferi se zelo spremenijo razmere ob nenadnih izbruhih na Soncu in ob času geomagnetnih neviht. Zaradi spremembe koncentracije prostih elektronov v ionosferi se zaradi difuzije spremeni smer in jakost zračnih tokov v njeni sicer električno nevtralni okolici. Ti ionosfero odnašajo vzdolž silnic zemeljskega magnetnega polja. Ker se lastnosti geomagnetnega polja krajevno spreminjajo, se krajevno spreminja tudi turbulenca ionosfere. Zaradi tega sta tako odboj radijskih valov kot lom mikrovalov v ionosferi odvisna od časa in kraja njihovega oddajanja ali sprejemanja. Posebno težko pa so obvladljive majhne anomalije v njenem vrtnčenju (ionospheric scintillation), ki so posebej pomembne pri določanju položaja visoke točnosti s pomočjo navigacijskih sprejemnikov GNSS (Global Navigation Satellite System).

Razelektritve v ionosferi

Razelektritve v ionosferi niso navadne strele v zgornjih plasteh atmosfere, temveč so ti pojavi vezani na lastnosti hladne plazme. Te vrste razelektritev ali dogodki TLE (Transient Luminous Event) so podobne razelektritvam v fluorescentnih ceveh in obsegajo različne oblike razelektritev v zgornjih plasteh atmosfere. Nastajajo visoko nad nevihtnimi oblaki, običajno v zaključnem obdobju neviht. Sprožijo jih strele v troposferi med oblaki in zemeljsko površino s pozitivnimi nosilci električnega naboja. S prostim očesom lahko dogodke TLE opazimo zelo redko in to le v izjemnih okoliščinah, ko se vidi nad najbolj aktivne dele nevihtnih oblakov. Ker je njihova svetlost enaka svetlosti šibkega polarnega sija, jih lahko opazimo le v temni noči in izven naselij. Število teh zelo kratkotrajnih razelektritev v ionosferi je le odstotek od števila razelektritev v troposferi. Dogodki TLE so dobro dokumentirani šele v zadnjih dveh desetletjih kot posledica razvoja dovolj hitrih video kamer za nočno snemanje. S pomočjo opazovalnih satelitov, ki krožijo okoli Zemlje, pa je bilo ugotovljeno, da je teh dogodkov na vsej Zemlji v enem letu preko dveh milijonov (Williams, 2001; Savtchenko & Mitzeva, 2007, Chen et al., 2008).



Slika 2 - Razelektritev v ionosferi nad jugozahodnim delom Slovenije, posneta na observatoriju GEOS v Weiningenu v Švici 9.11.2013 ob 17:44:23 UTC uri (Spinner, 2014)

Prve razelektritve v ionosferi so opazili kot kratkotrajne rdeče-oranžne bliske (Red Sprites). Prva poročila o njihovem obstoju objavljena v znanstveni literaturi segajo v leto 1886 (MacKenzie & Toynbee, 1886; Iwanski et al., 2009), teoretično pa so bili predvideni pred devetdesetimi leti (Wilson, 1924; Pasko et al., 2002). Prvič so jih povsem slučajno posneli raziskovalci iz Univerze v Minnesoti leta 1989. Od takrat se je nabralo že zelo veliko njihovih fotografij in filmov, posnetih s površine Zemlje (Slika 2), iz letal in iz vesoljskih plovil (Yair et al., 2005).

Raziskovanje razelektritev v ionosferi se je iz začetnega dokumentiranja teh dogodkov razširilo na meritve njihovih optičnih spektrov (Heavner et al., 2013), radijskih valov ter zelo dolgih in ekstremno dolgih elektromagnetnih valov. Gostoto elektronov v teh razelektritvah merijo z radarji, ki delujejo v področju decimetrskih radijskih valov (Tsumoda et al., 1998). Proučujejo spremljajoče akustične pojave, elektrokemične reakcije (Parra-Rojas et al., 2013; Pasko, 2007) in povezave teh razelektritev s strelami v troposferi (Heavner, 2000). Raziskavam razelektritev v ionosferi so namenjeni nekateri vesoljski programi (Chern, 2003). V fazi priprave pa je vesoljski program, ki je načrtovan za ugotavljanje vpliva dogodkov TLE na magnetosfero (Hebert et al., 2012; Pinçon, 2014). Že dalj časa pa so v teku projekti za širjenje znanja o teh pojavih (Lyons & Schmidt, 2004).

Ovalne razelektritve različne svetlosti in običajno v rdeči barvi svetlobe (Red Sprites) se iz vrha močnih nevihtnih oblakov razprostirajo v ionosfero v višino do 90 km nad zemeljsko površino. Njihov najsvetlejši del je na višini od 65 do 75 km, pod tem delom pa so modri pasovi, ki se v obliki lovč spuščajo na višino 40 km. Zaradi različnih oblik se ta vrsta razelektritev v ionosferi deli v različne razrede. Najpogostejše se te razelektritve pojavljajo v skupinah na širšem območju ali pa se združujejo v snope. Trajajo od 3 do 10 mili sekund. So sicer najprej odkrite razelektritve v ionosferi, vendar ne tudi najbolj pogoste.

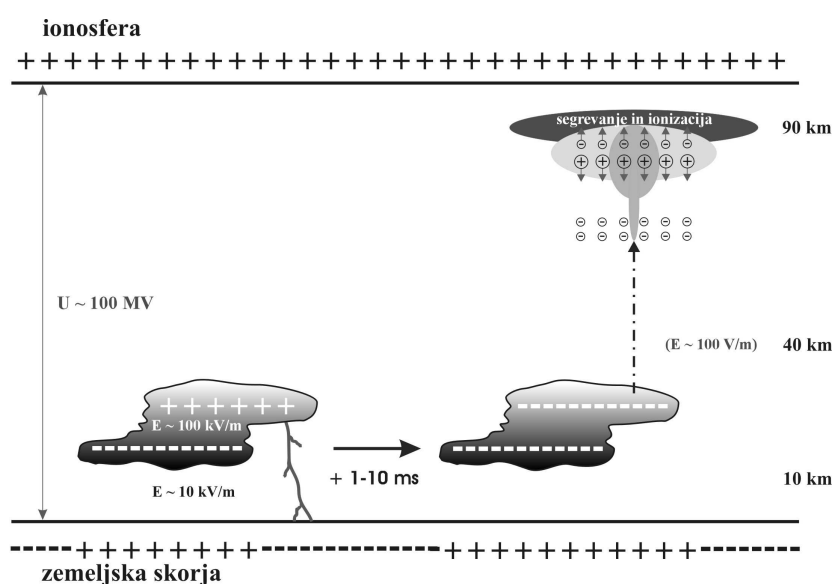
Najpogostejše so ozke obročaste razelektritve, ki so izjemno svetli in kratkotrajni bliski visoko v ionosferi širine do 400 km, imenovane ELVES (Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources). Poleg samega bleska, ki traja manj kot eno mili sekundo, so te vrste razelektritev v ionosferi tudi močan izvor

elektromagnetnih valov zelo nizkih frekvenc. Te vrste dogodek TLE je bil prvič posnet iz vesolja nad Francosko Gvajano leta 1990.

Ozke konične razelektritve se iz električno aktivnega jedra neviht širijo v ionosfero v obliki ozkih modrih stožcev (Blue Jets) širine okoli 15 kotnih stopinj (Pasko, 2003). Te razelektritve napredujejo s hitrostjo okoli 100 km/s do višine od 40 do 50 km nad zemeljsko površino. So svetlejši od ovalnih razelektritev in niso neposredno povezani z razelektritvami v troposferi. Ta vrsta dogodkov TLE je najmanj pogosta in je bila prvič fotografirana iz vesolja nad Avstralijo leta 2007.

Osnovna razlaga razelektritev v ionosferi

Razelektritve v ionosferi se dogajajo več kot petkrat višje od višine nevihtnih oblakov. Skupine močnih nevihtnih oblakov MCS (mesoscale convective system) so sicer večje kot oblaki lokalnih neviht, vendar manjše kot ekstremni tropski cikloni. Te skupine nevihtnih oblakov so lahko podolgovate in ravne oblike ali pa v bolj ali manj zakrivljenem loku. Oblikujejo se v bližini vremenskih front in trajajo tudi po več ur. V Evropi se najpogosteje pojavljajo v drugi polovici avgusta in v septembru v območju zahodnega dela Sredozemskega morja in v povprečju obsegajo okoli 9000 km² (Morel & Senesi, 2002). Na kontinentalnem delu Evrope so prisotne v njenih gorskih predelih. Njihova najbolj običajna smer potovanja je proti vzhodu ali severovzhodu in to v popoldanskem času.



Slika 3 - Ilustracija razelektritve naboja v mezosferi zaradi strele med vrhom nevihtnega oblaka in zemeljsko površino

Osnovno razlago nastanka razelektritev v ionosferi podaja teorija, ki jo je razvil v dvajsetih letih preteklega stoletja škotski fizik in meteorolog Charles T. R. Wilson (Pasko et al., 1996; Hu et al., 2007; Pasko, 2007). Ta teorija izhaja iz raziskav pri razvoju plinskih elektronskih cevi. Ugotovili so, da je prebojna trdnost plinov ali jakost električnega polja, pri katerem sicer neprevodni plin zaradi ionizacije postane prevoden, proporcionalna njihovi gostoti.

Za nastanek razelektritve v ionosferi pa je poleg upadanja prebojne trdnosti zraka z naraščajočo višino pomembno še inducirano elektrostatično polje nad nevihtnim oblakom, ki od njegovega vrha proti ionosferi pojenja z naraščajočo višino h kot $1/h^3$. Obenem pa eksponentno pojenja prebojna trdnost zraka, ker tako upada njegova gostota. To zmanjševanje prebojne trdnosti zraka je hitrejše kot pa pojemanje elektrostatičnega polja nevihtnega oblaka. Zato elektrostatično polje visoko v atmosferi preseže prebojno trdnost v že zelo redkem zraku, s čemer se vzpostavijo pogoji za električni preboj.

Poleg navidezno elektrostatične povezave med vrhom oblaka in ionosfero je za nastanek razelektritve v ionosferi pomembno še pospeševanje prostih elektronov (Pasko et al., 2012; Qin et al., 2013). Ti prosti elektroni nastajajo ob ionizaciji zaradi kozmičnega sevanja energije od 0,1 do 1 MeV. Pospešuje jih močno inducirano elektrostatično polje, ki ga povzroči strela s pozitivnimi nosilci električnega naboja ob vrhu oblaka na višini z in zemeljsko površino (Slika 3). Po poenostavljenem modelu se to strelo obravnava kot vertikalni dipol z momentom $Q \cdot z$. Pri veliki večini strel ta dipolni moment ne presega 100 Ckm, pri preboju strel s pozitivnimi nosilci električnega naboja nevihtnih oblakov in zemeljsko površino, pa ta moment naboja presega vrednost 1000 Ckm, kar zadošča za razelektritev v ionosferi (Paras & Rai, 2012). Teoretične razlage nastanka razelektritev v ionosferi so bile potrjene tudi z eksperimenti v laboratorijih (Williams, 2001).

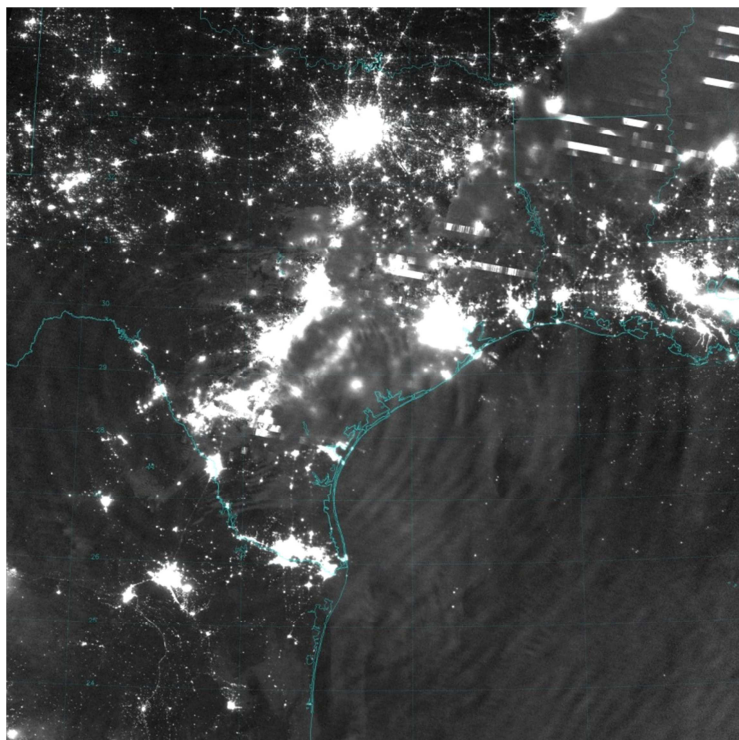
Elektromagnetni valovi ekstremno nizkih frekvenc

Raziskave v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja so pokazale, da ob udaru strel, ki povzročajo razelektritve v ionosferi, nastajajo predvsem ekstremno dolgi elektromagnetni valovi ELF (Extremely low frequency) v frekvenčnem področju od 3 Hz do 300 Hz (Barr et al., 2000; Inan et al., 2010). Zaradi resonančne pojava, Schumannovih resonančnih frekvenc, se valovi ELF ojačajo v naravnem valovodu med zemeljsko površino in ionosfero (Ohkubo et al., 2005). Zato ti valovi obstajajo dlje kot razelektritve v ionosferi in tudi ne pojenjajo dosti z oddaljevanjem od svojega izvora. Prav na osnovi proučevanja ionosferskih razelektritev s pomočjo sprejemnikov ELF je bilo ugotovljeno, da se intenzivnost teh razelektritev spreminja s sončnimi cikli (Sato, 2003; Reddy, 2014).

Dodatne raziskave so tudi pokazale (Siingh et al., 2009), da so izvor valov ELF električni toki, ki tečejo vzdolž razelektritev v ionosferi, in ne strele med nevihtnim oblakom in zemeljskim površjem. Vrh jakosti spektra imajo ti valovi frekvence okoli 40 Hz.

Sij v ionosferi in težnostni valovi zaradi udarov strel

Udari strel v troposferi, najnižji plasti atmosfere, ki sega do 8 pa do kakšnih 16 km visoko, povzročajo v višje ležečih plasteh atmosfere spremembe temperature in tlaka. To povzroča tudi dvig težišča ozračja, od katerega se zaradi segrevanja zraka širijo težnostni valovi v atmosferi (Atmospheric Gravity Waves), ki so podobne narave kot valovi na površini morij (Williams, 2009). Nastajajo v stabilnih plasteh tekočin ali plinov zaradi vzgona in teže. V ozračju so lahko vidni tudi zaradi sija svetlobe v visokih plasteh atmosfere (Slika 4). Ta svetloba je v zelo šibki zeleni barvi, v najpogostejši barvi svetlobe polarnih sijev. Iz vesolja so ti valovi vidni kot koncentrični krožni valovi (Seaman, 2014). Težnostni valovi so pomembni zaradi razumevanja gibanja zraka v ozračju, prenosa energije med različnimi plastmi ozračja ter ustvarjanja pogojev za različne kemične reakcije in prenos njihovih produktov.



Slika 4 - Težnostni valovi, ki so nastali zaradi močne nevihte in so vidni zaradi tleče svetlobe v tanki zgornji plasti mezosfere. Valove je posnel ameriški satelit Suomi-NPP nad zvezno državo Teksas (ZDA) 4. aprila 2014 ob 08:13 UTC (Seaman, 2014)

Sij v zgornjih plasteh atmosfere je zelo šibka emisija svetlobe, ki je prisotna preko celega dne. Zaznamo pa jo le ponoči in to v posebnih okoliščinah. Nastaja zaradi različnih procesov in v temni noči povzroča nepopolno temo. Luminiscenco povzročajo kozmični žarki, ki v termosferi zadevajo v zelo redke atome zraka in jih pri tem vzbujajo. Izvor sija v ionosferi je tudi kemoluminiscenca, ki nastaja najpogosteje ob vezavi kisika in dušika z ioni hidroksila OH. Najpogostejši izvor tleče svetlobe v zgornjih plasteh atmosfere pa je rekombinacija ionov nazaj v nenabite delce. Molekule ionizirajo ultravijolični žarki Sonca, ko pa se rekombinirajo, se sprošča energija (Observations, 1960; Miller et al., 2012). V gostejših plasteh se zaradi te energije poveča notranja energija zraka, v redkejših pa se sproščajo tudi fotoni vidne svetlobe. Še posebno izrazit je tak izvor v tanki plasti med mezosfero in termosfero okoli 90 km nad površino Zemlje, ki sveti v spektru rumene svetlobe natrija.

Zaključek

Razelektritve v ionosferi so posledica srednje velikih in velikih neviht v troposferi. So del sistema zemeljskih električnih tokov, ki so bili do sedaj nepoznani.

Poleg močnih emisij elektromagnetnih valov ekstremnih dolžin v frekvenčnem področju od 3 Hz do 300 Hz pa strele v troposferi povzročajo tudi razelektritve v ionosferi, sevanje žarkov gama (Reddy, 2014; Ringuette et al., 2014) in ustvarjajo antimaterijo v obliki pozitronov, ki odletavajo v vesolje (NASA's, 2014). To pomeni, da strele vplivajo na srednje in zgornje plasti atmosfere in tudi na biosfero bolj kot se je o tem vedelo pred začetkom raziskav razelektritev v ionosfero pred dvema desetletjema. Pri meritvah

sprememb zemeljskega magnetnega polja pa je to znanje potrebno pri razlagi merilnih rezultatov (Čop et al., 2013), kar omogoča boljšo izbiro merilnega mesta kot ga narekujejo priporočila mednarodnih organizacij IAGA in INTERMAGNET (Paliska et al, 2010).

Literatura

- Anderson, D. Fuller-Rowell, T. (1999). The Ionosphere. SE-14. Space Environmental Center, Boulder.
- Bamford, R. The Oblique Ionospheric Sounder. (2000). Project Final Report. Rutherford Appleton Laboratory; Radio Communication Research Unit, Chilton.
- Barr, R. Llanwyn, D. J. Rodger, J. C. (2000). ELF and VLF radio waves. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1689-1718.
- Chen, B. A. et al. (2008). Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. *Journal of Geophysical Research*, 113, A08306.
- Chern, L. J. (2003). Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 647– 659.
- Čop, R. Molov, G. Deželjin, D. (2013). Vpliv neviht na geomagnetne meritve na Gori nad Ajdovščino. 18. Strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 105-110.
- Handbook of Geophysics and the Space Environment. (1985). Scientific editor Adolph S. Jursa. United States Air Force; Air Force Geophysics Laboratory, Springfield.
- Heavner, J. M. (2000). Optical Spectroscopic Observations of Sprites, Blue Jets, and Elves: Inferred Microphysical Processes and their Macrophysical Implications. Doctoral thesis. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks.
- Heavner, J. M. et al. (2013). Sprites, Blue Jets, and Elves: Optical Evidence of Energy Transport Across the Stratopause. *American Geophysical Union: Geophysical Monograph*, 123, 69-81.
- Hebert, P. et al. (2012). Taranis MCP: a joint instrument for accurate monitoring of Transient Luminous Event in the upper atmosphere. ICSO 2a – Imagers & Radiometrs. International Conference on Space Optics, Ajaccio (Corse).
- Hu, W. Cummer, A. S. Lyons, A. W. (2007). Testing sprite initiation theory using lightning measurements and modeled electromagnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 112, D13115.
- Inan, S. U. Cummer, A. S. Marshall A. R. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *Journal of Geophysical Research*, 115, A00E36.
- IUPAC Compendium of Chemical Terminology (The Gold Book). (1997). Second Edition. Edited by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Science, Oxford.
- Iwanski, R. et al. Meteorological Study of the First Observation of Red Sprites from Poland. *Acta Geophysica*, 2009, 57 (3), 760-777.
- Lyons, A. W. Schmidt, D. M. (2004). The discovery of red sprites as an opportunity for informal science education. *American Meteorological Society*, 13th Symposium on Education, Boston (US).
- MacKenzie, Toynbee, H. (1886). Meteorological phenomena, *Nature*, 33, 26.
- Miller, D. S. et al. (2012). Suomi satellite brings to light a unique frontier of nighttime environmental sensing capabilities. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (39), 15706-15711.
- Morel, C. Senesi, S. (2002). A climatology of mesoscale convective systems over Europe using satellite infrared imagery. II: Characteristics of European mesoscale convective systems. *Quartaly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 1973–1995.
- NASA's Fermi Catches Thunderstorms Hurling Antimatter into Space (2014). http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html (Pridobljeno 25.09.2014)
- Observations of the Night Airglow; 1 July 1957 – 31 December 1959. (1960). *Annals of the International Geophysical Year 1957-1958*, Volume XXIV. Editor I. G. Yao. Pergman, Oxford.

- Ohkubo, A. et al. (2005). VLF/ELF sferic evidence for in-cloud discharge activity producing sprites. *Geophysical Research Letters*, 32, L04812.
- Paliska, D. Čop, R. Fabjan, D. (2010). The Use of GIS-based Spatial Multi-criteria Evaluation in the Selection Process for the New Slovenian Geomagnetic Observatory Site. *Annales Ser. hist. nat.* 20 (1), 1-8.
- Paras, K. M. Rai, J. (2012). Electrical parameters of red sprites. *Atmosfera*, 25 (4), 371-380.
- Parra-Rojas, C. F. Luque, A. Gordillo-Vázquez, F. J. (2013). Chemical and electrical impact of lightning on the Earth mesosphere: The case of sprite halos. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 1–25.
- Pasko, P. V. Inan, S. U. Bell, F. T. (1996). Sprites as luminous columns of ionization produced by quasi-electrostatic thundercloud fields. *Geophysical Research Letters*, 23 (6), 649-652.
- Pasko, P. V. et al. (2002). Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, 416, 152-154.
- Pasko, P. V. (2003). Electric jets. *Nature*, 423, 927-929.
- Pasko, P. V. (2007). Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges. *Plasma Sources Science Technology*, 16, S13–S29.
- Pasko, P. V. Yair, Y. Kuo, C.-L. (2012). Lightning Related Transient Luminous Events at High Altitude in the Earth's Atmosphere: Phenomenology, Mechanisms and Effects. *Space Science Reviews*, 168, 475–516.
- Pinçon, J.-L. (2014). TARANIS – a Satellite for the Study of TLEs and TGFs. XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman (US).
- Qin, J. Celestin, S. Pasko, P. V. (2013). Dependence of positive and negative sprite morphology on lightning characteristics and upper atmospheric ambient conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 1–16.
- Reddy, F. (2014). Fermi Improves its Vision for Thunderstorm Gamma-Ray Flashes. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt (US). http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/vision-improve.html (Pridobljeno 25.09.2014)
- Ringuette, R. et al. (2014). Gamma-rays Associated with Nearby Thunderstorms at Ground Level. XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman (US).
- Sato, M. (2003). Global Lightning and Sprite Activities and Their Solar Activity Dependences. Dissertation. Tohoku University; Department of Geophysics; Graduate School of Science, Sendai (Japan).
- Savtchenko, A. Mitzeva, R. (2007). Sprites and parent thunderstorms. Black Sea School on Plasma Physics. I. Zhelyazkov, ed. *BSSPP Proceedings*, 1, 115-128.
- Seaman, C. (2014). Severe Weather in the Mesosphere. Suomi NPP; VIIRS Imagery and Visualization Team Blog. <http://rammb.cira.colostate.edu/projects/npp/blog/index.php/uncategorized/severe-weather-in-the-mesosphere/> (Pridobljeno 7. 10.2014)
- Siingh, D. et al. (2009). Thunderstorms, lightning, sprites and magnetospheric whistler-mode radio waves. Banaras Hindu University, Department of Physics, Atmospheric Research Laboratory, Varanasi (India).
- Spinner, R. (2014). AW: Request. From: roger.spinner@geos-weiningen.ch, To: rudi@artal.si. Wed, Sep 3, 2014 at 8:23 AM.
- Tsunoda, R. T. et al. (1998). Evidence of a high-altitude discharge process responsible for radar echoes at 24.4 MHz, *J. Atmos. Solar Terr. Physics*, 60 (7), 957–964.
- Williams, R. E. (2001). Sprites, Elves, and Glow discharge Tubes. *Physics Today*, November, 1-7.
- Williams, J. The AMS Weather Book; The Ultimate Guide to America's Weather. (2009). University of Chicago, Chicago.
- Wilson, C. T. R. (1924). The electric field of a thundercloud and some of its effects. *Proc. Phys. Soc. London*, 32D-37D.
- Yair, Y. et al. (2005). Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission. *Geophysical Research Letters*, 32 (L02801).

Večletno merjenje tektonskih mikro premikov v kraških jamah

Stanka Šebela *

Povzetek

V petih kraških jamah v Sloveniji merimo mikro premike s šestimi ekstenziometri TM 71. V Postojnski jami se meritve opravljajo že deset let. Inštrumenti so nameščeni v razpoke, na prelomne ploskve in v lezike. Merilna mesta v kraških jamah so bila izbrana glede na bližino prelomnih con in glede na ugodno dostopnost terena. V Postojnski jami sta ekstenziometra oddaljena okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. V Pološki jami je merilno mesto okrog 300 m južno od Ravenskega preloma. V Jami Svetih treh kraljev je inštrument okrog 800 m južno od Ravenskega preloma. Inštrument v Kostanjeviški jami leži v širši prelomni coni Zagreb-Zemplin in se nahaja okrog 1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice. V Županovi jami se meritve opravljajo 500 m severno od Dobropoljskega preloma. Vse lokacije kažejo tektonsko pogojenost mikro premikov, v Pološki jami pa beležimo tudi premike zaradi nestabilnosti terena.

Ključne besede: mikro premiki, kraške jame, ekstenziometer TM 71, Slovenija.

Keywords: micro displacements, karst caves, TM 71 ekstensometer, Slovenia

Uvod

V okviru projekta COST 625, ki je potekal od 2000 do 2006 smo v letu 2004 v Postojnski jami namestili prva dva ekstenziometra TM 71 za merjenje mikro premikov. Danes imamo v kraških jamah postavljenih 6 ekstenziometrov s katerimi redno spremljamo velikosti, smeri in rotacije mikro premikov. Inštrumenti so nameščeni v razpoke ali na prelome. V Pološki jami pa merimo premike med plastmi. Kraške jame in umetni tuneli so zaradi stabilne temperature zelo primerni za tovrstne meritve (Gosar et al., 2011; Šebela et al., 2009; Šebela et al., 2010).

Merilna mesta v kraških jamah so bila izbrana glede na bližino aktivnih prelomov in glede na ugodno dostopnost terena. V Postojnski jami sta ekstenziometra oddaljena okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. V Pološki jami je merilno mesto okrog 300 m južno, v Jami Svetih treh kraljev pa okrog 800 m južno od Ravenskega preloma (Poljak, 2000). Inštrument v Kostanjeviški jami leži v širši prelomni coni Zagreb-Zemplin in se nahaja okrog 1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice. V Županovi jami se meritve opravljajo 500 m severno od Dobropoljskega preloma in 4 km severno od Želimeljskega preloma.

Metoda

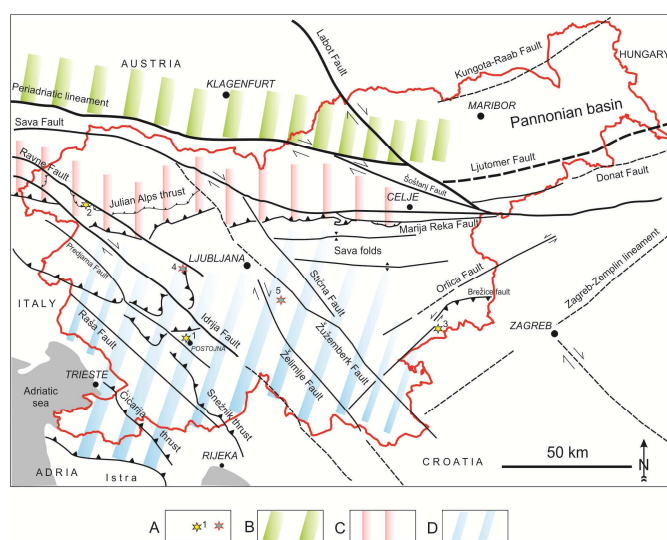
Za merjenje mikro-premikov uporabljamo 3D ekstenziometre TM 71 z natančnostjo $\pm 0,007$ mm v smereh x , y in z . Hkrati merimo tudi rotacijo v dveh ravninah (xy in xz) z natančnostjo $\pm 0,00016$ radianov (Košťák et al., 2007; Stemberk et al., 2011; Briestenský et al., 2011 in 2014). Meritve se večinoma izvajajo enkrat na mesec. V Postojnski jami na Veliki gori (Postojna 1) imamo nameščeno avtomatsko merjenje vsako uro. Ekstenziometer TM 71 je v sedemdesetih letih razvil Čeh dr. Blahoslav Košťák (Košťák et al. 2007).

* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

V zadnjih dvajsetih letih so okrog 300 ekstenziometrov namestili v kraških jamah na Češkem, Slovaškem, v Bolgariji, na Poljskem, v Avstriji, Belgiji in v Sloveniji. Za namestitev pa so primerni tudi tuneli (Nemčija, Slovaška, Kirgistan) ali opuščeni rudniki (Slovenija) ter površinski izdanki (Grčija, Italija, Peru, Svalbard, Kanarski otoki, ZDA, Slovenija).

Rezultati

V Postojnski jami (Slika 1, Preglednica 1) že 10 let (2004 – 2014) merimo mikro premike na dinarsko usmerjeni prelomni coni, ki se nahaja okrog 1 km severno od Predjamskega preloma. Na Veliki gori je inštrument nameščen med jamsko steno, ki predstavlja prelomno ploskev $30^{\circ}/80-90^{\circ}$ in med podorni blok apnenca. V desetih letih beležimo manjše premike ($+z=0,03$ mm, $-y=0,05$ mm, $-x=0,04$ mm), in sicer normalni vertikalni premik ob prelomu (spust SV krila za 0,03 mm), desni horizontalni zmik za 0,05 mm in ekstenzijo za 0,04 mm. Izraziti sta dve obdobji, ko je prišlo do opaznejših premikov. Konec leta 2004 je prišlo do desnega horizontalnega zmika za 0,05 mm. Od 28.8. do 9.12.2009 smo zabeležili spust SV bloka $+z=0,07$ mm (normalni vertikalni premik), od 18.6. do 22.7.2010 pa smo zabeležili dvig SV bloka $-z=0,05$ mm (reverzni vertikalni premik). Na Veliki gori smo vzpostavili tudi avtomatske meritve, ki potekajo vsako uro, vendar merjenje še ni ustaljeno in bo potrebno sistem izboljšati.



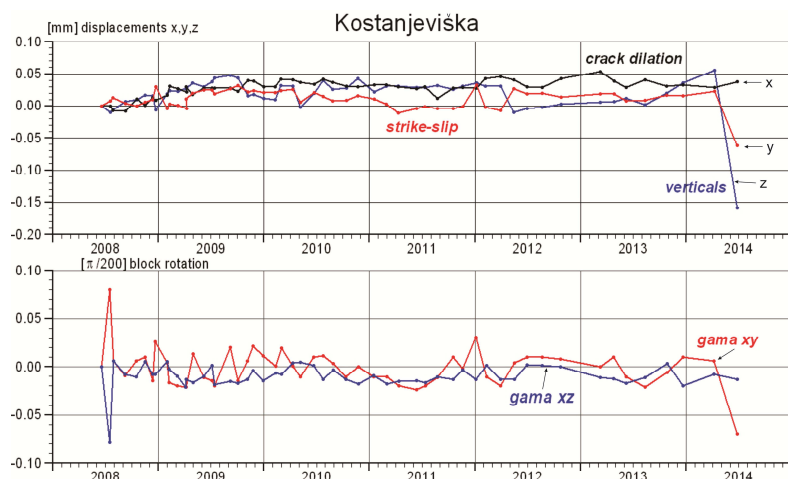
Slika 1 – Tektonska zgradba Slovenije (Placer, 2008 in Poljak, 2000) s pomembnimi prelomi in položajem ekstenziometrov TM 71. A – kraške jame (1-Postojnska jama, 2-Pološka jama, 3-Kostanjeviška jama, 4-Jama Svetih treh kraljev, 5-Županova jama), B – tektonska enota Vzhodnih Alp (severno od Periadriatskega lineamenta), C – tektonska enota Julijskih Alp, D – Dinaridi.

Na drugi lokaciji v Postojnski jami v Lepih jamah je inštrument nameščen med dve prelomni ploskvi v umetno povečanem rovu. Na JZ prelomni ploskvi $30^{\circ}/80-90^{\circ}$ imamo vertikalne drse, ob SV prelomni ploskvi $30^{\circ}/60^{\circ}$ pa imamo horizontalne drse. Po desetih letih inštrument kaže desni horizontalni zmik $-y=0,02$ mm in ekstenzijo $-x=0,03$ mm. Od 26.6.-24.7.2008 smo zaznali vertikalni premik $+z=0,08$ mm (spust SV bloka, normalni vertikalni premik), od 24.7.-5.8.2008 pa se je premik povrnil v stanje dne 26.6.2008 (–

$z=0,08$ mm, reverzni vertikalni premik). Prav v tem obdobju smo imeli tudi desni horizontalni zmik $-y=0,06$ mm.

Oba ekstenziometra sta v Postojnski jami nameščena na isto prelomno cono, vendar na različne prelome znotraj te cone. Na obeh lokacijah beležimo manjše tektonske mikro premike, ki v desetih letih niso presegli $0,05$ mm. V krajših časovnih obdobjih pa smo odčitali tudi nekoliko večje premike ($0,08$ mm), ki pa se navadno povrnejo v prvotno stanje. Ob visokih poplavalah v Postojnski jami jeseni 2010 na inštrumentih nismo zasledili sprememb premikov, kar dokazuje, da ne beležimo npr. premikov zaradi sprememb v hidrologiji kraškega sistema ampak tektonsko pogojene mikro premike. Premiki, ki jih TM 71 zazna so največkrat povezani s spremembami napetosti v Zemeljski skorji.

V Kostanjeviški jami je TM 71 nameščen znotraj razširjene razpoke s smerjo vpada 140° in vpadnim kotom 80° . Gre za razpoko, ki je vzporedna prelomu Kostanjevica-Brežice. V celotnem obdobju meritev 2008 – 2014 je najbolj izrazit premik $+x=0,04$ mm, ki predstavlja stiskanje razpoke v horizontalni ravnini. V horizontalni smeri opazujemo tudi desne in leve zmiike, ki so $< 0,04$ mm. Od 2008 do 25.5.2014 je vertikalno premikanje kazalo dvig SZ bloka za $0,05$ mm, kar predstavlja normalni premik ob razpoki $140^\circ/80^\circ$. V obdobju od 25.5.2014 do 26.6.2014 pa smo zabeležili močnejše premike, in sicer $-z=0,2$ mm in $-y=0,1$ mm, kar predstavlja desni horizontalni zmik in relativni spust SZ bloka (reverzni premik ob razpoki $140^\circ/80^\circ$). Hkrati opazujemo tudi stiskanje v horizontalni ravnini. Gre za zelo velik premik v kratkem obdobju enega meseca, ki ga verjetno lahko povezujemo s spremembami napetosti v Zemeljski skorji na področju JV Slovenije.



Slika 2 – Merjenje tektonskih mikro premikov v Kostanjeviški jami s TM 71 ekstenziometrom ($+x$ =kompresija, $-x$ =ekstenzija, $+y$ =levi horizontalni premik, $-y$ =desni horizontalni premik, $+z$ =dvig SZ bloka, $-z$ =spust SZ bloka). Zgornji graf – premiki, spodnji graf – rotacije.

Od 19. junija 2008 je v Pološki jami nameščen en ekstenziometer. Jama (10.800 m dolga in 704 m globoka) je bila izbrana, ker njeni rovi ležijo 250-800 m južno od Ravenskega preloma, ob katerem je nastal potres 12. aprila 1998 ($M=5,6$). Po ustnem pričevanju jamarjev so po potresu opazili nekaj odpadlih blokov v spodnjih-vhodnih delih jame. Tudi nadžarišče potresa leta 2004 ($M=5,2$) je bilo v bližini Pološke jame. Prav zato smo se, sicer po zelo zahtevni namestitvi, odločili, da inštrument TM 71 postavimo v kraško jamo, ki je zelo blizu nadžarišč potresov iz let 1998 in 2004 ter v bližino Ravenskega preloma. Zaradi zahtevnosti dostopa, premike odčitamo na približno vsaka

dva meseca. Naš namen je razumevanje tektonskih aktivnosti na Krnskem pobočju ter na območju širše prelomne cone Ravenskega preloma.

TM 71 je v Pološki jami (Slika 3) nameščen med dvema tektonsko premaknjenima plastema ($120^{\circ}/40^{\circ}$) zg. triasnega apnenca, in sicer okrog 50 m stran od spodnjega JV vhoda v jamo. V obdobju od 2008 – 2014 smo izmerili premik v navpični smeri $+z$ za 0,11 mm (relativni dvig SZ bloka), kar pomeni, da se ob plasteh, ki vpadajo proti JV vrši normalni premik. Ta premik se verjetno nakazuje tudi zaradi nestabilnosti terena. Opažamo tudi manjše ($< 0,04$ mm) leve ali desne horizontalne zmike med dvema plastema. Največji kratkotrajni premik pa beležimo v horizontalni smeri. Med 27.11.2011 do 4.3.2012 smo izmerili $-x=0,23$ mm, kar predstavlja ekstenzijo. V obdobju 28.11.2012 do 30.9.2013 pa smo izmerili kompresijo $+x=0,16$ mm. Horizontalni zmiki ter stiskanje in razpiranje med plastema so verjetno tektonsko pogojeni. Normalni premik ob plasteh, ki vpadajo vzporedno s pobočjem pa verjetno kaže na premike zaradi nestabilnosti terena. Tudi v jamskih rovi ponekod lahko opazimo nekaj cm velike premike rogov ob lezikah, kjer je zgornja plast spuščena glede na spodnjo (Slika 3).



Slika 3 - TM 71 ekstenziometer v Pološki jami (levo) in zamaknjen rov ob leziki v Pološki jami (desno) (foto: S. Šebela).

Sedanjo tektonsko aktivnost ob Ravenskem prelomu so pokazale tudi študije s katerimi so ugotovili aktivne tektonske deformacije ob izvirih Tolminke in v prelomni coni Ravenskega preloma (Kastelic et al., 2008). TM 71 se nahaja tudi okrog 200 m nad narivnico Julijskih Alp (Slika 1). Mikro premiki v Pološki jami so zato lahko vezani tudi na to strukturo.

Jama pri Svetih treh kraljih je bila odkrita v tridesetih letih prejšnjega stoletja, ko je bil za potrebe Rupnikove obrambne linije na meji med Jugoslavijo in Italijo izdelan umetno izkopani rov, ki je naletel na kraške rove. Jama je dolga 962 m in globoka 77 m (Mihevc, 1991). Nahaja se tik pod vrhom hriba Vrh nad Rovtami ali Vrh Sv. Treh kraljev (884 m); vhod v jamo je v nadmorski višini 812 m. Jama je nastala v spodnje triasnem zrnatem dolomitu. Plasti vpadajo proti JZ. Za nastanek, obliko in razporeditev rogov so pomembni prelomi in razpoke. Dominantna smer prelomov je S-J. Druga najbolj pogosta smer prelomov je 16/65 (Mihevc, 1991).

TM 71 je nameščen na sečišču dveh izrazitih razpok. Razpoka smeri 0/80 seka razpoko smeri 280/70. Merjenje mikro-premikov od 2012 do 2014 kaže na reverzni premik ob razpoki 0/80 (dvig južnega krila za 0,09 mm). Hkrati se ob isti razpoki vrši levi zmik (0,09

mm) in kompresija za 0,14 mm v smeri S-J. Največji premik pa smo opazovali od 26.9.2012 do 23.10.2012 $+z=0,17$ mm in od 23.10.2012 do 4.2.2013 $-z=0,19$ mm. V prvem obdobju je ob razpoki 0/80 nastal normalni vertikalni premik (dvig južnega krila), v drugem obdobju pa je šlo za reverzen vertikalni premik (spust južnega krila). V obdobju med 26.9.2012 do 4.2.2013 pa smo opazovali ekstenzijo v horizontalni ravnini $-x=0,13$ mm.

Severno od Rovt poteka čez širšo okolico Zavratca in dolino Sovre zavraški snop triasnih prelomov, ki leži v celoti v Tičenski notranji narivni grudi. Najmočnejši prelom je Mlakar (1969) poimenoval Lomsko-Zavraški prelom, mlajšega, ki se odceplja od njega pa Logarjev prelom. Ti triasni prelomi, ki danes potekajo v smeri vzhod-zahod, so nastali v nateznih razmerah in so zato normalnega značaja. Ob Zavraškem snopu triasnih prelomov so bili relativni premiki manjši od nekaj deset do 200 m (Čar, 2010). Tudi današnji mikro premiki ob razpoki smeri V-Z kažejo na možne aktivne premike v širši coni Zavraških prelomov, hkrati pa zaradi bližine Ravenskega preloma verjetno nakazujejo njegovo recentno aktivnost tudi severno od Vrha Sv. Treh kraljev nad Rovtami.

Preglednica 1 – Značilnosti tektonskih mikro premikov v kraških jamah.

št. TM 71	začetek meritev	geološki elementi – smer vpada in vpad	geološka struktura	položaj TM 71 glede na bližnji prelom	premik do 2014	največji premik	kamnina	
Postojnska jama	2	2004	30/80-90 (Post 1); 30/80-90 in 30/60 (Post 2)	prelomna cona	1 km severno od Predjamskega preloma	Post 1 (konec 2004-sredina 2005) – y=0,05 mm; (28.8.-9.12.2009)+z=0,07 mm; (18.6.-22.7.2010) –z=0,05 mm; Post 2 (26.6.-24.7.2008) +z=0,08 mm; (24.7.-5.8.2008) –z=0,08 mm; (24.7.-29.7.2008) –y=0,06 mm; (2.10.2009 – 9.12.2009) +y=0,05 mm; (18.6.2010-12.8.2010) –y=0,05 mm	zg. kredni apnenec	
Kostanjeviška jama	1	2008	140/80	razpoka	1 km južno od preloma Kostanjevica-Brežice	(2008-2014) +x=0,04 mm	sp. kredni apnenec	
Pološka jama	1	2008	120/40	plasti	300 m južno od Ravenskega preloma in 200 m nad narivom Julijskih Alp	(2008-2014) +z=0,11 mm	zg. triasni apnenec	
Županova jama	1	2011	110/90 in 115/90	vzporedni razpoki	500 m severno od Dobrepolskega preloma	(konec 2011-8.10.2012) –x=0,05 mm; (5.8.2012-2014) +x=0,02 mm; (27.5.2012-19.6.2013) –y=0,03 mm; +y=0,03 mm	(5.6.2014-8.10.2014) –z=0,04 mm, +y=0,04 mm; (18.6.-8.10.2014) –x=0,04 mm	sp. jurski apnenec
Jama Svetih treh kraljev (Rupnikov rov)	1	2012	280/70 in 0/80	sekanje dveh razpok	800 m južno od Ravenskega preloma	(2012-2014) +z=0,09 mm; +y=0,09 mm; +x=0,14 mm	(26.9.2012-23.10.2012) +z=0,17 mm; (23.10.2012-4.2.2013) –z=0,19 mm	sp. triasni dolomit

$+x$ =kompresija, $-x$ =ekstenzija, $+y$ =levi horizontalni premik, $-y$ =desni horizontalni premik, z =vertikalni premik

Županova jama se nahaja 4 km južno od Grosuplje in nekoliko južno od hriba Tabor (492 m). Jama je razvita v plastovitih jurskih apnencih, ki so na širšem površju nad jamo nagubani v sinklinalo z osjo v dinarski smeri (SZ-JV). Jama se nahaja okrog 500 m severno od Dobropoljskega preloma. JZ blok Dobropoljskega preloma, zgrajen iz triasnih kamnin, je dvignjen, SV blok, ki ga gradijo jurske kamnine, pa je spuščen (Buser, 1968). Ob dinarsko usmerjenem prelomu, pa naj bi nastali desni horizontalni premiki. Prelom poteka vzhodno od Ljubljane, mimo Škofljice, na severnem robu Ribniške Male gore. TM 71 smo namestili med dve skoraj vzporedni subvertikalni razpoki $110^{\circ}/90^{\circ}$ in $115^{\circ}/90^{\circ}$, ki sta med seboj oddaljeni okrog 1 m. V jami so najbolj zastopane prav te smeri daljših razpok in prelomov. V obdobju od 5.6.2014 naprej beležimo nekoliko večje premike. Tako imamo ekstenzijo (–x) za 0,05 mm, levi horizontalni premik (–y) za 0,03 mm in relativni vertikalni spust (–z) zahodnega bloka za 0,05 mm.

Zaključek

Večletno merjenje mikro premikov v petih kraških jamah v Sloveniji z ekstenziometri TM 71 kaže na manjše tektonske premike v širših conah prelomov: Predjamski (0,05 mm), Ravenski (0,11-0,14 mm; Pološka jama 0,018 mm/leto in Jama Svetih treh kraljev 0,07 mm/leto), Dobropoljski (0,05 mm), Kostanjevica-Brežice (0,05 mm) in nariv Južnih Alp. V krajših časovnih obdobjih beležimo tudi večje premike npr. 0,2 mm v Kostanjeviški jami, ki pa se običajno vrnejo v prvotno stanje. V Pološki jami je del mikro premikov potrebno pripisati tudi nestabilnosti terena. Raziskava je pomembna za razumevanje aktivnih tektonskih premikov v širših conah prelomov, za razumevanje stabilnosti kraških jam in za spremljanje sprememb v napetosti Zemeljske skorje. Raziskava je del projektov: slovensko-češki bilateralni projekti (BI-CZ/06-07-011 in BI-CZ/08-09-015), FP7-INFRA-2010 pripravljalna faza projekta EPOS (*European Plate Observing Systems*) in FP7-PEOPLE-2009-IRSES-246874 (BlackSeaHazNet).

Literatura

- Briestenský, M., Stemberk, J., Michalik, J., Bella, P. in Rowberry, M.D. 2011. The use of karstic cave system in a study of active tectonics: fault movements recorded at Driny Cave, Malé Karpaty Mts (Slovakia). *J. Cave and karst studies*, 73, 114-123.
- Briestenský, M., Thinová, L., Praksová, R., Stemberk, J., Rowberry, M. D. in Knežlová, Z. 2014. Radon, carbon dioxide and fault displacements in central Europe related to the Tōhoku earthquake. *Radiation Protection Dosimetry*, 160/1-3, 78-82, doi: 10.1093/rpd/ncu090
- Buser, S. 1968. Osnovna Geološka karta SFRJ, list Ribnica, Zvezni Geološki zavod Beograd.
- Čar, J. 2010. Geološka zgradba idrijsko – cerkljanskega hribovja. Tolmač h Geološki karti idrijsko – cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1:25 000, Geološki zavod Slovenije, 127 pp, Ljubljana.
- Gosar, A., Šebela, S., Košťák, B. in Stemberk, J. 2011. On the state of the TM 71 extensometer monitoring in Slovenia: seven years of micro-tectonic displacement measurements. *Acta Geodyn. Geomater*, 8/4, 389-402.
- Kastelic, V., Vrabec, M., Cunningham, D. in Gosar, A. 2008. Neo – Alpine structural evolution and present day tectonic activity of the eastern Southern Alps: the case of the Ravne Fault, NW Slovenia. *Journal of Structural Geology*, 30/8, 963-975.
- Košťák, B., Cacoň, S., Dobrev, N.D., Avramova-Tacheva, E., Fecker, E., Kopecký, J., Petro, L., Schweizer, R. in Nikonov, A.A. 2007. Observations of tectonic microdisplacements in Europe in relation to the Iran 1997 and Turkey 1999 earthquakes. *Izvestiya - Physics of the Solid Earth*, 43/ 6, 503-516.

- Mihevc, A. 1991. Jama pri Sv. Treh kraljih. *Naše jame*, 33, 28-37.
- Mlakar, I. 1969. Nappe Structure of the Idrija-Žiri Region. *Geologija*, 12, 5-72.
- Placer, L. 2008. Principles of the tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51/2, 205-217.
- Poljak, M. 2000. Strukturno-tektonska karta Slovenije 1:250000. Mladinska knjiga, Ljubljana.
- Stemberk, J., Košťák, B. in Cacoń, S. 2011. A tectonic pressure puls and increased geodynamic activity recorded from the long-term monitoring of faults in Europe. *Tectonophysics*, 487, 1-12.
- Šebela, S., Turk, J., Mulec, J., Košťák, B. in Stemberk, J. 2009. Statistical evaluation of the 3D monitoring of displacements of Dinaric Fault Zone in Postojna Cave, Slovenia. *Acta Geodyn. Geomater.*, 6/2, 1-14.
- Šebela, S., Vaupotič, J., Košťák, B. in Stemberk, J. 2010. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna Cave, Slovenia. *J. Cave and karst studies*, 72, 21-34.

Vpliv podnebne spremenljivosti na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic: primer vodomerne postaje Litija na reki Savi

Matevž Menih, Nejc Bezak in Mojca Šraj*

Povzetek

V prispevku so predstavljeni rezultati verjetnostnih analiz visokovodnih konic za različna 30-letna obdobja, kjer so bili uporabljeni podatki z vodomerne postaje Litija na reki Savi. Z uporabo metode letnih maksimumov smo tako analizirali 110 let dnevnih vrednosti pretokov od leta 1901 do 2010. V analizi so bile uporabljene različne teoretične porazdelitvene funkcije in metoda momentov L za oceno njihovih parametrov. Z uporabo različnih kriterijev ustreznosti smo za vsako obdobje izbrali porazdelitev, ki se najbolj prilega merjenim podatkom. Primerjali smo projektne pretoke izbranih povratnih dob med posameznimi 30-letnimi obdobji ter ugotovili, da lahko izbrano obdobje meritev pomembno vpliva na rezultate verjetnostnih analiz oz. da ima spremenljivost podnebja pomemben vpliv tudi na projektne pretoke.

Ključne besede: metoda letnih maksimumov, metoda momentov L, verjetnostna analiza visokih vod, Mann-Kendall test

Key words: annual maximum series method, method of L-moments, flood frequency analysis, Mann-Kendall test

Uvod

Poplave so običajno naraven in izredno dinamičen pojav. V Sloveniji je njihov nastanek povezan z močnimi nalivi velikih intenzitet, dolgo trajajočimi padavinami zmernih intenzitet, taljenjem snega ter kombinacijo padavin ter taljenja snega. Manjše poplave ne povzročijo veliko škode, ko pa pride do večjih poplav, pa gre za naravne nesreče, pri katerih je lahko povzročena večja materialna škoda, ki je posledica človeške prisotnosti na poplavnih območjih in pri katerih lahko pride tudi do človeških žrtev (Brilly et al., 1999).

Ogroženost, ranljivost in nevarnost opredeljujejo varstvo pred vodnimi ujmami. Ogroženost posameznega območja določata ranljivost, ki določa ceno škode, ki je bila povzročena na človeških dejavnostih in nevarnost, katera določa stopnjo verjetnosti pojava poplav in naravne pogoje za le-te. Ker je nastala gmotna škoda zaradi katastrofalnih poplav običajno velikih razsežnosti, popolne zaščite pa ni, lahko z uporabo pravih verjetnostnih analiz veliko pripomoremo k zmanjšanju materialne škode (Brilly et al., 1999).

Cilj zaščite pred poplavami na družbeno sprejemljivo raven je zmanjševanje posledic poplav (Brilly et al., 1999). Ko se visoka gladina vode prelije čez rob struge in se razlije po okolici, pride do pojava preplavljanja. Gladina vode pa upada počasneje, kot se je dvigala (Mikoš et al., 2002).

Soodvisnost med pretokom (Q) in povratno dobo (T) imenujemo verjetnost pojava poplav (Brilly et al., 1999). Povratna doba je interval časa, v katerem bo dogodek dosežen ali presežen (Brilly in Šraj, 2005). Če želimo ugotoviti povezavo med pretokom in povratno dobo (Q - T povezava) je treba najprej izvesti kvalitetne meritve pretoka, nato pa lahko preko različnih statističnih metod dobimo povezavo Q - T , ki je za vsako vodomerno

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

postajo edinstvena (Bezák, 2012). Analize v Sloveniji kažejo, da se ekstremni poplavni dogodki v zadnjih dveh desetletjih pojavljajo pogostejše kot prej, kar bi lahko imelo vpliv tudi na ocenjene projektne pretoke.

Zemljino podnebje se je vedno spreminjalo. V zgodovini Zemlje je bilo veliko obdobj, ko je bilo mnogo topleje in tudi mnogo hladneje kot danes. Svet je bil prekrit s tropskimi gozdovi ali z ledenimi prostranstvi. Trenutni trend segrevanja Zemlje lahko sledimo vsaj 200 let nazaj t.j. od zadnjega zelo hladnega obdobja, imenovanega mala ledena doba. V preteklosti pa so bila obdobja, ko so bile temperature precej višje od današnjih (srednjeveško toplo obdobje, holocenski maksimum) (Durkin, 2007). Podnebna spremenljivost je torej dokazana, vzroki zanjo pa so še vedno velika polemika.

Namen te raziskave je ugotoviti vpliv izbranega obdobja meritev oz. vpliv podnebne spremenljivosti na rezultate verjetnostnih analiz visokovodnih konic oz. na projektne pretoke.

Podatki

Vodomerna postaja Litija na reki Savi (Slika 1) je najstarejša postaja Agencije RS za okolje (Frantar & Hrvatin, 2008). Z meritvami so se začeli ukvarjati že leta 1893, leta 1953 pa je bila postaja prestavljena nekaj sto metrov gorvodno. Meritve se od takrat izvajajo z limnigrafom Seba Omega (Bezák et al., 2012). Osnovna analiza podatkov je bila narejena z dnevnimi vrednostmi pretokov, ki so bili izmerjeni na vodomerni postaji Litija (Litija I) na reki Savi in nam jih je posredovala Agencija RS za okolje (ARSO, 2014a). V analizi smo upoštevali niz 110-ih let podatkov (1901-2010). Vzorce za verjetnostne analize visokovodnih konic smo določili po metodi letnih maksimumov. Podatke smo razdelili na 30-letna obdobja s korakom 10 let (Bezák et al., 2014) in tako smo dobili 9 obdobj, ter za vsako od teh izvedli verjetnostne analize.



Slika 1: Vodomerna postaja na Litija I na reki Savi –
lokacija in vodomerna letev (ARSO, 2014b)

Metode

Magnitudo hidrološkega pojava z njegovo pogostostjo povezujejo verjetnostne analize, ki nam omogočajo, da lahko določimo pogostost ekstremnih dogodkov, kot so npr. poplave in ekstremni padavinski dogodki, za povratne dobe, ki so daljše od opazovanega obdobja. Temelj verjetnostnih analiz so tri osnovne predpostavke (Beguería, 2005):

- Za ekstremne dogodke velja, da so slučajne spremenljivke, zato jih lahko opišemo z verjetnostnimi porazdelitvami;
- Obravnavan vzorec je homogen;
- Neodvisnost podatkov.

Za učinkovito načrtovanje hidrotehničnih objektov ter razumevanje vodnih procesov so verjetnostne analize nujne. Kot rezultat teh analiz dobimo zvezo med pretokom in povratno dobo ($Q-T$). V verjetnostnih analizah so najpogostejše upoštevane visokovodne konice oziroma ekstremne vrednosti. Za metodo letnih maksimumov velja, da vzorec vsebuje največje pretoke v posameznem letu. Tako dobimo v vzorcu toliko elementov, kolikor let obravnavamo.

Metoda letnih maksimumov se v hidrologiji za izvedbo verjetnostnih analiz uporablja najpogostejše, ker je vzorec enostavno izbrati. Elementi v vzorcu predstavljajo maksimalne vrednosti pretokov vsakega leta, zaradi tega večinoma ne pride do težav z odvisnostjo posameznih elementov vzorca, razen v primerih, ko se ekstremni dogodek zgodi proti koncu ali v začetku koledarskega leta (Hosking in Wallis, 1997). Slabost te metode je, da lahko pride do neupoštevanja dogodkov, ki sicer niso bili največji v določenem letu, so pa bili dovolj veliki, da bi se jih v analizi moralo upoštevati. Pri metodi letnih maksimumov predstavlja povratna doba povprečni interval časa, v katerem se je zgodil eden ali več dogodkov, ki so večji od izbranega pretoka.

Za verjetnostno analizo visokovodnih konic z uporabo metode letnih maksimumov se v svetu najpogostejše uporabljajo naslednje teoretične porazdelitve: Gumbelova porazdelitev (G), generalizirana porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV), generalizirana logistična porazdelitev (GL), logaritemsko Pearsonova 3 porazdelitev (LP3), Pearsonova 3 porazdelitve (P3) in logaritemsko normalna porazdelitev (LN). Za oceno parametrov teoretičnih porazdelitev se lahko uporabljajo različne metode kot npr.: metoda momentov, metoda momentov L in metoda največjega verjetja. Izbira metode za ocenjevanje parametrov lahko bistveno vpliva na rezultate verjetnostne analize (Bezák, 2012; Hosking in Wallis, 1997; Sankarasubramanian in Srinivasan, 1999). V nadaljevanju je predstavljena metoda momentov L, ki je bila uporabljena tudi v naših analizah.

Metoda momentov L temelji na posebnih momentih L, je računsko dokaj enostavna in izhaja iz metode verjetnostno obteženih momentov (angl. *Probability weighted moments*) (Hosking in Wallis, 1997). Momenti L so bolj primerni za uporabo v primeru majhnih vzorcev in so manj občutljivi na osamelce, ki se lahko nahajajo v vzorcu (Hosking in Wallis, 1997). Ocene momentov temeljijo na vzorcu z velikostjo n , ki je razporejen v naraščajočem vrstnem redu. Ocenjene vrednosti verjetnostno obteženih momentov so zapisane z naslednjimi izrazi (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned}b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \\b_1 &= \frac{1}{n} \sum_{j=2}^n \frac{(j-1)}{(n-1)} x_j, \\b_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_j,\end{aligned}$$

$$b_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_j, \quad (1)$$

kjer je (Hosking in Wallis, 1997):

n velikost vzorca,
 x_j j -ti element vzorca.

S pomočjo enačb (1) zapišemo vrednosti momentov L (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} l_1 &= b_0, \\ l_2 &= 2b_1 - b_0, \\ l_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0, \\ l_4 &= 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Razmerje momentov L (angl. *L-moment ratios*) tj. koeficient variacije momentov L (t_2), koeficient simetrije momentov L (t_3) in sploščenost momentov L (t_4) lahko uporabimo za oceno parametrov porazdelitve ter jih izračunamo z naslednjimi izrazi (Hosking in Wallis, 1997):

$$\begin{aligned} t_2 &= l_2/l_1 && \text{koeficient variacije momentov } L, \\ t_3 &= l_3/l_2 && \text{koeficient asimetrije momentov } L, \\ t_4 &= l_4/l_1 && \text{sploščenost momentov } L. \end{aligned} \quad (3)$$

Po izvedbi verjetnostnih analiz je potrebno preveriti še ustreznost posamezne porazdelitve in izbrati tisto, katera se najbolj prilega merjenim podatkom. V svetu se uporablja veliko različnih kriterijev ustreznosti, nekateri so bolj, nekateri manj primerni za preverjanje ustreznosti porazdelitve. Največkrat se uporabljajo testne statistike kot so: *RMSE* (koren povprečne kvadratne napake), *MSE* (povprečna kvadratna napaka), *MAE* (povprečna absolutna napaka) in Pearsonov koeficient korelacije r . V nadaljevanju je podrobneje predstavljena testna statistika *RMSE*, ki smo jo uporabili v naših analizah.

RMSE kriterij ustreznosti (angl. *Root mean square error*) je eden izmed mnogih kriterijev za določitev najustrežnejše porazdelitve. V nadaljevanju je predstavljena enačba kriterija *RMSE*, ki jo določata izmerjen in izračunan pretok in pri katerem morajo biti izračunani podatki oziroma pretoki urejeni po vrstnem redu od najmanjšega do največjega. Povratno dobo posameznega pretoka lahko določimo z Weibullovo empirično enačbo (Maidment, 1993).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - Q_{max,i})^2}, \quad (4)$$

kjer je:

x_i izračunana vrednost pretoka za izbrano porazdelitev,
 $Q_{max,i}$ izmerjena vrednost pretoka.

Rezultatov kriterija *RMSE* ne moremo ovrednotiti kot dobrih ali slabih, ampak lahko na podlagi rezultatov kriterija ustreznosti izberemo najprimernejšo porazdelitev. Izberemo lahko tisto porazdelitev, pri kateri so rezultati kriterija ustreznosti *RMSE* najmanjši. Pri tem velja opozoriti, da imajo osamelci v nekaterih primerih lahko velik vpliv na izračunano vrednost (Swanson et al., 2011).

Za zaznavanje trenda v podatkih smo v raziskavi uporabili Mann-Kendallov test, saj je po mnenju mnogih raziskovalcev za tovrstne analize izredno učinkovit (Hirsch et al., 1982; Gan, 1992; Kundzewicz in Robson, 2000). V analizah hidroloških podatkov velja Mann-Kendallov test za enega izmed najširše uporabljenih robustnih ne-parametričnih testov na trend. Test služi za identifikacijo pomembnih trendov v spremenljivkah in je zasnovan na »tau« statistiki ter ima dva parametra, to sta stopnja značilnosti (angl. *Significance level*), ki označuje moč trenda in velikost obsega (angl. *slope magnitude estimate*), ki označuje smer in obseg trenda (Jurko, 2009). Osnova Mann-Kendallovega testa je rangiranje podatkovnih nizov, pri čemer se predpostavlja, da so podatki neodvisni in identično porazdeljeni, v nasprotnem primeru bi pozitivna serijska korelacija povečala možnost statistično značilnega trenda. Mann-Kendall test se lahko uporabi za zaznavanje postopne spremembe ali trenda v časovnih nizih.

Vse analize so bile izvedene s programskim orodjem R (R-project, 2014). Program R oziroma vmesnik tega programa R Studio je prosto dostopen in odprtokodni program, ki se večinoma uporablja za statistične analize in je po zmogljivosti primerljiv z ostalimi programi kot je na primer Matlab. Poleg operacijskega sistema Windows ga je mogoče poganjati tudi na Linux in Mac OS X. R je torej okolje, v katerem se lahko izvajajo statistične analize različne zahtevnosti in programski jezik, ki omogoča mnogo več kot le izvajanje osnovnih statističnih analiz.

Rezultati in analiza

Kot je bilo že uvodoma omenjeno, nas je zanimalo, če vse pogostejši ekstremni poplavni dogodki, ki se dogajajo v Sloveniji v zadnjem času, vplivajo na ocenjene projektne pretoke. Tako smo torej 110-letno obdobje meritev na postaji Litija razdelili na 30-letna obdobja s korakom 10 let in tako dobili 9 obdobj, ter vsako posebej analizirali. V preglednici 1 so predstavljeni rezultati verjetnostne analize za vseh devet obravnavanih 30-letnih obdobj in za celotno obdobje (1901-2010) za izbrane povratne dobe (T10, T50, T100 in T500) ter pripadajoča najustreznejša porazdelitev, ki je bila izbrana na podlagi rezultatov kriterija ustreznosti *RMSE* (preglednica 2). Poleg tega testne statistike *RMSE*, smo izračunali še nekaj drugih testnih statistik kot so: *MAE*, *MSE* in *r* (Pearsonov koeficient korelacije), ki pa jih v prispevku nismo predstavili. Kot najustreznejšo smo izbrali tisto porazdelitev, kjer je bila vrednost kriterija ustreznosti najmanjša.

Preglednica 1: Primerjava projektnih pretokov izbranih povratnih dob za posamezna 30-letna obdobja ter izbrana najustreznejša teoretična porazdelitev na desni strani.

	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3	
1901-1930							
T10	1805	1803	1803	1771	1818	1811	LP3
T50	2327	2236	2246	2299	2311	2269	
T100	2548	2405	2418	2552	2516	2453	
T500	3059	2774	2781	3225	2987	2866	

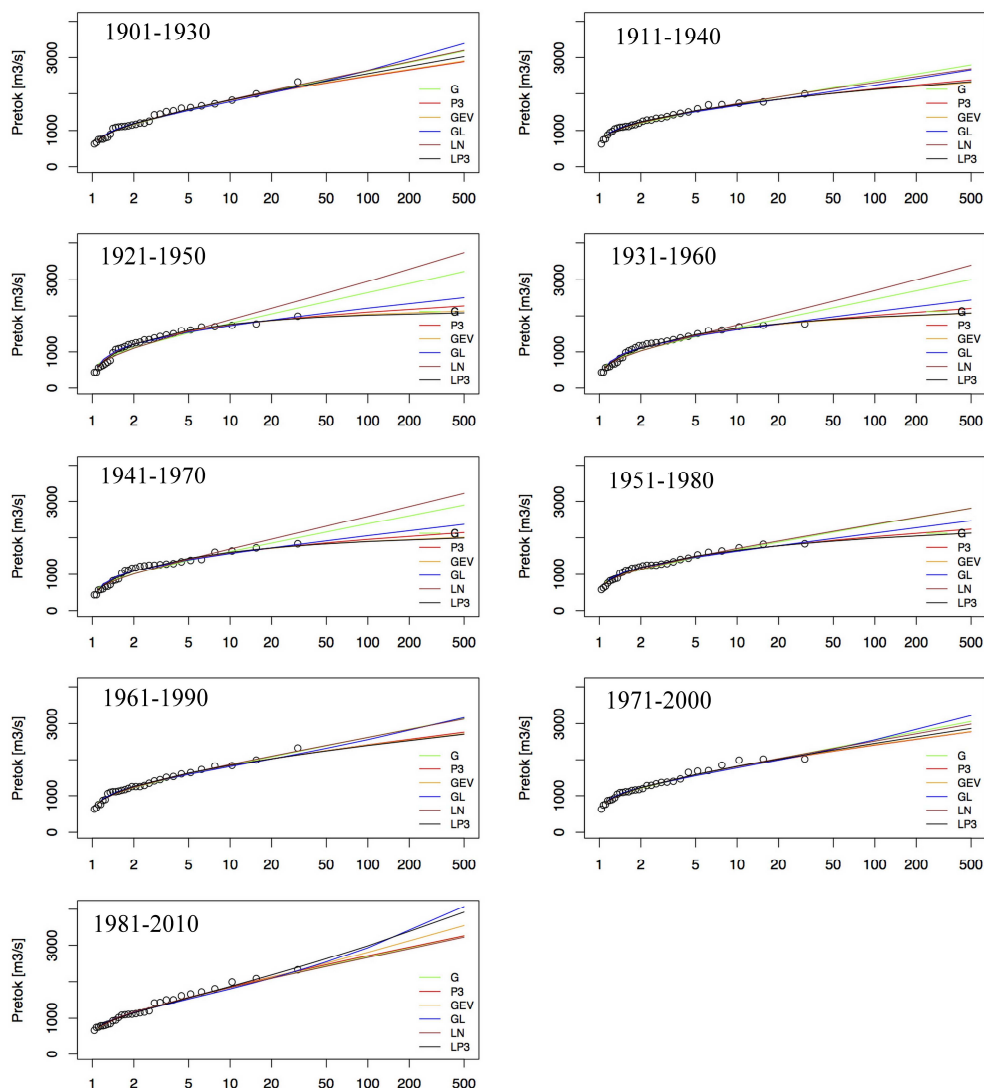
	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3	
1911 - 1940							
T10	1713	1699	1705	1680	1729	1706	GEV
T50	2163	2014	2007	2063	2139	2006	
T100	2353	2131	2110	2235	2306	2114	
T500	2793	2379	2305	2658	2686	2331	
1921-1950							
T10	1795	1741	1752	1727	1896	1766	LP3
T50	2392	2016	1984	2079	2632	1972	
T100	2645	2106	2045	2215	2955	2020	
T500	3229	2277	2135	2506	3737	2085	
1931-1960							
T10	1670	1629	1639	1614	1750	1656	LP3
T50	2226	1917	1890	1975	2412	1904	
T100	2461	2015	1961	2120	2701	1972	
T500	3004	2209	2072	2442	3397	2079	
1941 - 1970							
T10	1624	1585	1594	1570	1694	1605	LP3
T50	2154	1861	1835	1916	2313	1834	
T100	2379	1955	1903	2055	2581	1896	
T500	2897	2141	2011	2364	3224	2079	
1951 - 1980							
T10	1675	1649	1657	1634	1708	1659	GEV
T50	2148	1929	1912	1979	2173	1908	
T100	2348	2029	1990	2124	2366	1986	
T500	2810	2233	2123	2462	2810	2126	
1961 - 1990							
T10	1845	1837	1840	1808	1868	1843	LN
T50	2387	2256	2258	2318	2397	2245	
T100	2617	2416	2411	2556	2617	2394	
T500	3147	2763	2720	3167	3128	2706	
1971 - 2000							
T10	1818	1817	1816	1781	1837	1828	LN
T50	2384	2293	2305	2360	2402	2343	
T100	2624	2479	2495	2640	2640	2552	
T500	3177	2885	2904	3387	3197	3025	
1981 - 2010							
T10	1843	1862	1841	1804	1842	1872	PE3
T50	2434	2465	2506	2541	2416	2628	
T100	2683	2711	2806	2931	2658	2986	
T500	3261	3264	3546	4076	3226	3918	

	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3	
Celotno obravnavano obdobje (1901-2010)							
T10	1775	1758	1765	1734	1810	1768	LP3
T50	2317	2136	2127	2196	2371	2126	
T100	2547	2277	2251	2402	2607	2251	
T500	3077	2576	2486	2911	3161	2494	

Rezultati so pokazali, da je za vodomerno postajo Litija na Savi najustreznejša teoretična porazdelitev logaritemsko Pearsonova 3 porazdelitev (LP3) (preglednica 1), ki je za 3 obdobja izkazala najmanjšo testno statistiko, za vsa ostala obdobja pa eno od najmanjših (preglednica 2). Grafični rezultati verjetnostih analiz visokovodnih konic za posamezna obdobja in za vse uporabljene porazdelitve so predstavljeni na sliki 2.

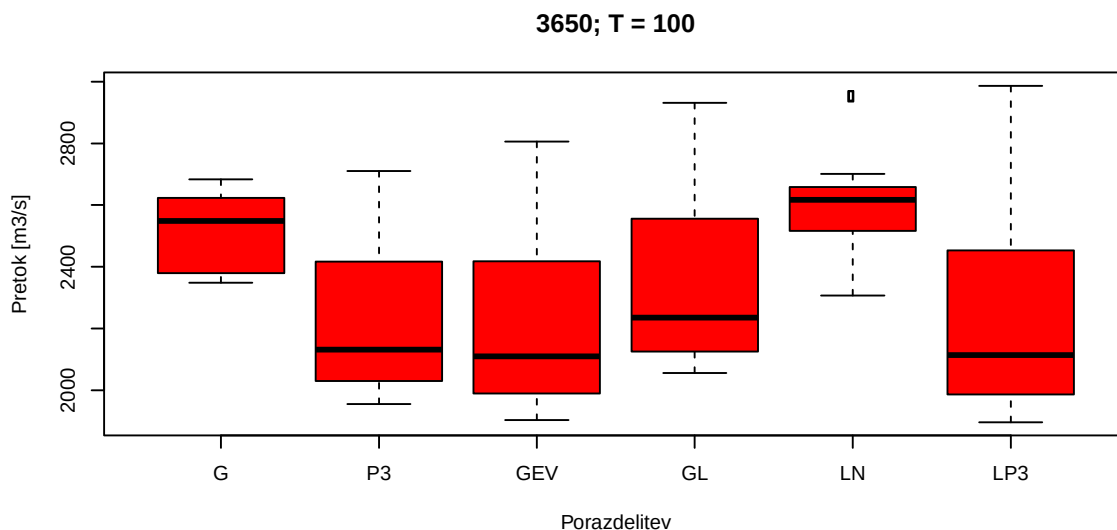
Preglednica 2: Rezultati testne statistike *RMSE* izbranih porazdelitev za vsa obravnavana 30-letna obdobja

obdobje/porazdelitev	G	PE3	GEV	GL	LN	LP3
1901-1930	66,09	59,69	60,1	70,76	60,4	59,41
1911-1940	53,39	37,95	37,39	41,77	42,05	37,56
1921-1950	120,9	67,03	62,87	81,08	143,17	58,34
1931-1960	104,75	61,81	56,94	76,27	120,36	52,88
1941-1970	98,81	68,59	66,8	77,01	108,76	65
1951-1980	72,12	44,57	43,28	51,34	64,73	43,75
1961-1990	55,99	53,98	53,39	55,43	49,07	54,38
1971-2000	60,3	59,63	59,97	68,04	55,55	56,98
1981-2010	65,99	56,89	65,84	80,58	66,4	60,73



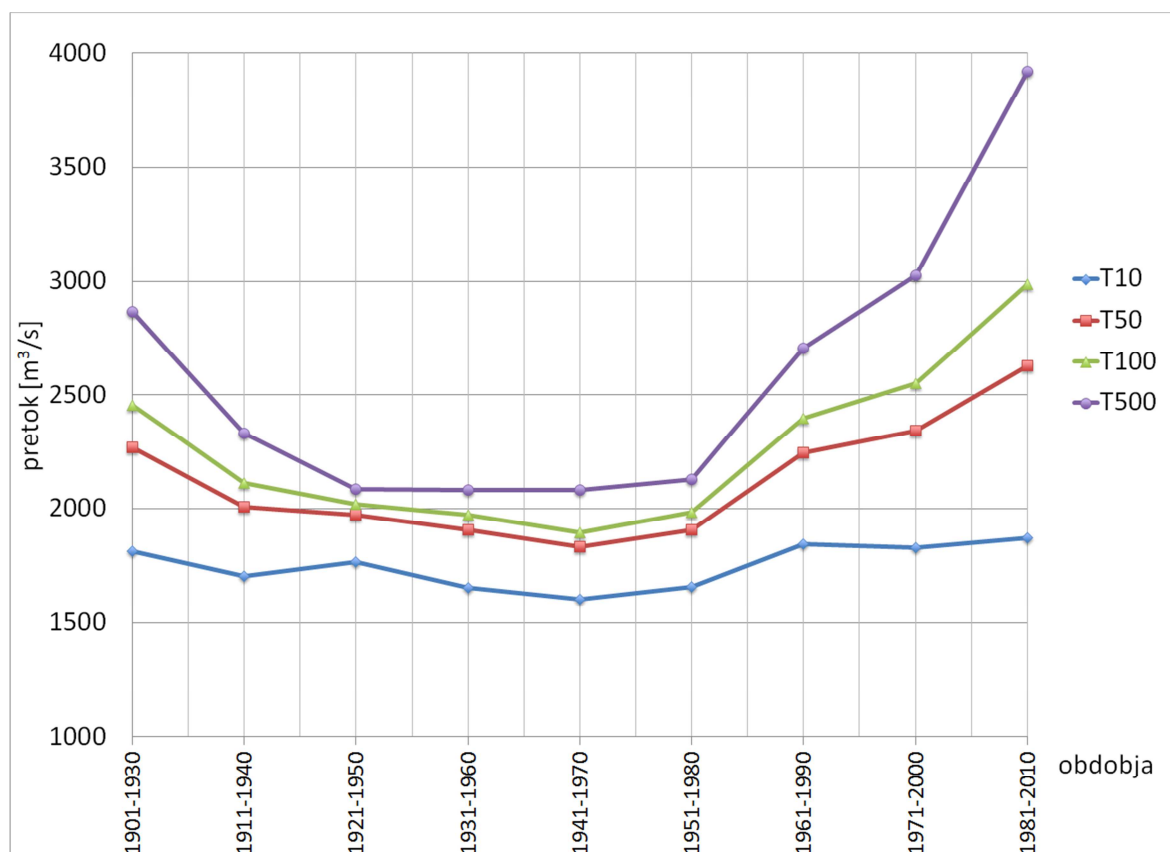
Slika 2: Grafični prikaz rezultatov verjetnostnih analiz z vsemi uporabljenimi teoretičnimi porazdelitvami za posamezna 30-letna obdobja.

Slika 3 prikazuje rezultate verjetnostnih analiz vseh obdobj z uporabo okvirjev z ročaji (angl. *box plot*) za povratno dobo 100 let za vse posamezne porazdelitve. Okvir z ročaji (Košmelj, 2001) je razdeljen na kvartile in ima pet značilnih točk. Srednja črta okvirja predstavlja mediano vzorca, spodnja stranica okvirja predstavlja 25 percentilov (prvi kvartil), zgornja pa 75 percentilov vzorca (tretji kvartil), medtem ko sta s črto z ročajem označeni minimalna in maksimalna vrednost vzorca (Brilly in Šraj, 2005). Vidimo, da najmanjši raztros ocenjenih projektnih pretokov izkazuje logaritemsko normalna porazdelitev (LN), največjega pa logaritemsko Pearsonova 3 porazdelitev (LP3). Seveda pa to ne more biti kriterij za izbiro porazdelitve, saj je LN porazdelitev dala ene najvišjih vrednosti statistik pri kriteriju ustreznosti (preglednica 2). Razlike so precejšnje tudi v samih vrednostih projektnih pretokov. Najvišjo mediano projektnih pretokov dobimo z LN porazdelitvijo, sledi Gumbelova, vse ostale pa imajo približno enak red velikosti (slika 3). Seveda razlike ocenjenih projektnih pretokov naraščajo s povratno dobo, kar je razvidno iz slike 2.



Slika 3: Rezultati verjetnostnih analiz posameznih obdobij za 100-letno povratno dobo in posamezne porazdelitve.

Če naredimo primerjavo projektnih pretokov (LP3) izbranih povratnih dob za posamezna 30-letna obdobja (slika 4) je razvidno, da ocenjene vrednosti projektnih pretokov, ki pripadajo izbranim povratnim dobam od petega obdobja (1941-1970) naprej rastejo, medtem ko so do tega obdobja rahlo padale. Najvišje vrednosti projektnih pretokov izkazuje zadnje 30-letno obdobje (1981-2010), kar je bilo nekako pričakovano, saj se v Sloveniji ekstremni padavinski dogodki in s tem tudi poplave v zadnjih dveh desetletjih pojavljajo pogostejše kot prej (Kobold, 2011). Razlike v projektnih pretokih pa se s povratno dobo povečujejo in so najočitnejše za 100- in 500-letno povratno dobo (slika 4).



Slika 4: Prikaz spreminjanja projektnih pretokov izbranih povratnih dob za 30-letna obdobja meritev z izbrano logaritemsko Pearsonovo 3 porazdelitvijo

Poleg verjetnostnih analiz visokovodnih konic smo ugotavljali tudi trend v obravnavanem vzorcu maksimalnih pretokov. Uporabili smo statistični Mann-Kendallov test, ki je dal vrednost testne statistike τ enako -0,0372 in p -vrednost 0,5663, kar pomeni, da je trend celotnega vzorca maksimalnih pretokov na Savi rahlo padajoč, a ni statistično značilen (s stopnjo zaupanja 0,05). Rezultat kaže, da celoten vzorec maksimalnih pretokov v povprečju praktično skoraj ne kaže nobenega trenda, saj se naraščajoči trend zadnjih desetletij izgubi v padajočem trendu do leta 1941. To pa je še en pokazatelj, ki kaže, da obravnava celotnih nizov meritev pri verjetnostnih analizah lahko podceni projektne pretoke.

Zaključki

Poplave so naraven in zelo dinamičen pojav, povzročena škoda pa je posledica človeške dejavnosti. Varovanje človeških življenj in zmanjšanje gospodarske škode sta cilja zaščite pred poplavami. S pasivnimi ukrepi za zaščito pred poplavami varujemo pred posledicami, z aktivnimi pa vplivamo na obliko in naravo pojava (zmanjšanje trajanja in velikosti) (Brilly et al., 1999). Kvalitetno in zanesljivo izvedene verjetnostne analize so potrebne za izvajanje učinkovitih vodarskih ukrepov in so pomembne za projektiranje, načrtovanje in tudi za obratovanje hidrotehničnih objektov (Bezák, 2012). Verjetnostne analize so osnova

tudi za analizo nevarnosti in analizo ranljivosti, slednjo določa cena škode na človeških dejavnostih, s čimer pa nadalje lahko opredelimo pojem ogroženosti (Brilly et al., 1999).

V prispevku so predstavljeni rezultati verjetnostnih analiz, ki so bile izvedene na podatkih o pretokih z vodomerne postaje Litija na reki Savi, kjer se meritve izvajajo od leta 1893. Analiziranih je bilo 110 let podatkov. Vzorec smo oblikovali po metodi letnih maksimumov in ga razdelili na 30-letna obdobja s premikanjem po 10 let. Na vsakem tako oblikovanem vzorcu smo izvedli verjetnostno analizo. Za ocenjevanje parametrov porazdelitev smo izbrali metodo momentov L. Metoda momentov L se je pri analizah drugih avtorjev izkazala za učinkovitejšo kot metoda momentov ali metoda največjega verjetja (Bezák, 2012; Hosking in Wallis, 1997; Sankarasubramanian in Srinivasan, 1999).

Z uporabo različnih kriterijev ustreznosti smo ugotovili, da se večini vzorcev najbolje prilega logaritemsko Pearsonova porazdelitev 3. Primerjava projektnih pretokov izbranih povratnih dob med 30-letnimi obdobji je pokazala, da se projektni pretoki izbranih povratnih dob od obdobja 1941-1970 naprej povečujejo, medtem kot so do tega leta rahlo padali. Razlike ocenjenih pretokov se povečujejo z večanjem povratne dobe.

Če bi želeli bolj zanesljive zaključke o vplivu podnebne spremenljivosti na projektne pretoke, bi bilo priporočljivo podobne analize izvesti še z metodo vrednosti konic nad izbrano mejno vrednostjo – pragom ti. POT metodo (angl. *peaks over threshold method*). Vsekakor pa lahko na podlagi naših rezultatov ugotovimo, da je za vodomerno postajo Litija zaznana naraščanje projektnih pretokov v zadnjih 70 letih in da je zato v smislu varnosti zelo pomembno, katero obdobje meritev vzamemo za osnovo verjetnostnih analiz. Na osnovi izvedenih analiz ugotavljamo, da bi bilo v praksi za oceno projektnih pretokov, namesto celotnega obdobja meritev priporočljiveje jemati zadnje 30-letno obdobje meritev, saj lahko v nasprotnem primeru projektne pretoke določene povratne dobe precej podcenimo.

Literatura

- Agencija RS za okolje, 2014a. Mesečni in letni pretoki vodomernih postaj. Ljubljana. http://www.arso.gov.si/vode/podatki/arhiv/hidroloski_arhiv.html (Pridobljeno 15. 4. 2014.)
- Agencija RS za okolje, 2014b. Površinske vode. Arhiv hidroloških podatkov. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Sava&p_postaja=3650&p_let=1953&b_arhiv=Prika%C5%BEi (Pridobljeno 23. 10. 2014.)
- Beguiria, S. 2005. Uncertainties in partial duration series modelling of extremes related to the choice of the threshold value. *Journal of Hydrology* 303, 1-4: 215-230.
- Bezák, N. 2012. Analiza visokovodnih konic z metodo vrednosti nad izbranim pragom in z metodo letnih maksimumov. Diplomsko naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Bezák): 106 str.
- Bezák, N., Brilly, M., Šraj, M. (2012). Izbira metode pri verjetnostnih analizah visokovodnih konic, *Zbornik Raziskave in s področja geodezije in geofizike 2012, SZGG*, 45–55.
- Bezák, N., Brilly, M., Šraj, M. (2014). Flood frequency analysis, statistical trends and seasonality analyses of discharge data : a case study of the Litija station on the Sava river. *Journal of flood risk management*, v tisku 2014, doi: 10.1111/jfr3.12118.
- Brilly, M., Mikoš, M., Šraj, M. 1999. Vodne ujme - varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 186 str.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Univerzitetni učbenik, 1.izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.
- Durkin, M. 2007. The great global warming swindle (film). A Wag TV Production, Velika Britanija.

- Frantar, P., Hrvatin, M. 2008. Pretočni režimi. P. Frantar (ur.), Vodna bilanca Slovenije 1971–2000. MOP ARSO, Ljubljana, 43–50.
- Gan, T. Y. 1992. Finding trends in air temperature and precipitation for Canada and North-eastern United States. Proceedings of NHRI Workshop No. 8. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, SK, 57–78.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R. & Smith, R. A. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* 18, 107–121.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. 1997. Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. Cambridge, Cambridge University Press: 224 str.
- Jurko, M. 2009. Statistična analiza trendov značilnih pretokov slovenskih rek. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Jurko): 65 str.
- Kobold M. 2011. Comparison of floods in September 2010 with registered historic flood events. *Ujma* 25, 48–56.
- Košmelj, K. 2001. Uporabna statistika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 249 str.
- Kundzewicz, Z. W. in Robson, A., 2000. Detecting trends and other changes in hydrological data. World climate programme-Water, WCDMP-45, WMO/TD – št. 1013. Geneva, WMO: 157 str.
- Maidment, D. 1993. Handbook of hydrology. Austin McGraw-Hill: 1424 str.
- Mikoš, M., Kranjc, A., Maticic, B., Muller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. *Actahydrotehnica* 20(32). Ljubljana, str. 103, 105. ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 13. 5. 2014.)
- R-project, version 3.0.2., 2014. <http://www.r-project.org/> (Pridobljeno 20. 2. 2014.)
- Sankarasubramanian, A., Srinivasan, K. 1999. Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments. *Journal of Hydrology* 218, 1-2: 13–34.
- Swanson, D. A., Tayman, J., Bryan, T. M. 2011. MAPE-R: a rescaled measure of accuracy for cross-sectional subnational population forecasts. *Journal of Population Research* 28, 2-3: 225–243. <http://www.springerlink.com/content/5174672j6091437t/> (Pridobljeno 15. 5. 2014.)

Objektna analiza padavin iz satelitskih meritev, reanaliz ERA-Interim ter modela WRF na območju Evrope in Severnega Atlantika

Veronika Hladnik^{*}, Gregor Skok^{*}

Povzetek

Objektna analiza padavin modela za napovedovanje vremena WRF, reanaliz ERA-Interim ter satelitskih meritev CMORPH je bila narejena na območju Evrope in Severnega Atlantika za obdobje med letoma 2000 in 2010. Identifikacija objektov je bila narejena z algoritmom FiT, pri čemer smo uporabili radij glajenja padavin $0,75^\circ$ in tri padavinske pragove: 0,5, 2 ter 4 mm. Preučili smo kakšna je življenjska doba padavinskih objektov na posameznem območju domene ter v katero smer se v glavnem premikajo objekti v določeni točki preučevane domene. Ugotovili smo, da se največ dolgoživih objektov pojavi jeseni. Objekti s krajšo življenjsko dobo so bolj pogosti nad kopnim, medtem ko so objekti z daljšo življenjsko dobo bolj pogosti nad Atlantikom. V večini prevladuje gibanje objektov proti vzhodu. Gibanje proti zahodu je pogosto le poleti in jeseni nad južnim delom Severnega Atlantika. Gibanja proti zahodu je nekaj več tudi nad Evropo. Ciklonskih padavin je največ nad oceanom, odstotek se zmanjšuje proti celini ter proti jugu preučevane domene. Največji odstotek ciklonskih padavin je pozimi, najmanjši pa poleti, ko na nekaterih predelih konvektivne padavine celo prevladujejo nad ciklonskimi.

Ključne besede: satelitske meritve CMORPH, reanalize ERA-Interim, model za napovedovanje vremena WRF, objektna analiza, padavine

Keywords: CMORPH satellite measurements, ERA-Interim reanalysis, WRF model, object analysis, precipitation

Uvod

Padavine so ena izmed glavnih in hkrati najtežje napovedljivih komponent klimatskega sistema. Za izvedbo analiz klime na regionalni skali se pogosto uporabljajo regionalni klimatski modeli. Padavine, ki so rezultat regionalnih klimatskih modelov, so med drugim odvisne od sheme za mikrofiziko oblakov, sheme za konvekcijo, velikosti domene in lokacije mej domene (Seth, Giorgi, 1998; Miguez-Macho idr., 2004; Leduc, Laprise, 2009) ter horizontalne ločljivosti (Jacob idr., 2014; Jung idr., 2012), zato je variabilnost padavin velika. Oceno kvalitete napovedi padavin dobimo z verifikacijo, kjer padavine, ki so rezultat regionalnih klimatskih modelov, primerjamo z opazovanji.

Za analizo klime v Evropi na regionalni ali državni skali se pogosto uporablja model WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock idr., 2008). Za njegove začetne in robne pogoje se običajno uporabijo globalne reanalize ERA-Interim (Dee idr., 2011), ki temeljijo na satelitskih in konvencionalnih meritvah. V mnogih študijah so padavine iz modela WRF primerjali s podatki opazovanj padavin pri tleh. Talne meritve so sicer bolj kvalitetne od satelitskih meritev, vendar so na voljo večinoma le nad kopnim in le na dnevni skali (24-urne akumulacije). Satelitske meritve so na voljo povsod (tudi nad oceani) in v boljši časovni ločljivosti (tri ure).

^{*} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

Objektna analiza je metoda, s katero objekt definiramo kot zaključeno območje na zglajenem padavinskem polju, v katerem količina padavin v vsaki od točk objekta presega vrednost padavinskega praga. S pomočjo objektne analize ne samo določimo objekte, temveč jim lahko sledimo tudi v času. Poleg življenjske dobe lahko objektom določimo tudi smer gibanja po izbrani domeni v vsakem časovnem koraku.

V tem prispevku so predstavljeni rezultati objektne analize v smislu časovnih objektov, kot tudi skupku prostorskih objektov, ki pripadajo posameznemu ciklonu. Predstavljena je objektna analiza vseh izmerjenih oziroma napovedanih padavin ter analiza zgolj ciklonskih padavin.

Uporabljena metoda

S pomočjo metode FiT (Forward-in-Time object identification; Skok idr., 2009, 2010, 2013) smo najprej identificirali prostorske ter nato še časovne padavinske objekte. Prostorski objekti so 2-dimenzionalni objekti, kjer dimenziji predstavljata velikost objekta v x in y smeri. Časovni objekti so 3-dimenzionalni prostorski objekti, kjer tretja dimenzija predstavlja časovno komponento oziroma življenjsko dobo objekta. Pri prostorski identifikaciji smo vsako padavinsko polje obravnavali ločeno (nismo upoštevali povezave s polji v predhodnem ali naslednjem časovnem koraku). Pri časovni identifikaciji objektov smo iskali povezavo med objekti v sosednjih časovnih korakih.

Pred uporabo FiT algoritma smo padavinska polja zgladili s pomočjo konvolucije z drsečim povprečjem s horizontalnim radijem glajenja R . Prostorski objekti imajo po glajenju s konvolucijo bolj gladke meje in so bolj podobni padavinskemu objektu, ki bi jih subjektivno določil človek. Pred uporabo algoritma smo določili tudi več padavinskih pragov za identifikacijo objektov. Vrednost praga določa mejo med padavinskim objektom in okolico. Padavinska polja smo zgladili z radijem konvolucije $0,75^\circ$ ter uporabili tri padavinske pragove 0,5, 2 ter 4 mm (Hladnik, 2014).

V naslednjem koraku smo identificirali časovne objekte. Dva prostorska objekta v sosednjih časovnih korakih predstavljata isti časovni objekt, v kolikor njun presek ni prazen. Objekt se v naslednjem časovnem koraku lahko razdeli na več delov (na več prostorskih objektov), vsi njegovi deli so v tem primeru del istega časovnega objekta. To pa ne velja, če se dva ali več padavinskih objektov v naslednjem časovnem koraku združi v en sam prostorski objekt. V tem primeru prostorski objekt v naslednjem časovnem koraku pripada le tistemu časovnemu objektu, katerega območje prekrivanja s prostorskim objektom v naslednjem časovnem koraku je največje.

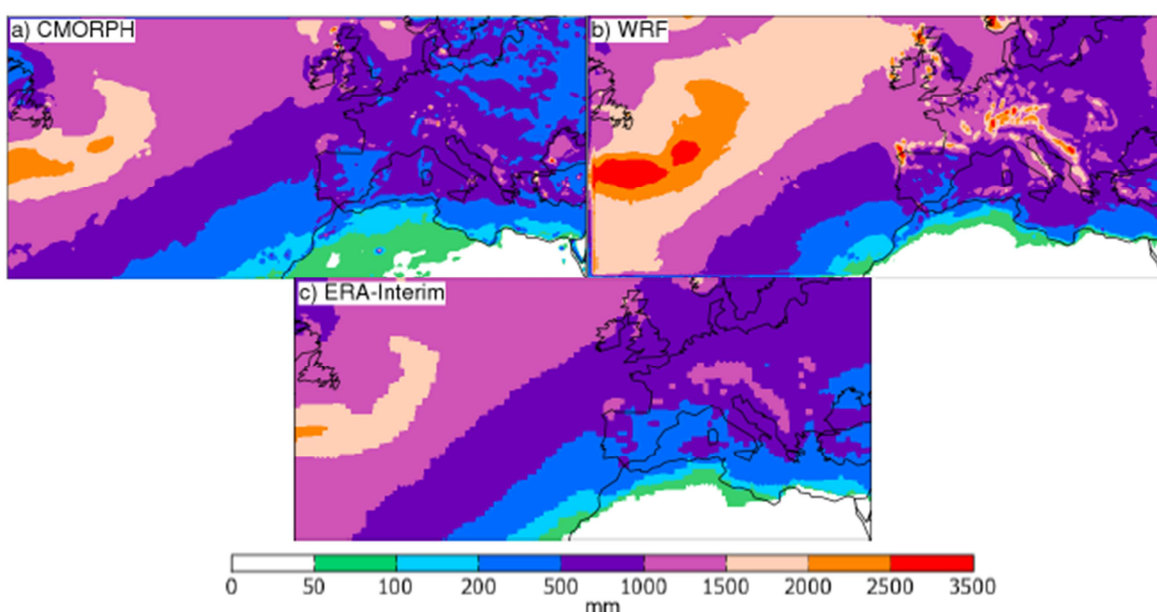
Na malo drugačen način smo se lotili analize ciklonskih padavin. Območja ciklonov smo določili s pomočjo polj zračnega tlaka reduciranega na morski nivo (mean sea level pressure - MSLP). Polja z ločljivostjo $0,25^\circ$ smo imeli na voljo vsakih 6 ur. Določili smo centre ciklonov, ki so predstavljali lokalne minimume v polju 3×3 točk domene. Vrednosti lokalnih minimumov so morale biti manjše od 1010 hPa. Dodatni pogoj, ki smo ga upoštevali, je bil še povprečni gradient v vseh smereh (S, J, V, Z) večji od 7,5 Pa/1000 km (Hanley in Caballero, 2012). Končno velikost ciklona smo določili tako, da smo iz središča ciklona v vsakem koraku iteracije povečali obseg ciklona v vseh štirih smereh, dokler nismo naleteli na sedlo ter je bila vrednost MSLP manjša od 1017,5 hPa.

Podatke WRF in CMORPH (Joyce, 2004) smo zgladili z radijem glajenja 3 mrežne točke, za vse tri nize podatkov pa smo uporabili padavinski prag 0,8 mm (6-urni padavinski podatki). Padavine smo pripisali ciklonu, če presek med padavinskim objektom in ciklonom ni bil prazen. Tudi padavine, ki se niso nahajale v ciklonu, ampak so bile del le-teh, smo pripisali ciklonu. Tako nismo zgrešili tudi večine frontalnih padavin, ki so del

ciklonov, a se največkrat raztezajo več 100 km izven njihovega območja. Pri časovnem sledenju ciklonov smo upoštevali, da iz enega ciklona v naslednjem časovnem koraku ne moreta nastati dva ciklona, prav tako se dva ciklona v naslednjem časovnem koraku ne moreta združiti v en ciklon.

Rezultati

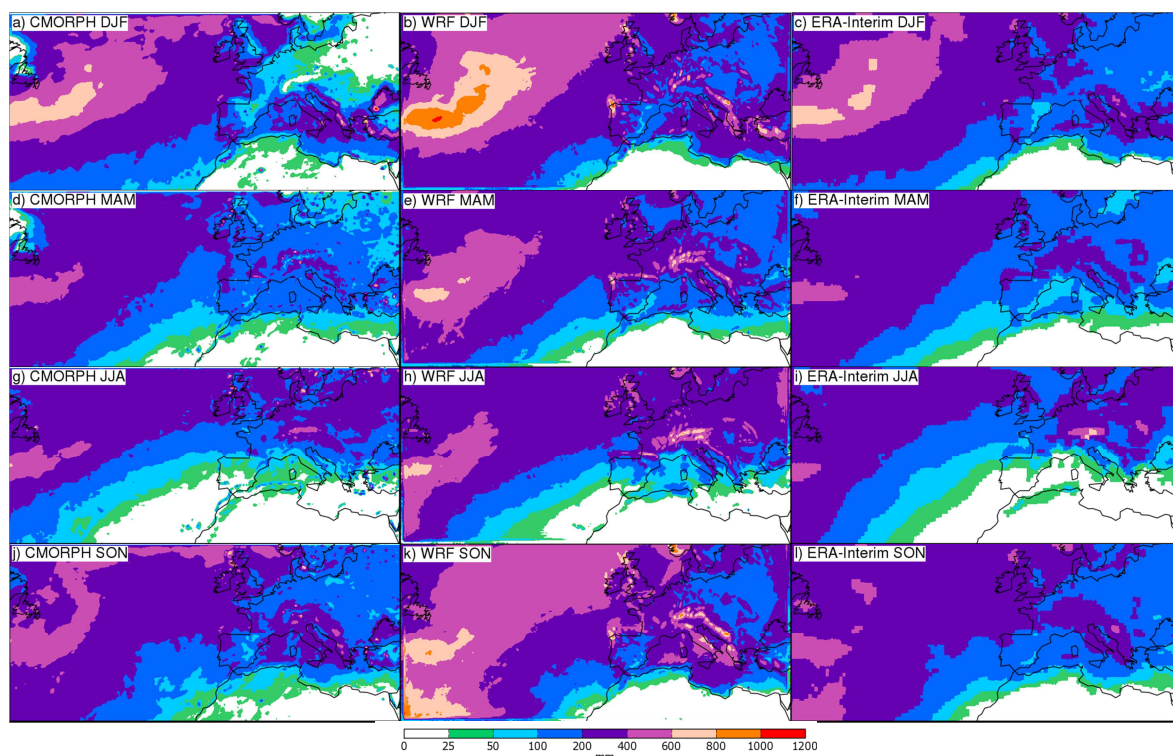
Najprej smo, da bi videli, kakšna je prostorska porazdelitev padavin na izbrani domeni, analizirali povprečne letne in sezonske akumulacije padavin (slika 1, slika 2). Prostorska razporeditev povprečnih letnih akumulacij padavin je podobna za vse tri nize podatkov, razlike so le v količini padavin, saj WRF daje tudi okoli 30 % več padavin kot ERA-Interim ter CMORPH.



Slika 1: Povprečne letne akumulacije padavin na celotni analizirani domeni za obdobje med letom 2000 ter letom 2010 za a) CMORPH, b) WRF in c) ERA-Interim.

Maksimum povprečnih letnih padavin se nahaja nad severnim Atlantikom. Veliko padavin pade tudi na območju Alp, Dinarskega gorstva, na jugu Skandinavskega polotoka, na severu Iberskega polotoka, na zahodu Britanskega otočja in v Karpatih ter drugih gorskih verigah v jugovzhodni Evropi. Na območjih z maksimalnimi vrednostmi povprečnih letnih padavin so največje vrednosti pri WRF, manjše pa pri CMORPH ter ERA-Interim. CMORPH prikaže v vzhodnem delu Evrope precej manjše količine letnih padavin glede na druga dva niza podatkov. Vrednosti so v WRF in v ERA-Interim precenjene na vzhodu Evrope ter podcenjene na zahodu severne Afrike.

Podobno velja tudi za sezonske akumulacije padavin, kar je razvidno iz slike 2. Maksimalne vrednosti povprečnih sezonskih padavin se pojavljajo na istih območjih kot pri povprečnih letnih padavinah.

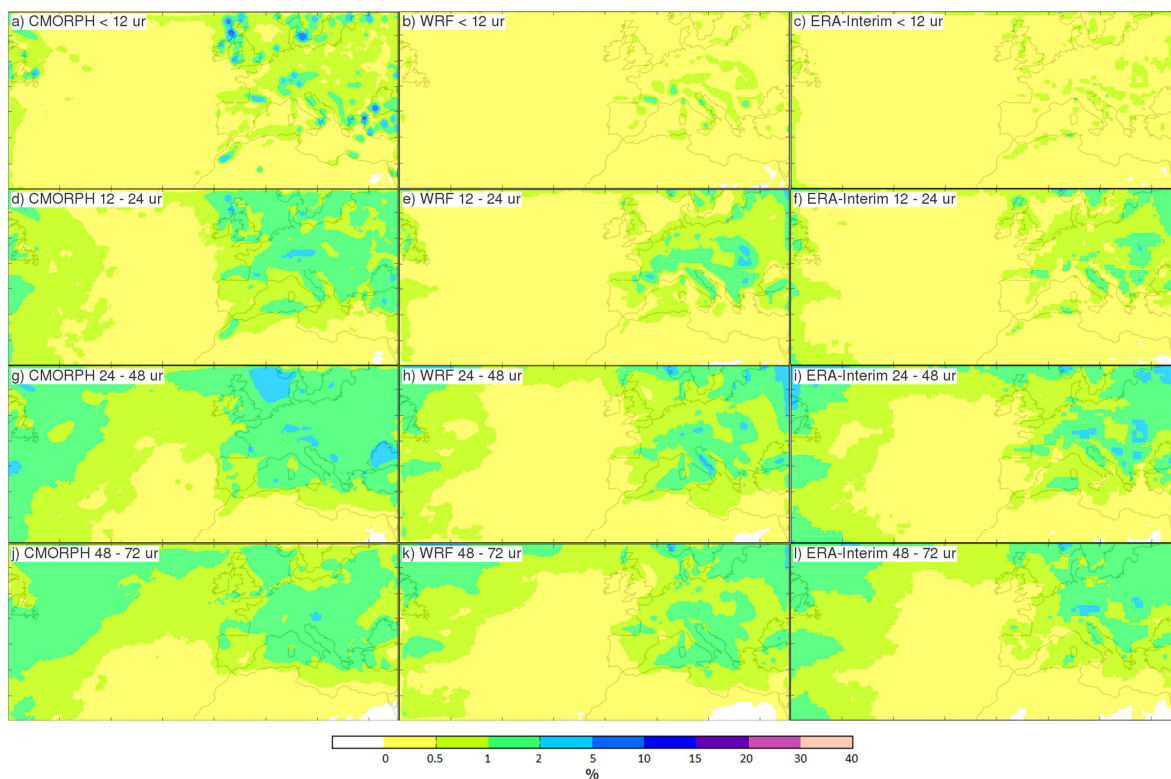


Slika 2: Povprečne sezonske (tri-mesečne) akumulacije padavin za obdobje med letom 2000 ter letom 2010.

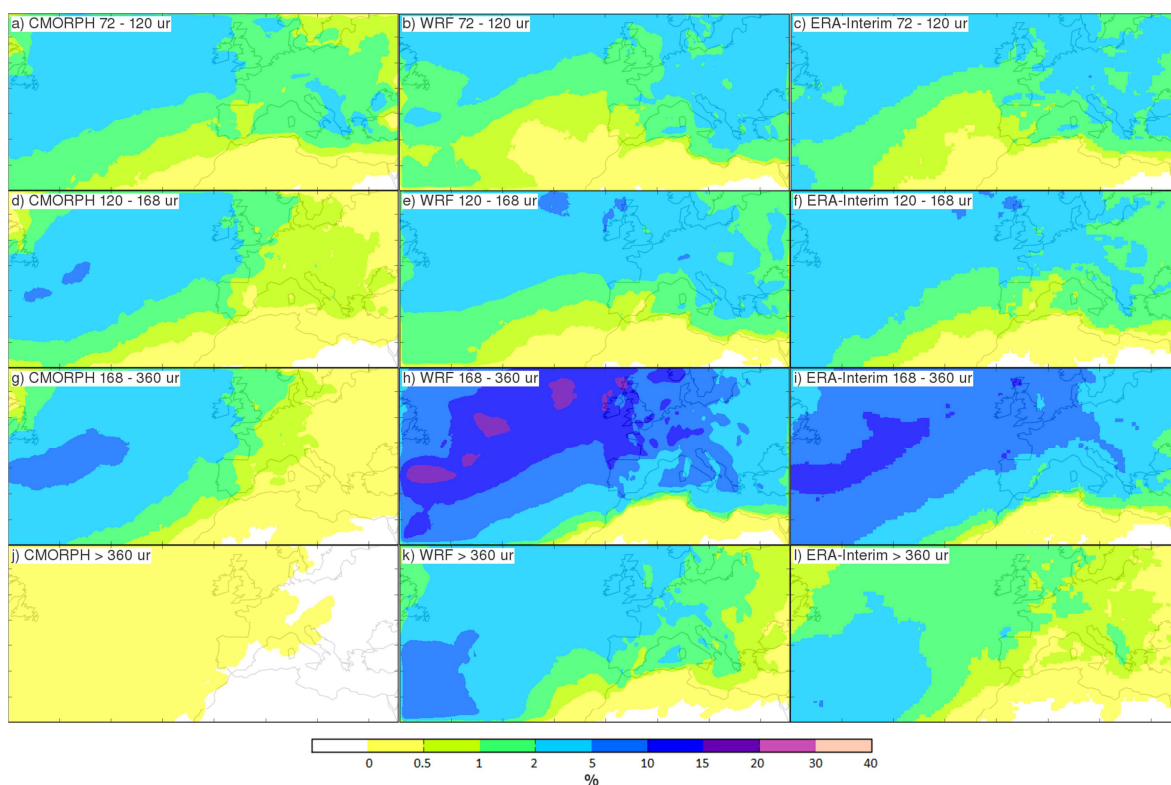
Vsi trije nizi podatkov kažejo, da poleti (JJA) zelo malo padavin pade nad Atlantskim oceanom zahodno od severne Afrike - pod 25 mm v letnem času. Manj kot 25 mm pade poleti tudi v vzhodnem delu Sredozemskega morja ter na jugu Iberskega polotoka. Nad Severnim Atlantikom pade največ padavin pozimi (DJF). Ob istem času jih najmanj pade na vzhodu Evrope, pri CMORPH v povprečju celo manj kot 25 mm. Nasploh nad celino pade v povprečju največ padavin poleti, najmanj pa pozimi. Na območju Alp, Dinarskega gorstva in Apeninov je maksimum jeseni.

Algoritem nam je vrnil lokacije časovnih objektov in njihove življenjske dobe. Slike prekritosti z objekti različnih vrednosti življenjskih dob (slika 3, slika 4) nam prikažejo, kje na domeni se nahaja največ objektov z daljšo oziroma krajšo življenjsko dobo. Rezultati na sliki 3 ter sliki 4 predstavljajo prekritosti z objekti z življenjsko dobo krajšo od 12 ur, z življenjsko dobo med 12 urami in 1 dnem, med 1 in 2 dnevoma, med 2 in 3 dnevi, med 3 in 5 dnevi, med 5 in 7 dnevi, med 7 in 15 dnevi ter prekritost z objekti z življenjsko dobo daljšo od 15 dni. Časovnih objektov z daljšo življenjsko dobo je manj, kljub temu je prekritost z objekti največja za objekte z življenjsko dobo med 7 in 15 dnevi, saj so časovni objekti z daljšo življenjsko dobo sestavljeni iz več prostorskih objektov, ki skupaj običajno pokrivajo večja območja. Pokritost z objekti je za objekte z življenjsko dobo krajšo od 12 ur največja za CMORPH. Enako velja za pokritost z objekti, katerih življenjska doba je med 12 urami in 3 dnevi. CMORPH ima več kratkoživih objektov kot WRF in ERA-Interim. Za objekte z življenjsko dobo med 3 in 7 dnevi je pokritost z objekti večja pri WRF ter ERA-Interim. Za preostale objekte (z življenjsko dobo daljšo od 7 dni) je pokritost z objekti največja pri WRF, sledi ERA-Interim, najmanjša je pri CMORPH. Pokritost z objekti, katerih življenjska doba je krajša od 12 ur, je največja še posebej ob orografskih pregradah nad Evropo. Prekritost z objekti, katerih življenjska doba je daljša od 7 dni, je največja nad oceanom. Kljub temu, da je objektov z daljšo življenjsko dobo nad oceanom manj kot nad kopnim, se nad oceanom običajno nahajajo večji objekti kot

nad celino, kar prispeva tudi k večji pokritosti z objekti z daljšo življenjsko dobo nad oceanom.



Slika 3: Prekritost analizirane domene z objekti glede na življenjsko dobo (manj kot 3 dni).

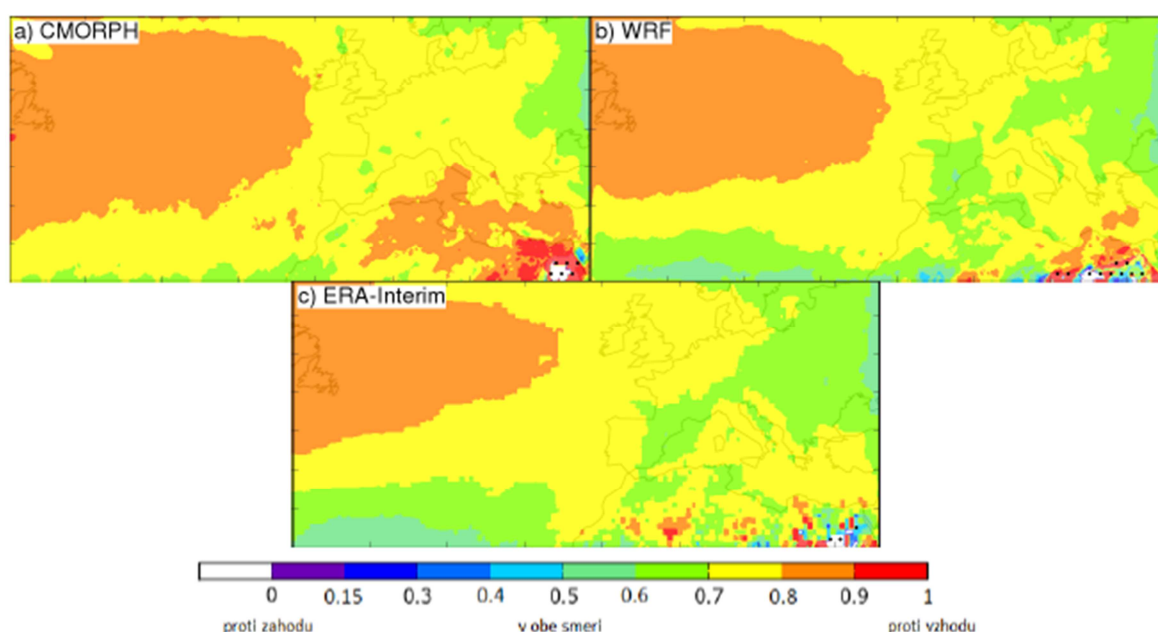


Slika 4: Prekritost analizirane domene z objekti glede na življenjsko dobo (več kot 3 dni).

Zaradi splošnih zahodnih vetrov se na obravnavanem območju zračne mase, ki prinašajo padavine, gibajo v glavnem proti vzhodu. Definirali smo indeks gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu za vsako točko domene z enačbo:

$$EWI = \frac{N_E}{N_E + N_W},$$

kjer je EWI indeks gibanja objektov, N_E število časovnih korakov v celotnem analiziranem obdobju, ko se je na določeni točki domene nahajal objekt, ki se je takrat premikal proti vzhodu, N_W pa število časovnih korakov, ko se je na določeni točki domene nahajal objekt, ki se je takrat premikal proti zahodu. Vrednost indeksa gibanja objektov enaka 1 predstavlja gibanje objektov proti vzhodu, vrednost 0 pa gibanje objektov proti zahodu. Vrednost indeksa gibanja 0.5 pove, da se je enako število objektov gibalo proti vzhodu in zahodu.

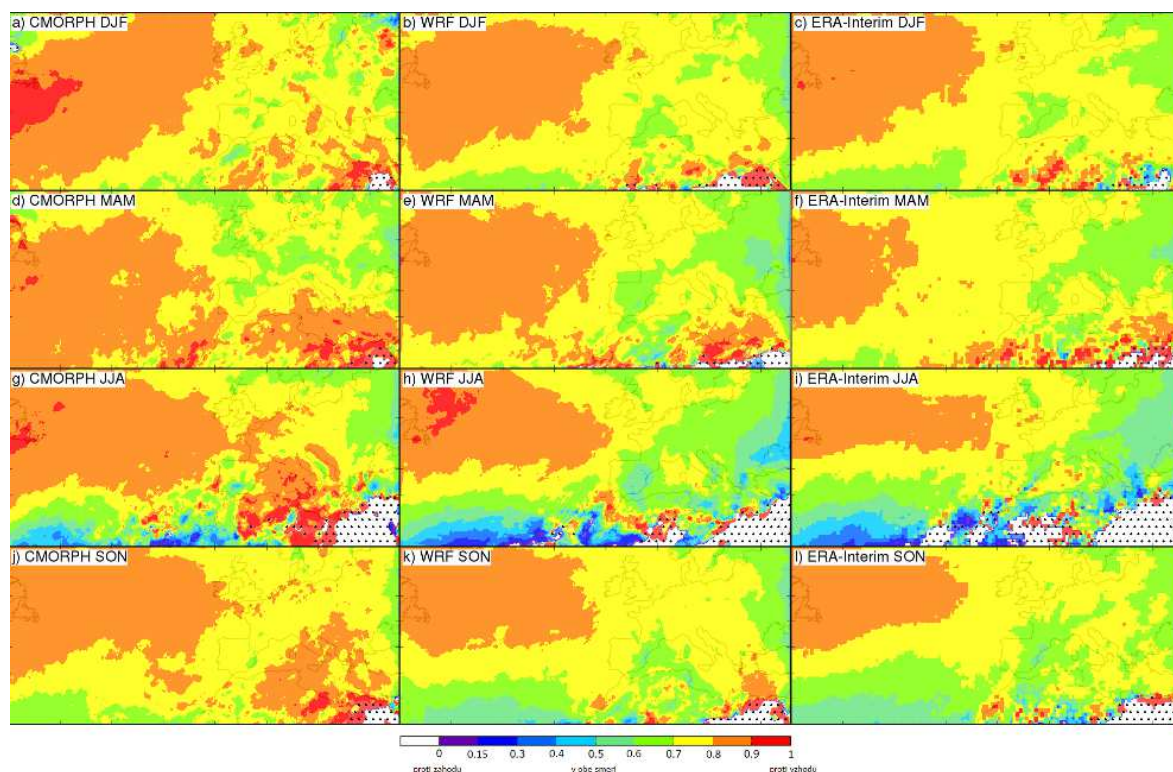


Slika 5: Indeks gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu za celotno analizirano obdobje. Vrednost 1 pomeni, da so se vsi objekti v tej točki domene gibal proti vzhodu, vrednost 0 pa, da so se vsi gibal proti zahodu. Vrednost 0.5 pomeni, da se je enako število objektov gibalo proti vzhodu kot proti zahodu. S pikami so označena območja, na katerih je bilo v točkah domene identificiranih manj kot 10 objektov.

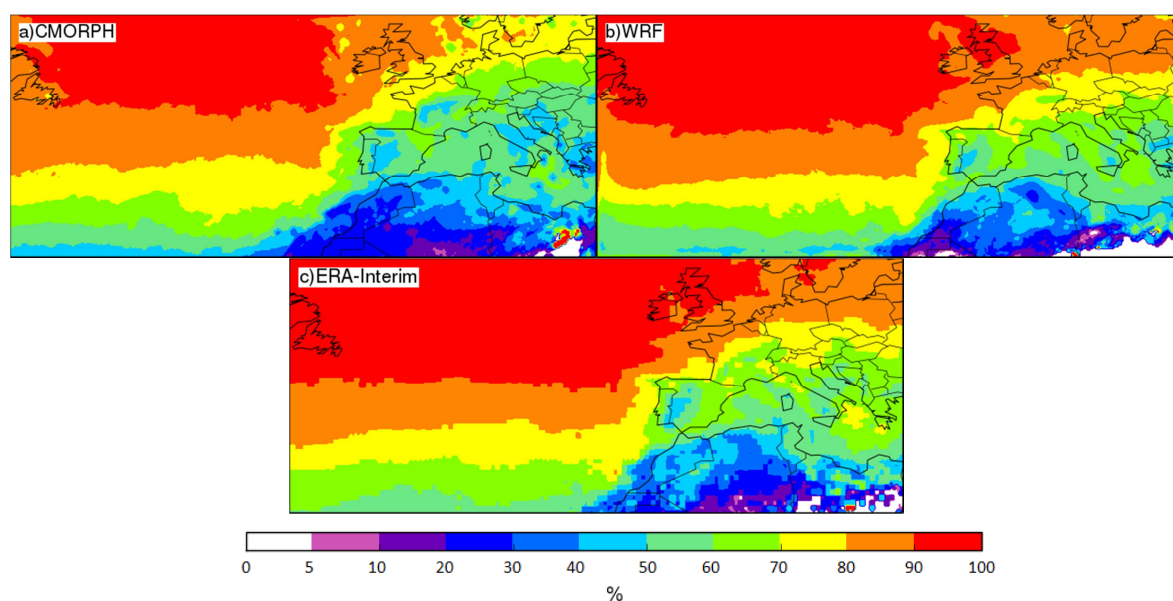
Iz slik gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu na sliki 5 je razvidno, da se nad Severnim Atlantikom proti vzhodu giblje od 80 do 90 % objektov, za satelitske meritve CMORPH se jih toliko giblje vzhodno tudi v večjem delu Sredozemskega morja ter na severu Afrike. Nad Evropo med 60 in 80 % objektov potuje proti vzhodu za vse tri nize podatkov. Na jugozahodu domene se med 40 in 50 % objektov giblje proti zahodu v ERA-Interim in WRF ter nekoliko manj v podatkovnem nizu CMORPH.

Preverili smo, kako se indeks gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu spreminja v posameznem letnem času, slika 6. Največ gibanja proti zahodu je poleti na jugu domene. Gibanje proti zahodu je bolj pogosto v WRF in ERA-Interim kot v CMORPH. Gibanje objektov proti vzhodu je v vseh letnih časih največje nad Atlantikom, pri satelitskih meritvah CMORPH še posebej spomladi in poleti tudi nad Sredozemskim morjem in nad

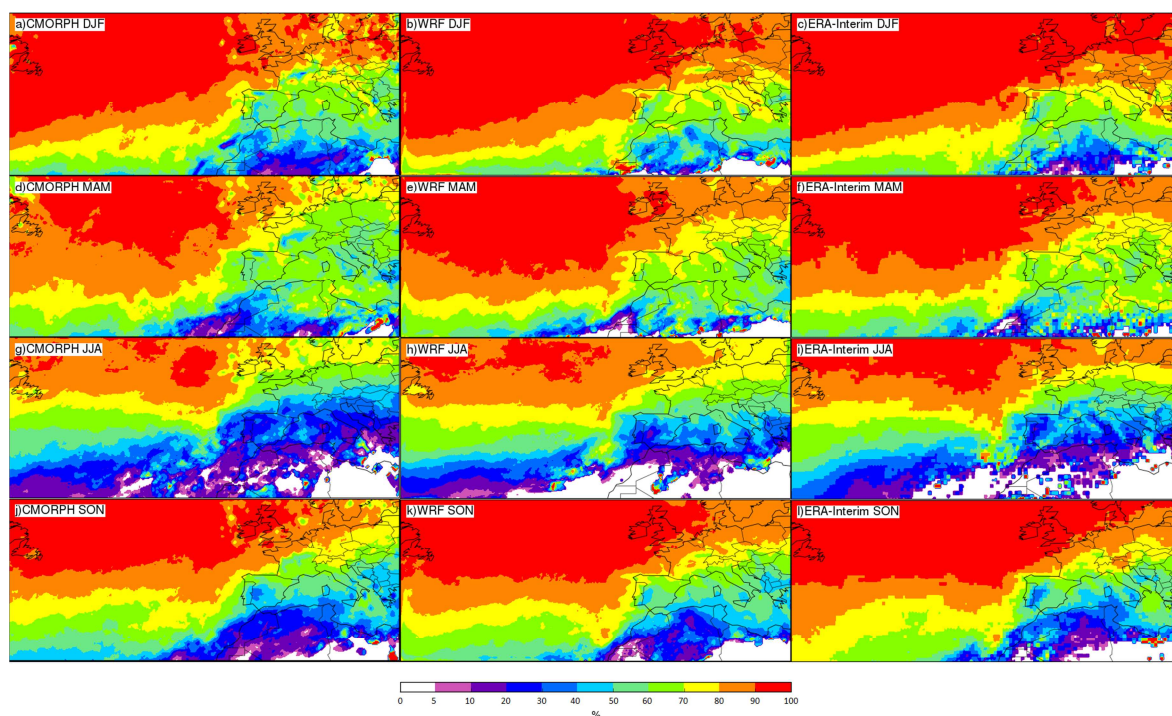
Afriko, kjer je število objektov pogosto manjše od 10, kar je premalo za verodostojno analizo. Tudi na vzhodu domene je več gibanja proti zahodu v ERA-Interim ter WRF, manj pa v CMORPH.



Slika 6: Indeks gibanja objektov proti vzhodu oziroma zahodu po letnih časih v celotnem analiziranem obdobju. Vrednost 1 pomeni, da so se vsi objekti v tej točki domene gibal proti vzhodu, vrednost 0 pa, da so se vsi gibal proti zahodu. Vrednost 0.5 pomeni, da se je enako število objektov gibal proti vzhodu kot proti zahodu. S pikami so označena območja, na katerih je bilo v točkah domene identificiranih manj kot 10 objektov.



Slika 7: Odstotek ciklonskih padavin za celotno analizirano obdobje.



Slika 8: Odstotek ciklonalnih padavin po letnih časih v celotnem analiziranem obdobju.

Podobno smo za vsako točko mreže določili še odstotek ciklonalnih padavin v njej, slika 7. Tega smo določili tako, da smo število polj, v katerih so se pojavile padavine, ki so pripadale ciklonom, delili s skupnim številom polj, kjer so se pojavile padavine. V celotnem analiziranem obdobju je največ ciklonalnih padavin, več kot 90 %, padlo nad severnim delom Severnega Atlantika. Odstotek je manjši nad celino, kjer so poleg ciklonalnih pogoste tudi orografske in konvektivne padavine ter se zmanjšuje proti jugu domene. Najmanjši odstotek ciklonalnih padavin je nad Afriko, kjer je količina padavin že tako majhna. V glavnem so vrednosti odstotkov ciklonalnih padavin za podatke CMORPH na istih lokacijah nekaj odstotkov manjše od le-teh za podatke WRF ter ERA-Interim.

Preverili smo še, kakšne so spremembe v odstotkih ciklonalnih padavin v posameznem letnem času, slika 8. Ciklonalnih padavin je nad Atlantikom in pa tudi nad večjim delom Evrope največ pozimi, marsikje več kot 80 %. Pričakovano je ta odstotek najmanjši v poletnih mesecih, saj je takrat velik odstotek padavin konvektivnega nastanka (predvsem nad celino). V južni polovici Evrope so tako vrednosti odstotka ciklonalnih padavin poleti med 10 in 50 %, pozimi pa med 40 in 90 %. Poleti je nizek odstotek ciklonalnih padavin tudi na jugu Severnega Atlantika (jug domene nad morjem), od 0 do 50 %.

Zaključki

Največje povprečne letne količine padavin se za vse tri nize podatkov nahajajo nad Severnim Atlantikom. Visoke povprečne letne količine padavin so izmerjene tudi ob orografskih pregradah nad Evropo (Alpe, Dinarsko gorstvo, jug Skandinavskega polotoka, sever Iberskega polotoka, zahod Britanskega otočja, Karpati ter druge gorske verige v jugovzhodni Evropi). Najmanj padavin letno pade v Afriki ter poleti tudi v vzhodnem delu Sredozemskega morja, na jugu Iberskega polotoka in nad Atlantskim oceanom zahodno od severne Afrike. Nad celino pade najmanj padavin pozimi, največ pa poleti. Na območju

Alp, Dinarskega gorstva in Apeninov največ padavin pade v jeseni. Največ padavin nad Atlantskim oceanom pade pozimi.

Objekti s krajšo življenjsko dobo so bolj pogosti nad Evropo, največ se jih pojavi spomladi in poleti, objekti z daljšo življenjsko dobo so bolj pogosti nad Atlantikom. Pokritost z objekti z življenjsko dobo krajšo od 12 ur je največja ob orografskih pregradah, pokritost z objekti z življenjsko dobo daljšo od 7 dni je največja nad Severnim Atlantikom. Nad oceanom je prisotnih več dolgotrajnih padavinskih sistemov, ki so najverjetneje povezani z večjimi območji nestabilnosti kot so fronte in cikloni, medtem ko imamo nad kopnim prisotnih tudi več kratkotrajnih orografsko induciranih padavin ter padavin konvektivnega nastanka.

Večinoma prevladuje gibanje objektov proti vzhodu. Gibanje proti zahodu je pogosto le poleti in jeseni nad južnim delom Severnega Atlantika. Gibanje proti vzhodu prevladuje nad Atlantikom ter nad Sredozemskim morjem, nekaj več gibanja proti zahodu je nad Evropo.

Največ ciklonalnih padavin pade nad severnim delom Severnega Atlantika, več kot 90 %. Odstotek je manjši nad celino in se zmanjšuje proti jugu analizirane domene. Najmanjši odstotek ciklonalnih padavin je nad Afriko, kjer je nasploh količina padavin majhna. Odstotki ciklonalnih padavin za podatke CMORPH so v istih točkah analizirane domene nekaj odstotkov manjši od odstotkov za podatke WRF ter ERA-Interim.

Ciklonalnih padavin je nad Atlantikom ter tudi nad večjim delom Evrope največ pozimi, marsikje jih je več kot 80 %. Najmanj ciklonalnih padavin je v poletnih mesecih, saj so poleti pogoste konvektivne padavine. V južni polovici Evrope so tako vrednosti odstotka ciklonalnih padavin poleti med 10 in 50 %, pozimi pa med 40 in 90 %.

Literatura

- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, B., Hersbach, H., Holm, E. V., Isaksen, I., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thepaut, J.-N., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 656, 553-597.
- Hanley, J., Caballero, R. (2012). Objective identification and tracking of multicentre cyclones in the ERA-Interim reanalysis dataset. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138, 664, 612-625.
- Hladnik, V. (2014): Objektna analiza padavin iz satelitskih meritev, reanaliz ERA-Interim ter modela WRF na območju Evrope in Severnega Atlantika (Object analysis of precipitation from satellite measurements, reanalysis ERA-Interim and WRF model in the area of Europe and the North Atlantic). Unpublished Master Thesis, Univerza v Ljubljani, FMF, 52 p. (in Slovenian).
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 2, 563-578.

- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., Xie, P. (2004). CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 3, 487-503.
- Jung, T., Miller, M. J., Palmer, T. N., Towers, P., Wedi, N., Achuthavarier, D., Adams, J. M., Altshuler, E. L., Cash, B. A., Kinter III, J. L., Marx, L., Stan, C., Hodges, K. I. (2012). High-resolution global climate simulations with the ECMWF model in Project Athena: Experimental design, model climate and seasonal forecast skill. *Journal of Climate*, 25, 9, 3155-3172.
- Leduc, M., Laprise, R. (2009). Regional climate model sensitivity to domain size. *Climate Dynamics*, 32, 6, 833-854.
- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G. L., Robock, A. (2004). Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 109, D13104.
- Seth, A., Giorgi, F. (1998). The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *Journal of Climate*, 11, 10, 2698-2712.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research NCAR/TN-475+STR, 113.
- Skok, G., Tribbia, J., Rakovec, J., Brown, B. (2009) Object-Based Analysis of Satellite-Derived Precipitation Systems over the Low- and Midlatitude Pacific Ocean. *Monthly Weather Review*, 137, 10, 3196-3218.
- Skok G., Tribbia, J., Rakovec, J. (2010). Object-Based Analysis and Verification of WRF Model Precipitation in the Low- and Midlatitude Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, 138, 12, 4561-4575.
- Skok G., Bacmeister, J., Tribbia, J. (2013). Analysis of Tropical Cyclone Precipitation Using an Object-Based Algorithm. *Journal of Climate*, 26, 8, 2563-2579.

Modeliranje difuznega sončnega obseva

Primož Mlakar^{*}, Marija Zlata Božnar^{*}, Boštjan Grašič^{*},
Amauri Pereira de Oliveira^{**}, Jacyra Soares^{**},
Dejan Gradišar^{***}, Juš Kocijan^{***}

Povzetek

Sončna energija predstavlja enega izmed najpomembnejših obnovljivih virov energije. Poznavanje kratkoročnih sprememb polja sončnega obseva je ključnega pomena za proizvodnjo energije. Ker je razmerje med direktnim in difuznim sončnim obsevom pomembno za določitev kvalitete sončne energije, smo razvili model difuznega sončnega obseva na podlagi umetnih nevronske mreže s pomočjo meritev globalnega sončnega obseva in drugih meteoroloških meritev. V prispevku predstavljamo kako se zgradi empirični model difuznega sončnega obseva in kako izbira vhodnih podatkov vpliva na kvaliteto modela.

Ključne besede: difuzni sončni obsev, perceptronska umetna nevronska mreža, meteorološke meritve, vrednotenje modelov

Key words: diffuse solar radiation, artificial perceptron neural network, meteorological measurements, model validation

Uvod

Sončna energija predstavlja enega izmed najpomembnejših obnovljivih virov energije. Pridobivanje lahko poteka neposredno (na primer z uporabo foto-voltaičnih sistemov ali kolektorjev za ogrevanje sanitarne vode) ali na bolj kompleksen način. Na primer kmetijsko pridelovanje rastlin za nadaljnjo izdelavo bioetanola ali drugih kemičnih snovi, ki "vsebujejo" sončno energijo v takšni obliki, da je primerna za prenos in dolgoročno uporabo tako kot uporabljamo bencin.

Proizvodnja bio-goriva ima tudi negativne učinke. Primer tega je poraba najkvalitetnejše kmetijske zemlje za takšno proizvodnjo. Dolgoročno lahko to povzroči probleme pri pridelavi hrane tudi zaradi klimatskih sprememb, poleg tega pa Slovenija ne proizvaja dovolj hrane za svoje lastne potrebe.

Alternativa takšni proizvodnji bio-etanola je proizvodnja alg v morski vodi na posebej oblikovanih območjih s čimer se ohranja najboljša zemlja za pridelavo hrane.

Poznavanje kratkoročnih sprememb polja sončnega sevanja je poleg proizvodnje energije tudi ključnega pomena za kmetijstvo, urbanistično načrtovanje in težave, povezane z onesnaženjem ozračja (Stanhill & Cohen, 2001). Za uveljavitev strategij, povezanih z energetske načrtovanjem, je pomembno, da zberemo vse razpoložljive znanstvene informacije o sončnem sevanju ter razvijemo in preizkusimo modele za napovedovanje sončne energije v različnih časovnih skalah, ki jih je mogoče uporabiti za večja območja (Jebaraj & Iniyamb, 2006).

Ne glede na kakšno izrabo sončne energije se odločimo pa nas zanima koliko energije je na razpolago in kakšne kvalitete je (Moheimani, 2005). Zato se izvajajo meritve globalnega sončnega obseva, difuznega in včasih tudi direktnega. Meritve globalnega

^{*} MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293, Šmarje-Sap, Slovenija

^{**} Group of Micrometeorology, Department of Atmospheric Sciences,
University of São Paulo, São Paulo, Brazil

^{***} Institut Jožef Stefan, Jamova 39, SI-1000, Ljubljana

sončnega obseva so relativno enostavne, zato se pogosto izvajajo na avtomatskih meteoroloških postajah. Meritve difuznega obseva in še posebej direktnega sončnega obseva so redke zaradi zahtevnosti meritev.

Ker je razmerje med direktnim in difuznim sončnim obsevom pomembno za določitev kvalitete sončne energije, smo razvili model difuznega sončnega obseva na podlagi umetnih nevronske mreže s pomočjo meritev globalnega sončnega obseva in drugih meteoroloških meritev.

Modeliranje sončnega obseva

Polje sončnega sevanja na površju sestavljajo direktni svetlobni snop in razpršene komponente, ki jih je mogoče neposredno oceniti z meritvami (Oliveira et al., 2002a), posredno z metodami modeliranja (Emde & Mayer 2007) ali s kombinacijo obojega na satelitskem prikazu (Pereira et al., 1996).

Metode modeliranja je mogoče opredeliti kot fizikalne ali empirične. Fizikalno modeliranje vključuje numerično rešitev enačbe prenosa sevanja (Ricchiazzi et al., 1998), empirično modeliranje pa ti. regresijske modele (Jacovides et al., 2007) ali postopke z metodami umetnih nevronske mreže (Soares et al., 2004) na predhodno izbranem nizu podatkov.

Včasih razlika med fizikalnim in empiričnim modeliranjem ni povsem jasno opredeljena. Janjai et al. (2009) so na primer razvili model za napovedovanje urnih vrednosti globalnega sončnega obseva Tajske, pri katerem so upoštevali vplive oblakov, aerosolov, ozona in vlažnosti, pri čemer so kot ocene uporabili satelitske slike vstopnega sončnega sevanja na vrhu atmosfere. Ta model je mogoče opredeliti kot fizikalni, saj temelji na enačbi prenosa sevanja, vendar hkrati z veliko mero empiričnih prikazov absorpcije in razpršitve upošteva vplive oblakov in aerosolov ter druge vplive.

Za nas je opredelitev empiričnih modelov znatno težja naloga. S statističnega vidika je mogoče empirične modele opredeliti kot parametrične in neparametrične. Parametrični modeli vključujejo posplošene linearne modele, kot je logistična regresija (Sansigolo, 1997), linearne (Jiang, 2009) in nelinearne regresijske modele, kot so polinomske, odsekovne in sigmoidne funkcije, ter Fourierjeve in podobne transformacije (Li et al., 2010) in avtoregresivne modele, kot sta metoda avtoregresivnega integriranega drsečega povprečja ARIMA (Jain & Lungu, 2002) in proces avtoregresivnih drsečih povprečij ARMA (Zaharim et al., 2009). Neparametrična modela sta umetna nevronska mreža (Senkal & Kuleli, 2009) in mehka logika (Sen, 1998).

Kratek pregled razpoložljive literature kaže več neskladij in napačnih predstav o empiričnih modelih. Bakirci (2009) je na primer izvedel obsežno raziskavo empiričnih modelov, s katero je želel oceniti mesečne povprečne dnevne vrednosti globalnega sončnega obseva na osnovi Angstromove formule. Navedel je šestdeset formul, ki jih je razvrstil v štiri skupine: linearne, polinomske, trigonometrične in druge. Statistično gledano so vsi ti modeli opredeljeni kot parametrični empirični modeli ne glede na uporabljeni izraz za povezavo globalnega sončnega obseva s spremenljivkami, kot so relativno število sončnih ur (razmerje med številom sončnih ur z največjim številom sončnih ur), zemljepisna širina, zemljepisna dolžina, nadmorska višina, deklinacija Sonca, temperatura zraka okolice, relativna vlažnost in količina padavin.

Naslednji primer težav, ki se pojavljajo pri empiričnih modelih, sta navedla Wong in Chow (2001). Po njunem mnenju je mogoče empirični model opredeliti kot parametrični in dekompozicijski. Dekompozicijski modeli so razred empiričnih modelov, pri katerih je glavni vhodni podatek globalni sončni obsev, na primer sklop regresijskih modelov za ultravijolične, fotosintezno aktivne in skoraj infrardeče komponente sončnega sevanja na

površju, ki so ga na osnovi globalnega sončnega sevanja za podeželsko območje Botucatu v Braziliji pripravili Escobedo in drugi (2009).

Merjenje polja sončnega sevanja in situ je najnatančnejši način ocenjevanja globalnega, direktnega in razpršenega sončnega sevanja na površju. Tovrstna dognanja pa je treba z vidikov umerjanja in prostorske »reprezentativnosti« obravnavati z visoko mero previdnosti, zlasti ker večina uporabljenih senzorjev ne upošteva napak, povezanih z vplivi temperature, naklona in prezračevanja (Gueymard & Myers, 2009).

Tehnologija zaznavanja na daljavo ne zagotavlja tako natančnih in zanesljivih podatkov kot meritve in situ, vendar je najučinkovitejša v smislu prostorske reprezentativnosti sončnega obseva (Gupta et al., 1999). Druga težava, povezana s sateliti, so visoki stroški.

Čeprav so rezultati fizikalnih modelov učinkovitejši od empiričnih, je redno ocenjevanje polja sončnega obseva z enačbo prenosa sevanja dokaj težavno. Fizikalni modeli se izvajajo numerično z bolj ali manj poenostavljeno vlogo oblakov, vlažnosti, drugih atmosferskih plinov, prisotnih v manjših deležih, ter aerosolov, kar meče dvom na njihovo sposobnost odsevanja dejanskega stanja.

Difuzni sončni obsev predstavlja pomemben delež celotnega sevanja na površju ter je odvisno od odbojnosti površine, topografije, ki določa delež vidnega neba (Ruiz–Arias et al., 2010), in sestave ozračja, katerega vplivni delež predstavljajo oblaki, trdni delci in vodni hlapi.

Statistično modeliranje kratkotrajnih sprememb difuznega sončnega obseva zahteva uporabo posebnih metod, ki upoštevajo nelinearne zakonitosti, prisotne v kratkem časovnem obdobju. Na splošno so regresijski modeli učinkoviti za mesečne in dnevne vrednosti, vendar z njimi ni mogoče modelirati vpliva oblakov na razpršeno sončno obsevanje po urah, ker je odvisnost zelo nelinearna (Oliveira et al., 2002b).

Naslednja pomembna težava glede empiričnega modeliranja na splošno in zlasti empiričnega modeliranja sončnega obseva je usklajevanje načela preprostosti s potrebo po čim širši uporabnosti. Preprosti empirični modeli so najpogostejše omejeni na določeno regijo in letni čas.

Jacovides et al. (2006) menijo, da je model, ki so ga predlagali Oliveira et al. (2002b) ter Soares et al. (2004), učinkovitejši od regresijskih modelov, vendar nobeden izrecno ne uporablja informacij o vrstah oblakov, ki so eden najpogostejših in najpomembnejših pojavov v ozračju ter pomemben dejavnik podnebne sistema in procesov podnebnih sprememb (Stephens, 2005).

Naslednji dejavnik, ki otežuje ocenjevanje globalnega sončnega obseva na mestnih območjih pa tudi drugje, je onesnaženost zraka. Onesnažen zrak vpliva na razpršeno sončno obsevanje neposredno z razpršitvijo na aerosolih (Pereira et al., 2000) in posredno z zvečanjem števila vodnih kapljic v oblakih v onesnaženem zraku (Rosenfeld & Woodley, 2001).

Soares et al. (2004) smo za premostitev teh težav uporabili metodo umetnih nevronske mreže, s katero smo ocenili difuzni sončni obsev po urah. Metode z uporabo umetnih nevronske mreže implicitno upoštevajo oblačnost in druge parametre. Umetne nevronske mreže so se namreč sposobne naučiti te vzorce. Edina težava pri tej metodi je ta, da umetne nevronske mreže težko uporabljajo osebe, ki niso razvile algoritma. Ta slabost je značilna za večino neparametričnih modelov.

Metode modeliranja povprečnega polurnega difuznega sončnega obseva na Letališču Portorož

Na Letališču Portorož ob sečoveljskih solinah je avtomatska meteorološka postaja (AMP) ARSO-a, katera je opremljena s standardnimi merilniki, ki jih potrebuje manjše

letališče. Poleg merilnika za globalni sončni obsev ima postaja tudi merilnik za difuzni sončni obsev, ki potrebuje premikanje senčila dvakrat na teden ob enakonočju, ko so spremembe največje. Ob sončnem obratu pa je ta interval bistveno daljši. Ker je na letališču vsak dan dežurni meteorolog, je postaja zelo dobro vzdrževana.

Postaja vzorčuje podatke o sončnem obsevu na nekaj sekund in jih vsake polure statistično obdela in shrani.

Od ARSO-a smo dobili vse polurne podatke meritev AMP Letališče Portorož od 1.1.2012 do 30.6.2014. Ta merilna baza je bila osnova za razvoj modelov za difuzni sončni obsev in za njihovo vrednotenje. Merilnih podatkov, ki smo jih uporabili za razvoj, nismo uporabili za vrednotenje modelov.

Za modeliranje smo uporabili metodo umetnih nevronske mreže (UNM). Izbrali smo Perceptronsko UNM s katero imamo največ izkušenj. UNM nismo sami razvijali, uporabili smo UNM z dobrimi referencami (NeuroShell, 2014).

V avtomatiki in pri razpoznavanju vzorcev je postopek modeliranja procesov z UNM zelo uveljavljen. Postopek je sestavljen iz:

1. izbire značilk (v avtomatiki se imenujejo regresorji),
2. izbire vzorcev za učno in testno množico ter množico za vrednotenje modela,
3. učenje UNM,
4. vrednotenje rezultatov.

Če nismo zadovoljni z rezultati, običajno ponovimo postopek z drugimi ali dodanimi značilkami.

Ker so ti izrazi tuji raziskovalcem iz drugi ved, bomo izraze razložili na primeru preprostega modela za povprečni polurni difuzni sončni obsev. S tem smo izbrali izhod iz modela, ki se imenuje izhodna značilka. Za vhode v model izberemo povprečne polurne merilne podatke globalnega sončnega obseva, temperature zraka na višini 2 m, relativne vlažnosti zraka, hitrosti vetra in trenutne ure v dnevu v istem času kot je izhodna značilka. Lahko bi izbrali merilne podatke iz prejšnjega časovnega intervala ali več časovnih intervalov nazaj. To so vhodne značilke. Vzorec pa je vektor vrednosti vhodnih in izhodnih značilk v določenem času. Značilka ni nujno merjen podatek. Uro v dnevu smo dodali, ker predvidevamo, da je močna povezava med časom v dnevu in difuznim sončnim obsevom. Poudariti je potrebno, da, če želimo »napovedati« difuzni sončni obsev, moramo imeti merilne podatke difuznega sončnega obseva za razvoj – izgradnjo modela.

Pred učenjem UNM moramo nastaviti ustrezne datoteke, da UNM lahko prebere podatkovne datoteke z učnimi in testnimi vzorci. V procesu učenja UNM za učenje uporablja učne vzorce. Testne vzorce pa uporablja za optimizacijo učenja, ker je najboljši model tisti, ki ima najmanjšo napako na testnih vzorcih.

Kvaliteto dobljenega modela pa lahko nato določimo z množico vzorcev za vrednotenje, ki niso bili uporabljeni med procesom učenja. Za vrednotenje običajno uporabljamo različne cenilke naprimer: korelacijo, vsoto kvadratov napake, odklon (bias), ...

Rezultati

Za model difuznega obseva na postaji Portorož smo pripravili več modelov katerih cilj je bil empirično določiti čim bolj optimalen model glede na razpoložljivost meritev.

V tem poglavju bomo predstavili dva modela, od katerih je eden zelo uspešen (»Nadgrajeni«), drugi pa nekoliko manj (»Osnovni«). Tako bomo lahko predstavili razlike, ki do tega privedejo.

Za izgradnjo modela smo uporabili podatke izmerjene v letu 2012. Podatke iz leta 2013 in prve polovice leta 2014 pa smo uporabili zgolj za neodvisno preizkušanje – vrednotenje

modela. Vrednotenje je tako potekalo na obširnem podatkovnem setu, ki v procesu izgradnje modela ni bil udeležen. Zadosti velika množica podatkov za vrednotenje (okvirno za polovico večja od podatkov za izgradnjo modela) pa je poleg časovne zaporednosti garancija za solidno neodvisno oceno kvalitete zgrajenih modelov.

Podatke iz leta 2012 smo nadalje razdelili na manjšo množico za optimizacijo (20 % naključno izbranih vzorcev) in preostalo množico za učenje. Proces učenja je bil vedno izveden z algoritmom povratnega širjenja vpliva napake (»backpropagation«), ki je eden od osnovnih možnih. Umetna nevronska mreža je imela topologijo klasične perceptronske nevronske mreže, z dvema skritima nivojema. Vsak od skritih nivojev je imel po 46 nevronov, vsak od teh nevronov pa nelinearno sigmoidno prenosno funkcijo. Končna naučena nevronska mreža za model je bila tista, ki je pokazala najmanjšo povprečno kvadratno napako napovedi difuznega obseva na optimizacijskih vzorcih. Ta model smo potem preizkusili na množici vzorcev za vrednotenje.

Vse značilke smo normirali glede na pričakovani razpon merilnih ali izračunanih vrednosti. Za vse meritve smo uporabljali polurne povprečne vrednosti.

Pri prvem modelu imenovanem »Osnovni« smo uporabili naslednje polurne povprečne značilke: temperaturo zraka, relativno vlažnost zraka, globalno sončno obsevanje, zračni tlak, hitrost vetra, padavine ter zaporedno številko dneva v letu in uro v dnevu. Model je dal solidno dobre rezultate na množici za vrednotenje. Vrednosti cenilk so predstavljene v preglednici 1. Podrobna definicija cenilk je na voljo v delovnem priročniku orodja Delta Tool, ki je izdelan v okviru FAIRMODE foruma za modeliranje onesnaževanja ozračja v Evropi (Thunis et al., 2011). Najbolj smo se za kvaliteto modela orientirali po cenilki R (Pearsonov koeficient korelacije), ki je znašala 0.902.

Preglednica 1 - Vrednosti cenilk za »Osnovni« model

Cenilka	Vrednost
Pearsonov koeficient korelacije (Pearson correlation coefficient) R	0.902
Celotna napaka (root mean square error) RMSE [W/m²]	38.0
Srednji delež odklona (Mean fractional bias) MFB	-0.0384
Faktor 2 (Factor of modelled values within a factor of two of observation) FAC2	0.917

FAC2 je razmerje med številom modeliranih vrednosti, ki so na intervalu med 0.5 in 2.0 merjene vrednosti, in številom vseh modeliranih vrednosti.

Zatem pa smo model izboljšali tako, da smo navedenim vhodnim značilkam dodali še dve značilki in sicer horizontalno instrumentalno vidljivost (RVR) in bazo oblakov. Obe značilki sta klasični avtomatski meritvi, ki se ju izvaja na vseh solidno opremljenih letališčih. RVR je vidljivost v vodoravni smeri (RVR,2014), baza oblakov pa je višina na kateri se nahaja prvi sloj oblakov. Obe meritvi sta avtomatizirani do te mere, da zahtevata le občasno vzdrževanje, podobno kot ostali meteorološki senzorji. Pomembno je, da ti dve

meritvi ne zahtevata pogostega nastavljanja ali kontroliranja, kar je sicer običajno zahtevano za merilnike difuznega in direktnega sončnega obseva. Dodatni izbrani značilki sta izjemnega pomena zato, ker nam vodoravna vidljivost precej pove o prisotnosti megle, ki razprši sončno svetlobo. Prisotnost oblakov pa tudi ključno vpliva na razmerje direktno / difuzno sončno obsevanje. Avtomatski merilnik pa nam ne omogoča identifikacije vrste oblakov, kar bi bilo dodatno zelo uporabno.

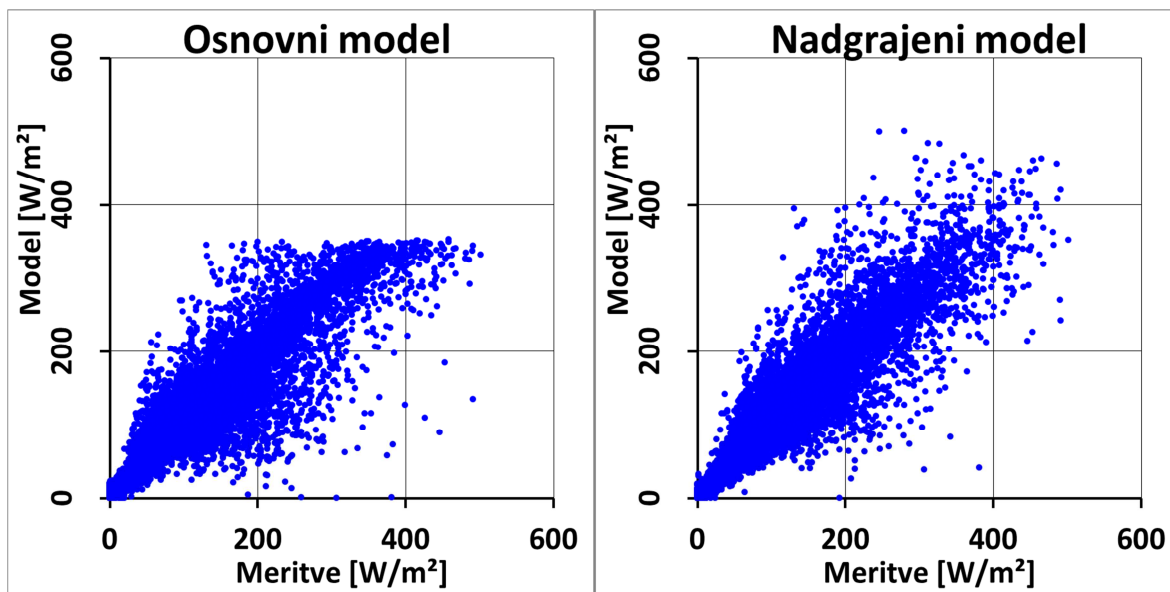
Novi model imenovan »Nadgrajeni« z dodatnima značilkama je izboljšal ključno cenilko R na vrednost 0.924. V preglednici 2 so prikazane še vrednosti ostalih cenilk v primerjavi z »Osnovnim« modelom.

Na sliki 1 sta predstavljena grafa raztrosa merjenih in napovedanih vrednosti difuznega sončnega obseva za oba modela. Graf raztrosa »Nadgrajenega« modela kaže v glavnem zelo solidno obnašanje modela, nekaj pa je merilnih ali napovedanih vrednosti, ki se zelo približajo osem, kar kaže, da je še vedno nekaj merilnih vzorcev katerih obnašanja ne moremo opisati z informacijo, ki jo nosijo merilne vrednosti izbranih značilk. To je zaenkrat odprto polje za nadaljnje delo.

Sledijo še trije izseki – grafi časovno zaporednih merjenih in napovedanih vrednosti difuznega sončnega obseva na sliki 2 za lažjo predstavo kako dober ali pa kako slab je lahko model. Uporabljene so vrednosti drugega opisanega modela »Nadgrajeni« z večimi značilkami in množico vzorcev za vrednotenje.

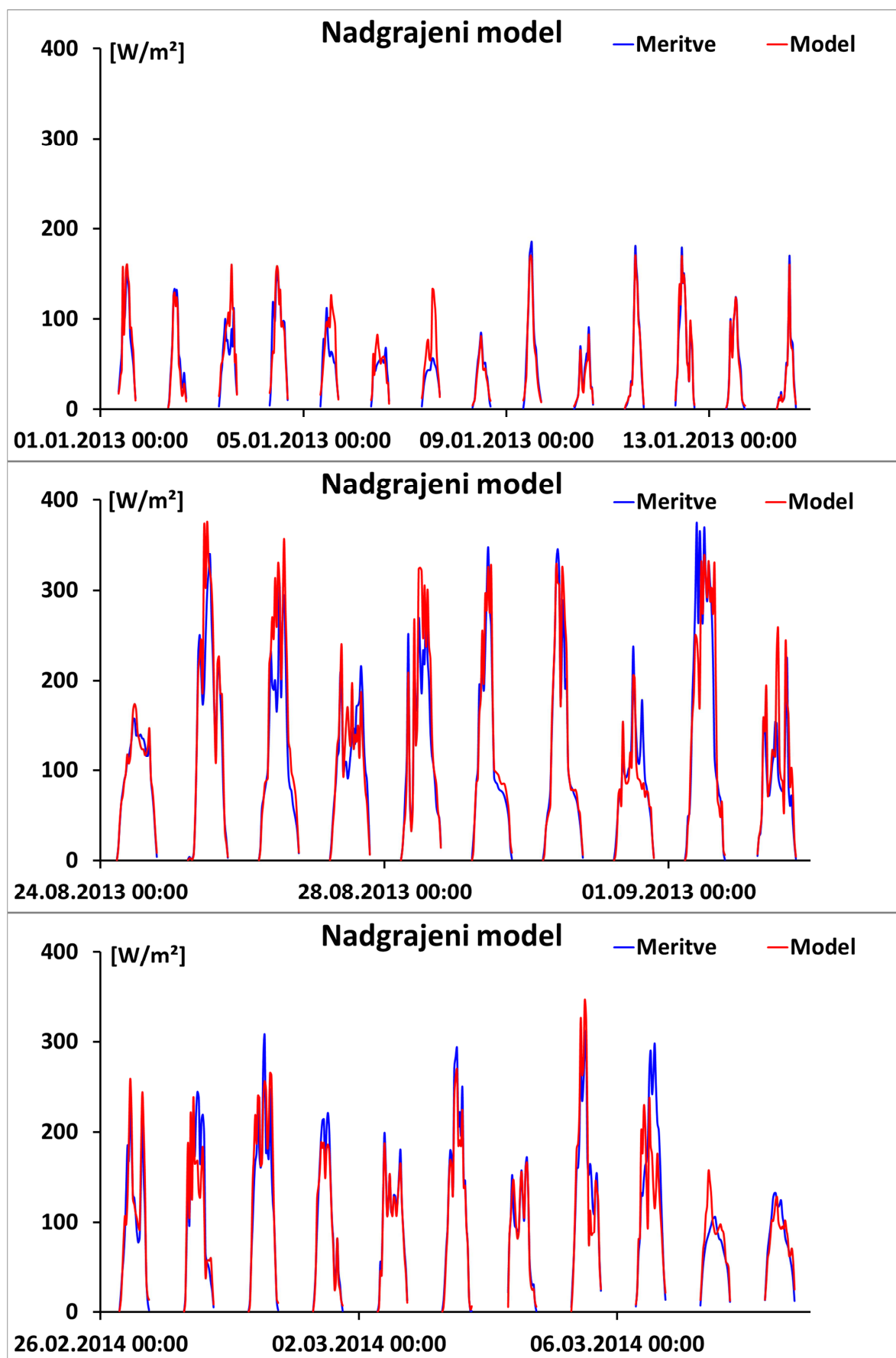
Preglednica 2 - Primerjava vrednosti cenilk med modeloma

Cenilka	Osnovni	Nadgrajeni
Pearsonov koeficient korelacije (Pearson correlation coefficient) R	0.902	0.924
Celotna napaka (root mean square error) RMSE [W/m²]	38.0	33.9
Srednji delež odklona (Mean fractional bias) MFB	-0.0384	0.0024
Faktor 2 (Factor of modelled values within a factor of two of observation) FAC2	0.917	0.944



Slika 1 – Grafa raztrosa merjenih in napovedanih vrednosti difuznega sončnega obseva obeh modelov

Že na prvi pogled so rezultati za »Nadgrajeni« model boljši kot pri »Osnovnem«. Pri »Osnovnem« modelu je očitna omejenost pri približno 350 W/m^2 . Slabost pripisujemo premajhni informacijski vsebnosti učnih vzorcev opisanih z navedenimi značilkami.



Slika 2 – Grafi časovno zaporednih merjenih in napovedanih vrednosti difuznega sončnega obseva za »Nadgrajeni« model

Razprava

Modeli na osnovi umetnih nevronske mreže so ena od pomembnih vrst modelov, ki so še posebej uporabni v primerih, ko imamo na voljo daljše nize zgodovinskih merjenih podatkov na izbrani lokaciji za katero želimo z modelom ponazoriti merjen fizikalni parameter.

Pri izbiri vrste umetne nevronske mreže smo upoštevali, da je matematično dokazano, da je ustrezno konfigurirana perceptronska nevronska mreža z dvema skritima nivojema z nelinearno prenosno funkcijo univerzalni aproksimator. Kar pomeni, da z njo lahko dovolj dobro ponazorimo (aproksimiramo) poljubno nelinearno funkcijo večih vhodnih spremenljivk, pogoj je le, da ta nelinearna funkcija nima singularnosti (Hornik, 1991; Kurkova, 1992). Ker smo aproksimator izbrali za ponazoritev meteoroloških meritev, katerih časovni nizi podatkov nimajo singularnosti, je to vsekakor ustrezna uporaba tega univerzalnega aproksimatorja.

Zgrajena modela kažeta na to, da že z osnovnimi meteorološkimi meritvami lahko postavimo soliden model difuznega sončnega obseva. Če pa model nadgradimo še z meritvami letališke meteorologije, pa ga še izboljšamo. Slabost takega modelskega pristopa je edino v tem, da zahteva vnaprej izvedeno obdobje, ko merimo tudi modelirani parameter – difuzno sončno obsevanje. Ko pa je model zgrajen, lahko meritev umaknemo (jo na primer prestavimo na drugo lokacijo kjer si tudi želimo zgraditi model).

Solidno dobra informacija o izmerjenih vrednostih in vsakokratnem razmerju med difuznim in direktnim sončnim obsevanjem je ključna vhodna informacija za inženirsko načrtovanje sončnih elektrarn. Poleg seveda vseh ostalih tudi od geografske lokacije odvisnih vrednosti (Rakovec et al., 2011).

Sklep

Predstavili smo dva relativno enostavna in kljub temu solidno uspešna modela difuznega sončnega obsev zgrajena na osnovi perceptronske umetne nevronske mreže.

Perceptronska umetna nevronska mreža je univerzalni aproksimator in je kot taka široko uporabna za različne ponazoritve meteoroloških parametrov (Mlakar & Božnar, 2011).

Zahvala

Raziskavo je delno financirala ARRS – Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, projekta št. L2-5475 in L1-4154.

Literatura

- Bakirci, K. (2009). Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2580–2588.
- Emde, C., Mayer, B. (2007). Simulation of solar radiation during a total eclipse: a challenge for radiative transfer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 2259–2270.
- Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Oliveira, A. P., Soares, J. (2009). Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, 86, 299–309.

- Gueymard, C.A., Myers, D. R. (2009). Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative modeling. *Solar Energy*, 83,171–85.
- Gupta, S. K., Ritchey, N. A., Wilber, A. C., Whitlock, C. H., Gibson, G. G., Stackhouse, Jr. P.W. (1999). A climatology of surface radiation budget derived from satellite data. *Journal of Climate*, 12, 2692–710.
- Hornik, K. (1991). Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks* 4, 251-257
- Jacovides, C. P., Tymvios, F. S., Assimakopoulos, V. D., Kaltsounides, N.A. (2007). The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 277–87.
- Jacovides, C. P., Tymvios, F. S., Assimakopoulos, V. D., Kaltsounides, N.A. (2006). Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. *Renewable Energy*, 31, 2492–504.
- Jain, P.K., Lungu, E.M. (2002). Stochastic models for sunshine duration and solar irradiation. *Renewable Energy*, 27, 197–209.
- Janjai, S., Pankaew, P., Laksanaboonsong, J. (2009). A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics, *Applied Energy*, 86(9), 1450-1457 (DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.02.005).
- Jebaraj, S., Iniyanb, S. A (2006). Review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reveiw*,10, 281–311.
- Jiang, Y. (2009). Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. *Applied Energy*, 86(9), 1458-1464 (DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.002).
- Kurkova, V. (1992). Kolmogorov's Theorem and Multilayer Neural Networks, *Neural Networks*, 5, 501-506
- Li, H., Ma, W., Lian, Y., Wang X. (2010). Estimating daily global solar radiation by day of year in China. *Applied Energy*, 87, 3011-3017(DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.028).
- Mlakar, P., Božnar, M. Z. (2011). Artificial Neural Networks - a Useful Tool in Air Pollution and Meteorological Modelling, *Advanced Air Pollution*, Dr. Farhad Nejadkoorki (Ed.), ISBN: 978-953-307-511-2, InTech, DOI: 10.5772/20824. Available from: <http://www.intechopen.com/books/advanced-air-pollution/artificial-neural-networks-a-useful-tool-in-air-pollution-and-meteorological-modelling>
- Moheimani, N. R. (2005). The culture of coccolithophorid algae for carbon dioxide bioremediation. PhD thesis. Murdoch University. Austrália, 252 pp.
- NeuroShell 2, Ward Systems Group, Inc. (2014). <http://www.wardsystems.com/neuroshell2.asp> (20.11.2014).
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J., Soares, J. (2002a). Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the City of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3-4), 231-249.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J., Soares, J. (2002b). Correlation models of diffuse solar radiation applied to the City of São Paulo (Brazil). *Applied Energy*, 71(1), 59-73.
- Pereira, E. B., Abreu, S. L., Stuhlmann, R., Rieland, M., Colle, S. (1996). Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data. *Solar Energy*, 57(2), 125-132.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S. (2000). Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. *Solar Energy*, 68(1), 91–107.
- Rakovec, J., Zakšek, K., Brecl, K., Kastelec, D., Topic, M. (2011). Orientation and Tilt Dependence of a Fixed PV Array Energy Yield Based on Measurements of Solar Energy and Ground Albedo – a Case Study of Slovenia, *Energy Management Systems*, Dr Giridhar Kini (Ed.), ISBN: 978-953-307-579-2, InTech, DOI: 10.5772/18386. Available from: <http://www.intechopen.com/books/energy-management-systems/orientation-and-tilt-dependence-of-a-fixed-pv-array-energy-yield-based-on-measurements-of-solar-ener>
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowle, D. (1998). SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.

- Rosenfeld, D., Woodley, W. (2001). Pollution and clouds. *Physics World*, February, 33–7.
- Ruiz-Arias, J.A., Cebecauer, T., Tovar-Pescador, J., Suri M. (2010). Spatial disaggregation of satellite-derived irradiance using a high-resolution digital elevation model. *Solar Energy* (doi:10.1016/j.solener.2010.06.002).
- RVR, http://en.wikipedia.org/wiki/Runway_visual_range, (20.12.2014).
- Sansigolo, C. A. (1997). Non-Stationary Markov Chains for Modelling Daily Sunshine at São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatololgy*, 56, 225-230.
- Sen, Z. (1998). Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. *Solar Energy*, 63(1), 39–49.
- Senkal, O., Kuleli, T. (2009). Estimation of solar radiation over Turkey using artificial neural network and satellite data. *Applied Energy*, 86(7-8), 1222-1228 (DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.06.003).
- Soares, J., Oliveira, A. P., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Escobedo, J. F., Machado, A. J. (2004). Modeling hourly diffuse solar radiation in the city of São Paulo using neural network technique. *Applied Energy*, 79, 201–14.
- Stanhill, G., Cohen, S. (2001). Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 255–78.
- Stephens, G. L. (2005). Cloud Feedbacks in the Climate System: A Critical Review. *Journal of Climate*, 18, 237-273.
- Thunis, P., Georgieva, E., Pederzoli, A. (2011). The DELTA tool and Benchmarking Report template, Version 1, FAIRMODE, Forum for air quality modelling, Joint Research Centre, Ispra, European Comission, <http://aqm.jrc.ec.europa.eu/DELTA/> (12.11.2014).
- Wong, L.T., Chow, W.K. (2001). Solar radiation model. *Applied Energy*, 69, 191–224.
- Zaharim, A., Razali, A. M., Gim, T. P., Sopian, K. (2009). Time series analysis of solar radiation data in the tropics, *European Journal of Scientific Research*, vol. 25, no. 4, 672–678

Aerofotografiranje in aerolasersko skeniranje Slovenije

Vasja Bric*, Sandi Berk*, Katja Oven* in Mihaela Triglav Čekada*

Povzetek

Kombinacija aerofotografiranja in aerolaserskega skeniranja omogoča izkoriščanje prednosti obeh metod zajema podatkov: večjo višinsko točnost, ki sledi iz aerolaserskega skeniranja, in boljšo vizualno interpretacijo prostora, ki jo omogočajo aerofotografije. Najprej je na kratko opisana zgodovina fotogrametričnega aerofotografiranja v Sloveniji, ki se je pričelo izvajati v letu 1971. Potem je predstavljen trenutno potekajoč projekt aerolaserskega skeniranja Slovenije. Obravnavane so možnosti izboljšav cikličnega aerofotografiranja Slovenije in možne alternative profesionalnim velikoformatnim aerofotoaparatom. Prav tako so podani predlogi za vzdrževanje izdelkov aerolaserskega skeniranja v prihodnosti. Opisani so najpomembnejše vplivi na kakovost najbolj uporabljenih izdelkov obeh metod: ortofotov in digitalnega modela reliefa.

Ključne besede: aerofotografiranje, digitalni model reliefa, aerolasersko skeniranje, ortofoto

Key words: aerial photography, aerial laser scanning, orthophoto, digital terrain model

Uvod

Od preloma tisočletja naprej se je zdelo, da bo lasersko skeniranje izpodrinilo klasično fotogrametrijo. Vendar se to ni zgodilo. Aerolasersko skeniranje postaja komplementarna metoda zajema podatkov o zemeljskem površju, ki skupaj z aerofotografijami daje optimalne rezultate. Kot bomo opisali v nadaljevanju, aerolasersko skeniranje daje točne višine, medtem ko aerofotogrametrija omogoča dobro vizualno interpretacijo prostora. Tako se skoraj vedno ob naročilu aerolaserskega skeniranja za manjša in srednje velika območja istočasno vključuje tudi aerofotografiranje.

Da bomo ločili med klasičnim aerolaserskim skeniranjem in kombinacijo aerolaserskega skeniranja in istočasnega aerofotografiranja, bomo to kombinacijo imenovali aerolasersko snemanje, ki se večinoma uporablja pri zajemu podatkov vzdolž različnih infrastrukturnih objektov (cest, železnic, daljnovodov) in drugih po površini manjših projektov. Pri zajemu podatkov za celo državo ali večjo regijo se aerolasersko skeniranje in aerofotografiranje izvajata ločeno, saj aerofotografiranje zahteva boljše vremenske in svetlobne pogoje ter se običajno izvaja precej višje nad terenom kot lasersko skeniranje. Istočasna uporaba velikoformatnega aerofotoaparata in laserskega skenerja zato zaenkrat še vedno ni gospodarna.

Vsedrjavno aerolasersko snemanje so izvedli v Švici, medtem ko so aerolasersko skeniranje ločeno od aerofotografiranja izvedli na Nizozemskem, Finskem, Švedskem, Danskem, v nekaterih deželah Nemčije, v Avstriji in v nekaterih regijah Italije, med njimi v nam sosednji Furlaniji - Julijski krajini, ki je bila skenirana med leti 2006 in 2009 (Triglav Čekada in sod., 2012).

Sam princip in uporabnost podatkov aerolaserskega skeniranja sta že bila podrobneje opisana (Bric in sod., 2011). V pričujočem članku se osredotočimo na primerjavo aerolaserskega skeniranja in aerofotografiranja ter izpostavimo možnosti hkratne uporabe

* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

oblaka točk in aerofotografij. Najprej na kratko opišemo dolgoletni projekt Cikličnega aerofotografiranja Slovenije (v nadaljevanju: CAS) s poudarkom na zadnjih treh ciklih ter morebitne spremembe pred naslednjimi cikli. Potem opišemo projekt Lasersko skeniranje Slovenije (v nadaljevanju: LSS), ki se je začel ponovno izvajati v letu 2014. Na koncu obravnavamo še kakovost različnih izdelkov pridobljenih iz podatkov aerolaserskega skeniranja ali aerofotografiranja.

Ciklično aerofotografiranje Slovenije (CAS)

Aerofotografiranje v Sloveniji se je z lastno ekipo začelo leta 1971 na Geodetskem zavodu Slovenije (v nadaljevanju: GZS). Leta 1975 se je začelo sistematično izvajanje projekta CAS. Po letu 1985 so se izvajali triletni cikli v različnih merilih in tehnologijah, na podlagi katerih ločimo analogno in digitalno dobo aerofotografiranja (Portal prostor, 2014).

Ves ta čas so se spreminjale zahteve, tehnologija in izvedba, število uporabnikov pa je naraščalo. Za financiranje je ves čas skrbela Geodetska uprava Republike Slovenije (v nadaljevanju: GURS). Izvajanje CAS je vse do leta 2007 opravljal GZS, potem je operativna izvedba prešla v tuja podjetja.

Potreba po vsedržavnem aerofotografiranju je danes še večja, kot je bila v preteklosti, ob tem je treba spremljati razvoj tehnologij, ki neposredno in posredno vplivajo na izvajanje CAS in uporabo njegovih izdelkov.

Analogna doba (1971–2005)

Analogno dobo aerofotografiranja je zaznamovala uporaba aerofotoaparata, ki za medij zaznavanja svetlobe uporabljajo fotografski film. Sprva so bili to črno-beli filmi, ki so jih kasneje zamenjali barvni filmi ter barvni infrardeči filmi občutljivi na bližji infrardeči del svetlobnega spektra, rdečo in zeleno, kar je omogočalo boljšo interpretacijo v kmetijstvu, gozdarstvu, hidrologiji in geologiji.

Do leta 1985 sta se merilo aerofotografiranja, ki se izračuna kot količnik med goriščno razdaljo aerofotoaparata in višino letala nad terenom, kot tudi čas izvedbe cikla, spreminjala. Z letom 1985 se je pričelo izvajati aerofotografiranje s triletnim ciklom, kar pomeni, da je bila vsako leto aerofotografirana tretjina slovenskega ozemlja. Merilo ni bilo enotno. Za ruralna in gorata območja je bilo izbrano merilo 1 : 17 500 in za urbana območja 1 : 10 000. Merilo 1 : 17 500 je bilo izbrano zaradi pokrivanja lista temeljnega topografskega načrta v merilu 1 : 5000 (v nadaljevanju: TTN 5), ki v naravi pokriva območje 2,25 km × 3 km, z enim stereomodelom, kar je pomenilo enostavnejše vzdrževanje TTN 5.

Merilo aerofotografiranja se je leta 1992 poenotilo na 1 : 17 500, za potrebe izdelave topografskih načrtov večjih meril pa so se izvajala t. i. posebna aerofotografiranja (npr. v merilu 1 : 5000 za potrebe izdelave načrtov v merilu 1 : 1000), vendar samo lokalno.

V začetku devetdesetih let se je v Sloveniji pričela doba digitalne fotogrametrije z nakupom optičnih skenerjev in računalnikov z možnostjo stereoopazovanja t. i. digitalnih fotogrametričnih postaj, sledila je izdelava digitalnih modelov reliefa (v nadaljevanju: DMR) in ortofotov.

Pred začetkom izvedbe novih ciklov aerofotografiranja so strokovnjaki dopolnili tehnične zahteve izvajanja projekta CAS. Eden izmed mejnikov v izvajanju CAS je bil cikel 2000–2002, ko so se natančneje določila območja izvedbe aerofotografiranja v

posameznem letu in so trigonometrične sekcije postale zaključene enote predaje izdelkov projekta.

Med tehnološkimi prelomnicami je leto 1999, ko je GZS kupil takrat najkakovostnejši analogni aerofotoaparat Leica RC30, ki je že omogočal zajem podatkov GNSS za natančen izračun koordinat perspektivnih centrov in s tem izboljšanje kakovosti aerotriangulacije. Isto leto je bil nabavljen tudi skener Leica DSW300, ki je omogočal bistveno hitrejše skeniranje filmov od leta 1993 kupljenega DSW100.

Prelomnica v načinu prikaza je leto 2003, ko je bil del slovenskega ozemlja v okviru projekta CAS prvič fotografiran v barvni tehniki.

Digitalna doba (2006–2014)

Digitalna doba systemskega aerofotografiranja v Sloveniji se prične leta 2006, ko je GZS z novim velikoformatnim profesionalnim digitalnim aerofotoaparatom Zeiss/Intergraph Digital Mapping Camera (v nadaljevanju: Z/I DMC) aerofotografiral celotno državo.

Izdelki CAS so bili do leta 2009 georeferencirani v državnem koordinatnem referenčnem sistemu D48/GK, odtlej v D96/TM. Vsi izdelki so predmet nadzora kakovosti, pri čemer se vzorčno ugotavljata absolutna ravninska točnost ortofota in absolutna višinska točnost DMR. Preverjajo se tudi druga morebitna odstopanja od specifikacij v razpisni dokumentaciji.

CAS 2006–2007

GURS je v sodelovanju s sofinancerji poskrbela za razpis izvedbe CAS, ki je bilo prvič izvedeno v digitalni tehniki (Javna naročila: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2006). Čas izvedbe aerofotografiranja za celotno državo, aerotriangulacije in izdelave DMR ter ortofota je bil zelo kratek, saj je naročnik želel s tem pridobiti časovni presek stanja v prostoru za celotno državo.

Osnovni izdelki so bili: aerofotografije in njihovi parametri zunanje orientacije, DMR – prvič s celico mreže velikosti $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, za vsako točko izračunan nagib in orientacijo nagiba ter barvni in barvni infrardeči ortofoto. Nominalna dolžina talnega intervala (v nadaljevanju: DTI) oz. velikost celice rastra aerosnetkov na terenu je bila 50 cm za 37 in 25 cm za 22 trigonometričnih sekcij. Ortofoti so bili za celotno državo izdelani z DTI = 50 cm.

Osnovna enota vseh izdelkov je bil fotogrametrični blok, ki je bil izenačen z velikostjo trigonometrične sekcije ($22,5\text{ km} \times 15\text{ km}$) oz. je bil povečan ali zmanjšan ob državni meji ter ob morju.

Pri izvedbi aerofotografiranja je bil uporabljen aerofotoaparat Z/I DMC z goriščno razdaljo 12 cm in velikostjo najmanjšega slikovnega elementa $12\text{ }\mu\text{m}$.

CAS 2009–2011

V letu 2009 je Slovenija prvotno pristopila k izvajanju CAS v dvoletnem ciklu, vendar se je v letu 2010 aerofotografiranje severozahodnih fotoblokov preneslo v leto 2011 (Javna naročila: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2009–2010).

V okviru tega CAS so bili izdelki enaki kot v predhodnem ciklu razen izračuna nagiba in orientacije nagiba terena na točkah DMR ter barvnih infrardečih ortofotov. Izdelano je bilo tudi manjše število ortofotov z DTI = 25 cm, tj. samo 34 listov v merilu 1 : 5000. Velika večina ortofotov je bila izdelana z DTI = 50 cm. Poostрила se je zahteva glede nominalne velikosti najmanjšega slikovnega elementa aerofotografije na terenu, in sicer na DTI = 25 cm.

Novo v ciklu 2009–2011 je bilo predvsem to, da so se vsi izdelki predali v izvornem koordinatnem referenčnem sistemu D96/TM, medtem ko so se vsi izdelki, razen parametrov zunanje orientacije aerofotografij, transformirali v D48/GK. Za posamično sekcijo so bile izdelane tudi datoteke s končnico DMRO, ki so bile glede na datoteke DMR spremenjene samo na večjih viaduktih in daljših mostovih in so bile uporabljene pri izdelavi ortofotov. Za vse omenjene spremembe je bila podlaga podana v tehničnih navodilih iz leta 2008.

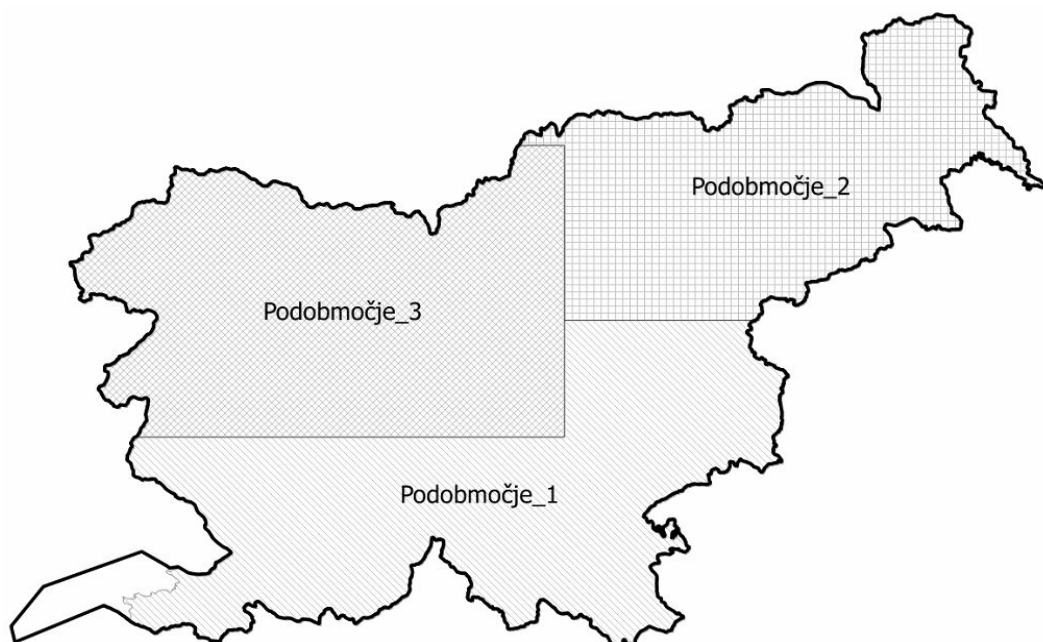
CAS 2012–2014

V izvedbi CAS 2012–2014 je bil predviden triletni izvedbeni cikel in s tem približno enako velika podobmočja kot v predhodnem ciklu. V primerjavi s prejšnjim ciklom CAS je bilo spremenjeno to, da so aerofotografije vsebovale vse štiri kanale (rdeči, zeleni, modri in bližnji infrardeči) izdelani pa so bili tudi barvni infrardeči ortofoti z DTI = 50 cm.

Izdelki za podobmočji 1 in 2 (glej Sliko 1) iz aerofotografij zajetih v letih 2012 in 2013 so že na razpolago, v letu 2014 pa predvsem zaradi slabega vremena v visokogorju podobmočje 3 ni bilo aerofotografirano v celoti (Javna naročila: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2012–2014). Izpada sta fotogrametrična bloka Kranj in Bovec.

CAS 2014

Zaradi dodatnih potreb je država za leto 2014 razpisala ponovno aerofotografiranje podobmočij 1 in 2, kar bi pomenilo nov časovni presek stanja na sloju ortofota, podobno kot za leto 2006 (Javna naročila: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2014), ki se zaradi izpada dveh od štirih fotogrametričnih blokov iz podobmočja 3 ni uresničilo. Vseh osem blokov v okviru podobmočij 1 in 2 je bilo uspešno aerofotografiranih, dokončani so bili tudi vsi zahtevani izdelki.



Slika 1: Delitev na tri podobmočja izvedbe CAS

Alternative obstoječemu CAS

Ob vsakokratni pripravi na izvedbo CAS se zastavijo vprašanja kot so: Ali je treba in kaj spremeniti v specifikacijah? Kako najnovejša tehnologija vpliva na izvedbo CAS? Ali obstaja cenejša rešitev? Ali so satelitski posnetki ali aerolasersko skeniranje ustrezna zamenjava (Nex in sod., 2011)? Ali je razdelitev na podobmočja ustrezna? Katere izdelke bi dodali, da bi bila uporabnost CAS še večja?

Zaradi možnosti izdelave kakovostnejših izdelkov bi bilo smiselno povečati vzdolžni preklop s 60 % na 80 %, kar ne poveča količine letenja, temveč le količino podatkov ter čas procesiranja, vendar minimalno vpliva na končno ceno projekta. Povečanje prečnega preklopa z 20 % na 60 % bi več kot podvojilo količino letenja in s tem bistveno povečalo stroške aerofotografiranja. Po drugi strani bi povečanje prečnega preklopa izboljšalo kakovost ortofota, ki bi postal podoben popolnemu ortofotu (angl. true orthophoto).

S povečanjem preklopa in z uporabo novih metod slikovnega ujemanja (Hirschmuller, 2008) bi kakovost povečali tudi digitalnemu modelu površja (v nadaljevanju: DMP), ki ga lahko samodejno izdelamo iz aerofotografij. DMP opisuje ploskev, ki jo določajo strehe stavb in vrhovi vegetacije, torej vse kar najprej zazna senzor pred seboj oz. je vidno na sami aerofotografiji. Izboljšanje algoritmov slikovnega ujemanja bi na neporaščenih območjih, z nekaj slabšo točnostjo, omogočalo celo vzdrževanje DMR, ki bo na novo izdelan v okviru projekta LSS. DMR za razliko od DMP prikazuje ploskev, ki je opredeljena z golimi tlemi, torej prikazuje tla brez vegetacije in stavb.

Mogoča je zamenjava tehnologije velikoformatnih profesionalnih aerofotoaparátov z različnimi večslikovnimi sistemi, ki uporabljajo dva ali več srednjeformatnih aerofotoaparátov (Li in sod., 2008; Nex, 2010). Postavitev dveh takih aerofotoaparátov skupaj poveča širino pasu aerofotografiranja, lahko se uporabi tudi več aerofotoaparátov obrnjenih v različne smeri, ki zajemajo delno nagnjene (angl. oblique) aerofotografije (Höhle, 2008; Wagner in sod., 2013). Informacij je na nagnjenih aerofotografijah, še posebej, če je isti objekt fotografiran večkrat, več kot na vertikalnih aerofotografijah. Ravno večja količina informacij o posameznih zgradbah je prepričala Malto, da so celotno državo posneli na ta

način (Formosa in sod., 2013). V primerjavi z vertikalnimi aerofotografijami velikoformatnih aerofotoaparatorov je treba leteti nižje in več, kompleksnejša je tudi orientacija in interpretacija nagnjenih aerofotografij. Pri vsedravnih aerofotografiranjih, kjer je treba velike površine zajeti v čim krajšem času, je zelo pomembna radiometrična izenačenosti aerofotografij za namene samodejne klasifikacije objektov. Na nagnjenih aerofotografijah je radiometrično izenačenost še težje doseči.

Če primerjamo profesionalne velikoformatne aerofotoaparate z uporabo enega ali več srednjeformatnih, so pomanjkljivosti slednjih sledeče: manjša višina zajema oz. več letanja, večja občutljivost na veter zaradi uporabe lažjih letal, slabša določljivost nagibov zaradi neuporabe stabilizacijskega podnožja, večja možnost neostrin zaradi neuporabe kompenzacije pomika slike, slabša točnost neposredne orientacije zaradi uporabe cenejših rešitev za georeferenciranje, slabša geometrična kakovost, saj izdelava srednjeformatnih fotoaparatorov ni namenska. Večino teh pomanjkljivosti je mogoče odpraviti z ustrezno dodatno opremo in izboljšavami (Wagner, 2011), vendar to dvigne ceno izdelave srednjeformatnim fotoaparatom in pod vprašaj postavi konkurenčnost nasproti profesionalnim velikoformatnim aerofotoaparatom.

Satelitskim senzorjem so prostorsko ločljivost v zadnji dveh desetletjih povečali iz nekajmetrske na polmetrsko oz. na 31 cm na WorldView-3 (DigitalGlobe, 2014), ob tem so izboljšali tudi spektralno, časovno in radiometrično ločljivost. Satelitski posnetki pokrivajo velike površine in se običajno več uporabljajo v velikih, manj razvitih državah za osnovno državno kartiranje, medtem ko jih razvite države uporabljajo za prostorske, agrarne, okoljske in druge analize ter izdelavo in vzdrževanje topografskih kart manjših meril. V primerjavi z velikoformatnimi aerofotoaparati imajo slabšo prostorsko, primerljivo radiometrično ter boljšo spektralno in časovno ločljivost. Slabša je geometrična točnost in možnost uporabe za stereozajem. Cena satelitskih posnetkov je v mononačinu do trikrat, v stereonačinu pa do šestkrat višja (LANDinfo Worldwide Mapping: Cenik satelitskih posnetkov) v primerjavi z aerofotografijami. Ob tem je treba upoštevati še, da je število pripadajočih licenc uporabe teh podatkov majhno (do pet), kar podatke pri množični uporabi še podraži.

Resna alternativa aerofotografiranju je aerolasersko snemanje, ki vključuje aerofotografiranje z velikoformatnim aerofotoaparatom in istočasno aerolasersko skeniranje z zmogljivim laserskim skenerjem (Landtwin in Whitacre, 2008; Rinaudo, 2011). Največji strošek aerolaserskega skeniranja ali aerofotografiranja je faza zajemanja podatkov. Istočasno aerolasersko skeniranje in aerofotografiranje prepolovi strošek ločenega dvakratnega letenja, vendar zahteva visokozmogljive instrumente in ustrezno veliko zračno plovilo, v katero je mogoče opremo namestiti in ji zagotoviti dovolj energije za večurno delovanje. Laserski skener bi ob čakanju na ustrezno vreme za aerofotografiranje lahko skeniral na drugih območjih, kar precej zmanjša gospodarnost istočasnega zajema podatkov

Lasersko skeniranje Slovenije (LSS)

Prvo aerolasersko skeniranje Slovenije se je pričelo izvajati v letu 2011, vendar je izbrani izvajalec po uspešnem začetku zašel v težave in nato tudi v stečaj. Projekt je bil poimenovan Lasersko skeniranje in aerofotografiranje Slovenije (v nadaljevanju: LSA). Trenutno poteka drugi poskus vsedravnega aerolaserskega skeniranja, ki naj bi bil zaključen do sredine leta 2015.

Prvi projekt aerolaserskega skeniranja Slovenije je poleg skeniranja celotnega območja države vseboval še devet poplavno ogroženih območij in štiri območja večjih zemeljskih plazov (glej Sliko 2). Na teh lokacijah je bila zahtevana gostota laserskih točk večja, in sicer najmanj 10 točk na m^2 (t. i. območja tipa A), medtem ko je bila predvidena gostota za večino države 5 točk na m^2 (t. i. območja tipa B). Za območja Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alp ter velikih gozdov je bila zahtevana gostota 2 točki na m^2 – t. i. območja tipa C.

Rezultati projekta LSA (Triglav Čekada in sod., 2012) poleg georeferenciranega oblaka točk (v nadaljevanju: GOT) vsebujejo še standardno klasifikacijo oblaka laserskih točk v razrede, imenovano georeferenciran in klasificiran oblak točk (v nadaljevanju: GKOT), oblak točk reliefa (v nadaljevanju: OTR), DMR ločljivosti 1 m (DMR 1), ter za omenjenih 13 ožjih območij tudi aerofotografije in ortofoto. DMR 1 je shranjen v ASCII-datoteki v obliki višin točk mreže ter v rastrski obliki kot podoba analitičnega senčenja (v nadaljevanju: PAS). Vsi izdelki so shranjeni v datotekah, ki pokrivajo območja velikosti 1 km^2 , razen PAS, kjer ena datoteka pokriva območje velikosti 25 km^2 (5000 m $\times$ 5000 m). V okviru projekta so bili lasersko posneti štirje bloki območja tipa A ter dve večji območji tipa B (glej Sliko 2), ki skupaj ne dosega 10 % celotne površine države.



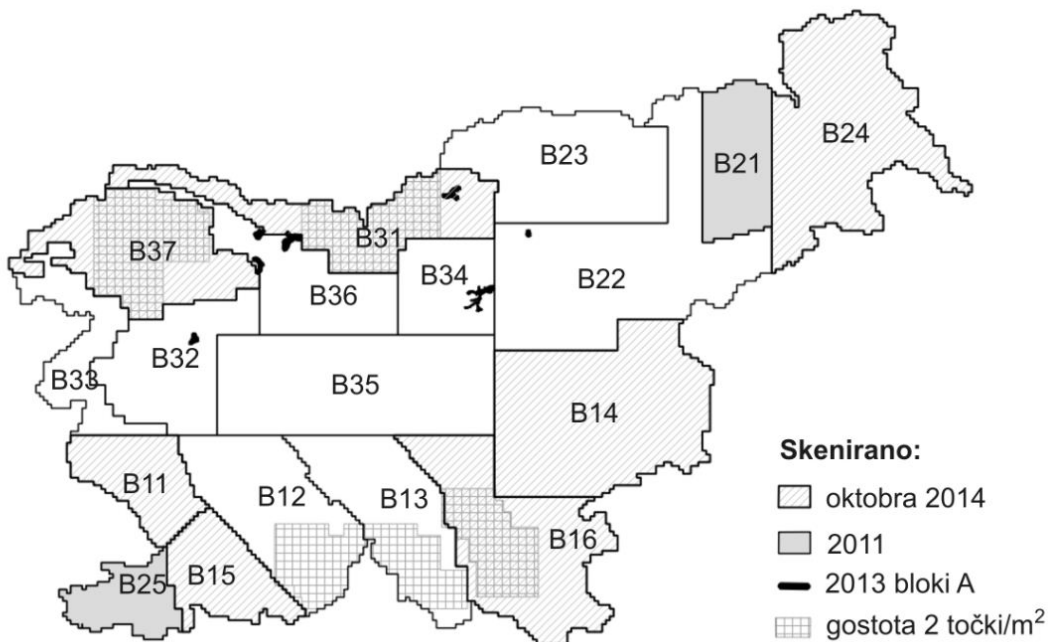
Slika 2: Pregled območij predanih izdelkov v projektu LSA 2011

V letu 2013 je bilo na novo določenih sedem poplavno ogroženih območij, kjer se je tudi izvedlo aerolasersko snemanje, kot je prej opisano za območja tipa A (glej Sliko 3). Seznam izdelkov je bil enak kot v okviru projekta LSA 2011.

Projekt LSS, ki se trenutno izvaja (2014–2015) vsebuje le območja tipa B in C. Predvideni rezultati so enaki kot v prekinjenem projektu. Celotna država je bila za potrebe natečaja razdeljena na tri podobmočja, ki so enaka delitvi v okviru projekta CAS za vse cikle po letu 2000 (glej Sliko 3).

Za izvedbo laserskega skeniranja vsakega podobmočja posebej so se v javnem razpisu potegovala tri na predhodnem razpisu usposobljenosti izbrana podjetja. V primeru stečaja prvo izbranega podjetja bi dokončanje projekta prevzelo na razpisu izbrano drugouvrščeno podjetje. Za vsa tri območja je bilo kot najugodnejši ponudnik za izvedbo skeniranja izbrano podjetje Flycom, d. o. o.

Končni izdelki GKOT, OTR, DMR in PAS so, za razliko od preteklih skeniranj, izdelani s programom gLidar (Mongus in sod., 2014) na Geodetskem inštitutu Slovenije.



Slika 3: Pregled načrtovanih podobmočij izvedbe LSS

Možnosti vzdrževanja DMR

Najbolj uporabljan izdelek projekta LSS bo DMR 1, ki bo pokrival celotno državo v ločljivosti 1 m. Treba bo zagotoviti njegovo vzdrževanje s periodo največ 3 leta. Možnosti vzdrževanja DMR 1 so naslednja: vsaka tri leta se izvede novo LSS, uvede se istočasna izvedba LSS in CAS, izvedejo se posebna aerolaserska skeniranja na območjih sprememb DMR ali pa se za vzdrževanje uporabijo orientirani stereopari aerofotografij iz CAS. Pri slednjem je mogoče vzdrževati samo izdelek DMR 1 in OTR, seveda le izven gozdov, in ne tudi ostalih izdelkov, ki nastanejo samo pri aerolaserskem skeniranju.

Strošek izvedbe LSS je pet- do šestkrat večji od stroška izvedbe CAS. Če vzdrževanja ne bi mogli zagotoviti za celotno državo, predlagamo ciljano vzdrževanje. Območja, kjer

bi izvajali pogostejša ponovna aerolaserska skeniranja v npr. triletnem intervalu, bi bilo treba zožiti na približno 40 % površine države, kjer se zgodi največ sprememb in bi jih bilo mogoče odkriti v okviru projekta CAS. Tako skeniranje bi imenovali aerolasersko skeniranje Slovenije za potrebe vzdrževanja OTR in DMR 1. Na ostalih 60 % območij države bi spremembe DMR 1 zaznali in spremljali administrativno in na njih izvedli t. i. ciljano letno aerolasersko skeniranje na vnaprej poznanih zaključenih območjih. Po potrebi bi spet izvedli LSS v celoti vendar šele, če bi zelo spremenili specifikacije oz. zahteve po npr. večji točnosti ali gostoti, ali če bi se DMR spremenil na veliko lokacijah.

Če bi lahko dobili zanesljive lokacije in območja sprememb DMR iz drugih npr. administrativnih virov, bi bilo smiselno izvajati samo ciljano aerolasersko skeniranje. Tak način vzdrževanja bi bil sicer najcenejši, ker bi bilo samega zajema podatkov najmanj, vendar je tak način zbiranja podatkov o lokacijah spremenjenega DMR povezan z obsežnimi administrativnimi postopki, ki običajno ne zgotovijo 100 % registracije sprememb prostoru, verjetno bi bilo treba dopolniti tudi zakonodajo, da bi kar največ podatkov o spremembah res dobili. Vsakih nekaj ciklov ciljanega vzdrževanja bi bilo treba spet izvesti LSS v celoti.

Istočasna izvedba CAS in LSS bi bila idealna rešitev, vendar je vprašljivo, ali bi se na razpis sploh prijavil kdo, ki bi zadovoljeval pogoje o uporabi vrhunske opreme za istočasno izvedbo aerofotografiranja in aerolaserskega skeniranja. Stroški takega projekta bi se v primerjavi s CAS zelo verjetno precej povečali. Mogoča bi bila sicer tudi uporaba opreme za aerolasersko snemanje s srednjeformatnimi fotoaparati, kjer je geometrična točnost in radiometrična kakovost aerofotografij v primerjavi s profesionalnimi velikoformatnimi aerofotoaparati slabša. Podaljšal bi se tudi čas zajema podatkov.

Smiselno bi bilo preveriti tudi kakovost izdelave DMR iz aerofotografij CAS na neporaščenih ravninskih območjih, kjer se zgodi največ sprememb. Samodejna izdelava DMP iz aerofotografij CAS omogoča objektivno primerjavo z DMP iz aerolaserskega skeniranja ali z DMP iz aerofotografij predhodnega CAS in samodejno iskanje sprememb ter vzdrževanje DMR na neporaščenih območjih. Seveda bi lahko pričakovali nekaj slabšo višinsko točnost v primerjavi z aerolaserskim skeniranjem, vendar se le-ta vsa leta izboljšuje.

Katera možnost bo uporabljena pri vzdrževanju DMR 1 in drugih izdelkov LSS je odvisno od razvoja tehnologije, finančnih zmožnosti in potreb po vzdrževanju. Bolj kot izbira metode vzdrževanja je pomembno, da se za vzdrževanje vnaprej pripravi vse potrebno in da se le-to prične takoj po vzpostavitvi zbirke DMR 1 in ostalih izdelkov LSS.

Kakovost podatkov aerofotografiranja in aerolaserskega skeniranja

Pri obravnavanju kakovosti podatkov aerofotografiranja in aerolaserskega skeniranja najprej opredelimo ključne izdelke obeh metod daljinskega zaznavanja. Za vsak izdelek opredelimo ključne sestavine kakovosti ter vplivne dejavnike nanje, posebej na vsedravnih projektih CAS in LSS. Na koncu obravnavamo še postopke kontrole kakovosti zajetih podatkov.

CAS in druga aerofotografiranja

Največ uporabljan izdelek aerofotografiranja je ortofoto. Uporabnost ortofota za različne namene je odvisna predvsem od (Kosmatin Fras, 2004): semantične kakovosti ortofota (radiometrična ločljivost, barvna lestvica, kontrastnost, ostrina), geometrične

ločljivosti ortofota (velikosti celice rastra na terenu oz. prostorska ločljivost) in geometrične kakovosti ortofota (točnosti georeferenciranja).

Semantična kakovost ortofota je odvisna od lastnosti aerofotoaparata, pri klasičnem aerofotografiranju še od kakovosti aerofilma, ter od kakovosti obdelave digital(izira)nih aerofotografij. Na semantično kakovost zelo vpliva tudi ustrezno izbran čas aerofotografiranja – odvisno od namena snemanja je treba izbrati ustrezen letni čas (običajno, ko je neolistano in brez snega), čas dneva (dovolj svetlobe, čim manj senc), ustrezne vremenske razmere (brez megle, visoke zračne vlage, smoga).

Geometrična ločljivost ortofota izhaja iz tehničnih karakteristik aerofotografiranja – merila aerofotografiranja, ki je odvisno od višine leta nad površjem, goriščne razdalje in ločljivosti aerofotoaparata, v primeru klasičnih aerofotografij pa tudi ločljivosti filmov in skeniranja le-teh. Geometrična kakovost ortofota je odvisna predvsem od:

- kakovosti parametrov zunanje orientacije in
- kakovosti uporabljenega digitalnega modela višin.

Kakovost parametrov zunanje orientacije je odvisna od kakovosti GNSS- in INS-instrumentov in izvedbe aerotriangulacije, pa tudi od kakovosti realizacije samega koordinatnega referenčnega sistema ter kakovosti razpoložljivih lokacijskih storitev za določanje položaja v realnem času. Zelo pomembno je zagotoviti zadostno število ustrezno razporejenih oslonilnih točk, kakovostno izmerjenih na terenu, ki morajo biti na aerofotografijah nedvoumno in natančno določljive.

Kakovost digitalnega modela višin obravnavamo z vidika dosegljive točnosti rekonstrukcije višine za katerokoli točko terena in ne zgolj točnosti višin vogalnih točk celic mreže (Kosmatin Fras, 2004). Na njegovo kakovost vplivajo način izdelave, geometrična ločljivost modela (velikost celice mreže), geometrična kakovost modela (točnost višin vogalnih točk celic mreže) in izbor ustrezne metode interpolacije (ki mora upoštevati tudi geomorfološke značilnosti terena).

Oglejmo si osnovne dejavnike in posamezne parametre kakovosti ortofota za različna časovna obdobja projekta CAS. Kot prvi relevantni mejnik, ki je dejansko omogočil sistematično masovno izdelavo ortofota, štejemo leto 1994. Takrat je GZS nabavil sistem za digitalno fotogrametrijo (skener, digitalno fotogrametrično postajo in programsko opremo).

V letu 1999 je nabava novega klasičnega velikoformatnega aerofotoaparata in zmogljivejšega optičnega skenerja pomenila tudi dvig kakovosti izdelkov.

Naslednji mejnik je leto 2003, ko se v okviru CAS prične izdelovati barvni ortofoto, kar pomeni bistveno izboljšanje njegove semantične kakovosti. Za nekatera zemljepisno omejena območja je bil sicer barvni ortofoto izdelan tudi že nekaj let prej.

Od leta 2006 so na projektu CAS v uporabi velikoformatni digitalni aerofotoaparati, ki prinesejo kakovostni preskok tako v smislu semantične (istočasni zajem v infrardečem spektru) kot tudi geometrične kakovosti. Odpadejo namreč vplivi kakovosti filma, deformacij analognih aerofotografij in kakovosti skeniranja le-teh.

Istega leta (2006) beležimo tudi prehod izdelave ortofota s pomočjo DMR ločljivosti 25 m na DMR ločljivosti 5 m (DMR 5). Že samo povečanje ločljivosti DMR seveda pomeni bistveno izboljšanje geometrične kakovosti končnega ortofota, čeprav gre bolj za metodološko spremembo (zahtevo v okviru tehničnih specifikacij), saj so vhodni podatki za izdelavo DMR ostali bolj ali manj nespremenjeni. Osnova za izdelavo DMR 5 je bilo deloma slikovno ujemanje in deloma državni digitalni model višin ločljivosti 12,5 m, ki je bil prevzorčen na DMR 5. Območja ugotovljenih odstopanj so bila izboljšana na osnovi stereoizvrednotenja aerofotografij CAS (Podobnikar, 2008). Na splošno je največja težava pri ugotavljanju različnih vplivov na kakovost ortofota pred letom 2006 ravno sledljivost

uporabljenih virov in načina izdelave DMR. Odtlej je bil DMR v okviru CAS opredeljen kot eden izmed izdelkov, katerega kakovost je naročnik tudi vzorčno kontroliral.

Kot zadnji mejnik omenimo še leto 2009, ko se prične izdelava ortofota v novem državnem koordinatnem referenčnem sistemu D96/TM, katerega vzpostavitev temelji na GNSS-tehnologiji. Izboljšanje kakovosti samega koordinatnega referenčnega sistema pomeni izboljšanje kakovosti koordinat oslonilnih točk, posledično parametrov zunanje orientacije in s tem geometrične kakovosti ortofota. Šele končni ortofoto se z modelom državne trikotniške transformacije (Berk in Komadina, 2010) zagotovi tudi v starem državnem koordinatnem referenčnem sistemu D48/GK – različici, ki ima še vedno največ uporabnikov. Pri tem se ne podvoji celotna rastrska zbirka, ampak se za rastrske podatke (tiff) generirajo samo nadomestne geolokacijske datoteke (tfw). Dobimo sicer nekoliko slabšo kakovost geolokacije ortofota, vendar je bilo z analizo ugotovljeno, da je to poslabšanje glede na trenutno geometrično ločljivost ortofota zanemarljivo (Berk in sod., 2007).

Za konec si oglejmo rezultate nedavne raziskave položajne točnosti ortofota od pričetka njegove sistematične izdelave do danes (Fabiani, 2014). Osnova za analizo so bili štirje listi ortofota na območjih, izbranih po merilih čim večje razgibanosti reliefa vendar hkrati tudi primerne poseljenosti, saj samo takšna območja zagotavljajo zadostno število točk za izvedbo analize. Za izbrana testna območja je bilo na voljo od štiri do šest serij ortofotov iz let od 1994 do 2012. Za vse štiri liste so bili rezultati skladni in nakazujejo splošni trend izboljševanja položajne točnosti. Koren srednjega kvadratnega pogreška (v nadaljevanju: RMSE, angl. root mean square error) položaja se je zmanjšal iz okoli 1,4 m v 1994 na okoli 40 cm v 2012. Pri tem je zanimiv splošni trend poslabšanja položajne točnosti nekje med leti 1998 in 2005, ki ga bo treba še pojasniti, tudi s pomočjo zgoraj omenjenih vplivnih dejavnikov in z njimi povezanih mejnikov pri izdelavi ortofota.

Če se ozremo še v prihodnost, je velik potencial za izboljšanje kakovosti ortofota predvsem DMR, ki bo rezultat vsedržavnega aerolaserskega skeniranja. Gre za ogromen kakovostni preskok tako glede ločljivosti (1 m), kot tudi predvidene višinske točnosti (15 cm). Pomanjkljivost LSS je sicer, da gre za enkratni projekt. O možnih načinih njegovega vzdrževanja smo govorili v prejšnjem poglavju.

Kot morebitno dodatno izboljšanje kakovosti ortofota se poraja še ideja o izdelavi popolnega ortofota, saj je eden izmed izdelkov aerolaserskega skeniranja lahko tudi DMP, ki aproksimira strehe stavb in drugih objektov ter vrhnjo ploskev vegetacije (vrhovi krošenj dreves ipd.).

Kot rezultat hkratne uporabe lidarskega DMP in multispektralnega ortofota je bila razvita tudi metoda samodejnega zajema in iskanja sprememb v topografskem sloju stavb (Grigillo in sod., 2011). Prednosti kombiniranja različnih metod daljinskega zaznavanja so bile analizirane tudi pri opazovanju in kartiranju vodnih površin (Veljanovski in sod., 2012).

LSS in druga aerolaserska skeniranja

Izdelki LSS, ki bodo na voljo za vso državo, so že omenjeni GOT, GKOT, OTR, DMR 1 in iz njega izvedeni PAS. V nadaljevanju se omejimo zgolj na DMR 1, ki je med njimi najbolj uporabljan in se glede na različne namene presoja predvsem na podlagi:

- geometrične ločljivosti modela (velikosti celice mreže) in
- geometrične kakovosti modela (točnosti georeferenciranja).

Optimalna geometrična ločljivost modela izhaja iz tehničnih karakteristik skeniranja – gostote zajema (število točk na m²). Geometrična kakovost modela je odvisna predvsem od (Bric in sod., 2013):

- kakovosti neposrednega georeferenciranja zajetega oblaka točk,
- naknadne medsebojne korekcije pasov in absolutne korekcije zajetega oblaka točk,
- kakovosti klasifikacije izvirnega oblaka točk (da res dobimo samo točke terena),
- kakovosti transformacije višin točk (iz elipsoidnih v nadmorske) in
- metode interpolacije.

Kakovost klasifikacije izvirnega oblaka točk je odvisna od strategije in algoritmov klasifikacije, ki temeljijo na geometriji oblaka točk in na dodatnih atributih zajema, na primer zaporedne številke odboja, jakosti odboja idr. Kakovost neposrednega georeferenciranja je neglede na uporabljeni način aerolaserskega skeniranja (instrumentarij, metoda zajema) odvisna od kakovosti realizacije uporabljenega koordinatnega referenčnega sistema (ETRS89) in kakovosti zagotavljanja lokacijskih storitev (korekcij GNSS-signalov). Na točnost neposrednega georeferenciranja vplivajo:

- napake skenerja oziroma napake laserja,
- napake, ki so posledica spreminjanja geometrije skeniranja oz. spreminjanja vpadnega kota žarka na podlago, in
- napake določanja položaja (GNSS) in nagibov skenerja (INS).

Kakovost transformacije višin oblaka zajetih točk je odvisna od kakovosti uporabljenega modela geoida ter od kakovosti realizacije državnega višinskega referenčnega sistema. Kakovost datumske transformacije horizontalnih koordinat oblaka točk v stari koordinatni referenčni sistem (D48/GK) je odvisna od kakovosti modeliranja distorzij starega koordinatnega referenčnega sistema.

Oglejmo si sedaj osnovne parametre kakovosti rezultatov projekta LSS. Za območja C (visokogorje, veliki gozdovi) je gostota skeniranja 2 točki na m² in za območja B (preostali del države) 5 točk na m² (Triglav Čekada in sod., 2012). Izbrane gostote so precej skladne s teoretično določeno optimalno gostoto lidarskih točk, ki naj bi za topografsko kartiranje v merilu 1 : 5000 znašalo med 12 in 20 točk na m² in v merilu 1 : 10 000 med 3 in 5 točk na m² (Triglav Čekada in sod., 2010). Iz pridobljenega oblaka točk se ne glede na gostoto skeniranja območja tvori končni DMR 1.

Zahtevana geometrična kakovost LSS je glede na tehnične specifikacije projekta opredeljena posebej za obe sestavini koordinatnega referenčnega sistema, in sicer (Bric in sod., 2013):

- 30 cm točnost položajnih koordinat (RMSE) v D96/TM (ETRS89) in
- 15 cm točnost elipsoidnih višin (RMSE) na elipsoidu GRS80 (ETRS89).

Navedeni parametri kakovosti se torej nanašajo na geometrično kakovost izdelka v povsem geometrijsko definiranem in kakovostno realiziranem koordinatnem referenčnem sistemu. Ker je DMR uporaben le, če so višine podane v državnem višinskem sistemu, ki temelji na fizikalni definiciji (Zemlja kot geoid), se elipsoidne višine transformira v nadmorske. Poleg tega je večina prostorskih podatkov v Sloveniji še vedno geolociranih v starem državnem koordinatnem referenčnem sistemu D48/GK, zato se tudi horizontalne koordinate zajetih lidarskih točk transformira v ta sistem. Geometrična kakovost DMR s koordinatami v D48/GK in nadmorskimi višinami H se s tem precej poslabša.

Na kakovost transformiranih višin vplivata:

- kakovost obstoječega državnega višinskega referenčnega sistema in

- kakovost absolutnega modela geoida.

Na kakovost višinskega referenčnega sistema vplivajo (Bric in sod., 2013):

- določitev višinskega geodetskega datuma,
- definicija višinskega sistema (tipa višin) in
- sama realizacija višinskega sistema.

Višinski geodetski datum v Sloveniji temelji na zgolj enoletnih mareografskih opazovanjih, in sicer daljnega leta 1875 (datum Trst). Napaka izhodiščne točke naj bi glede na rezultate raziskav znašala med 10 cm in 20 cm (Koler in sod., 2007). Ta napaka je pomembna predvsem za hidrološke študije v priobalnem pasu ter pri čezmejnih študijah, kjer se kaže neusklajenost s podatki sosednjih držav.

Višinski sistem v Sloveniji je definiran kot sistem normalnih ortometričnih višin, ki je danes zastarel, saj točke z isto višino ne ležijo na ploskvi z enakim težnostnim potencialom (Koler in sod., 2007). Zato je predviden prehod na nov, sodoben višinski sistem normalnih višin (Kuhar in sod., 2011).

Problemi realizacije višinskega sistema so v dolgi periodi izmere različnih redov nivelmanskih zank (problem različnih epoh), ki glede na ocenjene hitrosti vertikalnih pomikov v Sloveniji (geodinamika) lahko pomeni tudi napako velikosti 10 cm (Koler in sod., 2007).

Za transformacijo elipsoidnih višin v nadmorske višine rabimo kakovosten model geoida, ki je še večja težava kot slaba kakovost obstoječega višinskega referenčnega sistema. Po zadnjih raziskavah je natančnost transformacije, ki jo zagotavlja obstoječi absolutni model geoida AMG 2000, približno 8 cm (standardni odklon), največja absolutna odstopanja pa dosežejo skoraj 30 cm (Kuhar in sod., 2011).

Transformacija koordinat lidarskega DMR iz novega v stari koordinatni referenčni sistem je vendarle nekoliko manjši problem. Z modelom državne trikotniške transformacije, ki se uporablja za transformacijo lidarskih točk, so za pretežni del države zagotovljena položajna odstopanja, manjša od 10 cm (Berk in Komadina, 2010).

Za konec navedimo še nekaj statistik nadzora kakovosti georeferenciranja izdelkov LSA iz leta 2011 (Bric in sod., 2013). Izvedena je bila kontrola točnosti nadmorskih višin na DMR (na osmih lokacijah), ki je bil izdelan iz lidarskih točk. Na območjih naselij je višinska točnost lidarskega DMR (RMSE) med 4 cm in 14 cm, na travnikih med 3 cm in 12 cm, v grmičevju med 5 cm in 31 cm in v gozdovih med 5 cm in 18 cm. Na eni sami lokaciji je bila izvedena tudi kontrola položajne točnosti (planimetrično); le-ta je bila znotraj zahtevane točnosti, torej boljša od 30 cm. Na 75 lokacijah (100 točk na lokacijo na štirih tipih pokrovnosti) so bile izvedene terenske GNSS-meritve, ki bodo uporabljene tudi v kontroli kakovosti podatkov aerolaserskega skeniranja LSS 2013–2015. Za aerolaserska skeniranja izvedena v letu 2014/2015 se izvajajo kontrole višinske in položajne točnosti za vhodne podatke GOT ter tudi za končna izdelka OTR in DMR 1.

Sklep

V članku smo osvetlili glavne karakteristike dveh podatkovnih virov: cikličnega aerofotografiranja in aerolaserskega skeniranja Slovenije, ki bosta konec leta 2014 predstavljala presečno stanje topografskih podatkov za celotno Slovenijo. Zaradi prehodnega obdobja v katerem prehajamo na nov koordinatni referenčni sistem moramo ob uporabi teh podatkov upoštevati, v katerem koordinatnem sistemu so izvorni podatki in, če se le da, uporabljati izvirne podatke. V obratnem primeru, ko izvajamo raziskave v starem

koordinatnem referenčnem sistemu D48/GK, se moramo zavedati napak, ki jih le-te lahko prinesejo.

V preteklosti so bili stereomodeli aerofotografiranj uporabljani za izmero višin in oblik različnih topografskih objektov z ročnim sledenjem terenu. Danes lahko s kombinacijo stereomodela in točnejših aerolaserskih podatkov o terenu (ki so v stereomodelu vidni ali tudi ne) vršimo sledenje in zajem objektov na tleh, brez ročnega spreminjanja višine prostorske markice. Za zajem objektov nad terenom pa samodejni način sledenja izklopimo oz. preklopimo na običajen način fotogrametričnega opazovanja in iz vrednotenja stereomodela. Tako nam hkratna razpoložljivost aerolaserskih podatkov in stereoparov CAS odpira nove možnosti, kako izvajati trirazsežni zajem. Še več možnosti seveda nudi avtomatizacija postopkov iz vrednotenja objektov v prostoru.

Literatura in viri

- Berk, S., Janežič, M., Kete, P., Mesner, N., Radovan, D. (2007). Razvoj ortofota v novem koordinatnem sistemu. Končno poročilo projekta. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.
- Berk, S., Komadina, Ž. (2010). Trikotniško zasnovana transformacija med starim in novim državnim koordinatnim sistemom Slovenije. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2009–2010. Ljubljana, 28. september 2010. GIS v Sloveniji, 10. Založba ZRC, Ljubljana, str. 291–299.
- Bric, V., Berk, S., Triglav Čekada, M. (2013). Zagotavljanje kakovosti georeferenciranja podatkov aerolaserskega skeniranja za upravljanje voda. Geodetski vestnik, 57, 2, str. 271–285.
- Bric, V., Triglav Čekada, M., Bitenc, M. (2011). Uporaba laserskega skeniranja pri zaščiti in reševanju ter vojaških aktivnostih. Geoprostorska podpora obrambnemu sistemu Republike Slovenije. Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije, Ljubljana, str. 181–204.
- DigitalGlobe,
http://www.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_Pixels_to_Products_forWeb.pdf
(25. 11. 2014)
- Fabiani, N. (2014). Analiza položajne točnosti državnega ortofota glede na časovno obdobje njegove izdelave. Diplomsko naloga, št. 947/G. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Formosa, S., Briguglio, L., Calleja, E., Formosa Pace, J., Moncada, S. (2013). One Small State's Preparation for Climate Change: Building an Integrated Socio-Technic Informational Infrastructure. International Journal of Geoinformatics, 9, 1, str. 11–18.
- Grigillo, D., Kosmatin Fras, M., Petrovič, D. (2011). Samodejen zajem in iskanje sprememb v topografskem sloju stavb iz digitalnega modela površja in multispektralnega ortofota. Geodetski vestnik, 55, 1, str. 11–45.
- Hirschmuller, H. (2008). Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 2, str. 328–341.
- Höhle, J. (2008). Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 2008, 1, str. 7–14.
- Javna naročila. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, GURS: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2006, [http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1\[show_single\]=577](http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1[show_single]=577)
(25. 11. 2014)
- Javna naročila. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, GURS: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2009–2010,
[http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1\[show_single\]=811](http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1[show_single]=811)
(25. 11. 2014)
- Javna naročila. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, GURS: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2012–2014,
[http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1\[show_single\]=894](http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1[show_single]=894)
(25. 11. 2014)

- Javna naročila. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, GURS: Razpisna dokumentacija za izvedbo CAS 2014, [http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1\[show_single\]=947](http://www.gu.gov.si/si/javna_narocila/?tx_t3javnirazpis_pi1[show_single]=947) (25. 11. 2014)
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M. (2007). Uvajanje sodobnega višinskega sistema v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 51, 4, str. 777–792.
- Kosmatin Fras, M. (2004). Vpliv kakovosti vhodnih podatkov na kakovost ortofota. *Geodetski vestnik*, 48, 2, str. 167–178.
- Kuhar, M., Berk, S., Koler, B., Medved, K., Omang, O., Solheim, D. (2011). Vloga kakovostnega višinskega sistema in geoida za izvedbo GNSS-višinomerstva. *Geodetski vestnik*, 55, 2, str. 226–234.
- LANDinfo Worldwide Mapping: Cenik satelitskih posnetkov, <http://www.landinfo.com/satellite-imagery-pricing.html> (25. 11. 2014)
- Landtwinning, S., Whitacre, J. (2008). Simultaneous Data Acquisition with Airborne Lidar and Large-Format Digital Camera. International Lidar Mapping Forum. Denver, 21.–22. februar 2008. Conference Proceedings, str. 1–11.
- Li, J., Liu, X., Liu, F., Liu, Z., Zhao, L. (2008). SWDC-4 Large Format Digital Aerial Camera System. XXth ISPRS Congress. Peking, 3.–11. julij 2008. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII-B3a, str. 139–146.
- Mongus, D., Lukač, N., Horvat, D., Žalik, B., Triglav Čekada, M., Mladenovič, U. (2014). Zmožnosti aplikacij za obdelavo in izkoriščanje podatkov LiDAR. *Informatika v javni upravi »Izza oblaka posije Sonce«*, 8.–9. 12. 2014.
- Nex, F. C. (2010). Multi-Image Matching and LiDAR Data New Integration Approach. Doktorska disertacija. Politecnico di Torino, Torino.
- Nex, F., Rinaudo, F. (2011). LiDAR or Photogrammetry? Integration is the Answer. *Italian Journal of Remote Sensing*, 43, 2, str. 107–121.
- Podobnikar, T. (2008). Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki. *Geodetski vestnik*, 52, 4, str. 834–853.
- Portal Prostor. Ministrstvo za infrastrukturo in prostor, GURS: Aerofotografije, http://www.e-prostor.gov.si/si/zbirke_prostorskih_podatkov/topografski_in_kartografski_podatki/aerofotografije/ (25. 11. 2014)
- Rinaudo, F. (2011). Digital Aerial Cameras and LIDAR Acquisition Systems: A State of Art and Possible Evolutions. *Geomatics Technologies in The City – GTC 2011*. 1st International Geomatics Symposium in Saudi Arabia. Jeddah, 10.–13. maj 2011. Proceedings, str. 1–6.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Oven, K. (2012). Prvo vsedržavno lasersko skeniranje Slovenije. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012*. Ljubljana, 25. september 2012. GIS v Sloveniji, 11. Založba ZRC, Ljubljana, str. 191–196.
- Triglav Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin Fras, M. (2010). Teoretična gostota lidarskih točk za topografsko kartiranje v največjih merilih. *Geodetski vestnik*, 54, 3, str. 403–416.
- Veljanovski, T., Pehani, P., Lamovec, P., Oštir, K. (2012). Uporabnost podatkov satelitskega in letalskega daljinskega zaznavanja za opazovanje in kartiranje vodnih površin. *Geodetski vestnik*, 56, 4, str. 786–801.
- Wagner, R. (2011). The Leica RCD30 Medium Format Camera: Imaging Revolution. 52nd Photogrammetric Week '11. Stuttgart, 5.–9. september 2011. Wichmann, Berlin, str. 89–95.
- Wagner, R., Lieckfeldt, P., Roth, R., Markram, J. (2013). The Leica Geosystems CityMapper Solution. 54th Photogrammetric Week '13. Stuttgart, 9.–13. september 2013. Wichmann, Berlin, str. 89–99.

Problematika geodetskih terenskih meritev z GNSS in simulacije vodostaja na podlagi DMR na delu Cerknškega jezera

Polona Pavlovčič Prešeren¹, Marjeta Korošec², Dejan Grigillo³

Povzetek

Prispevek opisuje problematiko terenske izmere z GNSS kot tudi problematiko simulacije vodostaja dela Cerknškega jezera na podlagi državnega digitalnega modela višin s prostorsko ločljivostjo 5 m (DMV 5). Terenske meritve smo izvedli na območju Cerknškega jezera, ki je zanimivo zaradi velike oddaljenosti od stalnih postaj GNSS slovenskega državnega omrežja SIGNAL, hkrati pa je območje zanimivo tudi s hidrološkega vidika. Na osnovi primerjave pridobljenih rezultatov GNSS-višinomerstva in simulacije vodostaja z uporabo DMV 5 na delu Cerknškega jezera smo ugotovili, da je pri simulaciji vodostaja z uporabo modelov višin potrebno posebno pozornost posvetiti predhodni določitvi odstopanj višinskih modelov od dejanskih terenskih meritev.

Ključne besede: GNSS-izmera, omrežje SIGNAL, simulacija vodostaja, digitalni model višin, RTK-metoda izmere

Key words: GNSS-measurement, GNSS-permanent network SIGNAL, water level simulation, digital elevation model, RTK measurement method

Uvod

Cerkniško jezero, ki je največje presihajoče jezero v Evropi, se nahaja 2,5 km južno od Cerknice ob vasici Dolenje Jezero. Ob najvišjem vodostaju pokriva do 38 km² Cerknškega polja, ki v tleh skriva požiralnike in estavele. Nadmorska višina gladine jezera se giblje od 546 m do 551 m (Turk in Pipan, 2009). Že v preteklosti so se znanstveniki zanimali za Cerknško jezero in ga opisovali kot čudo narave. Prof. Pavel Kunaver o tem čudu v knjigi Cerknško jezero govori: »Ta ima o njem tak, oni drugačen vtis; kolikor ljudi vprašaš, vsakdo ga je videl v drugačni luči. Pa to ni čudno, saj že Valvasor opravičuje pisatelje, ki so poskušali podati pravilno sliko o Cerknškem jezeru, a se jim to ni posrečilo.«

Izmero z GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) na Cerknškem jezeru smo izvedli dvakrat neodvisno: prvič 17. 1. 2014 in drugič 15. 3. 2014. S statično metodo izmere smo umerili in preverili položajno točnost kinematičnih metod izmere GNSS na danem območju z uporabo virtualnega baznega stojišča VRS (angl. Virtual Reference Station), vzpostavljenega v okviru državnega omrežja stalnih postaj GNSS omrežja SIGNAL. Obdobje med izmerama je zaznamoval snegolom in žledolom, ki je zajel predvsem notranjske gozdove. Posledično se je gladina jezera zaradi taljenja snega in ledu nadpovprečno dvignila, kar je povzročilo obsežne poplave. Zaradi aktualne tematike smo izvedbi terenskih meritev za pridobitev hidroloških podatkov v tem obdobju na tem delu jezera posvetili še večjo pozornost. S terenskimi meritvami smo določili 3D-položaj diskretnih točk roba jezera. Poleg terenske izmere smo rob jezera določili tudi s simulacijo

¹ doc. dr., UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

² študentka 1. letnika MA Geodezija in geoinformatika, FGG

³ asist. dr., UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

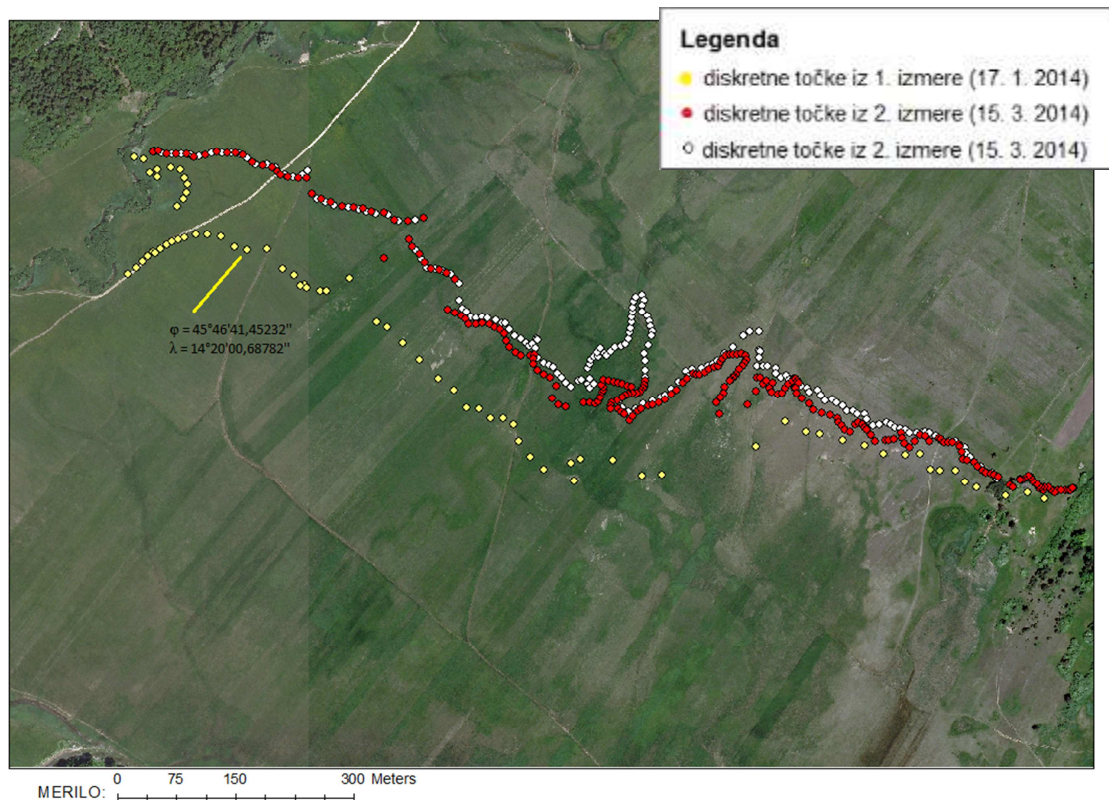
vodostaja jezera, izdelano s presekom DMV 5 in ravnine, ki je imela nadmorsko višino enako izmerjeni višini roba jezera. Rezultate terenskih meritev roba jezera in simulacije vodostaja smo upodobili na državnem ortofotu s prostorsko ločljivostjo 0,5 m (DOF050) v državnem koordinatnem sistemu D96/TM. Iz upodobitve je razvidno, da se obod jezera v obeh primerih razlikuje med sabo, kar je posledica višinskega premika DMV 5 na izbranem območju. Kakovost DMV 5 smo ocenili s primerjavo višin terenskih GNSS-meritev in z bilinearno interpolacijo pridobljenih višin iz DMV 5.

Izmera GNSS na danem območju

Za namen spremljanja vodostaja Cerknškega jezera smo uporabili kinematično metodo izmere GNSS v realnem času (v nadaljevanju RTK-metoda izmere (angl. Real Time Kinematic)). V prvi vrsti je to ena izmed najhitrejših terenskih metod določitve položaja objekta z GNSS, saj podatke o položaju točk ali objektov lahko pridobimo že tekom izmere. Način pridobitve položajnih podatkov na delovišču omogoča sprotno izdelavo skice izmerjenega območja, hkrati pa z gotovostjo vemo, da podatke opazovanj GNSS lahko obdelamo, ker že tekom izmere lahko ugotavljamo kakovost izračuna fazne nedoločenosti (izvedba inicializacije). Če opazovanja GNSS obdelujemo naknadno, se nam lahko zgodi, da jih v določenih situacijah ne moremo korektno obdelati. Problem se navezuje na problem izračuna fazne nedoločenosti v množici naravnih števil. Ker smo bili od najbližje stalne postaje GNSS državnega omrežja SIGNAL oddaljeni toliko, da izvedba RTK-metode izmere z direktno priključitvijo na stalno postajo ni bila smiselna, smo za namen izvedbe RTK-metode izmere uporabili vzpostavitev virtualnega baznega stojišča VRS. Ker se je izbrano delovišče nahajalo na območju, kjer so stranice trikotnika stalnih postaj omrežja SIGNAL daljše od 70 km, kar zagotavlja korektno izvedbo izmere z GNSS RTK-metodo izmere (Wang et al., 2010), smo predhodno določili tri točke s statično metodo izmere in na le-teh nadalje primerjali rezultate večkrat neodvisno izvedene RTK-metode izmere. Predpostavili smo, da je kakovost vzpostavitve VRS-postaje v omrežju SIGNAL in nadaljnje izvedbe RTK-metode na danem območju slabša zaradi večje oddaljenosti med stalnimi postajami. Širše območje izmere se nahaja v trikotniku omrežja SIGNAL, kjer so stranice precej daljše (povezava Radovljica in Ilirska Bistrica znaša nekaj manj kot 90 km), kot je to zahteva programskega paketa proizvajalca Trimble, v okviru katerega obdelujejo opazovanja stalnih postaj omrežja SIGNAL. V bližnji prihodnosti, ko bo v omrežje SIGNAL vključena tudi stalna postaja v Idriji, je pričakovati, da se bo kakovost rezultatov RTK-metode izmere z VRS precej izboljšala.

Na danih točkah smo preverili odstopanja koordinat, določenih s trikratno neodvisno RTK-metodo izmere. Odstopanja so bila precej izrazita v smeri proti severu (več kot 10 cm), medtem ko so bila manjša v smeri vzhod zahod (do 2 cm) in v višini (največ 7 cm).

Položaje diskretnih točk roba jezera smo pridobili v dveh terenskih dnevih. Ob tem smo tekom izmere večkrat neodvisno izvajali postopek inicializacije. Poudariti je potrebno težavnost izvedbe terenske izmere v smislu določitve roba jezera. V drugi terminski izmeri smo izmero izvedli z dvema operaterjema, pri čemer je prvi določal položaje točk zamočvirjenega roba jezera, drugi pa položaje točk roba jezera, kjer je voda segala čez gležnje (bele oziroma rdeče točke na sliki 1).



Slika 1: Prikaz točk, določenih z RTK-metodo izmere. Točke prve terenske meritve so obarvane rumeno, druge pa belo (prvi operater je določal roba jezera) oziroma rdeče (drugi operater, ki je določal rob zamočvirjenega dela).

Poleg položajnih podatkov smo v realnem času določevali tudi elipsoidne višine (GNSS je primarno vezana na pridobitev elipsoidne višine h), ki smo jo nadalje z uporabo aktualnega modela geoida Slovenije pretvorili tudi v nadmorsko višino H . V dani nalogi nismo ugotavljali odstopanja modela geoida od dejanskega stanja zato, ker nam je bil cilj izvesti primerjavo višin, pridobljenih z GNSS in višin, pridobljenih iz DMV 5. V slednjem pa so bile nadmorske višine pridobljene na osnovi uporabe istega modela geoida kot v primeru višinomerstva GNSS.

Analiza kakovosti DMR

Pri interpretaciji rezultatov analiz, opravljenih na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR), je pomembno, da poznamo kakovost uporabljenega DMR. Kakovost ocenimo na podlagi referenčnih meritev. V našem primeru smo kot referenčne točke uporabili meritve GNSS, opravljene z RTK-metodo izmere, ki smo jih izvedli za določitev oboda jezera. Razporeditev teh točk (slika 2) ni optimalna za oceno kakovosti, saj točke niso enakomerno razporejene po terenu, vseeno pa nam vsaj deloma ponuja vpogled v točnost rezultatov (upodobitev poplavljenosti), ki smo jih pridobili na podlagi analiz DMR. Kakovost DMR ocenimo z višinsko in položajno točnostjo ter popolnostjo. V nadaljevanju opisujemo oceno točnosti višin uporabljenega DMV 5, ki jo povzemamo po (Höhle, Potuckova, 2011). Položajne točnosti in popolnosti DMV 5 nismo ocenili.

Oceno točnosti višin DMV 5 smo izvedli s primerjavo višin 483 (n) referenčnih meritev GNSS h_{GNSS} in z bilinearno interpolacijo (Mikhail, Bethel, McGlone, 2001) izračunanih višin iz DMV 5 h_{DMV5} na identičnih lokacijah. Na podlagi višinskih odstopanj Δh smo ocenili koren srednjega kvadratnega pogreška $RMSE$ (angl. Root Mean Square Error), srednjo vrednost odstopanj μ in standardni odklon σ . Srednja vrednost odstopanj izraža premik DMR glede na referenčne meritve. Enačbe (1-4) podajajo izračun in rezultate ocene točnosti DMV 5:

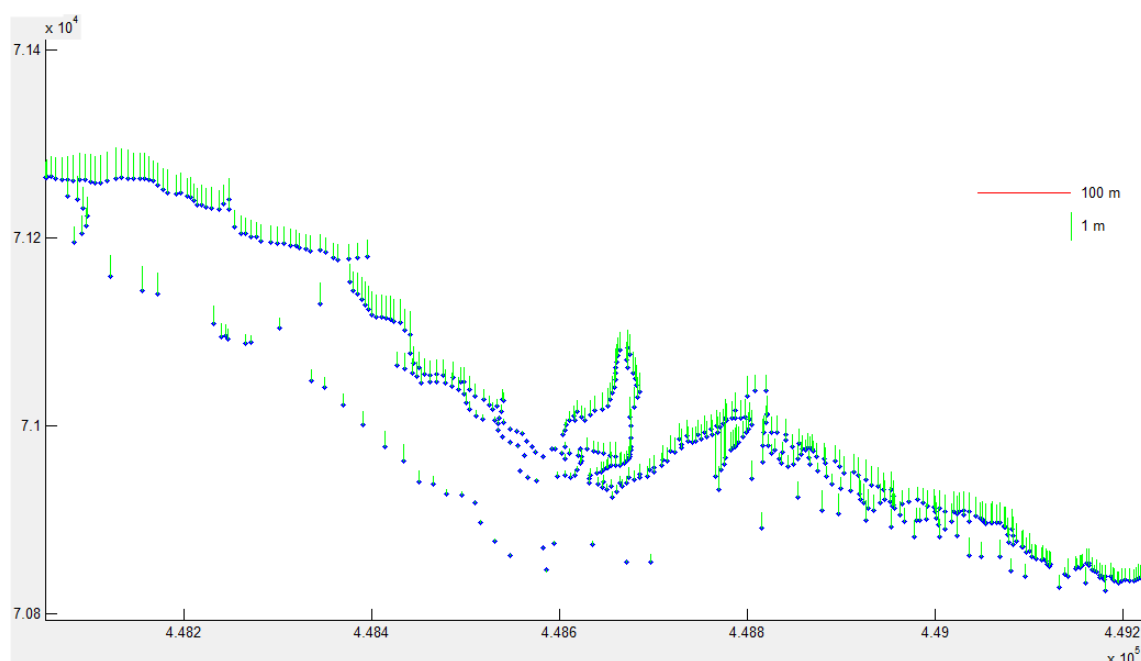
$$\Delta h = h_{\text{DMV5}} - h_{\text{GNSS}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} = 0,581 \text{ m} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i = 0,534 \text{ m} \quad (3)$$

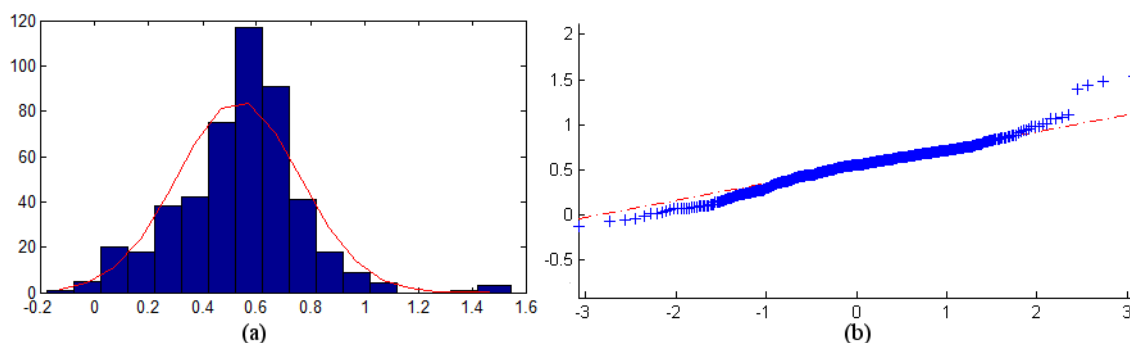
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \mu)^2} = 0,229 \text{ m} \quad (4)$$

Praga 3- $RMSE$, ki določa grobo pogrešena opazovanja, ni preseglo nobeno višinsko odstopanje. Zanesljivost cenilk, ocenjenih na podlagi vzorca, podamo z intervalom zaupanja. V našem primeru je 95% interval zaupanja za srednjo vrednost ocenjen na podlagi *Studentove t* porazdelitve, $[0,514 \text{ m} < \mu < 0,555 \text{ m}]$. 95% interval zaupanja za standardni odklon, ocenjen na podlagi χ^2 porazdelitve, je $[0,215 \text{ m} < \sigma < 0,244 \text{ m}]$.



Slika 2: Razporeditev referenčnih točk. V zeleni barvi so prikazana višinska odstopanja na posameznih referenčnih točkah (povečana za faktor 30).

Če opazovanja vsebujejo več grobih pogreškov ali če višinska odstopanja niso normalno porazdeljena, uporabimo robustne ocene točnosti. Normalnost porazdelitve odstopanj vizualno ocenimo na podlagi histograma porazdelitve odstopanj (slika 3a) in na podlagi kvantilnega grafa (slika 3b), na katerem primerjamo funkcijo empirične porazdelitve s teoretičnimi kvantili normalne porazdelitve.



Slika 3: (a) Histogram porazdelitve višinskih odstopanj. Rdeča linija označuje pričakovano število odstopanj v primeru normalno porazdeljenih odstopanj s srednjo vrednostjo odstopanj in standardnim odklonom, ocenjenima iz DMV 5. (b) Z modrimi + so prikazani kvantili višinskih odstopanj. Rdeča linija prikazuje kvantile normalne porazdelitve.

Robustna ocena za sistematični premik DMR je mediana. Mediana $m_{\Delta h}$ je srednje odstopanje vseh po velikosti razvrščenih odstopanj in je v našem primeru opredeljena kot 50% kvantil $Q_{\Delta h}(0,50)$. Je manj občutljiva za grobe pogreške kot srednja vrednost odstopanj. Ostale robustne ocene pridobimo z analizo kvantilov absolutnih vrednosti odstopanj $|\Delta h|$. 95% kvantil $Q_{|\Delta h|}(0,95)$ pomeni, da ima 95% absolutnih vrednosti odstopanj velikost znotraj intervala $[0, Q_{|\Delta h|}(0,95)]$. Naslednja ocena je 68,3% kvantil absolutnih vrednosti odstopanj $Q_{|\Delta h|}(0,683)$. Enak odstotek je v primeru normalno porazdeljenih odstopanj uporabljen za določitev standardnega odklona σ . Zadnja robustna mera točnosti višin, ki jo navajamo, je normalizirana mediana absolutnih deviacij *NMAD* (angl. normalised median absolute deviation). *NMAD* ustreza vrednosti $1 \cdot \sigma$ v primeru normalno porazdeljenih opazovanj. Enačbe (5-8) podajajo izračun in rezultate robustnih ocen točnosti DMV 5:

$$m_{\Delta h} = Q_{\Delta h}(0,50) = 0,555 \text{ m} \quad (5)$$

$$NMAD = 1,4826 \cdot m_{|\Delta h - m_{\Delta h}|} = 0,187 \text{ m} \quad (6)$$

$$Q_{|\Delta h|}(0,683) = 0,640 \text{ m} \quad (7)$$

$$Q_{|\Delta h|}(0,95) = 0,857 \text{ m} \quad (8)$$

Glede na podobne rezultate za srednjo vrednost odstopanj in mediano ter za standardni odklon in *NMAD* ter na vizualno analizo histograma in kvantilov na sliki 3 lahko za oceno

točnosti DMV 5 uporabimo standardne mere točnosti ($RMSE$, μ in σ). Ugotovimo lahko, da je DMV 5 na območju oboda jezera previsok za dobrega pol metra.

Simulacija vodostaja na osnovi DMV 5

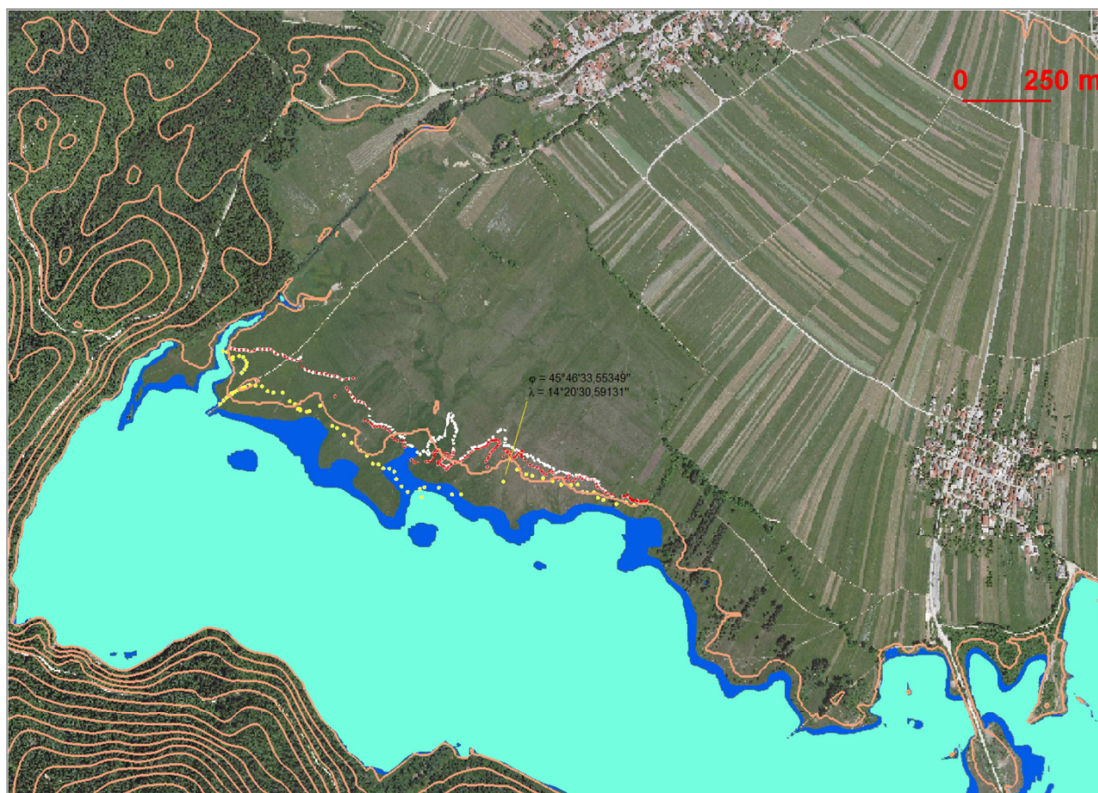
Grafično smo gladino jezera predstavili s presekom DMV 5 z ravnino, ki je imela višino enako nadmorski višini gladine jezera. Nadmorsko višino gladine jezera smo pridobili s terenskimi meritvami, nadalje pa smo izračunali srednjo vrednost nadmorskih višin, ki smo jih pridobili z diskretno izmerjenimi položaji točk. Srednjo vrednost smo izračunali zato, ker so se zaradi težavnosti izvedbe meritev višine diskretnih točk razlikovale v nekaj cm. Na sliki 4 prikazujemo območje jezera, kjer se gladina jezera nahaja na višini 549,65 m. Takoj lahko opazimo, da se ploskev ne ujema z dejansko izvedenimi terenskimi meritvami. To je vezano na predhodno ugotovitev, da je DMV 5 na območju oboda jezera previsok za dobrega pol metra. S slike je tudi razvidno, da linija rdečih diskretnih točk (terenska meritev) na začetku (na levi strani) poteka dokaj skladno z robom jezera, vendar zopet ne tik ob robu jezera. Meritve se z robom jezera najbolj skladajo v osrednjem delu. Največja oddaljenost izmerjenega roba od grafičnega roba jezera v horizontalnem smislu pa znaša približno 160 m.



Slika 4: Prikaz srednje nadmorske višine gladine jezera dne 15.3.2014 (DOF050 v novem koordinatnem sistemu D96/TM, DMV 5).

Nadalje smo primerjali gladini jezera – prva gladina je vezana na izmero v januarju 2014 (višina 549,14 m), druga pa na izmero v marcu 2014 (višina 549,65 m). V obeh

primerih so diskretno določene točke na terenu precej oddaljene od roba jezera, ki smo ga določili s simulacijo na DMV 5 (slika 5).



Slika 5: Primerjava vodostaja s prve (januar 2014) in druge (marec 2014) terenske izmere. V temnejši barvi je prikazan vodostaj v času druge izmere, v svetlejši barvi pa v času prve izmere (DOF050 v novem koordinatnem sistemu D96/TM, DMV 5).



Slika 6: Gladina jezera (v temnejši modri barvi) v času poplav 23. 2. 2014. Razširjenost jezera pred poplavami je prikazano v svetlo modri barvi. Voda je segala do najbližje hiše v

vasi Dolenje Jezero (rumen krogec), z rdečim krožcem je označena cerkev Sv. Lovrenca (DOF050 v novem koordinatnem sistemu D96/TM, DMV 5).

Višino vodne gladine v obdobju februarских poplav smo določili zgolj teoretično, saj med poplavami nismo izvedli terenske izmere z GNSS. Na merilnem mestu smo v času poplav odčitali globino jezera, ki je znašala 5,50 m, kar je za 1,30 m več kot globina v času druge izmere, ko je znašala 4,20 m. Tako smo pridobili ocenjeno višino gladine jezera v času poplav, ki je znašala 550,95 m. Srednja višina gladine jezera je že dosegala zgornjo mejo, ki jo jezero po navadi doseže v obdobju najvišjega vodostaja oziroma poplav (slika 6).

Zaključek

V prispevku smo želeli pokazati, da je pred uporabo različnih modelov višin, ki služijo kot vhodni podatek za nadaljnje analize, potrebno posebno pozornost nameniti oceni kakovosti izvirnega podatka, v našem primeru DMV 5. V danem primeru smo opravili tudi oceno kakovosti kinematične metode izmere GNSS na območju, kjer državno omrežje stalnih postaj GNSS SIGNAL zaenkrat še ne omogoča optimalne izmere. Ugotovili smo nekaj centimetrsko odstopanje položajev točk, določenih s kinematično izmero z uporabo točke VRS, od položajev, določenih z bolj točno statično metodo izmere GNSS. Nadalje smo ugotovili, da je DMV 5 na danem območju oboda jezera previsok za dobrega pol metra. To nakazuje, da z uporabo modela DMV 5 na danem območju dejansko simulirana ploskev jezera od dejanske lahko v horizontalnem smislu odstopa tudi več kot 100 m.

Ker bodo v omrežje SIGNAL v kratkem vključili dodatno stalno postajo v Idriji, pričakujemo, da se bo točnost določitve položaja z uporabo VRS precej izboljšala.

Oceni kakovosti podatkov modelov višin, kot je primer DMV 5 ali tudi drugi modeli, je in bo vedno potrebno posvečati večjo pozornost. Vedeti moramo, da ima masovni zajem podatkov, na osnovi katerih so izpeljani modeli, pred terenskim zajemom podatkov velike prednosti v smislu količine zajema podatkov, tehnologija zajema pa ima na določenih segmentih tudi pomanjkljivosti. Zato globalna ocena kvalitete izdelka, ki jo pridobimo hkrati z modelom, ni dovolj, da bi lahko nadaljnja uporaba izdelka potekala brez predhodne ocene kakovosti izdelka na nam zanimivem obravnavanem območju.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ARRS.

Literatura

- Höhle, J., Potuckova, M. 2011. EuroSDR No. 60: Assessment of the Quality of Digital Terrain Models, December 2011. http://www.eurosdrr.net/sites/default/files/uploaded_files/60_0.pdf
- Kunaver, P. 1961. Cerkniško jezero. Mladinska knjiga, Ljubljana.
- Mikhail, E., Bethel, J., McGlone, C. 2001. Introduction to Modern Photogrammetry. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Turk, J., Pipan, A. 2014. Cerkniško polje. <http://www.dedi.si/dediscina/9-cerknisko-polje> (Pridobljeno 15.10.2014)
- Wang, C., Feng, Y., Higgins, M., Cowie, B. 2010). Assessment of commercial Network RTK user positioning performance over long inter-station distances, *Journal of Global Positioning Systems* 9(2): 78-89.

Določanje kazalnikov nizkih pretokov – prikaz na primeru vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri

Manca Petek*, Mira Kobold*, Mojca Šraj*

Povzetek

Zaradi neugodne razporeditve padavin tekom leta, suša in z njo povezano pomanjkanje vode v zadnjih letih predstavlja velik problem tudi za Slovenijo. V hidrologiji pojem nizki pretoki pomeni stanje pretoka v vodotoku, ki sledi daljšemu obdobju pomanjkanja padavin. Kot taki so nizki pretoki sestavni del pretočnih režimov vodotokov, njihovo poznavanje pa je pomemben del učinkovitega gospodarjenja z vodami. Nizki pretoki so v prispevku predstavljeni z vidika izračuna glavnih kazalnikov nizkih pretokov. V prispevku smo na primeru merjenih pretokov na vodomerni postaji Kokra I na reki Kokri prikazali izračun omenjenih kazalnikov z uporabo programskega okolja R in paketa *lfstat*, temu pa je dodana še analiza in komentar rezultatov.

Ključne besede: hidrologija, nizki pretoki, kazalniki nizkih pretokov, Kokra, sezonskost, recesijska krivulja

Key words: hydrology, low-flows, low-flow indices, Kokra River, seasonality, recession curve

Uvod

Nizki pretoki in z njimi suša predstavljajo eno od pomembnejših področij hidrologije, suša pa že dolgo časa ni zgolj domena hidrologov in agronomov, saj blaženje njenih posledic zahteva povezovanje različnih strok. Sušo različni viri v literaturi v splošnem interpretirajo kot obdobje pomanjkanja vode in vodnih virov, medtem ko je natančnejša definicija pogosto subjektivna. Beran & Rodier (1985) definirata sušo kot neprekinjeno obdobje pomanjkanja vode in naravnih vodnih virov, bodisi v obliki padavin, pretoka v vodotokih ali stanja podtalnice, ki prizadene širše geografsko območje. V svoji prostorski razširjenosti se suše razlikujejo od poplav, saj običajno prizadenejo bistveno večja območja. Hisdal in Tallaksen (2000) povzameta štiri različne kategorije suše: meteorološko, ki se odraža v daljši odsotnosti padavin in je običajno glavni vzrok za razvoj suše; hidrološko, ki se odraža v nizkih vodostajih površinskih in podzemnih virov vode; kmetijsko, ki se kaže v pomanjkanju potrebne vlažnosti zemljine za rastline; ter socialno-ekonomsko, ki se odraža v povezavi suše s povpraševanjem po določeni dobrini. Pomanjkanje dobrin kot posledica kmetijske suše se namreč kaže v neravnovesju med ponudbo in povpraševanjem. Meteorološka suša se pojavi prva in je povod za razvoj drugih. Sledi ji agrometeorološka ter kot zadnja še hidrološka, saj se pretoki v vodotokih počasneje odzivajo na pomanjkanje padavin. Obnavljanje vodnih virov sledi v obratni smeri, saj se ob pojavu padavin najprej obnovijo vodne zaloge v tleh in vodotokih, kot zadnje pa se obnovijo zaloge podtalnice (Kobold in Sušnik, 2003). Beran in Rodier (1985) definirata razliko med hidrološko sušo in nizkimi pretoki. Glavna značilnost suše je deficit vode za nek določen namen, medtem ko so nizki pretoki sestavni del suše, vendar predstavljajo samo eno od njenih dimenzij, t.j. njeno intenziteto.

* Univerza V Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

Posledice spreminjanja vremenskih trendov v Evropi sta v povezavi z nizkimi pretoki analizirala Feyen in Dankers (2009). Ugotovila sta, da naj bi do konca stoletja v skladu z enim od možnih scenarijev prišlo do bistvenih sprememb mehanizmov nizkih pretokov vodotokov; ti naj bi se pojavljali bolj pogosto in v večjih obsegih, predvsem v južni Evropi. Nasprotno pa so Hisdal in sodelavci (2000) ugotovili, da ni jasnih dokazov o tem, da so suše v Evropi postale intenzivnejše in pogostejše, so pa zaznali spremembe trendov padavin v odvisnosti od njihovega prostorskega pojavljanja. Kljub nezanesljivim napovedim pa ti izsledki dajejo še večjo težo učinkovitejšemu upravljanju z vodnimi viri.

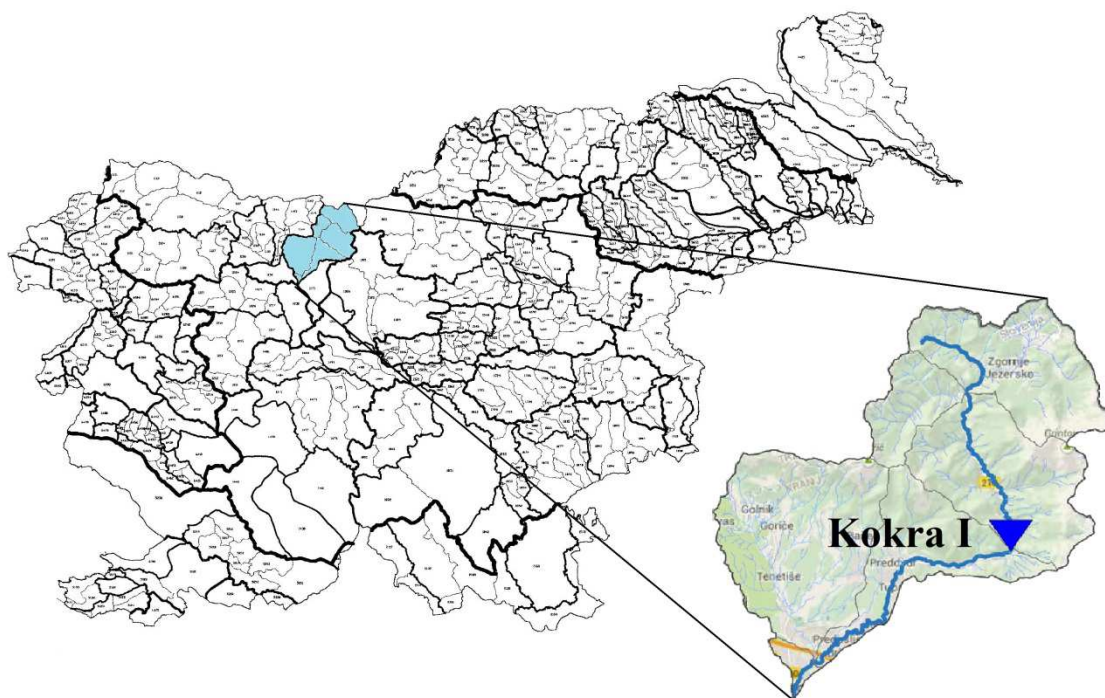
Kazalniki nizkega pretoka so v literaturi večinoma analizirani ločeno, saj predstavljajo kompleksne izračune, osnovane na številnih analizah podatkov. Svetovna meteorološka organizacija je v letu 2009 (WMO, 2009) izdala pomemben dokument na področju analize in napovedovanja nizkih pretokov, t.i. priročnik za določanje in napovedovanje nizkih pretokov (ang. *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*). Priročnik vsebuje opis metodologij, ki se uporabljajo za analize nizkih pretokov in primere njihovih izračunov. Sledi torej napredku hidrologije na tem področju in predstavlja osnovo za pristop k analizi nizkih pretokov. Na osnovi izdanega priročnika (WMO, 2009) je bil na dunajski univerzi BOKU izdelan paket *lfstat* (Koffler & Laaha, 2014), ki znotraj programskega okolja R omogoča izračun kazalnikov nizkega pretoka, njihovo grafično predstavitev in primerjavo. Program R je primeren predvsem zaradi prostega dostopa in odprtosti, kar omogoča integracijo t.i. paketov, ki jih prispevajo uporabniki nenehno rastoče R skupnosti (R-project, 2014).

Analize nizkih pretokov in določanje njihovih kazalnikov so nujne za celotno upravljanje z vodotoki, pravilno gospodarjenje z vodnimi viri, načrtovanje in upravljanje javne oskrbe z vodo, odločanje v zvezi z odvzemi in rabo vode, ohranjanje ekosistema ipd. Rezultati analiz dolgoletnih nizov pa se uporabljajo tudi kot predhodno opozorilo o morebitnih naravnih ali umetnih spremembah v režimu nizkih pretokov.

Podatki in metodologija

Kot ilustracijo uporabe programa R ter znotraj njega paketa *lfstat* za analizo nizkih pretokov, smo uporabili podatke o dnevnih vrednostih pretokov z vodomerne postaje Kokra I na istoimenskem vodotoku (slika 1). V analizah so uporabljeni podatki od leta 1957 do leta 2012 (ARSO, 2014). Uporabljen niz je brez manjkajočih vrednosti pretoka, kar omogoča verodostojno in zanesljivo analizo podatkov.

Kokra je alpska reka, ki izvira v Karavankah, na približno 1400 m nadmorske višine. Od tam teče po dolini mimo Preddvora proti Kranju, kjer se izlije v Savo (slika 1). Površina prispevne površine reke do vodomerne postaje Kokra I znaša 113,1 km², sicer pa celotno porečje Kokre meri 224 km² (Globevnik, 1998). Gorvodno od vodomerne postaje Kokra I ima vodotok značilen hudourniški značaj in geološko tu prevladujejo karbonatne kamnine. Od Preddvora do Kranja pa prevladujejo aluvialne naplavine in prodni zasipi, padec struge se bistveno umiri. Hidravlika toka na celotnem vodotoku regulirajo številni jezovi, pragovi, drče, nekaj objektov je namenjeno tudi za energetske izrabo vodnega toka (Globevnik, 1998).



Slika 1: Lokacija obravnavane vodomerne postaje Kokra I na reki Kokri

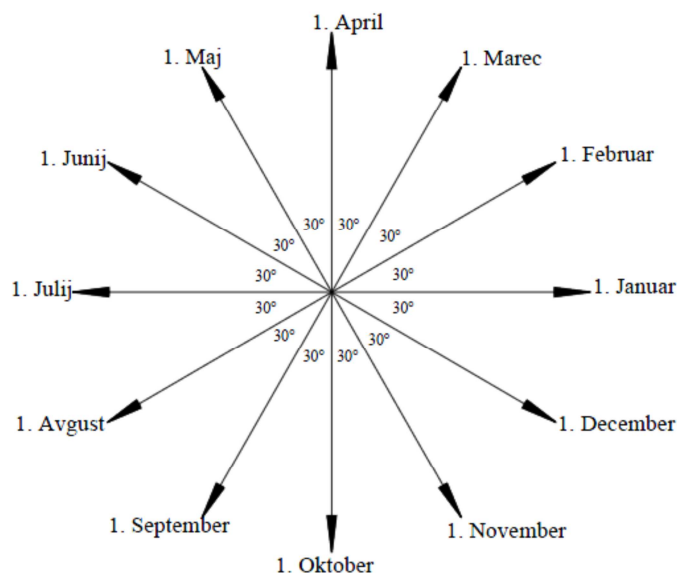
Za izračun kazalnikov nizkega pretoka smo uporabili že prej omenjeno programsko okolje R in temu namenjen paket *lfstat* (Koffler & Laaha, 2014). Med kazalnike nizkih pretokov v prvi vrsti spadajo osnovne statistike nizkih pretokov, kot je npr. srednji pretok Q_{sr} , ki kot tak predstavlja najosnovnejšo vrednost za primerjavo med različnimi vodotoki. V isto skupino spadajo tudi 70-, 90- in 95-odstotni pretok (Q_{xx}), ki predstavljajo pretoke, presežene enak odstotek časa. Druga možnost za njihovo določitev je, da jih razberemo iz krivulj trajanja. Srednji letni n -dnevni minimum (MAM) je ravno tako kazalnik nizkega pretoka in sestavni del številnih hidroloških študij, izračunamo pa ga lahko za različne časovne n -dnevne intervale, ter na koncu določimo povprečno vrednost vseh let (WMO, 2009). V praksi se uporabljajo 1, 7, 10, 30 in 90-dnevni intervali. Za izračun omenjenih kazalnikov smo v programskem okolju R uporabili funkcije *meanflow*, Q_{xx} in MAM , za vse pa smo izbrali tudi ustrezne vhodne parametre (Petek, 2014).

Osredotočili smo se tudi na izračun kazalnikov, povezanih z baznim pretokom, t.j. pretokom, ki izvira iz podzemnih virov. Eden teh je indeks baznega odtoka (BFI), ki predstavlja razmerje med baznim in celotnim pretokom v vodotoku. Vrednost indeksa se lahko giblje med 0 in 1 in je odvisen predvsem od značilnosti porečja (Brilly & Kobold, 1994; Kovačič, 2012). Izračun BFI smo v programskem okolju R izvedli z istoimensko funkcijo. Bazni pretok bistveno vpliva tudi na obliko t.i. krivuljo trajanja pretoka, ki prikazuje odstotek časa, v katerem je določena vrednost pretoka presežena (Smakhtin, 2001). Od baznega pretoka je odvisna tudi oblika krivulje trajanja, izris katere je možen z za to predvideno funkcijo FDC . Od baznega toka in značilnosti upadanja pretoka je odvisna tudi recesijska krivulja, ki predstavlja padajoči del hidrograma in ponazarja stopnjo upadanja posameznega vodotoka z recesijsko konstanto C v dnevih. Večji del analiz na tem področju je izvedla Tallaksen (1995, 1989), WMO (2009) pa sistematično podaja razlike med metodo glavne recesijske krivulje (MRC) in individualnih recesijskih segmentov (IRS). Ustrezno dolžino segmentov in vhodni parameter *peaklevel* lahko v

programu R določimo s pomočjo funkcij *recessionplot* in *seglenplot*. Natančnejši postopek analize recesijskih krivulj pa je predstavljen v WMO (2009) in Petek (2014).

Obdobja v letu, ko ima pretok vodotoka vrednost, manjšo od neke določene meje, imenujemo deficit vodnega toka (WMO, 2009). V povezavi z njegovim določanjem se pogosta uporablja metoda mejne vrednosti, s katero določimo trajanje, volumen, magnitudo in minimalni pretok deficita, ravno tako pa določimo čas njegovega začetka in konca. Ker lahko med posameznimi obdobji deficita pride do medsebojne odvisnosti (npr. obdobje deficita pretrga zgolj krajši padavinski dogodek), se v praksi uporabljajo različni postopki razvrščanja, kot so postopek drsečega povprečja (MA) (Fleig et al., 2006), algoritem zaporednih konic (SPA) (Hisdal & Tallaksen, 2000) ter metoda medčasovnega dogodka (IT) (Fleig et al., 2006), ki se pogosto pojavlja skupaj s postopkom volumskega kriterija (IC) (Hisdal & Tallaksen, 2000). Ustrezno metodo v programu R izberemo z argumentom »pooling«. Za mejno vrednost izberemo eno od statistik Q_{xx} , rezultat analize pa se izpiše v obliki preglednice z rezultati o trajanju, volumnu, intenziteti, minimalnem pretoku ter datum začetka in konca sušnega pretoka.

Pojavljjanje nizkih pretokov čez leto smatramo kot sezonsko lastnost posameznega vodotoka. V povezavi s slednjo lahko v programu R s funkcijo *sbplot* določimo pretočni režim vodotoka. Posebej nizkim pretokom namenjena kazalnika sezonskosti pa sta indeks sezonskosti in razmerje sezonskosti. Prvi na enostaven, grafičen način prikaže dan pojava nizkega pretoka na enotskem krogu (slika 2) (Burn, 1997) ter njegovo variabilnost (dolžina vektorja r). Skladno s tem je indeks sezonskosti sestavljen iz kota Θ , ki pomeni dan nastopa nizkega pretoka (v radianih), preračunanega julijanskega dneva D ter dolžine vektorja r . Razmerje sezonskosti pa je numerična predstavitev razmerja med poletnimi in zimskimi nizkimi pretoki; vrednosti manjše od 1 vodotok uvrščajo v poletni režim nizkih pretokov, večje pa v zimskega. Laaha in Blöschl (2006) za ločnico pri izbiri obdobj predlagata 1. april in 1. december. Indeks sezonskosti smo v programu R izračunali s pomočjo funkcije *seasindex*, razmerje sezonskosti pa s funkcijo *seasratio*. Pri slednjem smo upoštevali ločitev obdobj po Laaha in Blöschl (2006).



Slika 2: Grafični prikaz indeksa sezonskosti po mesecih (Srebrnič, 2005)

Rezultati in analiza

V nadaljevanju smo za vodomerno postajo Kokra I najprej izračunali vrednosti statistik za posamezna leta podatkov, povprečne vrednosti statistik za celotno obravnavano obdobje (preglednica 1), povprečne vrednosti statistik za posamezne mesece obravnavanega obdobja (preglednica 2) in prikazali korelacijo med izračunanimi nizi kazalnikov (preglednica 3).

Preglednica 1: Povprečne vrednosti statistik nizkega pretoka in indeksa baznega odtoka BFI za pretoke vodomerne postaje Kokra I (1957-2012)

MAM_1 [m ³ /s]	MAM_7 [m ³ /s]	MAM_{10} [m ³ /s]	MAM_{30} [m ³ /s]	MAM_{90} [m ³ /s]	Q_{sr} [m ³ /s]	Q_{90} [m ³ /s]	Q_{95} [m ³ /s]	Q_{70} [m ³ /s]	BFI
1.345	1.413	1.447	1.645	2.267	4.304	1.715	1.564	2.293	0.630

Vrednosti posameznih statistik so relativno majhne, najvišjo vrednost logično dosega srednji pretok, medtem ko je vrednost MAM_1 komaj nad kubičnim metrom pretoka (preglednica 1). Z baznim pretokom je povezan izračunani kazalnik BFI , katerega vrednost (0.630) nakazuje na opazen prispevek podzemnih virov k pretoku. Gre torej za vodotok, ki ima zmožnost vzdrževanja pretoka kljub majhni vodnatosti.

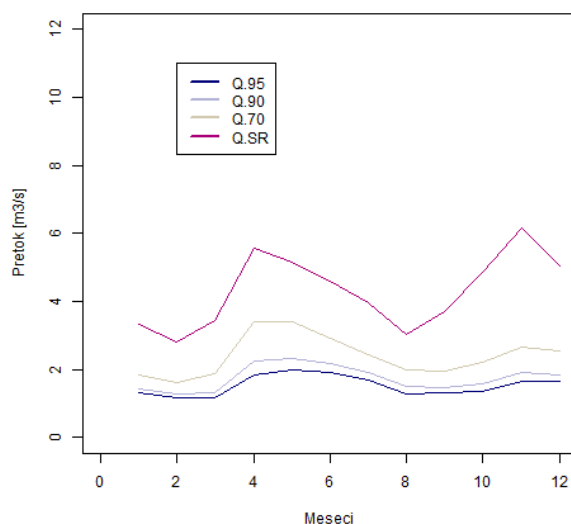
Poleg izračuna statistik za celotno obravnavano obdobje, smo izračun naredili tudi po posameznih mesecih. Rezultati so prikazani v preglednici 2 in na sliki 3. Izris značilnih pretokov različnih pogostosti pojavljanja (slika 3) pokaže značilne ekstreme Kokre skozi leto. Opazen je porast pretoka v mesecu aprilu, ki je posledica taljenja snega v Alpah. Povečan delež pretoka je opazen tudi v novembru in decembru, glavna minimuma pa sta v avgustu in februarju; slednji je posledica snežnih padavin, ki povzročijo zmanjšanje odtoka.

Srednji letni minimumi (MAM) si po velikosti sledijo po vrsti, odvisno od števila izbranih dni za grupiranje podatkov. Med Q_{95} , Q_{90} , MAM_{10} in MAM_{30} ni znatnih razlik, vendar analiza korelacije (preglednica 3) pokaže, da imajo za vsa obravnavana leta podatkov najvišjo stopnjo korelacije srednji letni minimumi med seboj, a povezanost pada z večanjem n ; MAM_1 je tako najtesneje povezan z MAM_7 in najmanj z MAM_{90} , MAM_{30} pa najbolj z MAM_{10} in MAM_{90} , manj pa z MAM_1 . Analogno je tudi pri 70-, 90- in 95-odstotnem ter srednjem pretoku. Med obema skupinama kazalnikov imata najvišjo stopnjo korelacije MAM_{30} in Q_{95} ter MAM_{10} in Q_{95} (preglednica 3).

Preglednica 2 - Izračunane povprečne statistike nizkega pretoka po posameznih mesecih za pretoke vodomerne postaje Kokra I (1957-2012)

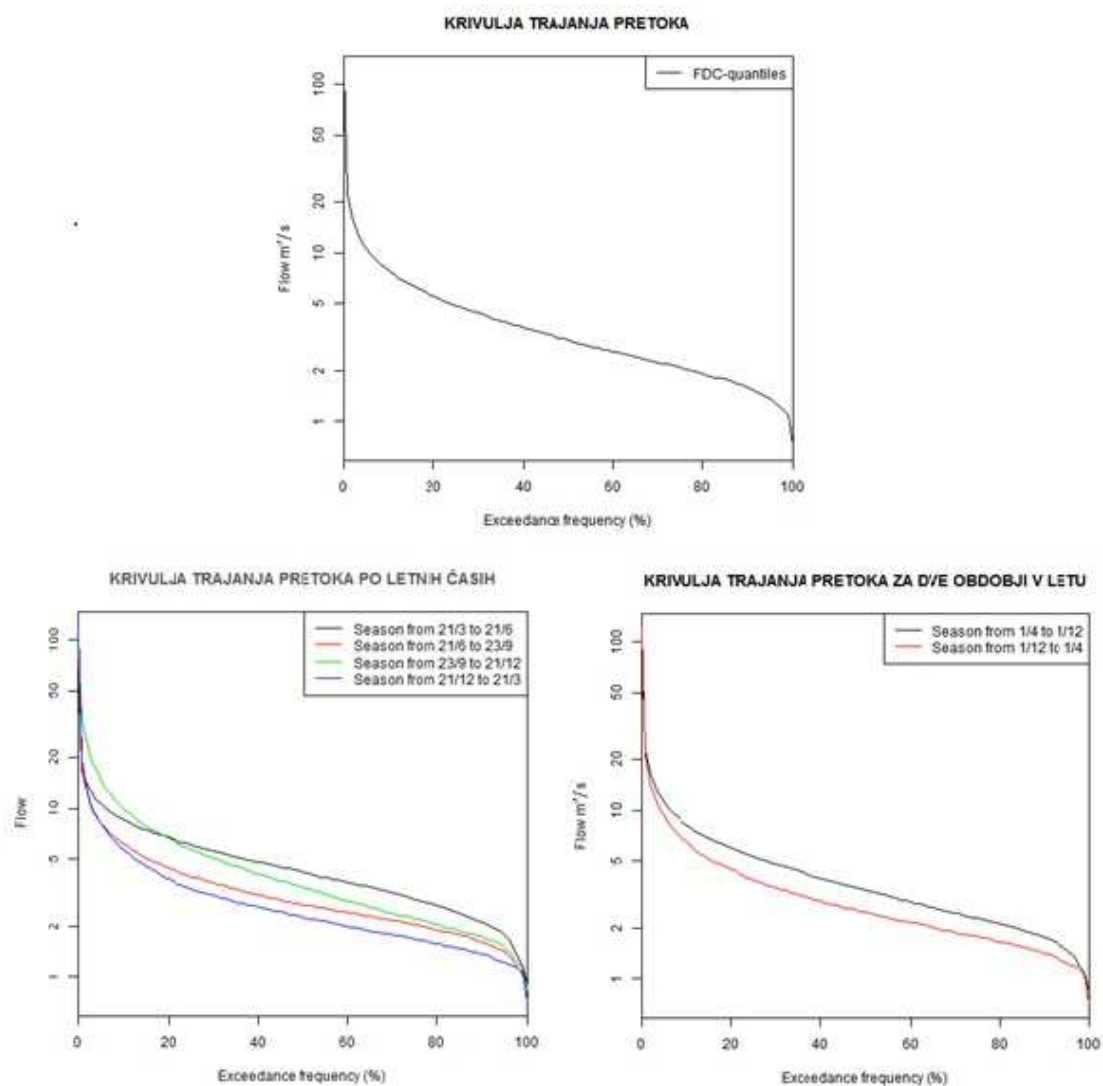
Mesec	BFI	MAM_1	MAM_7	Q_{SR}	Q_{95}	Q_{90}	Q_{70}
1	0.63	1.80	1.92	3.32	1.31	1.44	1.82
2	0.53	2.15	2.32	2.79	1.18	1.28	1.61
3	0.50	2.55	2.76	3.46	1.17	1.32	1.88
4	0.54	2.31	2.58	5.55	1.83	2.24	3.40
5	0.69	1.67	1.75	5.15	1.98	2.33	3.42
6	0.65	1.81	1.90	4.61	1.90	2.15	2.92
7	0.64	2.90	3.25	3.94	1.68	1.91	2.42
8	0.72	3.19	3.49	3.01	1.27	1.51	1.99

9	0.69	2.80	3.10	3.68	1.30	1.48	1.93
10	0.69	2.28	2.56	4.87	1.35	1.56	2.20
11	0.72	1.90	2.06	6.16	1.66	1.90	2.67
12	0.60	1.87	2.00	5.05	1.66	1.82	2.53



Slika 3: Prikaz povprečnega 95-, 90-, 70-odstotnega in srednjega pretoka po mesecih za obravnavano obdobje 1957-2012 za vodomerno postajo Kokra I

Izris krivulje trajanja za vodomerno postajo Kokra I za celotno obravnavano obdobje je prikazan na sliki 4a. Iz oblike krivulje trajanja izvemo veliko o naravi toka vodotoka. V hidrologiji nizkih pretokov se za analizo uporablja predvsem del krivulje, ki predstavlja pretoke, manjše od tistih, preseženih 50 odstotkov časa. Položna krivulja v tem delu pove, da podzemni viri znatno pripevajo k pretoku v vodotoku. To lahko v neki meri sklepamo tudi iz slike 4a. Z izrisom krivulj za vsak letni čas posebej (slika 4b) lahko ugotovimo večjo spremenljivost v pretokih skozi leto; najvišji del krivulje, torej največji pretoki, so značilni za pomlad, ko se sneg v višjih legah tali in pride do povečanega odtoka. Zima ima na drugi strani najmanjše pretoke prav zaradi akumulacije snežnih padavin, jesen pa je bolj vodnata od poletja. Krivulji za dve obdobji (slika 4c) v letu (enaki, kot pri računu razmerja sezonskosti) kažeta podobne karakteristike kot slika 4b; obstaja znatna razlika med pretoki v poletnem in zimskem času.



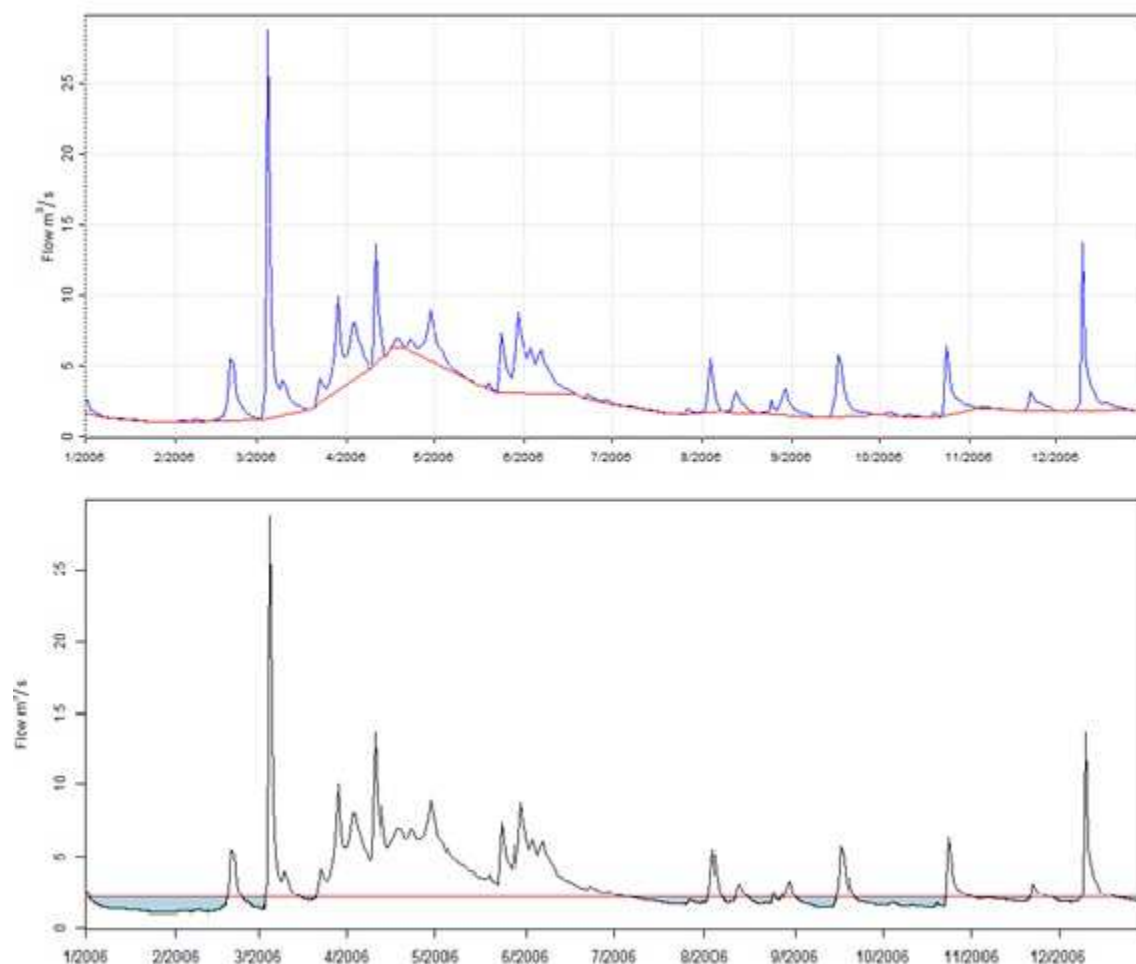
Slika 4: Izris krivulje trajanja za vse podatke o pretokih (a), ločeno na letne čase (b) ter za dve obdobji leta (c)

Preglednica 3 - Korelacijska matrika statistik nizkega pretoka

	MAM₁	MAM₇	MAM₁₀	MAM₃₀	MAM₉₀	Q_{sr}	Q₉₀	Q₉₅	Q₇₀
MAM₁	1	0.933	0.921	0.838	0.65	0.501	0.801	0.862	0.608
MAM₇	0.933	1	0.995	0.92	0.712	0.555	0.871	0.942	0.658
MAM₁₀	0.921	0.995	1	0.942	0.739	0.589	0.895	0.956	0.692
MAM₃₀	0.838	0.92	0.942	1	0.818	0.645	0.952	0.973	0.778
MAM₉₀	0.65	0.712	0.739	0.818	1	0.6	0.879	0.846	0.816
Q_{sr}	0.501	0.555	0.589	0.645	0.6	1	0.684	0.654	0.767
Q₉₀	0.801	0.871	0.895	0.952	0.879	0.684	1	0.969	0.862
Q₉₅	0.862	0.942	0.956	0.973	0.846	0.654	0.969	1	0.789
Q₇₀	0.608	0.658	0.692	0.778	0.816	0.767	0.862	0.789	1

Iz hidrograma na sliki 5 (zgoraj) so razvidna relativno velika nihanja v pretoku, ki se lahko ob padavinskih dogodkih poveča tudi za faktor 10 ali več glede na bazni odtok. Kokra je hudourniški vodotok, ki je močno odvisen tudi od hudourniških pritokov, zato se pretok naglo odzove na padavinske dogodke. Na sliki 5 spodaj je prikazan isti hidrogram z zaznanimi obdobji deficita pretoka. Po priporočilu WMO (2009) je bila v raziskavi za določitev deficita uporabljena metoda mejne vrednosti skupaj s postopkom drsečega povprečja (MA) in medčasovnega dogodka (IT). Prvi naj bi bil uporaben tako za vodotoke, ki se na spremembe v členih vodne bilance odzivajo hitreje, kot za tiste, katerih odzivni čas je daljši. Za mejno vrednost je bil izbran pretok Q_{70} .

Za mejni pretok Q_{70} smo izračunali tudi vrednost recesijske konstante C po metodi glavne recesijske krivulje (MRC) in po metodi individualnih recesijskih segmentov (IRS) z upoštevanjem različnih dolžin segmentov upadanja (preglednica 4). Ugotovili smo, da gre v primeru Kokre za najmanjša odstopanja med rezultati obeh metod pri upoštevanju dolžine segmentov 6 dni, zato smo to dolžino uporabili tudi v nadaljnjih analizah. Največje odstopanje pa kaže dolžina segmentov 4 dni (Petek, 2014).

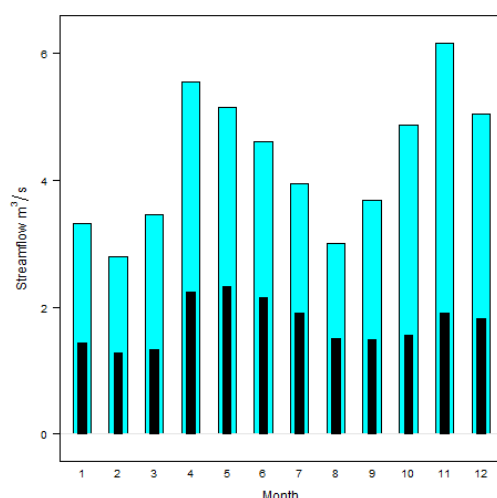


Slika 5: Primer hidrograma z baznim odtokom (a) in hidrograma z zaznanimi obdobji deficita pretoka (b) za leto 2006

Preglednica 4 - Izračun recesijskih konstant po metodah MRC in IRS za različne dolžine segmentov (mejni pretok Q_{70})

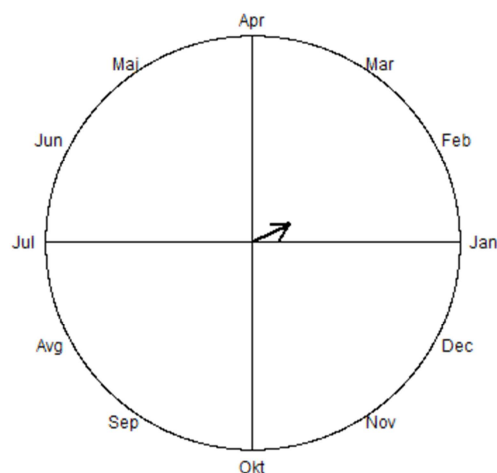
Dolžina segmentov	4	5	6	7
C_{MRC}	12.6	12.3	12.5	13.4
C_{IRS}	17.8	14.4	13.2	14.4

V skladu s prikazanim režimom toka na sliki 6 (funkcija *sbplot*) smo Kokro uvrstili v skupino alpskega sredogorskega snežno-dežnega režima. Zanj je značilno, da sta si zimski in poletni minimum podobna, več vode pa se pojavlja med aprilom in junijem ter v novembru (Hrvatin, 1998), kar smo ugotovili že iz osnovnih statistik. Nižji vodostaji so značilni med julijem in septembrom ter decembrom in marcem, ko so tovrstni vodotoki pod vplivom zimskih minimumov.



Slika 6: Pretočni režim reke Kokre

Zadnji med izračunanimi kazalniki so kazalniki sezonskosti. Sem spada tudi že prej omenjen indeks sezonskosti, ki je grafično prikazan na sliki 7. Puščica uvršča Kokro med vodotoke, ki imajo dan nastopa nizkega dogodka konec januarja, vendar kratka dolžina vektorja r nakazuje na to, da je variabilnost v pojavljanju nizkih pretokov čez leto velika.



Slika 7: Grafični prikaz indeksa sezonskosti

Razmerje sezonskosti predstavlja razmerje med poletnimi in zimskimi pretoki (enačba 1).

$$\frac{Q_{95}(1.4.-30.11.)}{Q_{95}(1.12.-31.3.)} = 1.1896 \quad (1)$$

Izračunana vrednost razmerja sezonskosti za Kokro je večja od 1, kar tako kot prejšnji kazalniki, postavlja Kokro v prevladujoč zimski režim nizkih pretokov. Vrednost Q_{95} je bila izbrana v skladu z literaturo (Laaha in Blöschl, 2006). Vrednost razmerja sezonskosti je pričakovana, saj Kokra spada med vodotoke, katerih pretoki so zaradi zimskih padavin v obliki snega, v hladni polovici leta manjši.

Zaključki

V prispevku smo predstavili najpogostejše uporabljene kazalnike nizkih pretokov, ki se uporabljajo v hidroloških študijah po svetu. Podatke o pretokih za primer vodomerne postaje Kokra I, dostopne na spletni strani Agencije za okolje Republike Slovenije, smo s programskim orodjem R ter paketom *lfstat* analizirali s pomočjo različnih funkcij in rezultate predstavili v obliki kazalnikov nizkega pretoka.

Kokra je relativno majhen vodotok, ki se hitro odziva na padavine in je pod vplivom hudourniških pritokov, zato so vrednosti osnovnih statistik, kot so MAM_1 , MAM_7 , Q_{SR} , Q_{70} , Q_{90} in Q_{95} , nizke. Njihove vrednosti se v manjšem obsegu spreminjajo med leti ter tudi povprečno med meseci. Pri ugotavljanju povezav med kazalniki je bila najvišja stopnja korelacije ugotovljena med srednjimi letnimi minimumi (MAM). Relativno visoka vrednost indeksa baznega odtoka BFI kaže, da je Kokra vodotok, ki ima kljub majhni vodnatosti zmožnost vzdrževanja pretoka zaradi opaznega prispevka podzemnih virov. V prispevku so prikazane tudi spremembe režima pretoka med letnimi časi, ki imajo za posledico različne oblike krivulje trajanja. Za izračun deficita vodnega toka smo primerjali dve metodi in sicer metodo drsečega povprečja (MA) in metodo medčasovnega dogodka (IT) ter njun vpliv na končni izračun. Ugotovili smo, da gre v primeru Kokre za najmanjša odstopanja med rezultati obeh metod pri upoštevanju dolžine segmentov 6 dni, največje odstopanje pa kaže dolžina segmentov 4 dni. V nadaljevanju je bil ugotovljen zimski režim nizkih pretokov z razmerjem med zimskimi in poletnimi pretoki večjim od 1 in nastopom dneva nizkega pretoka v januarju.

Kot orodje za obdelavo podatkov na področju analize nizkih pretokov in iskanje povezav med kazalniki se je kot zadovoljiv izkazal program R in nizkim pretokom namenjen paket *lfstat*. Ta ima sicer nekaj manjših pomanjkljivosti, predvsem pri personalizaciji grafičnih prikazov in pisanju rezultatov v zankah, kjer se v hitrosti ne izkaže najbolje. Kljub temu pa lahko ugotovimo, da orodje nudi odličen pripomoček za kompleksne izračune na dolгих nizkih podatkov.

Literatura

- ARSO (2014). Arhiv površinskih voda. Agencija Republike Slovenije za okolje. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (Pridobljeno 6. 6. 2014.)
- Beran, M., Rodier, J.A. (1985). Hydrological aspects of drought: a contribution to the International Hydrological Programme. Paris, Unesco.

- Burn, D.H. (1997). Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures, *Journal of Hydrology* 202, 212–230.
- Feyen, L., Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe, *Journal of Geophysical research*, 114, p. 1-17.
- Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., and Demuth, S. (2006). A global evaluation of streamflow drought characteristics, *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 535–552. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/535/2006/hess-10-535-2006.pdf> (24.10.2014)
- Globevnik, L. (ur.). (1998). Načrt urejanja povodja, vodnogospodarsko načrtovanje v okvirih približevanja Evropski uniji: načrt urejanja povodja Kokre, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, 103 str.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M. (2000). Drought Event Definition. V: Hisdal, H. (ur.), Tallaksen, L.M. (ur.). Technical Report to the ARIDE project No. 6. University of Oslo, Department of Geophysics, 41 str.
- Hrvatini, M. (1998). Pretočni režimi v Sloveniji, *Geografski zbornik* 38, 59-87.
- Kobold, M., Brilly, M. (1994). Low flow discharge analysis in Slovenia. FRIEND '97 – Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource, 119-131.
- Kobold, M., Sušnik, M. (2003). Hidrološke razmere površinskih voda opazovanih slovenskih rek v letu 2003. Mišičev vodarski dan, 2003: 1-9.
- Koffler, D. in Laaha, G. (2014). Package '*lfstat*', Calculation of Low Flow Statistics for daily stream flow data, 37 str. <http://cran.r-project.org/web/packages/lfstat/lfstat.pdf> (Pridobljeno 22. 10. 2014)
- Kovačič, T. (2012). Analiza vpliva lastnosti porečja na indeks baznega odtoka. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 105 str.
- Laaha, G., Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows, *Hydrological Processes* 18, 3851–3878.
- Petek, M. (2014). Analiza nizkih pretokov vodotokov v Sloveniji. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 68 str.
- R-project, (2014). R software, version 3.0.2, <http://www.r-project.org/> (Pridobljeno 20. 2. 2014.)
- Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. 240, 3–4: 147–186.
- Srebrnič, T. (2005). Časovna razporeditev padavin in pretokov v Sloveniji z analizo sezonskosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 137 str.
- Tallaksen, L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis, *Journal of Hydrology* 165, 349–370.
- Tallaksen, L.M. (1998). Analysis of time variability in recessions, FRIENDS in Hydrology IAHS Publication, 187, p.85-96
- WMO (2009). Manual of Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No. 50. (WMO-No. 1029). Ženeva, 136 str.

Morfometrične analize vršajev planeta Marsa – za uporabo na Zemlji

Tomaž Podobnikar*, Balázs Székely**

Povzetek

Predstavljena je uporaba geomorfometričnih analiz (pri uporabi digitalnega modela reliefa – DMR) planeta Marsa. Osredotočili smo se na odkrivanje vršajev. Razvili smo metodi progresivno Boolovo prekrivanje in ISOcluster, in sicer v smislu posebne geomorfometrije, torej izključno za čim natančnejše odkrivanje vršajev na tem notranjem kamnitem planetu. Raziskava predstavi inovativne sekundarne topografske attribute, ki smo jih uporabili pri analizi, in sicer indeks večsmerne vidnosti (MVI) in relief zgoraj (RA), ki sta se izkazali kot zelo pomembni pri iskanju vršajev. Nalogo smo izvajali na relativno neakovostnem DMR-ju ločljivosti 50 m, ki je bil izdelan iz posnetkov kamere HRSC na satelitu Mars Express istoimenske misije Evropske vesoljske agencije (ESA). Predstavljena metodologija ima ob nadaljnji dodelavi velik potencial za terestrične aplikacije, kot so ugotavljanje območij potencialno nevarnih vršajev, ki ogrožajo antropogeno krajino v gorskem svetu.

Ključne besede: zaznavanje vršajev, topografski atribut, klasifikacija površja, indeks večsmerne vidnosti, geomorfometrija, progresivno Boolovo prekrivanje slojev, digitalni model reliefa, Mars Express

Key words: talus slopes detection, topographic attribute, surface classification, multidirectional visibility index, geomorphometry, progressive Boolean overlay, digital terrain model, Mars Express

Uvod

Zemeljsko površje lahko po eni strani nazorno ponazorimo s fotografijo, skico, karto, po drugi strani pa z besedilom, ali numeričnimi podatki, ki so lahko nadalje strukturirani v tabele. Poenostavljeno, oba pristopa – prostorsko grafično ponazoritev in opis lahko združimo v učinkovit geografski informacijski sistem (GIS), v katerem lahko informacije o zemeljskem površju 'preberemo' kar iz geokodiranih podatkov. Digitalni model reliefa (DMR) razumemo kot digitalni geokodiran zapis oblikovanosti zemeljskega površja. Nepretrgana in pogosto gladka ploskev vključuje nadmorske višine. Nadmorske višine digitalnega modela reliefa so lahko kot druge informacije GIS zapisane v mrežo pravilnih kvadratastih celic, ki pogojujejo prostorsko ločljivost, podobno kot zapis digitalnih fotografij. Pogosto površje prikazujemo manj natančno, in sicer kar skupaj z ovojnico površja vegetacije, npr. gozda, travnika ali pa ovojnico grajenega okolja, npr. stavb v mestu ali pa mostov. Tak model imenujemo digitalni model površja (DMP) (Kraus in Pfeifer, 1998; Podobnikar, 2009).

Eden pomembnejših načinov povečanja uporabe DMR-ja so prostorske analize v GIS-ih. Z njimi se povezujejo geomorfološke analize, pri čemer si lahko pomagamo s kvalitativnimi in kvantitativnimi metodami, med slednje spada geomorfometrija.

* Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

** Oddelek za geofiziko in vesoljske znanosti, Univerza Eötvös, Pázmány P. sétány 1/C, H-1117 Budimpešta, Madžarska

Geomorfologija je veda, ki preučuje izoblikovanost zemeljskega površja in njeno področje je geomorfometrija, ki obravnava izoblikovanost površja iz kvantitativnega vidika, s čimer meri geomorfološke pojave (MacMillan in Shary, 2009). Evans (1972) je razdelil geomorfometrijo na splošno, ki zvezno obravnava Zemljino površje, in posebno, ki obravnava diskretne površinske strukture. Čeprav je bilo veliko geomorfometričnih metod razvitih že pred stoletji, se je geomorfometrija kot veja znanosti začela razvijati šele s praktično izvedbo DMR-ja (Miller in Laflamme, 1958).

Z analizo fizičnega površja lahko pri izključni uporabi DMR-ja (ali lidarskega oblaka točk) nadalje sklepamo na lastnosti in pojave, ki nimajo neposredne zveze s površjem. Sklepamo lahko npr. na izbrane lastnosti geološke sestave, geofizikalnih procesov in še na marsikatero naravno (in na Zemlji tudi družbeno-ekonomske) značilnosti. To dejstvo še posebej pripomore pri preučevanju planetov, lun (naravnih satelitov) ali asteroidov, ki jih zaenkrat dejansko ne moremo preučevati in situ, ampak le z metodami daljinskega zaznavanja.

Raziskovalci se danes ukvarjajo z razvojem metod za obdelavo viskoločljivostnih lidarskih podatkov, ki neposredno uporabljajo oblak zajetih točk (in ne DMR), prav tako tudi z metodami za regionalne in globalne DMR-je slabše ločljivosti in kakovosti ipd. (glej npr. Podobnikar, 2005, Podobnikar in Vrečko, 2012).

Osnove (geo) morfometričnih analiz

Pri geomorfometričnih analizah so pomembni naslednji elementi za pridobivanje implicitnih informacij o reliefu:

1. osnovni topografski atributi
2. sekundarni topografski atributi
3. metode klasifikacij površja
4. metode večkriterijskih odločitvenih modelov
5. metode geovizualizacij in vizualne analitike

Ad 1) Med osnovne topografske attribute štejemo naklon, ekspozicijo, ukrivljenost in še nekaj drugih. Skupna značilnost je, da jih izračunamo neposredno iz DMR-ja (Wilson in Gallant, 2000) po relativno enostavnih matematičnih enačbah.

Ad 2) Med sekundarne topografske attribute štejemo razne indekse, ki temeljijo na opisu variabilnosti fizičnega reliefa ali z reliefom povezanih procesov v okolju. Indeksi so izračunani empirično (Wilson in Gallant, 2000). Pogosto gre za različno zapletene algoritme. Njihovo poimenovanje je precej abstraktno, npr. topografski indeks vlažnosti, indeks večsmerne vidnosti (Podobnikar, 2012b).

Ad 3) V primeru klasifikacij površja gre za veliko število možnosti klasifikacij (npr. po načelih splošne in posebne geomorfometrije, pri uporabi različnih metod, po različnih kriterijih) reliefa pri uporabi DMR. Metode slonijo na uporabi topografskih atributov, ki igrajo vlogo različnih spremenljivk pri prostorskih analizah. Metode največkrat ločimo po načelih splošne in posebne geomorfometrije (Evans, 1972). Razvitih je veliko število metod za klasifikacijo celotnega površja ali identifikacijo in opis izbranih značilnosti površja na podlagi analiz oblik, tekstur, v več merilih, na podlagi analiz topografskih atributov relief, ipd. (Podobnikar, 2012a).

Ad 4) Metode večkriterijskih odločitvenih prostorskih modelov se nanašajo na kompleksne modele pri uporabi prostorskih analiz (Malczewski, 2006), kjer je npr. rezultat model vršajev.

Ad 5) Metode geovizualizacij lahko uspešno dopolnjujejo kvantitativne geomorfometrične metode. Vizualna analitika je znanost analitičnega sklepanja, ki uporablja vizualne interaktivne vmesnike. Vizualno analitiko lahko uporabljamo za vizualno prepoznavanje oblik reliefa. Mednje spada generična metoda indeksa večsmerne vidnosti (Podobnikar 2012b), ki je nepogrešljiva za izboljšavo in analizo DMR planeta Marsa, kamor se človek – za sedaj – še ni odpravil na terenske raziskave (Podobnikar in Székely, 2015).

Nadalje je možna uporaba različnih pristopov pri geomorfometričnih analizah glede na (glej npr. Podobnikar, 2005; Podobnikar 2009):

- konceptualni model DMR-ja, abstrakcijo, generalizacijo
- uporabo DMR-ja ali DMP-ja (digitalni model ploskve)
- strukturo DMR-ja – celična mreža, TIN, hibridna struktura oblak točk ipd.
- različno interpretacijo DMR-ja – žični model, celična mreža; uporabljene funkcije za opis DMR-ja oz. interpolacijske metode
- ločljivost in merilo podatkov, obseg območja
- kakovost DMR-ja (izjemno obširno področje), kakovost modela, ki opisuje DMR
- zgodovinski, sedanji ali predikcijo prihodnjega DMR
- aplikacijo oz. uporabo DMR-ja za splošne ali za različne posebne namene
- definicijo DMR-ja, v splošnem

Projekt Mars Express in podatki DMR-ja

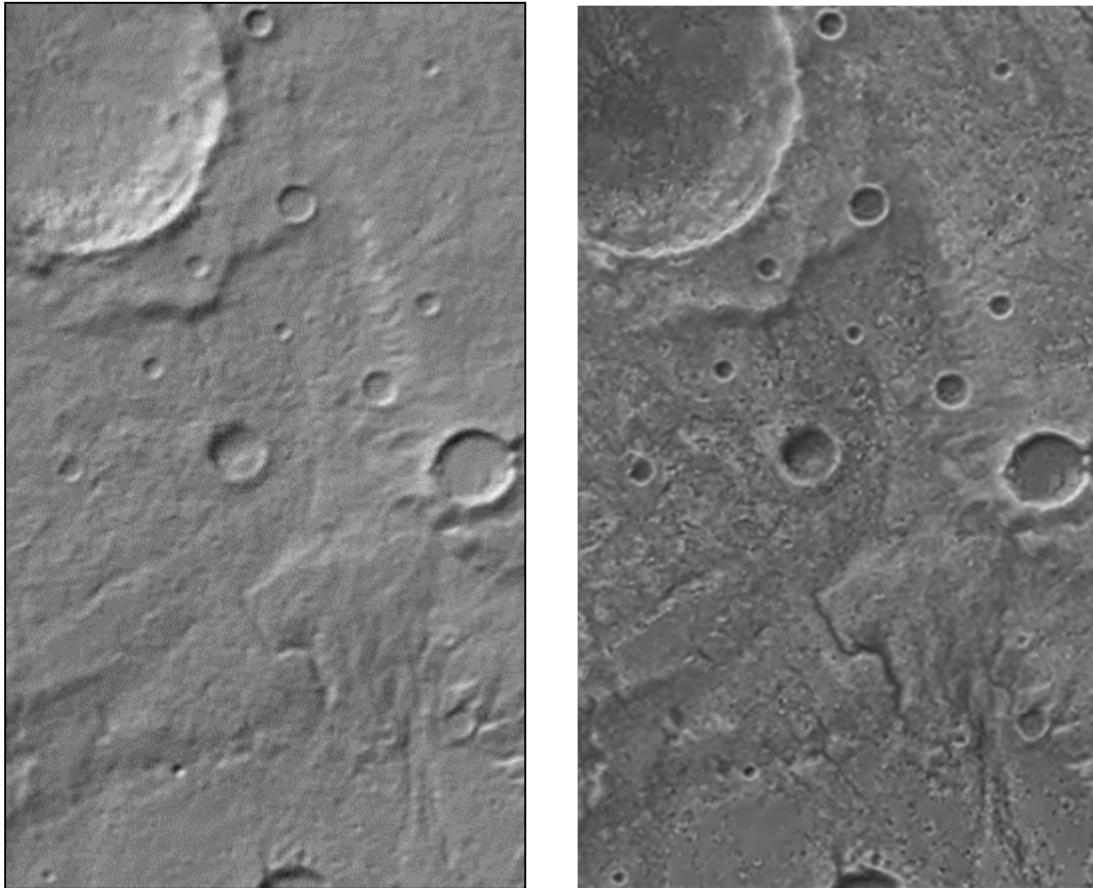
V članku analiziramo izbrane značilnosti, predvsem (areo)morfološke (Mars = Ares), ki jih povezujemo z (geo)morfološkimi (Zemlja = Gea). Misija oz. odprava Evropske vesoljske agencije (ESA) Mars Express je dobila ime po umetnem satelitu, ki so ga izstrelili z Zemlje 2. 6. 2003. Satelit je v orbiti Marsa od 25. 12. 2003. Naziv »express« je misija dobila zato, ker je bila cenejša od primerljivih, poleg tega pa je bila njena izvedba relativno hitra. Satelit ima maso 1120 kg in je opremljen z velikim številom instrumentov (Podobnikar in Székely, 2012).

Za izdelavo DMR-ja je najpomembnejši instrument »High Resolution Stereo Camera« (HRSC) (Jaumann et al., 2007). Gre za kamero dimenzij 515 x 300 x 260 mm, mase 20,4 kg, porabe 48,7 W, s 5 pankromatskimi in 4 barvnimi kanali (modri, zeleni, rdeči in NIR) t. i. »full colour«, s poljem vidnosti 11,9°, s senzorjem CDD 9 x 5272 pikslov (stereo kot $\pm 18,9^\circ$), z ločljivostjo 10 m/piksel (maksimalno 2 m), s širino signala 52,2 km (vsi podatki so izračunani glede na orbito 250 km višine). Kamera vsebuje tudi »Super Resolution Channel« (SRC). Izdelali so jo skupaj na DLR, FU Berlin in ESA. Gre torej za projekt Evropske vesoljske agencije s 43 raziskovalnimi skupinami iz 10 držav (brez Slovenije).

Izdelan je bil DMR s prostorsko ločljivostjo 50 m in natančnostjo okoli 10 m (Heipke et al., 2007), ki je bil dodatno izboljševan (predvsem zaradi napak slikovnega ujemanja na geomorfološko neizraziti pokrajini, slabih kontrastov na večjih osvetljenih ali osenčenih površinah, ujemanja pasov in interpolacije ter s tem pojavljanja grobih napak, Slika 1). Problem je tudi različna ločljivost originalnih posnetkov, kar je posledica izrazito eliptične orbite satelita Mars Express. DMR je izdelan na osnovi stereoparov ter slikovnega ujemanja.

Pri vizualni interpretaciji DMR-ja je uporaben indeks večsmerne vidnosti, kot napredna generična metoda analitičnega senčenja reliefa, ki izpolnjuje osnovna topografska načela v kartografiji, poleg tega je uporabna za generalizacijo DMR-ja, klasifikacijo

geomorfoloških oblik in odkrivanja značilnosti ter za izboljšavo fotografij (Podobnikar, 2012b; Slika 1).



Slika 1 – Primerjava klasičnega analitičnega senčenja (levo), ter senčenja z indeksom večsmerne vidnosti (MVI; multidirectional visibility index). Uporabljen je DMR HRSC, ESA, Mars Express s prostorsko ločljivostjo 50 m. Prikazano je območje »Thaumasia mountain range«. Na modelu z indeksom večsmerne vidnosti je zaznati precej več geomorfoloških detajlov kot na klasičnem modelu.

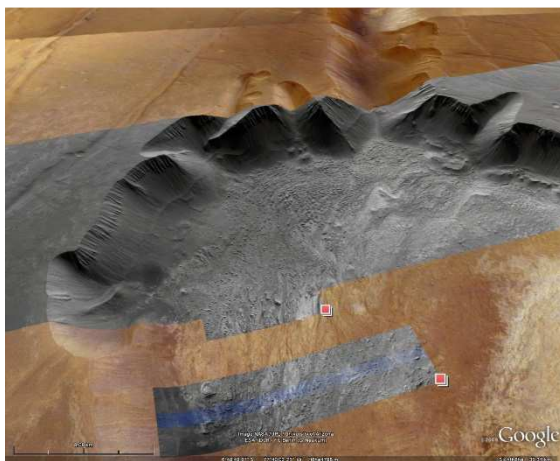
Metodologija geomorfometričnega iskanja vršajev Marsa

Nestabilna pobočja dolin so pogosto pokrita z vršaji (z grušči ali s podžlebnimi melišči). Na Zemlji so vršaji značilnost gorskih območij (Podobnikar in Székely, 2015; Slika 2). Geomorfološka oblika različnih tipov vršajev je določena z materialom, ki ga sestavlja. Pri tem gre pogosto gre za slabo razvrščen material. Oblika vršajev na Marsu je pogojena glede na Zemlji različne okoljske pogoje: manjša gravitacija (pribl. 38 % zemeljske), danes pomanjkanje fluvialne erozije, več prostega materiala (pogosto vetrnih nanosov), in značilna velika območja pobočij – kar pomeni, da so vršaji pomembne morfološke značilnosti na Marsu. Na Zemlji so vršaji ponekod porasli in zato lahko nekoliko bolj strmi in s tem metastabilni.

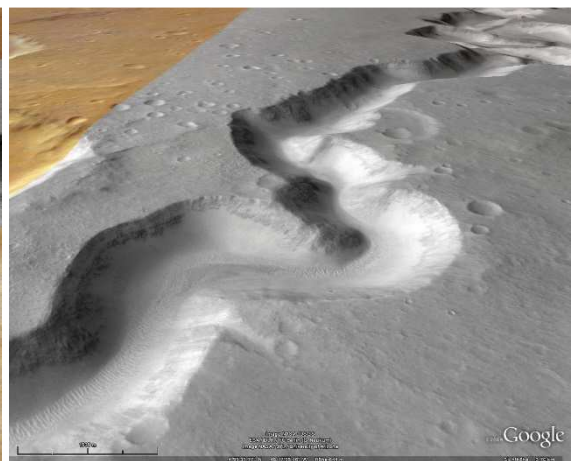


Slika 2 – Primer večjega aluvijalnega vršaja in več melišč z reko Hunzo pri kraju Passu, Pakistan (Foto: T. Podobnikar)

Cilj tega prispevka je predstaviti robustni metodi za odkrivanje in ločevanje vršajev na Marsu glede na druga pobočja naravnega okolja, ki jih ne štejemo med vršaje po načelih posebne geomorfometrije, saj razpoznavamo točno določene reliefne oblike (MacMillan in Shary, 2009; Obu in Podobnikar, 2013). Pri tem smo uporabili DMR Marsa za izbrani testni območji Nanedi Valles in Candor Chasma (Slika 3). Dodaten cilj tega prispevka je tudi razvoj metod sekundarnih topografskih atributov.



a)



b)

Slika 3 – Testni območji za identifikacijo vršajev: (a) Candor Chasma (6° J, 77° Z), (b) Nanedi Valles (7° S, 48° Z). Območja potencialnih vršajev so vidna kot gladke površine na pobočjih.

Algoritem odkrivanja vršajev je v grobem naslednji (Podobnikar in Székely, 2015):

- vizualna interpretacija površja z metodo indeksa večsmerne vidnosti (MVI; multidirectional visibility index)
- izdelava topografskih atributov (spremenljivk), kot so indeks večsmerne vidnosti (MVI) (Podobnikar, 2012b), relief zgoraj (RA; relief above) (Podobnikar in Székely, 2015) in standardni odklon naklona reliefa (Székely et al., 2002)
- analiza neodvisnosti in značilnosti spremenljivk
- izračun spremenljivk
- klasifikacija spremenljivk v binarne vrednosti
- klasifikacija površja z uporabo metod posebne geomorfometrije: progresivno Boolovo prekrivanje in ISOcluster
- stalna kontrola kakovosti in analize občutljivosti

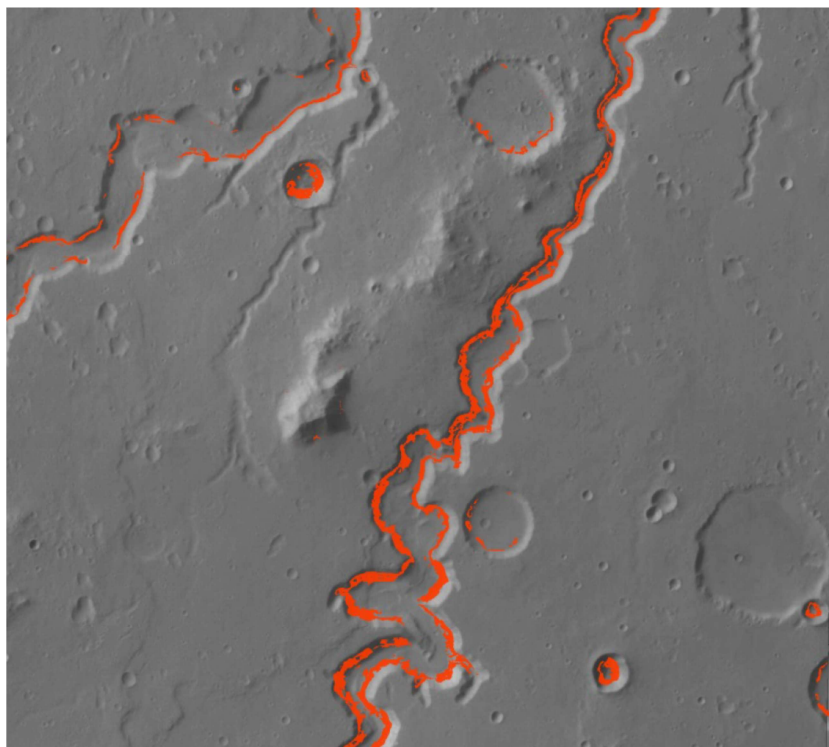
Posebej navajamo inovativne sekundarne topografske attribute, podrobnejši opis je v Podobnikar in Székely (2015):

- relief zgoraj (RA)
- kvazi naklon (QS_{θ}), pri uporabi MVI (kvazi zato, ker je rezultat podoben naklonu reliefa)
- MVI za kvazi naklon (MVI-QS)
- MVI za relativni relief (MVI-RR)
- spodnji pogled L_{θ} , pri uporabi MVI
- standardni odklon naklona reliefa

Razvili ali nadgradili smo metodi progresivno Boolovo prekrivanje (kot del algebre karte; Tomlin, 1990) in ISOcluster (Ball and Hall, 1965). Podrobnejši opis obeh metod je v Podobnikar in Székely (2015) v smislu posebne geomorfometrije za klasifikacijo površja, tu pa so podani osnovni parametri:

- Progresivno Boolovo prekrivanje uporablja spremenljivke z binarnimi vrednostmi za odkrivanje vzorcev v prostoru. Analiza značilnosti in neodvisnosti spremenljivk se je izkazala za koristno pri določanju in optimiziranju strategije pri analizi. Progresivna (korak za korakom) analiza se prične z grobo oceno (začetni približek) in nadaljuje z vedno bolj finimi, a načeloma manj pomembnimi spremenljivkami, ki izboljšujejo kakovost analize (Podobnikar, 2005), vse dokler spremembe niso v okviru določenega praga, ki ga sami postavimo.
- ISOcluster je standardna nenadzorovana klasifikacija površja, pri čemer nas zanimajo taki parametri klasifikacije pri uporabi takih spremenljivk, ki omogočajo karseda potencialno optimalno odkrivanje območij vršajev (Székely, 2001).

Rezultati izračunov na Sliki 4 dokazujejo, da so spremenljivke ključnega pomena za zanesljivo analizo, hkrati se rezultati dobro skladajo s predhodnimi terestričnimi analizami (Podobnikar in Székely, 2008). Nadalje rezultati kažejo na podobne lastnosti površja tako pri uporabi metode ISOcluster kot tudi za tehniko progresivnega Boolovega prekrivanja. Glede na oddaljenost Marsa, smo uporabili številne prilagojene tehnike za kontrolo kakovosti, kot je npr. vizualna ocena z že omenjeno metodo MVI.



Slika 4 – Rezultat iskanja vršajev za območje Nanedi Valles

Aplikacija metodologije na zemeljsko površje

Metodološko je pomembna zmožnost primerjave značilnosti površja, ki jih poznamo na Zemlji, s tistimi, ki jih preučujemo na izbranem planetu. Ne glede na to, da so fizične oz. geomorfološke lastnosti planetov različne zaradi različnih procesov pri njihovem razvoju, lahko v praksi najdemo veliko relativno podobnih značilnosti, ki pa se zagotovo razlikujejo v nekaterih podrobnostih. morfološke in še posebej morfometrične analize planetov so torej raziskovalni izziv. Primer je preučevanje izbranih lastnosti Zemlje, s čimer bolje razumemo procese na posameznem planetu in obratno: razumevanje določenih značilnosti planetov lahko pomaga pri preučevanju pojavov na Zemlji (Podobnikar in Székely, 2008; Székely in Podobnikar, 2008).

V gorskem svetu so antropogene strukture in objekti ranljivi zaradi izjemnih geoloških, geomorfoloških, hidroloških ali vremenskih pojavov (Sodnik et al., 2013). Pri modeliranju možnih scenarijev naravnih nesreč potrebujemo poleg podatkov o ranljivih antropogenih strukturah tudi prostorske topografske podatke. DMR-ji na osnovi aero-laserskega skeniranja (ALS) so potencialno pomembni za pridobivanje natančnih in podrobnih podatkov o premikih gmot, eroziji in podobnih pojavih, z visoko natančnostjo. Metode samodejnega procesiranja podatkov ALS omogočajo pridobivanje različne produkte, na primer o topografiji, višini gozda, obliki stavb, daljnovodih. Pridobljeni prostorski podatki so lahko modelirani skupaj z informacijami za oceno potencialne škode na osnovi določenega tipa nesreče v funkcionalnem postopku objektnega modeliranja (Podobnikar et al. 2010).

Sklep

V raziskavi smo se osredotočili na izbrane morfološke značilnosti planeta Marsa, in sicer na vršaje ter jih ob koncu v analitičnem smislu opredelili s tistimi na Zemlji. Uporabili smo sloj DMR-ja, izdelanega na osnovi satelitskih posnetkov kamere HRSC projekta Mars Express.

Predstavili smo dve uspešno aplicirani metodi za odkrivanje vršajev, kot metodi posebne geomorfometrije za klasifikacijo površja, in sicer progresivno Boolovo prekrivanje ter ISOcluster. Progresivno Boolovo prekrivanje se nanaša na relativno kompleksno modeliranje, pri katerem posamezne spremenljivke uporabimo za postopno empirično izgradnjo modela, kar je posebej pomembno za natančnejšo analizo oddaljenega planeta Marsa, pri uporabi relativno nekovostnega DMR-ja.

Zelo pomembna tema raziskave je bila predstavitev sekundarnih topografskih atributov, ki smo jih uporabili pri analizi. Pri tem gre izpostaviti indeks večsmerne vidnosti (MVI) in relief zgoraj (RA), ki sta se izkazala kot zelo pomembna za izdelavo spremenljivk modela. Predstavljena metodologija je bila izdelana in dodelana na podlagi raziskav tako na Zemlji (Slovenija, Avstrija) kot tudi na več območjih Marsa in ima ob nadaljnji dodelavi velik potencial za nadaljnjo aplikacijo pri ugotavljanju območij potencialno nevarnih vršajev, ki ogrožajo antropogeno krajino v gorskem svetu Alp.

Zahvala: Raziskovalno nalogo je omogočila Avstrijska agencija za promocijo znanosti (FFG) v sestavu Programa avstrijskih vesoljskih aplikacij (ALR-OEWP-CO-413/07) in njihovih raziskovalnih projektov TMIS, TMIS+ in TMIS-morph (TMIS = Topographic Mars Information System) v okviru programa ASAP pod vodstvom prof. J. Janse, Raziskovalne skupine za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, Tehniška univerza na Dunaju. Podatke smo pridobili ob pomoči dr. G. Neukuma (Berlin) in ekipe Mars Express. Zaključni del raziskave je bil izdelan ob podpori prof. M. Mikoša ter programa Vodarstvo in geotehnika (P2-0180) Javne agencije za raziskovalno dejavnost (ARRS).

Literatura

- Ball, G.H., Hall, D.J. (1965). Isodata: a method of data analysis and pattern classification. Stanford Research Institute, Menlo Park. Office of Naval Research. Information Sciences Branch.
- Evans, I. S. (1972). General Geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. V R. V. Chorley (ur.), Spatial Analysis in Geomorphology. London: British Geomorphological Research Group.
- Heipke, C., Oberst, J., Albrecht, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J. R., Kirk, R. L., Mayer, H., Müller, J.-P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählisch, M., Neukum, G. in HRSC Co-Investigator Team (2007). Evaluating planetary digital terrain models — The HRSC DTM test. *Planetary and Space Science* 55, 2173–2191.
- Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Flohrer, J., van Gasselt, S., Giese, B., Gwinner, K., Hauber, E., Hoffmann, H., Köhler, U., Matz, K.-D., Mertens, V., Pischel, R., Roatsch, T., Reiss, D., Scholten, F., Stephan, K., Oberst, J., Saiger, P., Schwarz, G., Wählisch, M. (2007). The High Resolution Stereo Camera (HRSC) experiment on Mars Express: instrument aspects from interplanetary cruise through nominal mission. *Planetary and Space Science*, 55, 928–952.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998) Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 193–203.

- MacMillan, R. A., Shary, P. A. (2009). Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. V T. Hengl, H. I. Reuter (ur.) Geomorphometry - Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature, *IJGIS*, 20, 703–726.
- Miller, C. L. Laflamme, R. A. (1958). The Digital Terrain Model-Theory & Application. MIT Photogrammetry Laboratory.
- Obu, J., Podobnikar, T. (2013). Algorithm for karst depression recognition using digital terrain models. *Geod. vestn.*, 57, 260–270.
- Podobnikar, T. (2005). Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. *International journal of geographical information science*, 19(1), 69–89.
- Podobnikar, T. (2009). Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *S.A.P.I.E.N.S. Special Issue 2*, 15–24.
- Podobnikar, T. (2012a). Detecting Mountain Peaks and Delineating Their Shapes Using Digital Elevation Models, Remote Sensing and Geographic Information Systems Using Autometric Methodological Procedures. *Remote Sens.* 4, 784–809.
- Podobnikar, T. (2012b). Multidirectional Visibility Index for Analytical Shading Enhancement. *The Cartogr. J.*, 49, 195–207.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2008). Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: Perko, D., Zorn, M., Razpotnik Visković, N., Čeh, M., Hladnik, D., Krevs, M., Podobnikar, T., Repe, B., Šumrada, R. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, (GIS v Sloveniji, 9)*. Ljubljana: Založba ZRC, 73–81.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2012). Geomorfometrične analize Marsa pri uporabi DMR-ja. 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 19–29.
- Podobnikar, T., Székely, B. (2015). Towards the automated geomorphometric extraction of talus slopes in Martian landscapes. *Planet. Space Sci.*, 105, 148–158.
- Podobnikar, T., Székely, B., Hollaus, M., Roncat, A., Dorninger, P., Briese, C., Melzer, T., Pathe, C., Höfle, B., Pfeifer, N. (2010). Vsestranska uporaba aero-laserskega skeniranja za ugotavljanje nevarnosti zaradi naravnih nesreč na območju Alp", *Naravne nesreče v Sloveniji*, Založba ZRC, 125–137.
- Podobnikar, T., Vrečko, A. (2012). Digital Elevation Model from the Best Results of Different Filtering of a Lidar Point Cloud. *Trans. GIS*, 16, 603–617.
- Sodnik, J., Podobnikar, T., Petje, U., Mikoš, M. (2013). Topographic data and numerical debris-flow modeling, in: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), *Landslide Science and Practice. Vol. 1, Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*. Berlin, Heidelberg: Springer, 573–578.
- Székely, B. (2001). On the surface of the Eastern Alps – a DEM study. *Tübinger Geowiss. Arb.*, 60, 1–124.
- Székely, B., Reinecker, J., Dunkl, I., Frisch, W., Kuhlemann, J. (2002). Neotectonic movements and their geomorphic response as reflected in surface parameters and stress patterns in the Eastern Alps. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 149–166.
- Székely, B., Podobnikar, T. (2008). An attempt for automatic detection and visualization of talus cones from digital elevation data. V: Konečný, M., Bandrova, T. (ur.), *Second International Conference on Cartography & GIS, Proceedings 2*, Borovec, Bolgarija, 151–159.
- Tomlin, C.D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 249 p.
- Wilson, J., Gallant, J. (2000). *Digital Terrain Analysis; Terrain Analysis: Principles and Applications*, V: Wilson, J., Gallant, J. (ur.), Wiley, Chapter 1.

Snežni plazovi in preventiva v Srednjih Karavankah

Manca Volk Bahun*, Matija Zorn*, Jaka Ortar*, Miha Pavšek*

Povzetek

V prispevku predstavljamo nekaj rezultatov avstrijsko-slovenskega projekta Naravne nesreče brez meja (2011–2014), v okviru katerega smo pripravili več občinskih zemljevidov lavinske nevarnosti na območju Srednjih Karavankah, redno je izhajal lavinski bilten za to območje, organizirali pa smo tudi več tečajev s področja lavinske preventive.

Ključne besede: geografija naravnih nesreč, snežni plazovi, lavinska nevarnost, lavinski bilten, Karavanke

Key words: geography of natural hazards, avalanches, avalanche hazard, avalanche bulletin, Karavanks

Uvod

Snežni plazovi (Pavšek, 2002) so naravni pojav, ko se na pobočjih del snežne gmote loči od celote in zdrsne navzdol. Njihovo napovedovanje je zahtevno zaradi prostorske in časovne spremenljivosti pojava, posledice ter škoda pa so lahko občasno in krajevno zelo velike. V svetovnem merilu po pomenu ne sodijo med najpomembnejše naravne nesreče niti po žrtvah niti po škodi. Na primer v Švici pomeni ogroženost zaradi snežnih plazov le 2 % skupne ogroženosti. V Sloveniji letno skupaj z zemeljskimi plazovi povzročijo 8 % škode zaradi naravnih nesreč (večina te škode sicer pripada zemeljskim plazovom). Po drugi strani pa so največ smrtnih žrtev med naravnimi nesrečami v Sloveniji po 2. svetovni vojni terjali prav snežni plazovi, v povprečju po 1–2 letno (Pavšek et al., 2013).

V Sloveniji se snežni plazovi pojavljajo na vzpetem delu ozemlja, pogost pojav pa so predvsem v zimah z obilico snega. Omejeni so na strma, neporaščena ali slabo poraščena ter redko poseljena pobočja gorskega in hribovitega sveta. Praviloma se v zimah s povprečnimi snežnimi razmerami prožijo le v visokogorju, ob obilnejših snežnih padavinah pa so pogosti tudi v hribovitem svetu. Tod ogrožajo več gospodarskih poslopij ter posamezne hiše, še posebej pa infrastrukturo, zlasti prometnice (Pavšek et al., 2013).

Večina nesreč s snežnimi plazovi v zadnjih desetletjih se zgodi obiskovalcem gorskega sveta, redkeje pa domačinom, ki so nekdanj prevladovali med žrtvami. Ob veliki lavinski nevarnosti (4. stopnja; enotna evropska lestvica za opredeljevanje nevarnosti proženja snežnih plazov je petstopenjska) se večina snežnih plazov sproži spontano zaradi naravnih vplivov, ob zmerni nevarnosti (2. stopnja) pa predvsem ob dodatni obremenitvi snežne odeje zaradi človeka (na primer hoja, smučanje) (Pavšek et al., 2013).

Da namenjam v Sloveniji snežnim plazovom premalo pozornosti, kljub temu, da so po številu žrtev v samem vrhu, kažeta:

- pogosto zanemarjanje pri načrtovanju prostorskih posegov in rabe prostora (le manjši del bolj ogroženih občin ima na voljo zemljevide lavinske nevarnosti ali pa lavinski kataster);

* Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Geografski inštitut Antona Melika, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana, Slovenija

- skromna kadrovska in finančna podpora trenutno delujoče Službe za sneg in plazove pri Agenciji Republike Slovenije za okolje (Velkavrh, 2005). Omenjeno službo zato težko primerjamo z lavinskimi službami kot jih poznajo v ostalih alpskih državah, kjer so učinkovita podpora dejavnostim, ki se odvijajo v zasneženi pokrajini in ne nazadnje s pomočjo katerih zagotavljajo večjo varnost obiskovalcev na plazovitih območjih v času povečane nevarnosti. Opozarjanje in obveščanje o nevarnosti proženja snežnih plazov kot tudi ažurni prostorski podatki o snežnih plazovih spadajo med temeljne naloge lavinske službe (Pavšek et al., 2010).

V prispevku predstavljamo nekaj rezultatov projekta Naravne nesreče brez meja (2014; NH-WF), financiranega v okviru programa čezmejnega sodelovanja Slovenija–Avstrija med letoma 2011 in 2014, v okviru katerega smo: izdelali zemljevide lavinske nevarnosti za nekaj slovenskih in avstrijskih občin v Srednjih Karavankah, redno izdajali lavinski bilten za to območje, ter organizirali več tečajev varstva pred snežnimi plazovi.

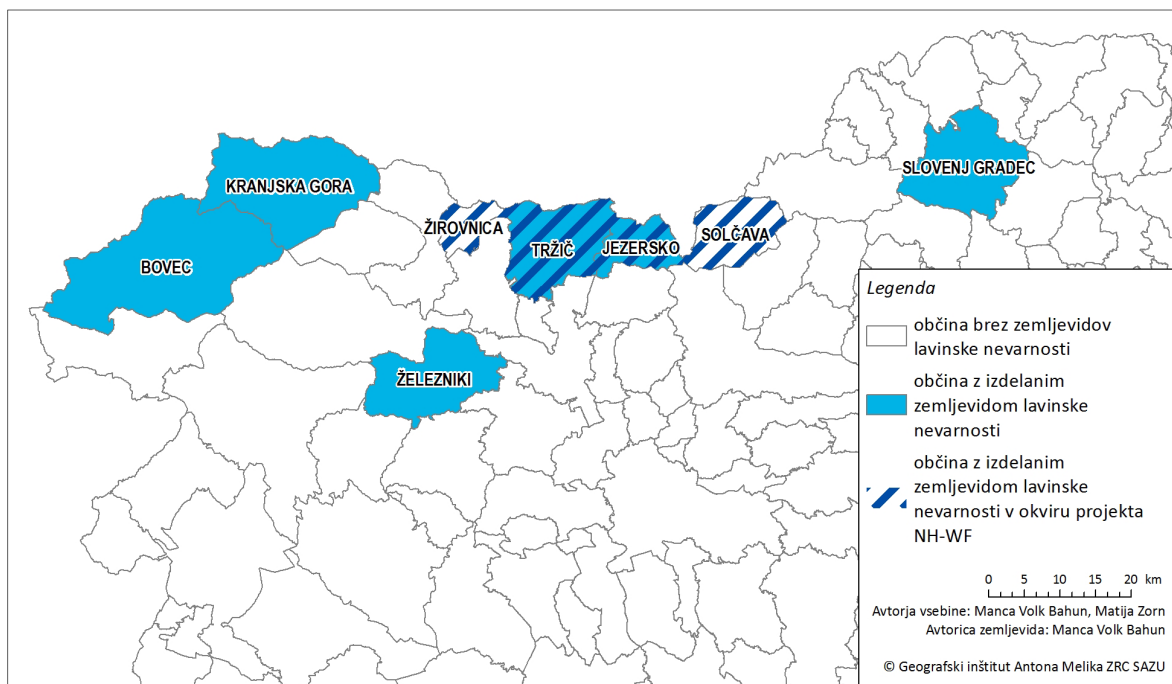
Zemljevidi lavinske nevarnosti

Zemljevidi lavinske nevarnosti ali kateregakoli drugega hidro-geomorfnege procesa so pomembni za preventivno prostorsko načrtovanje. Zemljevidi so toliko boljši, kolikor boljše je naše poznavanje preteklih lavinskih dogodkov in naše razumevanje vpliva različnih naravnogeografskih prvin pokrajine na proženje snežnih plazov (Pavšek et al., 2013).

V Sloveniji so za urejanje prostora in v povezavi s tem tudi za varnost prebivalcev odgovorne občine. Zakon o prostorskem načrtovanju (2007) v 2. odstavku 55. člena predpisuje izdelavo Občinskih podrobnih prostorskih načrtov (OPPN), ki morajo med drugim vsebovati »... *prostorske ureditve lokalnega pomena, zaradi posledic naravnih ali drugih nesreč* ...«. Mednje sodijo tudi zemljevidi lavinske nevarnosti.

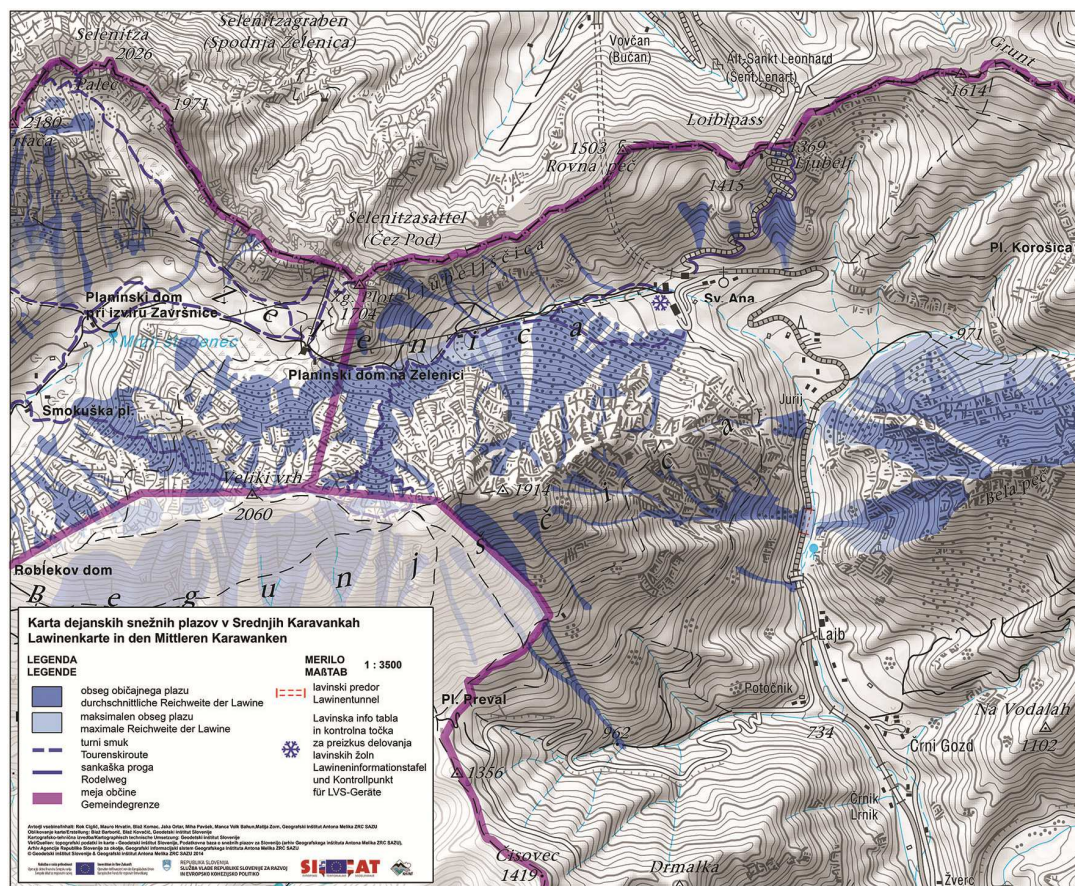
Številne občine v vzpetih pokrajinah Slovenije potrebujejo tovrstne zemljevide, vendar občine same po večini ne zmorejo (morda nočejo) nositi finančnega bremena njihove izdelave. Trenutno ima osem slovenskih občin izdelane zemljevide lavinske nevarnosti (slika 1). Izmed teh sta le dve sami financirali njuno izdelavo (Jezersko (Klabus et al., 2009) in Tržič (Natek et al., 2010)), štiri občine (Bovec, Kranjska Gora, Železniki in Slovenj Gradec) pa so zemljevide dobile v okviru nacionalnega projekta (Izdelava ..., 2011–2012).

V okviru projekta Naravne nesreče brez meja (2014) smo za štiri slovenske in tri avstrijske občine izdelali zemljevide lavinske nevarnosti. Na novo sta zemljevid lavinske nevarnosti dobili občini Žirovnica in Solčava, novejši/posodobljeni zemljevid pa sta dobili občini Jezersko in Tržič. Poleg tega smo zemljevide izdelali še za tri avstrijske občine (Borovlje/Ferlach, Sele/Zell in Železna Kapla-Bela/Eisenkappel-Vellach).



Slika 1: Osem slovenskih občin ima zemljevide lavinske nevarnosti.

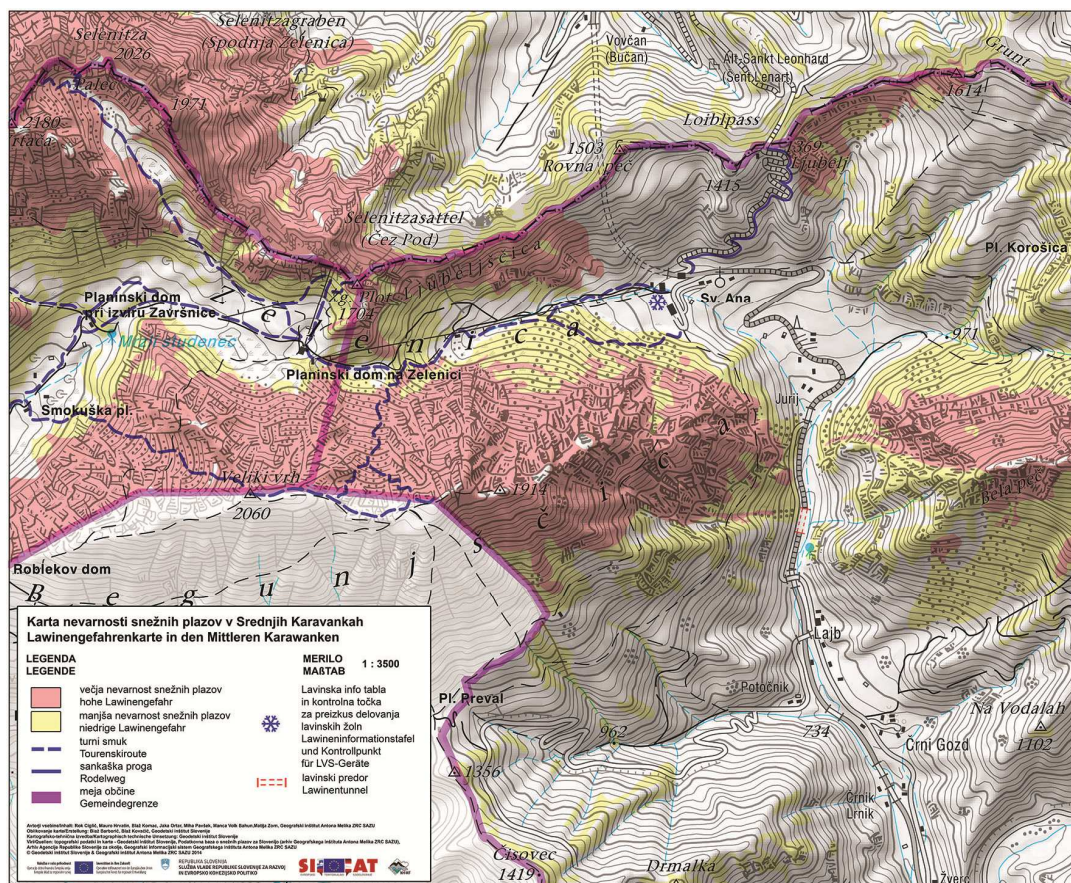
Za obravnavana območja smo skupaj z Geodetskim inštitutom Slovenije izdelali po dva zemljevida: zemljevid dejanskih snežnih plazov (slika 2) z vrisanimi plaznicami poznanih snežnih plazov, ter zemljevid lavinske nevarnosti (slika 3), na katerem so na temelju modela določena območja proženja (deloma pa tudi območja gibanja in odlaganja) snežnih plazov. Prvega smo izdelali s kartiranjem dejanskih plazov, pri čemer smo se deloma uprli na lavinski kataster (Bernot et al., 1994) in druge vire (Volk, 2010a; 2010b). Drugega pa smo izdelali s statistično logaritemsko metodo indeksiranja (Zorn & Komac, 2008; Pavšek et al., 2013), ki temelji na primerjanju zemljevida dejanskih snežnih plazov z različnimi naravnogeografskimi (vplivnimi) dejavniki, ki vplivajo na proženje snežnih plazov. Uporabili smo naslednje vplivne dejavnike: naklon, raba tal, usmerjenost površja, največja višina snega v obdobju 1951–2005, povprečna višina novozapadlega snega in povprečno število dni s snežno odejo.



Slika 2: Izsek iz zemljevida dejanskih snežnih plazov za območje Zelenice in Ljubelja.

Zemljevidi nevarnosti so pomembni za dolgoročno upravljanje s prostorom, na trenutno nevarnost pred snežnimi plazovi pa opozarjajo lavinski bilteni.

Lavinski bilteni so zgoščena obvestila o vremenskih in snežnih razmerah, ki navajajo stopnjo nevarnosti zaradi snežnih plazov na določenem območju. Vsebujejo lahko tudi opis različnih krajevnih dejavnikov, ki vplivajo na povečano nevarnost pojavljanja snežnih plazov. Mnoge države hkrati z lavinskim biltenom objavljajo tudi zemljevide s trenutno stopnjo nevarnosti za proženje snežnih plazov po evropski petstopenjski lestvici (Volk, 2011).



Slika 3: Izsek iz zemljevida lavinske nevarnosti za območje Zelenice in Ljubelja.

Lavinski bilten

Slovenski lavinski bilten v času zimske sezone trikrat tedensko pripravlja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), vendar po kakovosti zaostaja za tistimi, ki jih objavljajo druge alpske države (Eckerstorfer, 2008; Volk, 2011). Da bi izboljšali standarde na tem področju, smo za območje Srednjih Karavank uporabili nov pristop za pripravo lavinskega biltena. Po naši oceni je glavna težava, ki vpliva na kakovost lavinskega biltena ARSO, pomanjkanje terenskih podatkov o vremenu in snegu, kar je deloma tudi posledica redke mreže vremenskih in lavinskih postaj. Lavinske razmere so namreč močno krajevno spremenljive tako, da stopnja nevarnosti v Julijskih Alpah ni enaka stopnji nevarnosti v Karavankah ali Kamniško-Savinjskih Alpah. Natančnejše napovedi za ožja območja so zato izredno pomembne za večjo varnost prebivalcev, obiskovalcev gora ter infrastrukture.

Ocena trenutne lavinske nevarnosti je zahtevna, saj moramo upoštevati številne dejavnike, ki vplivajo na pojavljanje snežnih plazov. Potrebujemo podatke o vremenskih (padavine, veter, temperatura, vlaga, sončno obsevanje) in snežnih razmerah (trdnost in debelina plasti v snežni odeji, prisotnost in lega šibkih plasti, temperatura snega, vlažnost), ter podatke o površju (nadmorska višina, usmerjenost, naklon, raba tal, gostota in višina ter vrsta rastja). Podatke pridobivamo prek avtomatskih vremenskih postaj, pa tudi na terenu. Na podlagi zbranih podatkov ocenimo, katera pobočja so bolj nevarna za proženje snežnih plazov.

Pri izdelovanju lavinskih biltenov je pomembno, da skozi celotno snežno sezono spremljamo razmere (tako vremenske, kot tudi snežne), saj tako lažje razumemo

vsakokratno dogajanje znotraj snežne odeje in posledično bolje napovemo, kakšna je nevarnost proženja snežnih plazov.

V slabših vremenskih razmerah (na primer obilnejše sneženje, megla) je ocena lavinske nevarnosti še posebej zahtevna, saj je vidljivost na terenu zmanjšana in je zato ocena težje opredeljiva. Tudi v takšnih razmerah moramo pri izdelavi lavinskega biltena in oceni nevarnosti odgovoriti na naslednja vprašanja:

- Koliko snega je na potencialnem območju proženja?
- Koliko novega snega lahko še pričakujemo?
- Kakšne so padavinske, vetrovne in temperaturne razmere?
- Ali so razmere varne?

Kljub temu, da so neposredne informacije s terena ključne za pripravo opozoril, je treba razmere pogosto oceniti tudi brez tovrstnih informacij.



Slika 4: Snežni plaz na cesti na Zelenico (fotografija: Manca Volk Bahun).

Pri izdelavi lavinskega biltena je pomembno tudi, da vemo, komu so informacije namenjene. Uporabniki so namreč zelo različni, od strokovnjakov in izkušenih smučarjev/gornikov, do domačinov in turističnih delavcev, torej od takšnih, ki imajo veliko izkušenj s snegom v gorah, do takšnih, ki so povsem brez njih. Prav zato morajo biti informacije takšne, da so razumljive vsem (Burkeljca & Ortar, 2008; Studeregger et al., 2014).

Skupine, ki jim je lavinski bilten po večini namenjen, so (Studeregger et al., 2014):

- pripadniki lavinskih komisij (v Sloveniji jih ni, čeprav smo jih pred desetletji ponekod že imeli, drugod v Alpah pa so ključne pri zagotavljanju varnosti na krajevni ravni),
- turni smučarji in pohodniki,
- smučarji, deskarji, vozniki motornih sani,
- upravljavci žičnic, cest (slika 4) in železnic,
- gorska reševalna služba in policija,
- lokalni prebivalci.

Lavinski bilten za Srednje Karavanke

Za boljše napovedovanje trenutnih lavinskih razmer na območju Srednjih Karavank, smo v okviru projekta Naravne nesreče brez meja (2014) v zimskih sezonah 2012/2013 in 2013/2014 trikrat tedensko pripravljali lavinski bilten (slika 5). Pri opredeljevanju stopnje lavinske nevarnosti smo uporabljali uveljavljeni postopek za izdelavo lavinskih biltenov, stopnjo nevarnosti pa smo ocenili na temelju evropske petstopenjske lestvice.

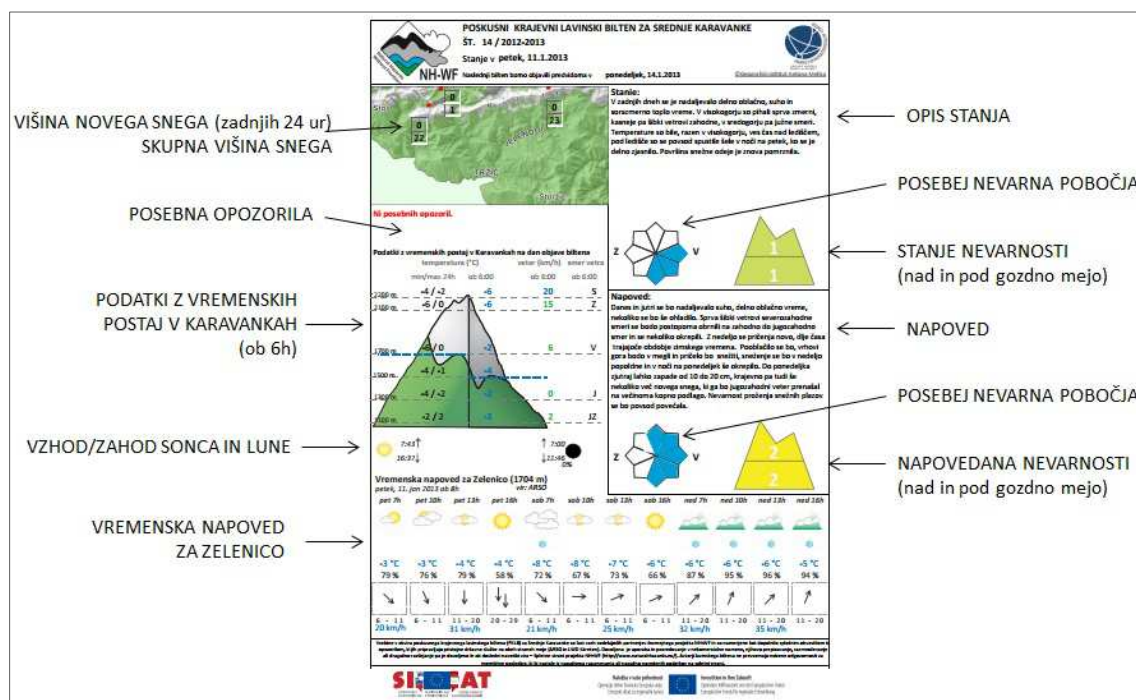
V vsaki od obeh sezon smo na spletišču projekta (Naravne ..., 2014) objavili po 67 lavinskih biltenov. Biltene so povzemala številna druga spletišča (na primer Gore-ljudje, 2013; Vremenske ..., 2013), uporabljali pa so jih tudi pristojni na ARSO. Pri njihovi izdelavi smo uporabili podatke (Studeregger et al., 2014):

- terenskih opazovanj,
- terenskih prerezov snežne odeje,
- samodejnih vremenskih postaj,
- vremenskih napovedi,
- o predhodni preobrazbi snežne odeje,
- o trenutnih razmerah.

Pri vremenskih podatkih smo se oprli na opazovalno mrežo ARSO, opazovalno mrežo avstrijske meteorološke službe (*Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG*) in opazovalno mrežo koroške lavinske službe (*Lawinenwarndienst Kärnten*). V slednjo so bile v okviru našega projekta vključene tri nove vremenske postaje na območju Srednjih Karavank (slika 6). Prav podatki s teh postaj so pripomogli k izboljšanju napovedi, saj je za krajevne napovedi ključna čim gostejša mreža postaj.

Poleg izmerjenih podatkov smo pri izdelavi biltenov uporabljali tudi vremenske prognostične modelske napovedi, ki so ključne predvsem pri napovedih razmer za več dni vnaprej. Uporabili smo modela:

- ALADIN/SI (*Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational*) – numerični vremenski model za napovedovanje vremena do 72 ur vnaprej;
- INCA/AT (*Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis*) – model za analizo podatkov v visoki ločljivosti in sistem kratkoročnega napovedovanja avstrijske meteorološke službe, ki omogoča tridimenzionalne analize temperature, vlage in vetra za vsako uro, ter dvodimenzionalne predstavitve (ocena in napoved) količine padavin (na 15 minut) in oblačnosti. Sistem vsebuje podatke vremenskih postaj, podatke daljinskega zaznavanja (radarske in satelitske podatke), model numerične vremenske napovedi ter topografske podatke v visoki ločljivosti.



Slika 5: Lavinski bilten za Srednje Karavanke.



Slika 6: V okviru projekta je bila postavljena vremenska postaja na Zelenici (fotografija: Matija Zorn).

Lavinski tečaji

Za varstvo in zaščito pred snežnimi plazovi je pomembno tudi vseživljenjsko izobraževanje. Pri tem izpostavljamo lavinske tečaje, ki jih organizirajo planinska društva in Gorska reševalna zveza Slovenije. Snežni plazovi prav zaradi nepoznavanja, napačne ocene razmer ali precenjevanja izkušenj vsako leto terjajo številne žrtve (McClung in Schaerer 2006).

Tudi v Sloveniji je tovrstnih izobraževanj vsako leto več, kar pozitivno vpliva ozaveščenost obiskovalcev gora.

Zasnova in trajanje tečajev je lahko različna (od nekaj ur do več dni), vendar večina sledi glavnim tematikam (American ..., 2014):

- **uvodni del** s predstavitvijo splošnih informacij o snežnih plazovih, kako se jim izogniti in katero opremo potrebujemo za varno gibanje v gorah pozimi;
- **kabinetni del** z lavinsko terminologijo, statistiko, vzroki za sprožitev plazov, pripravo na turo (vreme, oprema, gibanje ...);
- **terenski del** z izdelavo prereza snežne odeje (slika 7) in oceno nevarnosti za proženje snežnih plazov, izbiro varne poti, iskanjem, sondiranjem in izkopavanjem ponesrečenega.

Obseg in zahtevnost obravnavanih tematik je prilagojena stopnji predhodnega znanja udeležencev in trajanju tečajev.

Dve tovrstni izobraževanji smo v Planinskem domu na Zelenici organizirali tudi v okviru projekta Naravne nesreče brez meja.



Slika 7: Prikaz prereza snežne odeje na tečaju varstva pred snežnimi plazovi na Zelenici (fotografija: Grega Bahun).

Sklep

V »boju« z naravnimi nesrečami je preventiva ključnega pomena. V okviru projekta Naravne nesreče brez meja (2014) smo udeleženi več tovrstnih aktivnosti. Povezane so bile z organizacijo tečajev na temo gibanja v gorah v zimskih razmerah, sprotne obveščanje o aktualni lavinski nevarnosti (izdaja lavinskega biltena) ter izdelavo zemljevidov lavinske nevarnosti. Tovrstne zemljevide ima izdelanih le osem slovenskih občin. Glede na pomen, ki jih imajo zemljevidi nevarnosti pri posegih v prostor, je nujno (ne le z vidika preventive, pač pa to nalaga tudi zakonodaja), da zemljevide dobijo vse občine s povečano tovrstno nevarnostjo. Glede na žrtve, ki jih pri nas vsako leto zahtevajo snežni plazovi, je nujno poskrbeti tudi za kakovostno lavinsko službo, ki bi redno izdajala krajevna lavinska opozorila za celotno državo.

Literatura

- American Avalanche Association,
http://www.avalanche.org/pdf/AAA_EDGuidelines_Table.pdf (Pridobljeno 22. 12. 2014)
- Bernot, F., Horvat, A., Pavšek, M., Šegula, P., Valič, M., Mulej, F. (1994). Ogroženost Slovenije s snežnimi plazovi. Elaborat, Ljubljana, Podjetje za urejanje hudournikov.
- Burkeljca J., Ortar J. (2008). The mess of problems, patterns, and types. *The Avalanche Review* 32 (4), 24–25.
- Eckerstorfer, M. (2008). Cartographic analysis of avalanche hazard maps. A comparison of relevant cartographic factors for the visualization of the avalanche bulletin. 6th ICA Mountain Cartography Workshop: Mountain Mapping and Visualisation, 33–40.
- Gore-ljudje: Lavinski bilten Karavanke – 15. 1. 13,
<http://www.gore-ljudje.net/informacije/87351/> (Pridobljeno: 20. 12. 2014).
- Izdelava prostorske baze podatkov in spletnega informacijskega sistema geološko pogojenih nevarnosti zaradi procesov pobočnega premikanja, erozije ter snežnih plazov (2011–2012),
<http://akvamarin.geo-zs.si/geohazard/Default.aspx> (Pridobljeno 3. 12. 2014)
- Klabus, A., Pavšek, M., Zorn, M., Komac, B. (2009). Poplavna, erozijska, plazovita in plazljiva območja na teritoriju občine Jezersko. Elaborat, VGP Projekt d.o.o. Kranj.
- McClung, D., Scheaerer, P. A. (2006). *The Avalanche Handbook*. Seattle, Mountaineers, 271 str.
- Naravne nesreče brez meja,
<http://www.natural-hazards.eu/> (25. 3. 2014)
- Natek, K., Krevs, M., Lampič, B., Mrak, I., Ogrin, D., Repe, B., Stepišnik, U. (2010). Karte erozijske in poplavne nevarnosti, plazljivosti in nevarnosti snežnih plazov za območje občine Tržič. Elaborat, Univerza v Ljubljani, Filozofska Fakulteta, Oddelek za geografijo, 97 str.
- Pavšek, M. (2002). *Snežni plazovi v Sloveniji*. Ljubljana, Založba ZRC, 212 str.
- Pavšek, M., Komac, B., Volk Bahun, M., Ortar, J., Zorn, M., Ciglič, R., Ferk, M. (2013). »Zemljevidi nevarnosti za snežne plazove na Gorenjskem« v I. Mrak, I. Potočnik Slavič, B. Rogelj, ur., *Gorenjska v obdobju globalizacije*. Bled, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 61–74.
- Pavšek, M., Komac, B., Zorn, M. (2010). »Ugotavljanje lavinske nevarnosti s pomočjo GIS-a« v D. Perko, M. Zorn, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2009–2010*. Ljubljana, Založba ZRC, 131–146.
- Studeregger, A., Wurzer, A., Reider, H., Riegler, A., Ertl, W., Volk Bahun, M., Ortar, J., Pavšek, M. (2014). Avalanche warning service without frontiers in the Karawanks along the Slovenian-Austrian Border, *Journal of Environmental Science and Engineering B3*, 24–29.
- Velkavrh, A. (2005). *Sneg in snežni plazovi: Služba za sneg in plazove*,
http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Sluzba_za_sneg_in_plazove.pdf (Pridobljeno 20. 12. 2014).

- Volk, M. (2010a). Snežni plazovi v Karavankah. Diplomsko delo, Univerza na Primorskem. Fakulteta za humanistične študije, 111 str.
- Volk, M. (2010b). Snežni plazovi v osrednjih Karavankah, Ujma 24, 116–120.
- Volk, M. (2011). »Lavinski kataster in zemljevidi nevarnosti zaradi snežnih plazov s poudarkom na primerih z območja osrednjih Karavank« v M. Zorn, B. Komac, R. Ciglič, M. Pavšek, ur., Neodgovorna odgovornost, Naravne nesreče 2. Ljubljana, Založba ZRC, 103–109.
- Vremenske in lavinske informacije za Srednje Karavanke (2013), <http://onger.org/?mode=novica&menu=1&id=2130> (Pridobljeno 20. 12. 2014).
- Zakon o prostorskem načrtovanju (2007). Uradni list RS, št. 33.
- Zorn, M., Komac, B. (2008). Zemeljski plazovi v Sloveniji. Ljubljana, Založba ZRC, 159 str.

Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne

Mitja Brilly*, Klaudija Sapač*, Andrej Vidmar*, Lidija Globevnik*, Mira Kobold**, Katarina Zabret*, Maja Koprivšek*, Matej Sečnik*, Darko Anzeljc***

Povzetek

Maja 2014 so na spodnjem delu porečja reke Bosne kot posledica večdnevni nepretrganih padavin nastopile poplave, ki so povzročile za več kot milijardo evrov škode in terjale 86 smrtnih žrtev. Slovenska vlada je sprejela odločitev, da prizadetim območjem BiH pomaga tudi z analizo poplavnega dogodka na porečju reke Bosne in predlaga nekatere ukrepe za blaženje vpliva poplav v prihodnosti. V projektu so iz Slovenije sodelovali: Agencija RS za okolje, Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Inštitut za vode RS. Na osnovi zbranih podatkov je bilo analizirano vremensko dogajanje in podan opis hidroloških razmer z rezultati analize verjetnosti velikosti zabeleženih padavin in pretokov. Za potrebe rekonstrukcije poplavnega dogodka maja 2014 je bil z orodjem HBV-light razvit hidrološki model porečja reke Bosne. Rezultati simulacije kažejo, da so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli 500-letno povratno dobo, ponekod pa celo 1.000-letno. Model reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira vodno bilanco vodotoka in daje osnovo za nadaljnji razvoj, v obstoječi obliki pa je že uporaben za izdelavo napovedi pretokov pri poplavih reke Bosne v spodnjem toku. S celovito analizo se večja poznavanje izrednega hidrološkega dogodka maja 2014 na porečju reke Bosne, z izdelavo hidrološkega modela pa se vzpostavlja prenos znanja in izkušenj med Slovenijo in BiH s področja napovedovanja in spremljanja poplav.

Ključne besede: poplava, reka Bosna, hidrološki model, padavine, napoved, povratna doba, HBV-light

Key words: flood, Bosna River, hydrological model, precipitation, forecast, return period, HBV-light

Uvod

Sredi maja 2014 so na spodnjem delu porečja Save nastopile poplave s katastrofalnimi posledicami. Umrlo je 86 ljudi, ocenjene škode pa so presegle eno milijardo evrov. Prizadele so območja na Hrvaškem, v Bosni in Hercegovini (BiH) ter v Srbiji. Poplave se niso pojavile le ob reki Savi, temveč tudi na porečjih njenih pritokov. Poplavljali so Vrbas, Vrbanja, Bosna, Spreča, Usora, Krivaja ter reka Drina. Največ škode so povzročile reka Sava v Brčkem, Orašju in Obrenovcu, reka Bosna v Zavidovičih, Doboju, Maglaju, Modriču in Bosanskem Šamcu, reka Drina v Bijeljini in Zvorniku ter reka Vrbanja v Čelincu in Kotor Varošu.

Slovenska vlada je sprejela odločitev, da pomaga prizadetim območjem Bosne in Hercegovine tudi z analizo poplavnega dogodka ter predlaga nekatere ukrepe za blaženje vpliva poplav v bodoče. Na sestanku predstavnikov hidroloških in vodarskih strok Slovenije ter BiH dne 6. junija 2014 je bilo dogovorjeno, da se analizira poplavni dogodek na reki Bosni ter izdela hidrološki model porečja. V projektu je iz Slovenije poleg

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

** Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija

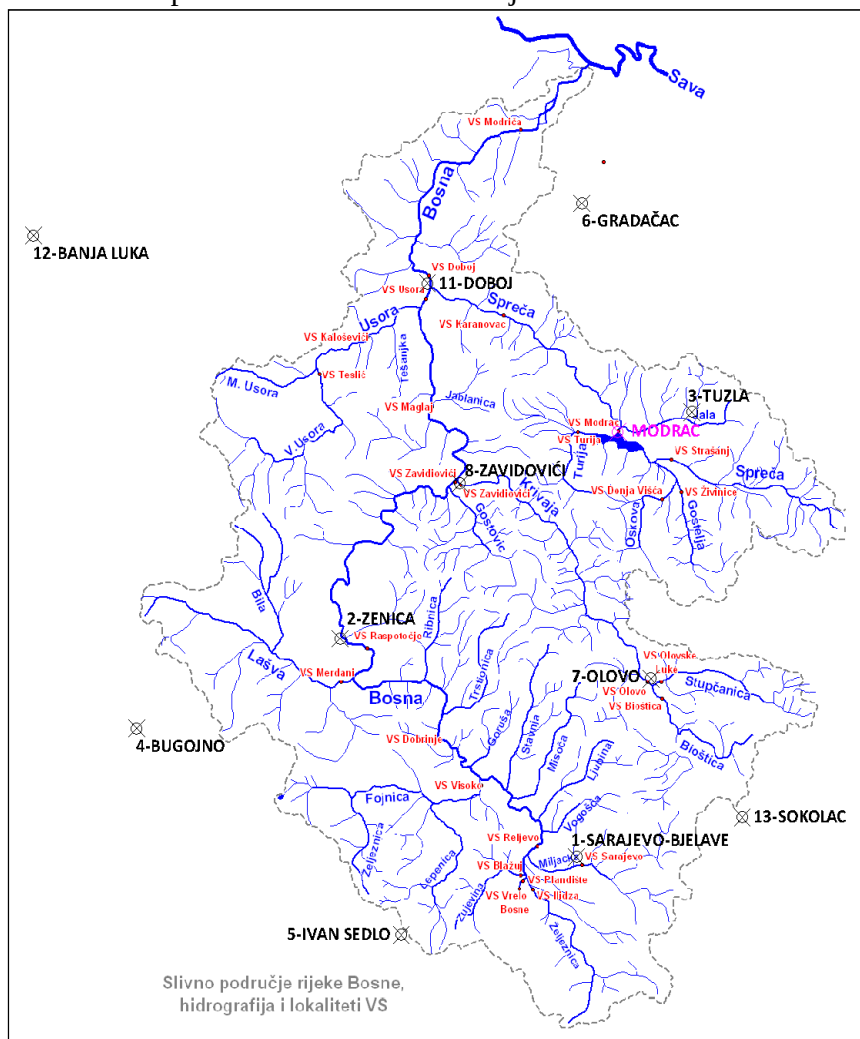
*** Inštitut za vode Republike Slovenije, Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana, Slovenija.

Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) sodelovala tudi Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FG) in Inštitut za vode Republike Slovenije (IZVRS). V projektu sta iz BiH aktivno sodelovala Republički hidrometeorološki zavod Republike Srpske (RHMZ RS) in Federalni hidrometeorološki zavod Federacije Bosne i Hercegovine (FHMZ BiH).

S projektom se veča poznavanje izrednega hidrološkega dogodka v maju 2014 na največjem porečju v BiH, to je porečju reke Bosne. Z izdelavo hidrološkega modela reke Bosne pa se vzpostavlja pomemben prenos znanja ter izkušenj Slovenije pri vzpostavljanju sistema spremljanja, napovedovanja in učinkovitejšega obvladovanja poplav v BiH.

Opis porečja reke Bosne

Porečje reke Bosne (slika 1) po podatkih »Hidrološke studije površinskih voda Bosne i Hercegovine - Sliv rijeke Bosne« glede na orografsko razvodnico obsega 10.420 km² (ZV in FHMZ, 2012). Reka teče od juga proti severu. Povirje je v Dinaridih z vršaci, ki presegajo 2.000 m, osrednji del porečja zajema hribovito območje osrednje Bosne, spodnji del toka pa poteka po ravninskem območju poplavnega sveta reke Save. Porečje je tudi po geološki sestavi izredno pestro z značilnimi območji krasa.



Slika 1: Porečje reke Bosne z lokacijami vodomernih in padavinskih postaj (Vir hidrografske podlage z razvodnico in vodomernimi postajami: ZV in FHMZ, 2012).

Povirje reke Bosne opredeljujejo Vrelo Bosne (4 km²) in trije vodotoki: Željeznica (480 km²), Zujevina (200 km²) in Miljacka (410 km²). Dolvodno se z leve priključita Fojnica (760 km²) in Lašva (960 km²), v Zavidovićih pa z desne potok Krivaja (1500 km²). V Doboju v reko Bosno z leve strani priteka Usora (850 km²), z desne pa reka Spreča (1950 km²). Na odseku Bosne, med vtokom Miljacke in Krivaje, v Bosno z desne vteka večje število manjših pritokov prispevne površine do 200 km², ki skupaj tvorijo prispevno površino velikosti približno 1.700 km². Skupna površina porečja desnega brega Bosne je 6.900 km² (približno 65 % celotnega porečja).

Vremensko dogajanje maja 2014 na Balkanu

Poplave na Balkanu maja 2014 so bile posledica izjemnih padavin, nastalih zaradi obsežnega območja nizkega zračnega pritiska, ki se je pomikalo z južnega Jadrana preko Bosne in Hercegovine ter Srbije na Madžarsko. Območje poplav je bilo že pred samim poplavnim dogodkom zasičeno z vodo, saj je na območju Republike Srbije in v Bosni in Hercegovini že v aprilu padla velika količina dežja, na meteoroloških postajah Banja Luka, Doboj in Prijedor celo maksimalna mesečna količina po letu 1961 (Banja Luka 214 mm, Doboj 177,4 mm in Prijedor 163,8 mm). Na nekaterih meteoroloških postajah je padla tudi več kot dvakratna dolgoletna povprečna količina padavin za mesec april. V mesecu aprilu je območje Bosne in Hercegovine prešlo kar sedem ciklonov, že 2. maja pa se je formiral nov višinski ciklon v Genovskem zalivu, ki je predvsem na severu 3. in 4. maja povzročil obilne padavine (RHMZ RS, 2014).

V ponedeljek, 12. maja 2014, je prizadeto območje prešla hladna fronta, ki je s seboj prinesla hladnejši zrak, zlasti v višje plasti atmosfere. Do srede zjutraj se je nad območjem oblikovalo plitvo območje nizkega zračnega tlaka, ki se je začelo poglobljati (DHMZ, 2014). Z zahoda je začel na to območje z višinskimi tokovi dotekati vlažen in nestabilen zrak. Z dotekanjem mrzlega zraka čez Alpe se je v sredo, 14. maja, oblikoval obsežen ciklon s središčem nad BiH. Ciklon je dosegel svoj vrhunec 15. in 16. maja, ko se je center pomaknil proti severovzhodu, oslabil pa je šele v soboto, 17. maja. Posledica so bile dolgotrajne padavine, ki so zajele območja v BiH, Hrvaški in Srbiji. Ciklon je črpal vlago iz Sredozemlja in Črnega morja, hladnejši zrak pa je v višjih predelih povzročal sneg. Procesi v globokem ciklonu so bili zelo intenzivni, ker je bila os ciklona postavljena navpično. Poleg tega je ciklon bolj ali manj miroval, 15. maja pa se je celo premaknil proti zahodu. Razen ekstremne količine padavin so stanje poslabšale nenavadno nizke temperature za ta letni čas in zelo močan veter (Renko, 2014). Na območju osrednjega Balkana se je omenjeni ciklon zadrževal kar tri dni. Hkrati je nad zahodno in delom srednje Evrope vztrajalo območje visokega zračnega tlaka. Preglednica 1 prikazuje podatke o dnevni količinah padavin in vsote dnevni padavin za izbrana obdobja na padavinskih postajah porečja reke Bosne (slika 1).

Intenziteta padavin, ki so zajele porečje Bosne, je bila dokaj zmerna. Podatki urnih izmerjenih vrednosti padavin 15. maja v Zenici nihajo med 0,7 in 10,7 mm. Največjo intenziteto urnih padavin je sicer imelo Sarajevo, kjer je 14. maja v eni uri padlo 11,4 mm dežja. Deževalo je ves čas, od 13. maja ob 12:00 uri do 16. maja zjutraj, padavine vmes niso prenehale. Potem je 16. maja čez dan in 17. maja deževalo le še z zelo zmerno intenziteto. V Tuzli je v 62 urah nepretrganega deževja padlo 229,2 mm padavin. Verjetno je, da se je med 13. in 16. majem talil tudi sneg, ki je v planinah zapadel še aprila oziroma v predhodnih dneh. Možno je tudi, da so bile ponekod dejanske padavine večje od izmerjenih, saj ob močnih vetrovih dežemer ne zajamejo vseh padavin.

Preglednica 1: Dnevne količine padavin in vsote dnevnih padavin za izbrana obdobja na posameznih postajah v mm (vir: FHMZ BiH, RHMZ RS, 2014).

Postaja	Sarajevo-Bjelave	Olovo	Zenica	Zavidovići	Gradačac	Tuzla	Modrac
Datum	[mm]						
1.4. - 30.4. 2014	97	136,5	19,6	170		192,6	
1.5. - 11. 5. 2014	32	27,1	16,5	25,8	91,8	55	
12. 5. 2014	14,1	15,3	4,4	0,8	3,3	4,9	
13. 5. 2014	34,6	5,5	30,2	12,3	21,1	20,6	52
14. 5. 2014	71,3	72,9	53,7	57,1	68,3	92,3	79,5
15. 5. 2014	18	65,8	38,7	33,1	85,1	103,8	76,6
16. 5. 2014	4,6	8	11,4	9	13,6	28,6	14,4
17. 5. 2014	2,4	4,4	3,3	2,4	3,3	2,5	
13.5. 2014 16:00- 16.5. 2014 6:00	116,5	150,4	127,1	107,8	178	229,2	
12.5.-17.5. 2014	145	171,9	141,7	114,7	194,7	252,7	222,5
1. 5.-17.5. 2014	177	156,6	274,6	113,9	382,8	247,8	
1.4.-17. 5. 2014	274	335,5	293,2	310,5	286,5	500,3	
Povprečje 1961-1990	932		782			894	

Verjetnostna analiza večdnevnih padavin

Povratna doba dogodka na obravnavanih padavinskih postajah v BiH je bila ocenjena s primerjavo vrednosti verjetnostne analize maksimalnih večdnevnih padavin v obdobju 1960–2013 oziroma 2000–2010 in vrednosti maksimalnih večdnevnih padavin aprila in maja 2014 (Anzeljc in Đurović, 2014). Z izrisom izolinij povratnih dob za posamezno trajanje maksimalnih večdnevnih padavin na porečju reke Bosne je prikazana tudi ocena prostorske razsežnosti jakosti padavinskega dogodka (slika 2). Pri analizi so bila uporabljena poročila ter podatki o padavinah, ki sta jih poslala FHMZ BiH in RHMZ RS, ter nekateri padavinski podatki objavljeni na spletnih straneh (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014).

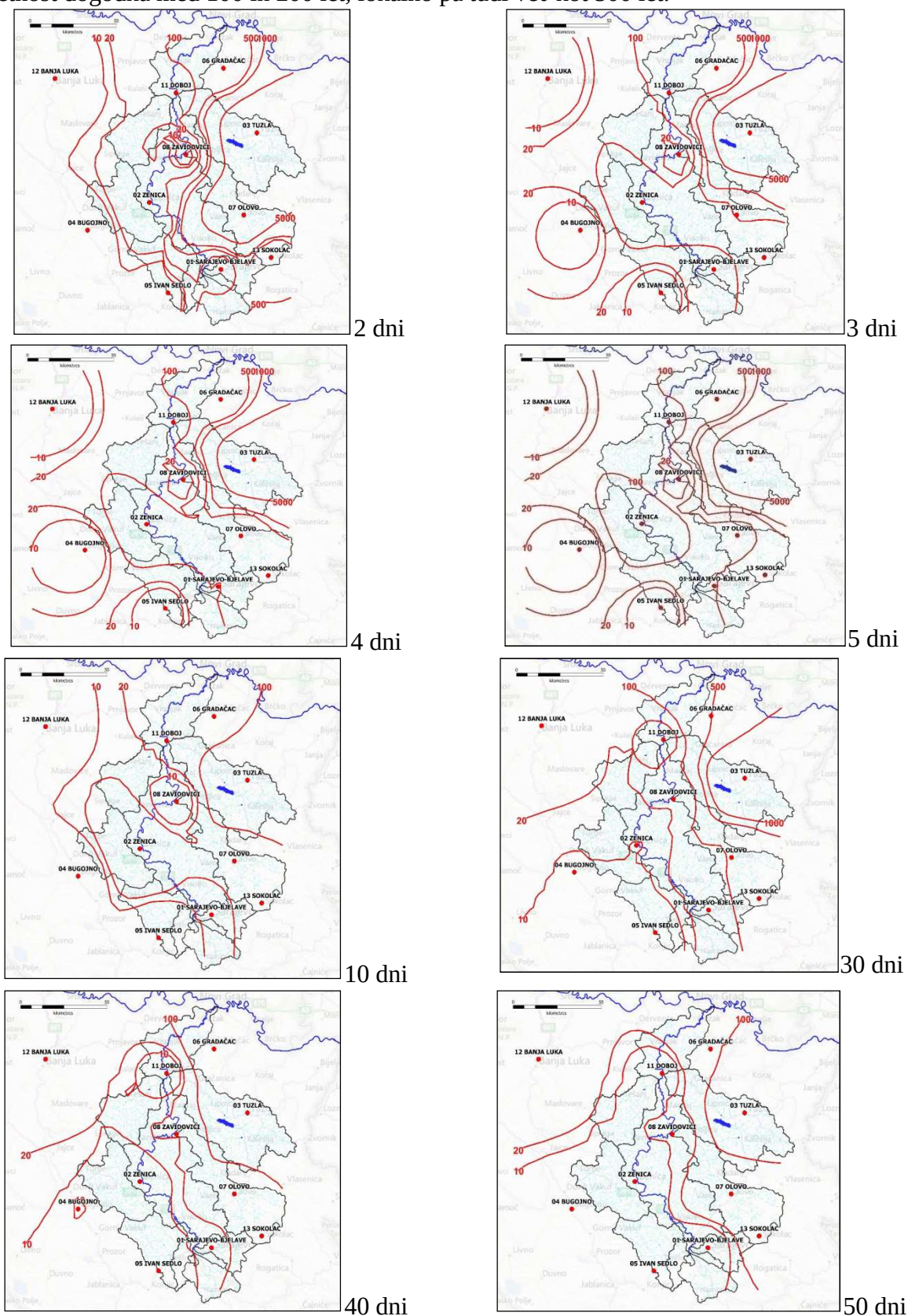
Za vsako leto v obdobju 1960–2013 so bile določene maksimalne večdnevne padavine s trajanjem od 1 do 60 dni. Vrednosti povratnih dob za posamezna trajanja padavin so bila določena po Gumbelovi porazdelitveni funkciji. Izbrane so bile povratne dobe 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1.000, 2.000 in 10.000 let.

V Tuzli je večina večdnevnih padavin dosegla povratno dobo več kot 500 let. V Olovem so 2- in 3-dnevne padavine imele več kot 500-letno povratno dobo, 1-, 4- in 30-dnevne padavine pa 100-letno povratno dobo. Padavine vseh drugih trajanj so imele povratno dobo višjo od 20 let. V Doboju je imela večina večdnevnih padavin povratno dobo med 20 in 50 let, 3-dnevne pa več kot 100 let. Podobno kot v Doboju so tudi v Sarajevu in Zenici večdnevne padavine imele večinoma več kot 20-letno povratno dobo, 3- do 7-dnevne pa celo več kot 100-letno povratno dobo.

Vrednosti povratnih dob na padavinskih postajah so bile prostorsko interpolirane po metodi utežne inverzne razdalje (angl. *inverse distance weighting*) z velikostjo mrežne celice 5 km, inverzno razdaljo na četrto potenco in z upoštevanjem štirih sosednjih postaj (Anzeljc in Đurović, 2014).

V Tuzli so maksimalne 3-dnevne padavine nastopile 14. maja, 4-dnevne 13. maja in 5-dnevne padavine 12. maja 2014, v Olovu so 2-dnevne 500-letne padavine nastopile 14.

maja 2014, v Sarajevu 4-dnevne 100-letne padavine 12. maja 2014 in v Zenici 13. maja 2014. Glede na padavine, ki so zajele več kot polovico porečja reke Bosne, je bila verjetnost dogodka med 100 in 200 let, lokalno pa tudi več kot 500 let.



Slika 2: Izolinije povratnih dob maksimalnih padavin izbranih trajanj aprila in maja 2014 na porečju reke Bosne.

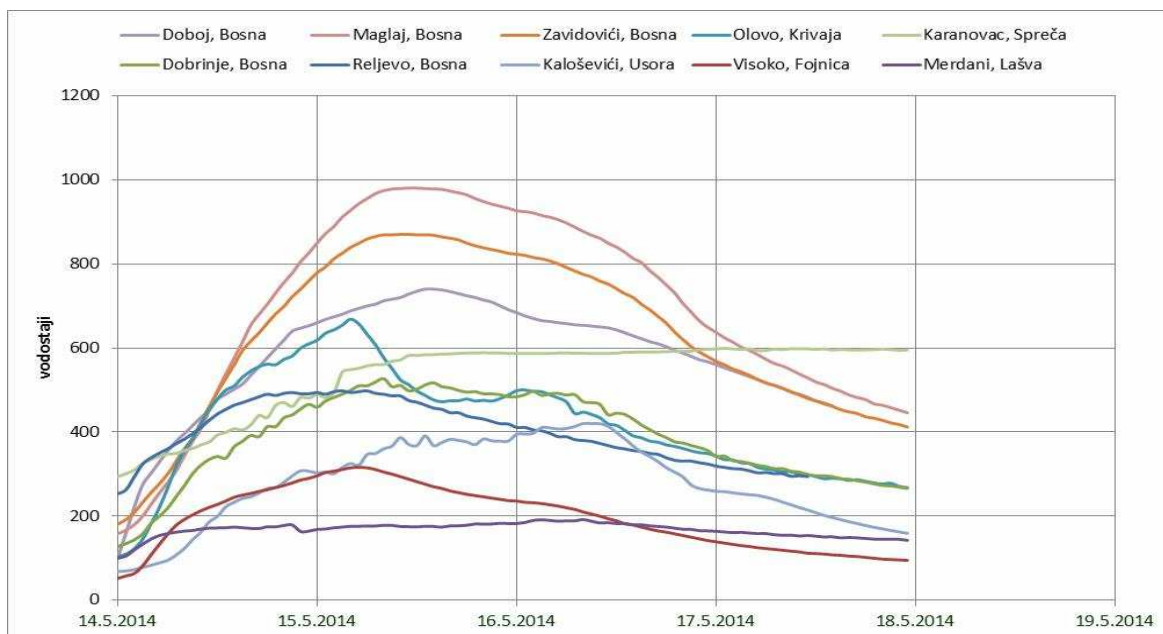
Opis poplavnega dogodka

Izjemen dogodek maja 2014 na reki Bosni je v posamičnih elementih primerljiv z vsemi izrednimi dogodki poplav, plazov in drobirskih tokov, kot jih poznamo v Sloveniji iz let 1990, 2000, 2007 in 2010 (Kobold, 2011). Dogodki v Sloveniji so bili sicer intenzivni, ampak kratkotrajni z izjemo leta 2000 (Mikoš et al., 2002). Dogodek v Bosni je bil celo intenzivnejši, predvsem pa dolgotrajen. Dolgotrajne in intenzivne padavine so sprožile številne zemeljske plazove ter drobirske tokove. Ti so bili najhujši na območju Željeznog polja. Zemeljske plazove so zasledili tudi na drugih območjih porečja. Analiza RHMZ RS (2014) kaže tudi na izredno velike padavine v osrednjem delu porečja reke Bosne in v spodnjem vzhodnem delu porečja. Sočasno so relativno velike padavine zajele tudi Slavonijo, kar je povzročilo izredne pretoke na manjših vodotokih, ki se neposredno izlivajo v reko Savo (Abdulaj et al., 2014).

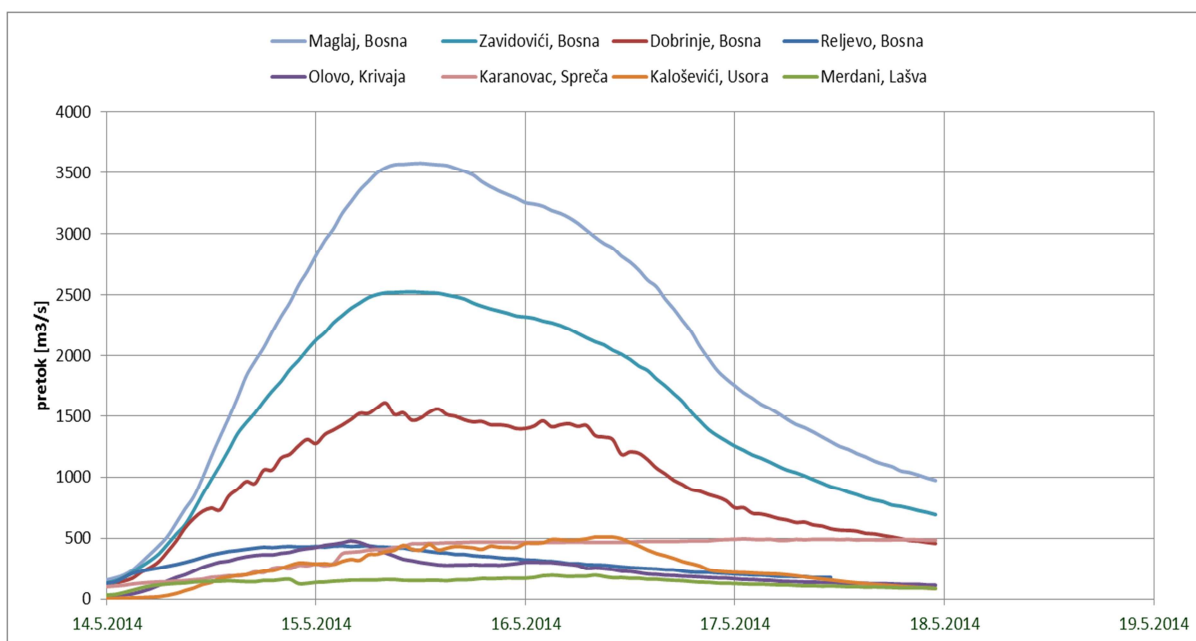
Poplava, ki se je začela oblikovati že v zgornjem delu porečja 13. maja 2014, je dosegla izredno velike vodostaje (preglednica 2). Na zgornjem delu porečja sicer niso presegli vrednosti, doseženih pri izmerjenih zgodovinskih dogodkih. Do sedaj znane maksimalne vrednosti so bile presežene dolvodno od Zenice. V Zenici je bil maksimum presežen za 70 cm, v Doboju za 150 cm. Če se velike količine vode ne bi razlile po poplavnih območjih, bi bile konice poplav še višje (Kupusović, 2014). Bolj kot višina vode pa preseneča njeno trajanje. Tako je v Doboju pretok večji od predhodnega največjega trajal kar dva dni in tri ure (slika 3). Izmerjene pretoke, ki so jih za nekatere vodomerne postaje RHMZ RS in FHMZ BiH zabeležile med 14. in 18. majem 2014, podaja slika 4. Veliko vodomernih postaj pa je bilo med poplavo poškodovanih, zato so podatki izgubljeni.

Preglednica 2: Maksimalni vodostaji na vodomernih postajah v Republiki Srbski (RHMZ RS, 2014).

Reka	Hidrološka postaja	Kota "0" [m n.v.]	Maks. pred majem 2014		Maj 2014	
			Vodostaj [cm]	Datum	Vodostaj [cm]	Datum
Sava	Gradiška	85,39	855	19. 3. 1977	808	20. 5. 2014
	Srbac	82,81	1024	31. 10. 1974	1012	18. 5. 2014
	Rača	75,3	856		950	17. 5. 2014
Una	Novi Grad - dol.	116,06	576	9. 10. 1955	572	17. 5. 2014
Sana	Prijedor	129,68	511	9. 10. 1955	543	17. 5. 2014
Vrbas	Delibašino selo	141,38	687	23. 9. 1996	837	16. 5. 2014
Vrbas	Banja Luka	151,21	520	23. 9. 1996	632	16. 5. 2014
Vrbanja	Vrbanja	166,22	527	22. 6. 2010	592	16. 5. 2014
Bosna	Doboj	137,01	578	13. 5. 1965	721	15.- 16. 5. 2014



Slika 3: Gladine poplavnih valov na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

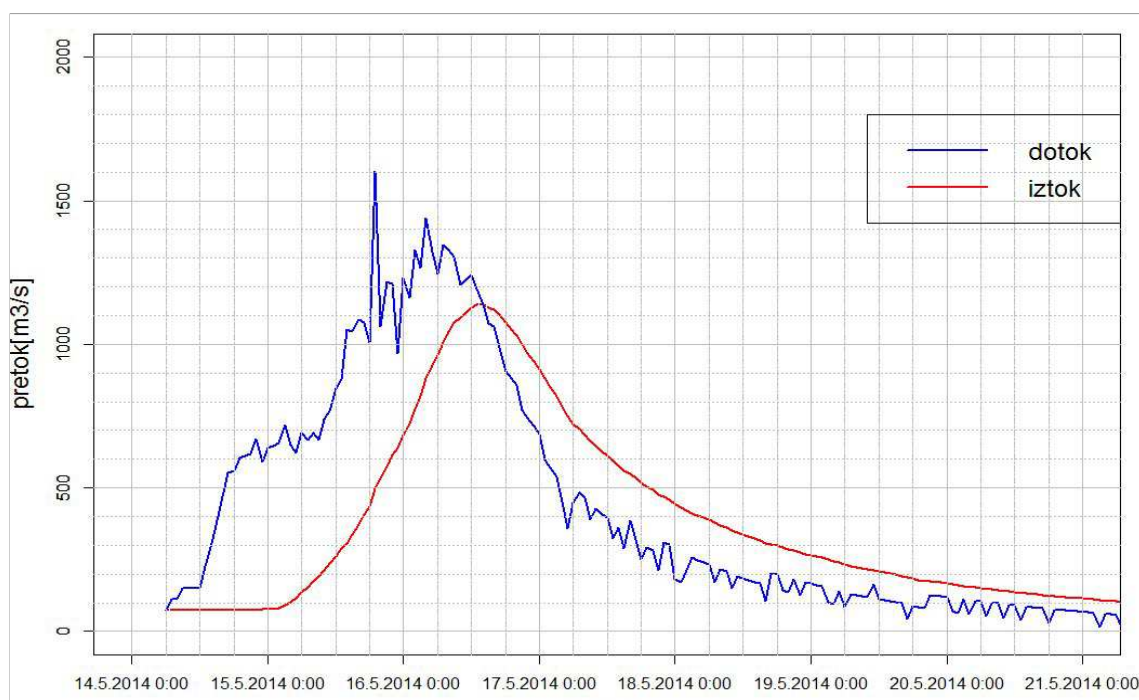


Slika 4: Pretoki na vodomernih postajah pri poplavi maja 2014 (vir podatkov: RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

Iz slike 3 in pripadajočih podatkov (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014) lahko razberemo čas dvigovanja gladine poplavnega vala, verjetne vplive zadrževanja vode na poplavnih ravninah ter istočasnost nastopa konice poplavnih valov na sotočjih. Zamiki pri pojavu konic so v zgornjem toku reke od 2 do 3 ure. V spodnjem toku je bilo potovanje poplavnega vala podobno kot v zgornjem toku, le da se je pojav največjega pretoka krepko upočasnil zaradi razlivanja vode na poplavna območja. Voda se je v Maglaju začela dvigovati celo prej kot v gorvodnih Zavidovičih. Maksimum je bil v Maglaju dosežen že v

eni uri po doseženem maksimumu v Zavidovičih, v Doboju pa po šestih urah pri sorazmerno enaki razdalji. Reka Krivaja v Olovu je dosegla vrh dve uri pred reko Bosno v Zavidovičih in tako povzročila dvig vala v Maglaju še preden je tja pripotovala najvišja konica vala reke Bosne iz Zavidovičev. V Maglaju je tako konica vala (združena Bosna in Krivaja) trajala kar šest ur.

Na oblikovanje poplavnega vala v Doboju je vplivala tudi pregrada Modrac na Spreči (Tuzlansko jezero). Specifični pretok prispevnega območja nad zadrževalnikom je bil več kot $1 \text{ m}^3/\text{s}$ na km^2 . Pri tem je zanimivo, da so meritve padavin na pregradi pokazale nižje vrednosti kot pa v Zenici. Podatki kažejo maksimalni dotok v zbiralnik Modrac $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ (15. maj 2014 ob 15. uri) in iztok $1137 \text{ m}^3/\text{s}$ (16. maj 2014 ob 13. uri). Zadrževalnik je zmanjšal maksimalni pretok za 30 % in ga zamaknil za 22 ur (slika 5).



Slika 5: Hidrogram dotoka in iztoka iz zbiralnika Modrac
(vir podatkov: Spreča d.d. Tuzla, 2014).

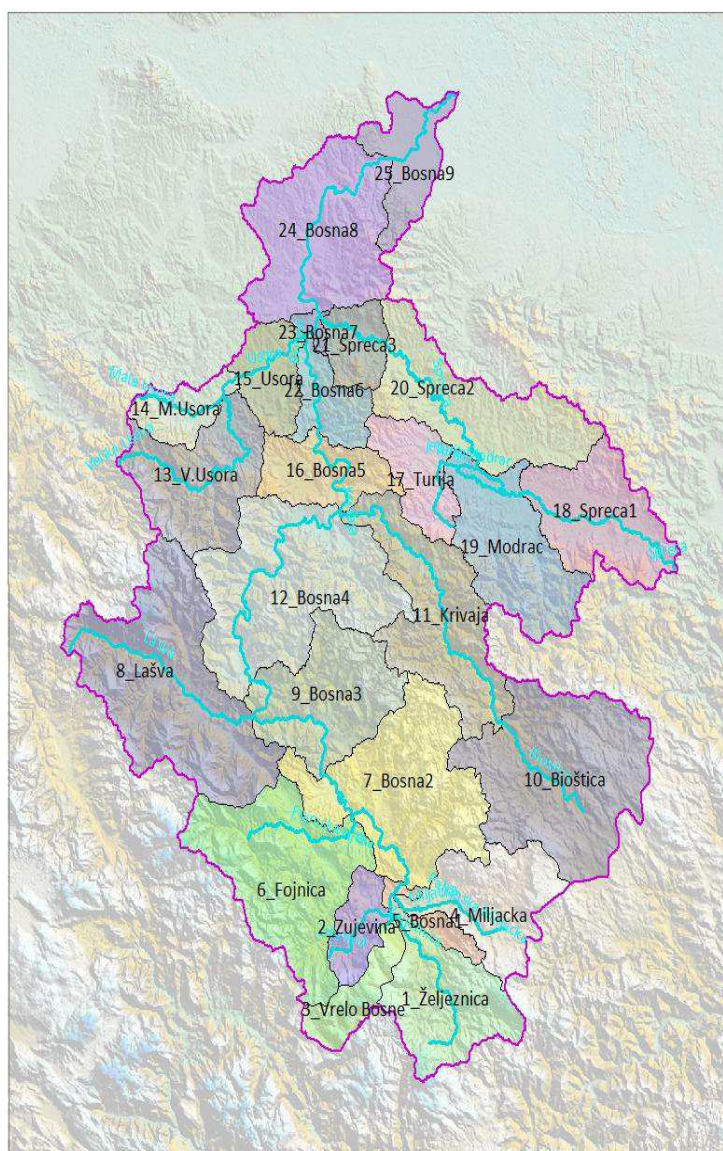
Hidrološki model porečja reke Bosne

Pretočne hidrograme poplavnega dogodka maja 2014 smo simulirali s pomočjo hidrološkega modela HBV-light. S simulacijo smo analizirali odtočne koeficiente dogodka in določili najbolj verjetne pretoke dolvodno od Maglaja. Hidrološki model HBV-light je delno-porazdeljen konceptualni model za kontinuirano računanje odtoka, ki se uporablja za simulacijo hidroloških dogodkov in izdelavo napovedi. Model je bil razvit na osnovi HBV modela Švedskega inštituta za meteorologijo in hidrologijo na Univerzi v Uppsali leta 1993 z uporabo programskega jezika Microsoft Visual Basic (Seibert in Vis, 2012).

Da bi zagotovili dovolj veliko točnost rezultatov modela tako obsežnega in heterogenega območja, smo celotno porečje Bosne razdelili na podporečja tako, da vsako vsebuje le en velik pritok. Tako je bilo porečje razdeljeno na 25 podporečij s površinami od 30 do 1.000 km^2 (slika 6). Pri pregledu podatkov smo ugotovili, da so specifični pretoki na Vrelu Bosne 16-krat večji od specifičnih pretokov na sosednjih območjih. To pomeni,

da se v Vrelo Bosne pretaka tudi voda iz kraškega zaledja. Skupna površina porečja reke Bosne z upoštevanjem kraškega zaledja in uporabljenega GIS modela (10.836 km²) se zato nekoliko razlikuje od orografsko določenega prispevnega območja (10.420 km²) (ZV in FHMZ, 2012).

Vsa podporečja so bila nadalje razdeljena na največ tri višinske cone glede na nadmorsko višino in vegetacijo. Izbrane meje višinskih con so bile: do 700 m, od 700 m do 1400 m in nad 1400 m. Južni del porečja reke Bosne je dokaj gorat, zato imajo podporečja na tem območju po tri cone. Podporečje v ravninskem delu (severni del porečja), kjer nadmorske višine večinoma ne presegajo 700 m, pa ima dve coni. Vsaka cona nadmorske višine pa je bila nato razdeljena še v dve skupini glede na pokrovnost v tako imenovane vegetacijske cone: gozd in polje (ne-gozd).



Slika 6: Model porečja reke Bosne z vsemi podporečji, zajetimi v modelu.

Za zagon modela oziroma za kalibriranje so bili uporabljeni vhodni podatki, pridobljeni od Hidrometeoroloških zavodov Federacije BiH in Republike Srbije:

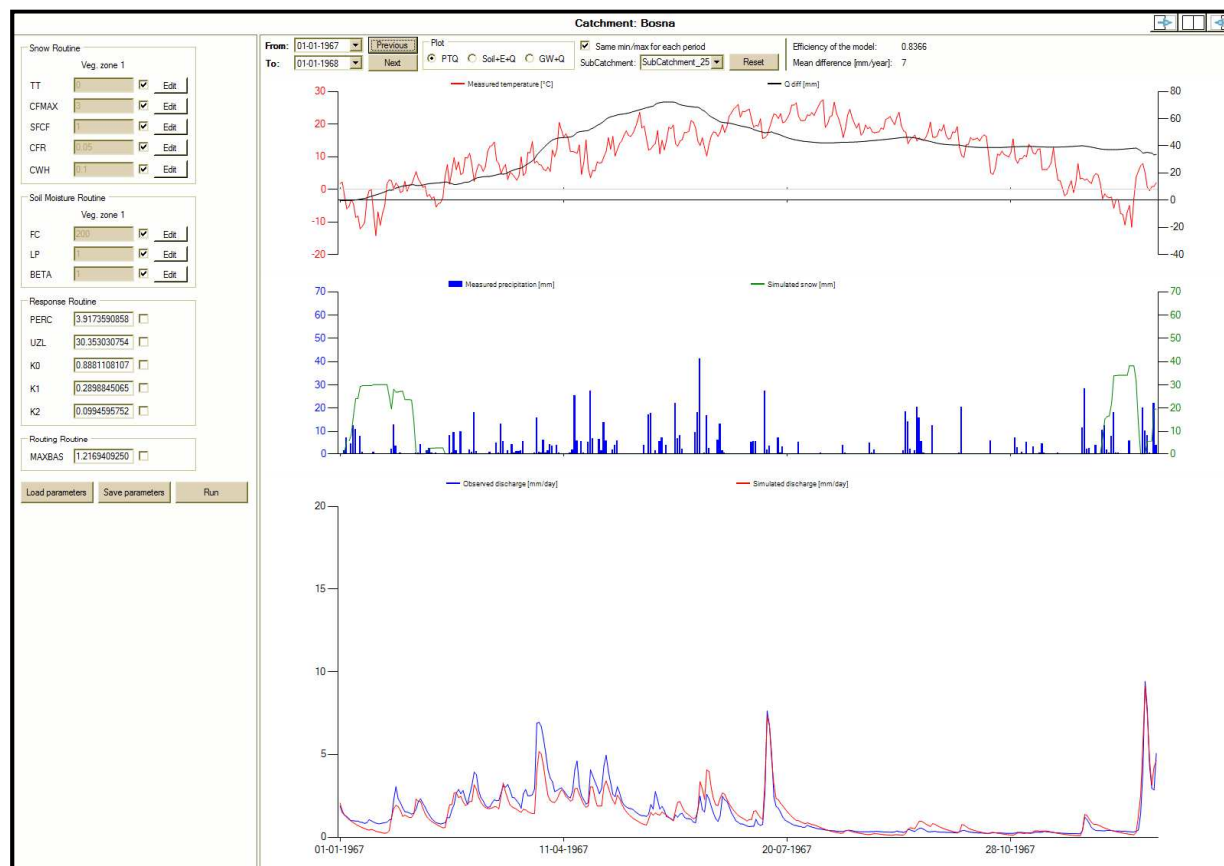
- padavine za enajst postaj,

- temperature za šest postaj,
- pretok za enaintrideset postaj,
- potencialna evapotranspiracija za šest postaj.

V testni fazi smo modelirali s padavinskimi podatki različnih kombinacij vseh postaj glede na razpoložljivost podatkov. Za končno verzijo je bilo izbranih šest postaj, za katere so bili na voljo dnevni in urni podatki o padavinah: Sarajevo-Bjelave, Zenica, Tuzla, Bugojno, Ivan Sedlo in Doboj. Vplivna območja posameznih postaj so bila določena s Thiessenovimi poligoni. Za iste postaje so bili upoštevani tudi podatki o temperaturi zraka in evapotranspiraciji.

Obdobja za umerjanje in preverjanje modela smo izbrali na osnovi pojava velikih pretokov in razpoložljivih podatkov na vseh postajah. Tako smo obdobje od 1. 1. 1964 do 31. 12. 1968 izbrali za obdobje umerjanja, kasnejše obdobje med 1. 1. 1984 in 31. 12. 1988 pa za obdobje preverjanja.

Za umerjanje smo najprej uporabili orodje, ki ga nudi program HBV-light, genetski algoritem GAP. Rezultati umerjanja so enaki za obe obdobji, obdobje kalibracije (1964–1968) in validacije (1984–1988). Koeficienti določenosti in učinkovitosti so izredno dobri za pretoke vzdolž reke Bosne in nekoliko slabši za posamezne pritoke, pri katerih so odtoki padavin zadržani zaradi kraškega značaja ali akumulacije. To so reke Fojnica, Lašva, zgornji tok Krivaje, Usora, Turija in Spreča. Slika 7 prikazuje rezultate simulacije za leto 1967 (rdeča črta: simulirani pretoki; modra črta: merjeni pretoki). Pri prikazovanju rezultatov se zaradi lažjega spremljanja vodne bilance podatki modela skupaj s pretoki prikazujejo v mm na enoto površine.



Slika 7: Kalibracija modela za reko Bosno
(rdeča črta: simulirani pretoki; modra črta: merjeni pretoki).

Letni koeficienti odtoka kažejo na precejšen raztros (ARSO, ULFGG in IzVRS, 2014). Zaradi večje evapotranspiracije lahko pričakujemo postopno zmanjševanje koeficienta po reki navzdol. Večja odstopanja lahko pomenijo tudi neustrezno določene razvodnice, predvsem zaradi krasa. Rezultati modela kažejo, da je prispevna površina Vrela Bosne verjetno podcenjena, Krivaje pri Olovu pa precenjena. Za izboljšanje modela je bilo za umerjanje modela uporabljeno orodje PEST (Doherty, 2012; Doherty, 2005; Lawrence et al., 2009; Zhulu, 2010), s katerim smo dobili boljše rezultate.

Preglednica 3 podaja podatke o verjetnih visokih vodah na postajah reke Bosne in vrednosti, dosežene maja 2014. Verjetne visoke vode povratne dobe od 10 do 100 let so določene v hidroloških študijah RHMZ RS in FHMZ BiH. Visoke vode 500- in 1.000-letne povratne dobe smo določili s pomočjo grafičnega prikaza določenih visokih voda na logaritemski skali, pri čemer smo predpostavili zvezen potek krivulje verjetnostne porazdelitve vzorca.

Glede na podatke, ki jih prikazuje preglednica 3, so pretoki reke Bosne v Maglaju presegli povratno dobo 500 let, drugod pa več kot 1.000 let. Odtočni koeficienti za reko Bosno so se gibali med 0,76 (Bosna Modriča) in 0,91 (Bosna pod vtokom Usore). Odtočni koeficient za Bosno v Doboju je bil 0,82.

Preglednica 3: Verjetnosti pojava maksimalnih pretokov na posameznih vodomernih postajah na reki Bosni (Hidrološka študija za BiH, RHMZ RS in FHMZ BiH, 2014).

povratna doba [leta]	Modriča	Doboj	Maglaj	Zavidovići	Raspotočje	Dobrinje	Reljevo
	[m ³ /s]						
10	2214	2091	1508	1164	904	600	345
20	2551	2420	1764	1320	1039	717	400
50	2990	2795	2120	1520	1220	880	464
100	3318	3087	2479	1673	1360	1058	510
500*	4148	3936	3272	2091	1700	1375	637
1.000*	4645	4321	3718	2342	1904	1534	714
simulacija 2014 – teoretično najvišje konice vala	4875	4831	3498	2479	2265	1663	820

*določeno iz odnosa verjetnih visokih voda do 100-letne povratne dobe s pomočjo logaritemske skale

Zaključki

Izvedene analize, zbir podatkov od leta 1961 do maja 2014, izdelava baze podatkov o pretokih, padavinah in temperaturah na porečju reke Bosne ter hidrološki model so samo hiter vpogled v kompleksen in pester proces poplav reke Bosne. Celostna analiza zahteva tudi zbiranje vrste drugih podatkov o škodi in vodarskih ureditvah, ki so bile izvedene v porečju v zadnjih stotih letih. Vsekakor verjetnost pojava presega 1.000-letno povratno dobo.

Hidrološki model reke Bosne zadovoljivo in uspešno simulira vodno bilanco vodotoka in daje osnovo za nadaljnji razvoj. Model je že sedaj uporaben za izdelavo napovedi poplavnih pretokov reke Bosne v spodnjem toku. Ker je na porečju Bosne prisoten velik lokalni orografski vpliv na padavine, bi bilo možno hidrološki model občutno izboljšati, če bi bilo na razpolago več podatkov o padavinah.

Vsaka katastrofalna poplava je enkraten pojav s posebnimi karakteristikami in razvojem. Poplave reke Bosne maja 2014 so posledica večdnevni neprekinjenih padavin, ki so povzročile izredno visoke specifične pretoke in koeficient odtoka blizu vrednosti 1. Pozitivna okoliščina je, da maksimalni pretoki posameznih pritokov niso sovpadali z največjimi pretoki v strugi reke Save, so pa podaljšali trajanje poplavnega vala. Dogodek zahteva podrobnejšo nadaljnjo analizo posameznih pritokov, še posebej analizo baze podatkov, zbrane pri upravljanju z zbiralnikom Modrac.

Literatura

- Abdulaj R., Miković N., Oskoruš D. in Vujnović T. (2014). Velike vode donjeg toka rijeke Save tijekom svibnja 2014. Hrvatska vodoprivreda 207, 14–16.
- DHMZ (2014). Stoljetna poplava na donjem toku rijeke Save. Državni hidrometeorološki zavod. http://klima.hr/razno/priopcenja/poplava_sava_2014.pdf (20. 5. 2014)
- ARSO, ULFGG in IzVRS (2014). Analiza poplavnega dogodka maja 2014 v Bosni in Hercegovini za porečje reke Bosne. Poročilo. http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Koncno%20porocilo_Analiza%20poplave%20maja%202014%20za%20porecje%20reke%20Bosne.pdf
- Anzeljc, D., Đurović, B. (2014). Analiza večdnevni padavin, ki so maja 2014 povzročile poplave na porečju Bosne. Poročilo IzVRS.
- Doherty, J. (2005). PEST, Model-Independent Parameter Estimation, User Manual, 5th Edition. Brisbane, Water Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (7. 4. 2013)
- Doherty, J. (2012). Addendum to the PEST Manual. Brisbane, Australia, Water Numerical Computing. <http://www.pesthomepage.org/Downloads.php> (2. 4. 2013)
- Kobold, M. (2011). Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Ujma 25, 48–56.
- Kupusović T. (2014). Poplave, akumulacije, hidroenergija i okoliš, sa izazovima klimatskih promjena, predstavitev, Doboj, Javna tribuna (15.7.2014)
- Lawrence, D., Haddeland, I., Langsholt, E. (2009). Calibration of HBV hydrological models using PEST parameter estimation. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Directorate: 44 p. <http://195.18.194.201/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Report%202009/report1-09.pdf> (2. 5. 2013)
- Mikoš, M., Vidmar, A., Šraj, M., Kobold, M., Sušnik, M., Uhan, J., Pezdič, J., Brilly, M. (2002). Hidrološke analize na plazu Stože pod Mangartom. Ujma 16, 326–334.
- Renko T. (2014). Rekordne količine kiša u Slavoniji i regiji. Hrvatska vodoprivreda 207, 12–13.
- RHMZ RS (2014). Meteorološki i hidrološki aspekti poplava u Republici Srpskoj, maj 2014 (Метеоролошки и хидролошки аспекти поплава у Републици Српској, мај 2014). Republički hidrometeorološki zavod RS. <http://www.rHMZRS.com/assets/images/meteorologija/> (19. 12. 2014)
- Seibert, J., Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrology and Earth System Sciences 16, 11, 3315–3325. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3315/2012/hess-16-3315-2012.pdf> (21. 3. 2013)
- Spreča d.d. Tuzla (2014). Javno preduzeće za vodoprivrednu djelatnost »Spreča« d.d. Tuzla. Podatki o pretokih, vodostajih in padavinah na lokaciji HE Modrac za obdobje februar–maj 2014.
- Zhulu, L. (2010). Getting Started with PEST. Athens, The University of Georgia: 28 p. <http://www.ndsu.edu/pubweb/~zhulin/pdf/teaching/starting%20pest.pdf> (3. 4. 2013)
- ZV in FHMZ (2012). Hidrološka studija površinskih voda Bosne i Hercegovine, Sliv rijeke Bosne. Zavod za vodoprivredu d.d. Sarajevo, Federalni Hidrometeorološki Zavod.

Prenos merilnih podatkov iz geomagnetnega observatorija po obstoječem komunikacijskem omrežju

Damir Deželjin¹, Rudi Čop¹

Povzetek

Za večino današnjih geofizikalnih meritev je osnovnega pomena daljinski prenos merilnih podatkov in njihova računalniška obdelava. Zato smo že v času priprav na gradnjo geomagnetnega observatorija na ozemlju Slovenije začeli tudi z razvojem digitalnega sistema za prenos merilnih podatkov, z razvojem telemetrije. Po predhodnih analizah smo pristopili k samostojni gradnji zapisovalnika podatkov (data logger), ki je osrednja enota v telemetriji. Z njo se merilni podatki zajemajo, delno obdelujejo in pripravljajo za prenos do strežnika. Zgradili smo ga iz standardne strojne opreme, ki zagotavlja delovanje zapisovalnika podatkov tudi v težjih pogojih, njegovo enostavno nadgradnjo in nižjo porabo električne energije. Za sam prenos merilnih podatkov od zapisovalnika podatkov do strežnika izkoriščamo obstoječe omrežje za mobilno telefonijo, ki omogoča tudi paketni prenos podatkov.

Ključne besede: merilni podatki, zapisovalnik podatkov, omrežje GSM

Key words: measuring data, data logger, GSM network

Uvod

Za postavitev sodobnega geomagnetnega observatorija obstajajo priporočila, vendar so vsa osredotočena na merilne instrumente, meritve in obdelavo merilnih podatkov (Wienert, 1970; Jankowski & Sucksdorff, 1996). Zelo skopa pa so navodila glede zajemanja in prenosa merilnih podatkov ter zagotavljanja varnega in zanesljivega obratovanja. Obratovanje geomagnetnega observatorija, ki ni nadzorovan s stalno posadko na njem, ogrožajo atmosferske prenapetosti, vandalizem in gozdni požari (Čop et al. 2014). Zato je zanesljiva in robustna telemetrija ne samo potrebna za prenos merilnih podatkov temveč tudi za daljinski nadzor delovanja merilnih instrumentov in celotnega observatorija z namenom, da se zagotovi zanesljiva in neprekinjena registracija vrednosti komponent zemeljskega magnetnega polja. Njihove srednje vrednosti med drugim omogočajo redukcijo merilnih vrednosti izmerjenih na drugih mestih po ozemlju, ki ga tak observatorij pokriva, in s tem omogočajo medsebojne primerjave merilnih podatkov in nadzor njihovih sprememb v času.

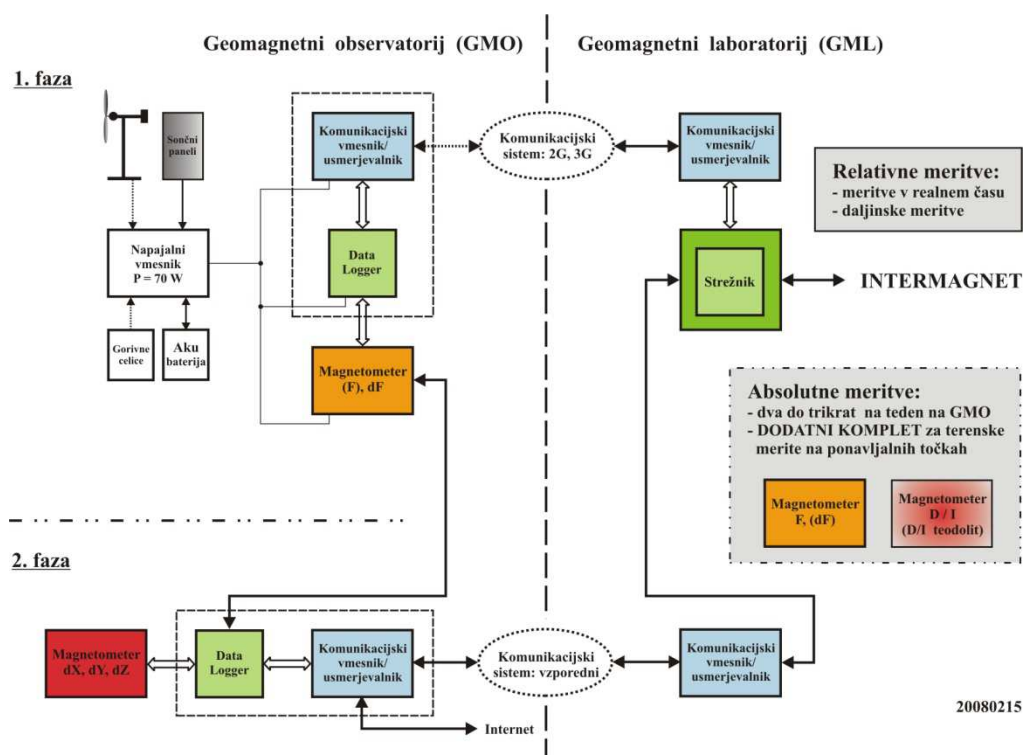
Tak sodobni digitalni geomagnetni observatorij je običajno znanstveno-raziskovalno središče, ki je vključeno v mednarodno informacijsko mrežo za izmenjavo merilnih podatkov. Pogoje za vključitev v tako mrežo postavljajo mednarodne organizacije, ki jo nadzorujejo. Prav tako te mednarodne organizacije stalno nadzorujejo delovanje v mrežo vključenega geomagnetnega observatorija, organizirajo redno izobraževanje osebja, ki observatorij vzdržuje, in organizirajo redno preverjanje merilne opreme (Sumaruk et al, 2014). Taka globalna informacijska mreža za izmenjavo minutnih merilnih podatkov o stanju zemeljskega magnetnega polja v skoraj realnem času je INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), ki je bil ustanovljen leta 1991 pod okriljem mednarodne organizacije IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) (Love, 2008; INTERMAGNET, 2012). V tej mreži se za prenos in

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovelje/Siccirole

izmenjavo merilnih podatkov najbolj pogosto uporablja omrežje interneta. V kolikor pa to ni mogoče, se podatki posredujejo preko geostacionarnih telekomunikacijskih satelitov.

Načrtovanje telemetrije

Izhodiščni parametri pri razvoju telemetrije so bili: zanesljivost prenosa merilnih podatkov in stroški tega prenosa, cena in dosegljivost opreme ter stroški vzdrževanja in možnost nadaljnjega razvoja sistema.



Slika 1: Blokovna shema sistema za zajemanje, prenos, shranjevanje in obdelavo merilnih podatkov iz digitalnega geomagnetnega observatorija

Ocenjena je bila količina merilnih podatkov v časovni enoti in dodatno so bili določeni še naslednji pogoji (Kraker et al, 2008), ki so se nanašali predvsem na zapisovalnik podatkov (data logger):

- potreben je vmesnik RS232 za zajem merilnih podatkov iz magnetometra in vmesnik Ethernet za komunikacijo proti komunikacijskemu usmerjevalniku;
- podatki se lahko v zapisovalniku podatkov združujejo in pošiljajo s časovnim zamikom;
- zahtevana je nizka poraba energije za zagotavljanje avtonomnosti ter sposobnost delovanja v širšem temperaturnem območju zaradi delovanja tudi na prostem;
- podatki se pošiljajo preko brezžičnih sistemov za digitalno komunikacijo do strežnika.

Zapisovalnik podatkov na geomagnetnem observatoriju ne omogoča le zapisovanje merilnih podatkov, temveč omogoča neodvisen dostop do njih in nadzor nad merilnimi instrumenti. Zato mora tak zapisovalnik podatkov poleg komunikacijskih vmesnikov in zunanjih pomnilnikov vsebovati tudi računalnik industrijskega tipa, ki zmore z ustrezno

programsko opremo: a) zanesljivo zajemati merilne podatke iz magnetometra, b) sinhronizirati čas, c) skladiščiti podatke, d) omogočiti neodvisni dostop do njih in d) zanesljivo dostaviti podatke do strežnika. Za zapisovalnik podatkov so bile v nadaljevanju projekta predvidene še dodatne razširitve zaradi povečane varnosti delovanja same telemetrije in celotnega geomagnetnega observatorija (Slika 1).

Zapisovalnik podatkov je osrednja enota telemetrije, kjer se zajemajo in oddajajo podatki različnih bitnih pretokov. Zato so bile že v začetku njegovega načrtovanja pričakovane daljše čakalne vrste, zaradi česar mora imeti taka enota dovolj velik delovni spomin (RAM). Za stalni zunanji pomnilnik pa je bila izbrana pomnilniška kartica tipa Compact Flash (CF), ki ustreza industrijskim standardom in deluje tudi v razširjenem temperaturnem območju. Po daljšem preverjanju je bil izbran računalnik za vgradnjo (Embedded PC), na katerega se lahko namesti operacijski sistem Linux kot tudi za vgradni računalnik prilagojen operacijski sistem Windows (microATX, 2004; PC Engines, 2010).

Na osnovi predhodnih preizkušenj je bil izbran komunikacijski usmerjevalnik Digi ConnectPort WAN VPN (ConnectPort, 2013), ki je zadovoljil zahtevo po hitrem in varnem povezovanju naprav znotraj geomagnetnega observatorija in lokacij po mobilnem omrežju. Zaradi modularne zasnove ga je mogoče enostavno nadgraditi za povezavo v različne oblike mobilnih omrežij. Varnost prenosa podatkov zagotavljajo vgrajeni tuneli VPN (Virtual Private Network) z različno obliko zaščite prenesenih podatkov (Virtual, 2001). Na njegov vhod USB se lahko priključi tudi video kamera za video nadzor nad geomagnetnim observatorijem.

Zaradi zmanjšanja vpliva atmosferskih prenapetosti in drugih električnih motenj so bile za premagovanje daljših razdalj znotraj geomagnetnega observatorija izbrane optične povezave. Vse preostale žične povezave so bile zaradi zmanjšanja vpliva strel naknadno skrajšane na najmanjšo možno mero (Čop et al. 2014).

Sistem za zajemanje, prenos, obdelavo in shranjevanje merilnih podatkov za stalno spremljanje sprememb zemeljskega magnetnega polja, za uspešno pripravo na absolutne meritve in za daljinski nadzor instrumentov na observatoriju (Čop & Deželjin, 2013; Čop et al, 2014) je začel testno delovati aprila 2011. V letu 2012 se je zapisovalniku podatkov postopoma povečevala zanesljivost delovanja, kar vključuje tudi stalen nadzor nad komunikacijo ter poenostavljen dostop do merilnih podatkov. Na strežniku se je izboljšala končna obdelava merilnih podatkov in njihov grafični prikaz.

V letu 2014 se je sistem telemetrije postopoma dopolnjeval v načinu obdelave merilnih podatkov. Ti podatki so oblikovani tudi v formatu za pošiljanje v skoraj realnem času v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET, v mrežo za izmenjavo minutnih merilnih podatkov iz digitalnih geomagnetnih observatorijev (INTERMAGNET, 2012).

Zapisovalnik podatkov

Tekom razvoja smo zapisovalnik podatkov prilagodili za beleženje merilnih rezultatov iz različnih vrst magnetometrov z različnimi hitrostmi vzorčenja, različnega načina dostopa do merilnih podatkov in različnih hitrosti njihovega prenosa. Postal je bolj univerzalen in s tem tudi preprosteje zamenljiv v primeru njegove okvare. Znižalo se je število teh enot v rezervi in skrajšali smo čas popravila na observatoriju v primeru odpovedi katerega od zapisovalnikov podatkov.

Zapisovalnik podatkov je prilagojen za zajemanje, obdelavo in prenos merilnih podatkov iz magnetometrov do strežnika geomagnetnega observatorija. Posamezna enota mora prenesti informacijsko vsebino v kodi ASCII do 7 MB na dan. Ob upoštevanju, da je mogoče tako obliko informacije stisniti na velikost, ki je do petkrat manjša od prvotne, je

prenesena količina podatkov do 50 MB na mesec. Taka ocena velja tudi v primeru najbolj zahtevnega prenosa podatkov v binarni obliki, ki se ne dajo stisniti toliko kot kodirani podatki. Dodatni natančnejši izračuni in pa testiranja so pokazala, da se lahko količino prenesenih podatkov na mesečnem nivoju omeji na okoli 30 MB. Tak prenos merilnih podatkov iz magnetometrov na observatoriju je zadovoljiv, če je na observatoriju dostopen eden od standardnih nizko cenovnih načinov paketnega prenosa podatkov, kot npr. GSM (Global System for Mobile Communications) 2G/3G (Generation) ali ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line).

V zapisovalnik podatkov vgrajeni vgradni računalnik poganja operacijski sistem Linux. Slednji je nameščen na vgrajenem pomnilniku tipa CF. Operacijski sistem je prilagojen možnosti nenadzorovanega ponovnega zagona sistema zaradi izpada napajanja ali zaradi odklopa brez predhodnega ustavljanja (shut-down procedure). Zato je operacijski sistem naložen na zunanjem pomnilniku v bralnem načinu (read-only). To tudi zmanjšuje obrabo, kakor tudi zmanjšuje možnost okvare kartice CF. Do take okvare pride v primeru izpada električnega napajanja med pisanjem na kartico CF. Ker pa je bilo potrebno na zunanji pomnilnik začasno shranjevati tudi izmerjene podatke, se je pomnilniška kartica CF v zapisovalniku podatkov izkazala kot njen najmanj zanesljiv sestavni del. Zato smo tisti del standardne pomnilniške kartice CF, ki smo jo uporabljali tudi kot dinamični pomnilnik, zamenjali s ključem USB.

Zunanji pomnilnik na ključu USB uporabljamo kot bralni pomnilnik (read-only) obsežnega datotečnega zapisa. Ta rešitev je bila uporabljena zaradi njegove nizke cene in enostavnosti prenosa podatkov. Izkazal se je kot zanesljivejši zunanji pomnilnik za začasni zapis merilnih podatkov odpredhodno uporabljene pomnilniške kartice CF.

Kljub skrbno načrtovani arhitekturi telemetrije še vedno obstaja možnost, da pride do daljše prekinitve prenosa podatkov. V tem primeru upravljavec observatorija uporabi kar ključek USB iz zapisovalnika podatkov za prenos merilnih podatkov na njegov računalnik. Na enak način lahko pride do merilnih podatkov o spremembi zemeljskega magnetnega polja na samem observatoriju v času absolutnih meritev. Da pa ne bi nastala vrzel v datoteki z merilnimi podatki zveznih meritev (variometric data) zaradi izklopa celotnega zapisovalnika podatkov ali zaradi daljšega izklopa njegovega ključka USB, je predvidena možnost vzporedne vezave več zapisovalnikov podatkov na isti instrument.

Prenos merilnih podatkov po omrežju GSM

Za prenos merilnih podatkov od geomagnetnega observatorija do strežnika se uporablja brezžični paketni prenos podatkov. Cenovno ugodna tehnologija omogoča tak prenos, ki ponuja pri manjših stroških za prenos podatkov tudi povečano varnost pred atmosferskimi prenapetostmi. Je pa tak prenos omejen tako po hitrosti kot tudi po količini prenesenih informacij. Namenjen je predvsem poslovnim uporabnikom za prenos podatkov iz oddaljenih lokacij v realnem času (Round, 2010). Izkorišča že obstoječe brezžično omrežje ponudnika storitve za digitalno komunikacijo. Pri uporabi takega načina prenosa merilnih podatkov smo v letu 2014 začela registrirati tudi vrednost signala RSSI (Received Signal Strength Indication, RX level) (Nicholson, 2012) na mikrovalovni anteni modema za brezžično digitalno komunikacijo, ki je vgrajen v usmerjevalnik (ConnectPort, 2013).

Za prenos digitalnih podatkov po brezžičnem omrežju se uporablja nosilni signal izjemno visoke frekvence UHF (Ultra High Frequency) od 0,3 GHz do do 3 GHz in valovne dolžine od 1 m do 1 dm (Radio, 2014). Po standardu IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) je to frekvenčno področje mikrovalov in sicer dveh območij radarskih valov: L (1 GHz – 2 GHz) in S (2 GHz – 4 GHz). Ti se na zemeljski površini

uporabljajo v mobilni telefoniji, za oddajanje digitalnega radia, v brezžičnih računalniških omrežjih in za nadzorne sisteme v pomorstvu in letalstvu.

Ker se mikrovalovi v prostoru širijo premočrtno, je njihov doseg odvisen od vremenskih razmer vzdolž poti njihovega širjenja. Hitrost njihovega širjenja je odvisna od temperature in vlažnosti zraka ter zračnega tlaka (Cook, 1986). Na širjenje mikrovalov v troposferi pa ne vplivajo samo lastnosti zraka in padavine, temveč tudi neposredno sevanje Sonca: visoko energetske žarke X in visoko energetske elementarne delce ali kozmičnih žarkov. Pri uporabi mikrovalov za neposredno komunikacijo med oddajno in sprejemno anteno so najpomembnejši neposredni valovi, vendar so pri tem pomembni tudi odbiti valovi. Pri odboju na kopnem se ti valovi razpršujejo, zato doseže sprejemno anteno le manjši del te odbite energije. Odbiti valovi tudi potujejo po daljši poti do sprejemne antene od tistih neposrednih in če je ta pot lihi mnogokratnih polovice valovne dolžine, se vala med seboj dušita. Padavine mikrovalove razpršujejo in jih v dobršni meri tudi vpijajo. Drobne kaplje vode, delci prahu in peska, toča, sneg in ledeni kristali v zraku zmanjšujejo energijo mikrovalov na njihovi poti tem bolj, čim višja je njihova frekvenca oziroma krajša valovna dolžina.

Zaključek

Primernejša rešitev za zanesljivejše in hitrejše prenašanje merilnih podatkov ter hitrejši in zanesljivejši dostop do zapisovalnika podatkov bi bil priključek observatorija na javno komunikacijsko omrežje preko optičnega kabla. Pri tem bi bila ohranjena zahtevana galvanska ločitev zaradi prenapetostne zaščite, bi pa optična povezava omogočila priklop dodatnih magnetometrov in ostalih potrebnih merilnih instrumentov. S priklopom nadzornih video kamer, kar bi omogočila optična povezava z javnim komunikacijskim omrežjem, bi bil lažji daljinski nadzor observatorija in njegovo daljinsko vzdrževanje.

Z nadaljnjimi sistematičnimi meritvami jakosti signala RSSI na mikrovalovni anteni obstoječega modema na observatoriju za brezžični paketni prenos podatkov bi lahko dokazali, da na širjenje mikrovalov v troposferi vplivajo ne samo lastnost zraka in padavine, temveč tudi neposredno sevanje Sonca.

Literatura

- ConnectPort WAN Family; Multifunction 3G Wireless WAN Routers. (2013). Digi International.
- Cook, P. N. (1986). *Microwave Principles and Systems*. New Jersey (US): Prentice Hall.
- Čop, R. Deželjin, D. (2012). Prvo leto delovanja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Zbornik predavanj. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 57-62.
- Čop, R. Deželjin, D. (2013). Transmission of Measuring Data from the Sinji vrh Geomagnetic Observatory. Proceeding of the XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing. Edited by: Pavel Hejda, Arnaud Chulliat, Manuel Catalan. Extended Abstract Volume. San Fernadno; Cadiz (Spain): Real Instituto y Observatorio de la Armada, June 4th – 14 th, 2012. Boletion Roa, 3 (13), 160-164.
- Čop, R. Milev, G. Deželjin, D. Kosmač, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 3, 135-141.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual. (2012). Version 4.6. Edited by Benoît St-Louis. Edinburgh (UK): British Geological Survey.
- Jankowski, J., Sucksdorff, C. (1996). *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. International Association of Geomagnetism and Aeronomy.

- Kraker, P. Štern, A. Bešter, J. Čop, R. (2008). Telemetric System for Geomagnetic Field Monitoring. International scientific conference on Magnetism – Geomagnetism – Biomagnetism MGB – 2008, Sežana 7 – 8 November 2008. Conference Proceedings - MGB 2008, Sežana: Higher Education Centre Sežana; Laboratory for Geomagnetism and Aeronomy International Conference on Magnetism, Geomagnetism and Biomagnetism, 65-78.
- Love, J. J. (2008). Magnetic monitoring of Earth and space. *Physics Today Online*, 61 (2), 31-37.
- microATX Motherboard Interface Specification. (2004). Version 1.2. Intel.
- Nicholson, M. (2012). DIGI Connect Mobile Status Management. Digi International Part Number: 40002846_A. Minnetonka (US): Digi International.
- PC Engines; ALIX.3c3/alix.3d3 system boards. (2010). Glattbrugg(CH): PC Engines.
- Radio spectrum. (2014). Wikipedia the Free Encyclopedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum#IEEE (13.12.2014)
- Round the clock control of your fleet. Bransys allows you to successfully manage your business with real-time data. (2010). Application Area: GPS locating and tracking. Bransys VIP Operator – Member of Telekom Austria Group M2M.
- Sumaruk, P. Yu. Starostenko, I. V. Legostaeva V. O. (2014). Geomagnetic observatories of Ukraine in the Global Network INTERMAGNET, *Russ. J. Earth. Sci.*, X, 12 (2), ES2002, doi:10.2205/2011ES000506.
- Virtual Private Networking: An Overview. (2001). Microsoft. <http://technet.microsoft.com/en-us/library/bb742566.aspx> (13.12. 2014)
- Wienert, K.A. (1970). Notes on geomagnetic observatory and survey practice. Earth sciences. Brussels: UNESCO.

Erozija arheološkega najdišča v Dabarski pečini pri Sanskem mostu ob poplavi maja 2014

Andrej Mihevc^{*}, Jasminko Mulaomerović^{**}

Povzetek

V vhodnem delu Dabarske pečine, ki je občasni visokovodni izvir reke Dabar, je visoka voda sredi maja 2014 močno erodirala arheološke plasti iz mlajšega eneolitika. Datacija oglja iz ognjišča v spodnjem delu erodiranega profila z metodo ¹⁴C je pokazala starost 4010 ± 30 BP. Do erozije arheoloških plasti v jami je prihajalo že v preteklosti, vendar pa je tokratna visoka voda popolnoma odstranila znaten del arheoloških plasti. To nakazuje bodisi na izjemnost te poplave ali pa spremembe v količini in režimu kraških izvirov Dabra.

Ključne besede: Dabarska pečina, arheologija, vučedolska kultura, datacija, poplava.

Key words: cave, Dabarska pečina, archaeology, Vučedol culture, datation, flood.

Uvod

Nad južnim Jadranom je 13. maja 2014 nastalo ciklonsko območje, ki se je nato s svojim središčem počasi pomaknilo preko proti vzhodu. Na območju osrednjega Balkana, nad Bosno in Srbijo se je ciklon zadrževal tri dni, oslabel je šele v soboto 17. Maja (Agencija, 2014). Velike količine padavin je bila deležna SZ Bosna (Drvar 276 mm, Mrakovica 313 mm, Doboj 270 mm) (RHMZRS, 2014). V treh dneh je padlo 200 – 300 mm padavin, kar je 2-3 krat več kot znaša povprečje za maj in skoraj tretjina poprečnih letnih padavin v Sanskem Mostu (1023 mm). To je povzročilo obsežne poplave predvsem na panonski strani dinarske gorske pregrade. Visoke vodostaje so imeli tudi kraški izviri Dabra.

Med ekskurzijo po dinarskem krasu smo hoteli s študenti geografije 24. maja 2014 obiskati Dabarsko pečino. Presenetil nas je še vedno visok vodostaj vode, ki je tekla iz jame, zato nas je le nekaj prebredlo v jamo. V jami smo videli, da je ob poplavi prišlo do močne erozije arheoloških plasti, ki pokrivajo velik del vhodnega dela jame.

Obvestili smo speleologe v Sarajevu, ki so v naslednjih dneh z namenom zaščite razkritih artefaktov in nahajališča obiskali jamo. Ob tej priložnosti so iz spodnjega dela profila vzeli vzorec oglja za datacijo najstarejše arheološke plasti.

Dabarska pečina in izjemna visoka voda maja 2014

Dabarska pečina leži nad izvirom reke Dabar, levega pritoka Sane, okrog 6 km JZ od Sanskega mosta. Gladina vode v izviru, ki leži pod navpičnim odsekom v boku doline, je bil prvotno okrog 3 m nižje kot vhod v Dabarsko pečino. Pred njim so v prejšnjem stoletju zgradili okrog 2 m visok jez za vodno zajetje in poganjanje danes opuščenega mlina in za toliko dvignili gladino vode v izviru.

^{*} Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija; Mihevc@zrc-sazu.si

^{**} Centar za krš i speleologiju, Branilaca Sarajeva 30, 71000 BiH; Jasminko.Mulaomerovic@bhteleco

Dabarska pečina je dolga 630 m (Pegan et al., 2013) in je občasni visokovodni izvir. Vhod v jamo je okrog 10 m širok in 15 m visok. Za vhodom se jama razširi v do 20 m široko in 70 m dolgo dvorano. Ta zavije proti JZ, se zoži in razveji v več manjših rovov. Ob visokem vodostaju teče voda iz jame, ob nizkem vodostaju je v jami le nekaj sifonskih jezer in jezer ujete vode, voda pa izvira v strugi pred jamo.



Slika 1: Pogled iz Dabarske pečine proti vhodu. Ob desni steni rova so nad prodnimi sipinami vidne temne antropogene plasti sedimenta. Del teh je poplava v maju 2014 že odnesla.

V notranjih delih jame in ob severni in vzhodni steni vhodne dvorane kjer večkrat teče voda pokrivajo tla podorni bloki in slabo zaobljeni grušč in prod. V zahodnem delu vhodne dvorane pa so tla 1-2 m višja. Tu je preko proda odložen do 1 m debel antropogeni sloj. Sestavljajo ga plasti iz žgaline in pepela pomešanega z ogljem in odlomki prazgodovinske keramike, živalskih kosti in kremenovimi odbitki. Ob občasnih obiskih v zadnjih letih smo opazili, da je ob višjih vodostajih voda nekoliko erodirala te arheološke plasti, zato smo lahko ob njihovem robu našli kose prazgodovinske keramike. Po značilnih okraskih na lončenini sklepamo, da ves kulturni sloj pripada kompleksu eneolitske Vučedolske kulture. Novejše keramike pa v jami nismo opazili. Vučedolska keramika je opisana tudi v le 5 km oddaljeni jami Hrustovači (Korošec, 1946; Benac, 1947).

Izjemno deževje med 14-17. majem 2014 in poplava, ki je sledila je v vhodnem delu jame dvignil gladino vode za okrog 2,5 m, iz jame pa je po oceni teklo okrog $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Voda je tekla tudi preko večjega dela arheološko pomembnih tal jame. Na več deset kvadratnih metrov veliki površini je erodirala in odnesla drobnejše delce iz plasti, na prodni podlagi pa so ostali težji kosi keramike ali kosti. Ob robu erodirane kulturne plasti je erozija razgalila arheološke plasti v več metrih dolgih in do 60 cm debelih profilih. V vseh profilih je ostra ločnica med spodnjimi slabo zaobljenim prodom in gruščem ter

arheološkimi plastmi. V njih prevladujejo sloji sivkastega pepela in rdečkaste žgaline pomešane z ogljem in večjimi delci, kamni, kosi razbitih keramičnih posod in kostmi.



Slika 2: Profil erodirane antropogene plasti po poplavi maja 2014. Okrog 25 cm debele arheološke plasti sestavlja predvsem pepel, žgalina, posamezni kamni in kosi lončenine. Plasti so odložene neposredno na svetlem, slabo zaobljenem apnenčastem produ.

Datacija arheološke plasti

V robu erodiranih arheoloških tal se je v plasti z ognjišča, ki je ležalo na produ v dnu profila ohranilo med pepelom več kosov oglja. Za datacijo smo vzeli kos oglja, ki je ležal v plasti pepela tik nad prodno podlago.

Oglje smo posušili ter poslali na datacijo v Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory (vzorec Beta-390179). Datacija z metodo ^{14}C je pokazala konvencionalno radiokarbosko starost 4010 ± 30 BP.

Razprava

Nastanek in obstoj arheološkega sloja v vhodnem delu Dabarske pečine in njegovo erodiranje v sedanjosti nam kaže na očitno spremembo v količini režimu pretakanja vode v jami.

Prvotno je voda tekla po celi širini vhodnega dela jame, o čemer pričajo prodniki. Kulturna plast, ki je odložena neposredno preko njih je lahko nastala potem, ko je rov prenehalo poplavlјati, saj bi poplave odvrnile ljudi in sproti odnesle antropogene sedimente. Kdaj v preteklosti to zgodilo ni mogoče reči, datacija oglja in arheoloških

predmetov govori le o času nastajanja arheološke plasti, poplave so lahko prenehale že veliko prej.

Prav tako ni mogoče natančneje reči, kdaj so se spremenile hidrološke razmere in so se poplave povrnila, tako da je začelo erodirati arheološke plasti. Tako Benac (1964) le omeni eneolit vučedolske kulture v bolj suhem delu vhodne dvorane, Marijanović (1988) pa meni, da je bila jama le občasno poseljena. To bi lahko pomenilo, da ob času njunih obiskov znaki erozije niso bili zelo izraziti.



Slika 3: Del lončene posode okrašen z ornamenti značilnimi za vučedolsko kulturo.

Ko so v drugi polovici prejšnjega stoletja pred stalnim izvirom Dabra zgradili jez je to verjetno dvignilo vodostaj nizke in srednje vode tudi v Dabarski pečini, vendar to verjetno ni bistveno vplivalo na erozijo. Erozijski sedimenti so posledica velikega pretoka in znatnega dviga vode v podzemlju po močnih padavinah, na tega pa skromen poseg pri izviro najbrž ni vplival, saj ni zmanjšal pretoka glavnega izvira.

Erozija arheološkega najdišča ob visokih pretokih se je verjetno pojavljala že nekaj desetletij ali stoletij, vendar pa je bila zadnja poplava in z njo povezana erozija izjemen hidrološki dogodek, saj je popolnoma odstranila velik del štiri tisoč let starih arheoloških plasti.

Literature

- Agencija republike Slovenije za okolje (2014). <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/natural-hazards/>.
- Benac, A. (1964). Studije o kamenom i bakarnom dobu sjeverozapadnog Balkana. Sarajevo, 174 p.

- Benac, A. (1947). Završna istraživanja u pećini Hrustovači. Glasnik Zem. Muzeja 3, Sarajevo, 5-41.
- Korošec, J. (1946). Pećina Hrustovača, novi lokalitet slavonske kulture. Glasnik državnog muzeja u Sarajevu. Nova serija 1946, Društvene nauke 1, Sarajevo, 7-37.
- Marijanović, B., (1988). Dabar pećina, Donji Dabar – Filipovići, Sanski Most.- V: Čović, B. (Ur.), *Arheološki leksikon Bosne i Hercegovine Tom 2. Arheološka nalazišta Regije 1-13*. Sarajevo: Zemaljski muzej Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 143.
- Pegan, G., G. Petković, M. Vidović, (2013). Dabarska pećina. Arhiv Speleološkog društva Ponir Banja Luka.
- RHMZRS (2014). Maj 2014. [http://www.rhmzrs.com/assets/images/meteorologija/sinopticka_analiza/maj 2014.pdf](http://www.rhmzrs.com/assets/images/meteorologija/sinopticka_analiza/maj%202014.pdf). (Pridobljeno 20.12.2014)