

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko <u>http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/</u>

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2017

zbornik del

23. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko Ljubljana, 25. januar 2018

UREDNIŠKI ODBOR

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

RECENZIJA

Bogomir Celarc Jože Rakovec Miha Pavšek Nejc Bezak Klemen Medved Mitja Brilly Benedikt Strajnar Stanka Šebela Tamara Jesenko Polona Vreča Martina Čarman Sandi Berk Polona Pavlovčič Prešeren Miran Kuhar

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 (23 ; 2018 ; Ljubljana) Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018 : zbornik del / 23. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 25. januar 2018 ; [organizator srečanja Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar ... et al.]. - Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2018

ISBN 978-961-6884-51-8 1. Kuhar, Miran 2. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana) 293138688

Predgovor

V imenu vseh članov SZGG se moram zahvaliti tistim, ki so prispevali denarna sredstva za letošnje tradicionalno srečanje. Največja zahvala gre Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Med drugim je pod njenim okriljem izšel tudi ta zbornik, kjer so zbrani prispevki s šestih od osmih področij, ki so združeni v IUGG (angl. International Union of Geodesy and Geophysics).

V letu 2017 so bili nekateri pomembnejši dogodki iz geodezije in geofizike, ki bodo vplivali na nadaljnji razvoj znanosti in strok, vključene v IUGG. IUGG je bila ustanovljena na sestanku Mednarodnega sveta za raziskave (International Research Council) v Bruslju leta 1919. V letu 2017 so se začele priprave na proslave ob stoletnici ustanovite IUGG. Svečanost na sedežu mednarodne organizacije UNESCO v Parizu bo 29. julija 2019. http://www.iugg.org/publications/ejournals/IUGGej1701.pdf

Med 30. 5. in 2. 6. 2017 je bil v Ljubljani mednarodno odmeven Četrti svetovni forum o zemeljskih udorih (4th World Landslide Forum) z več kot 600 udeleženci iz 49 držav, s predstavniki petih mednarodnih organizacij in štirih organizacij Združenih narodov. Namenjen je bil vpeljavi sistemov nadzora in napovedi zemeljskih udorov za zmanjšanje nevarnosti. <u>https://www.wlf4.org/</u>

Navkljub upoštevanju protokola iz Montreala, sprejetega pred tridesetimi leti za zaščito ozonske plasti v ozračju, se je ozonska luknja v zadnjih letih začela povečevati. Po najnovejših ugotovitvah je temu kriva kemikalija, ki je ni na seznamu tega protokola, oziroma je bil njen vpliv podcenjen. <u>https://www.atmos-chem-phys.net/17/11929/2017/</u> acp-17-11929-2017.pdf

USGS (angl. United States Geological Survey) je v preteklem letu s podporo mednarodnih organizacij IAGA (angl. International Association of Geomagnetism and Aeronomy) in INTERMAGNET (angl. International Real-time magnetic Observatory Network) dosegel, da se v fiskalnem letu 2018 ne bo ukinil njihov razvojni program na področju geomagnetizma. Ukinitev programa ne bi upočasnilo le razvoja na mednarodni ravni, temveč bi imela tehnološke in ekonomsko – socialne posledice tudi v ZDA. https://geohazards.usgs.gov/ pipermail/geomag-data/2017-June/000026.html

Letošnje srečanje SZGG se bo začelo z izvolitvijo novega predsedstva ter nadaljevalo s pregledom del posameznih sekcij in predstavitvijo referatov. Želim vam prijetno druženje, v naslednjem obdobju pa veliko uspehov in zadovoljstva pri delu.

predsednik SZGG ddr. Rudi Čop

Vsebina

Predgovor
Stanka Šebela - Geološke značilnosti erozijskih oken na primeru Škocjanskih jam7
Urban Jakop, Martina Kobold, Mojca Šraj - Hidrološka analiza za porečje Savinje13
Matic Šavli, Nedjeljka Žagar - ADM-Aeolus: zgodovinski korak v merjenju vetra iz vesolja in priložnost za izboljšanje napovedi vremena25
Marija Zlata Božnar, Primož Mlakar, Boštjan Grašič, Franci Gabrovšek - Avtomatske meritve vetra45
Polona Pavlovčič Prešeren, Miran Kuhar - Prve gravimetrične meritve v okolici Cerkniškega jezera
Rudi Čop - Elektromagnetni valovi daljši od premera Zemlje63
Ina Cecić, Dušan Nečak, Marko Berus - Ob 101. obletnici brežiškega potresa73
Gregor Rajh, Barbara Šket Motnikar, Mladen Živčić, Polona Zupančič, Andrej Gosar - Preliminarna analiza potresne aktivnosti po prelomnih potresnih izvorih v Sloveniji85
Klemen Ritlop, Niko Fabiani, Katja Oven, Mihaela Triglav - Čekada - Prvi dve leti delovanja kombinirane mreže 0. reda103
Katarina Zabret, Mojca Šraj - Prostorska spremenljivost prepuščenih padavin113
Boštjan Paradiž, Jure Cedilnik, Heda Kočevar, Irena Malešič, Janja Turšič - Projekt Sinica- nadgradnja sistema za ocenjevanje kakovosti zraka in ugotavljanje vzrokov čezmernih obremenitev v Sloveniji
Andrej Mihevc - Temperaturne razmere v Potočki zijalki in njihov vpliv na jamske sedimentne strukture
Tilen Urbančič, Božo Koler, Bojan Stopar, Mojca Kosmatin Fras - Vpliv števila točk aerolaserskega skeniranja na izračun koordinat vrha stožčaste tarče
Mihaela Triglav Čekada - Ledeniki na kartah vojaške izmere Avstroogrske monarhije 153
Gregor Stržinar, Gregor Skok - Optimizacija algoritmov radarske detekcije toče za območje Slovenije* (povzetek)

Geološke značilnosti kraških oken na primeru Škocjanskih jam

Stanka Šebela^{*}

Povzetek

Podrobno tektonsko-litološko kartiranje udornic Velike in Male doline v Škocjanskih jamah v merilu 1:500 je pokazalo novo kraško-geološko značilnost, to je kraško okno ali stratigrafsko erozijsko okno, kjer geološko starejši apnenci (Sežanska formacija, $K_2^{2\cdot4}$) izdanjajo pod geološko mlajšimi (Lipiška formacija, $K_2^{4\cdot5}$) apnenci zaradi oblikovanja udornic. Pri tem ne gre za tektonski okni. Vsako kraško okno zajema površino okrog 15.500 m². V skladu s terenskim geološkim kartiranjem Velike in Male doline v Škocjanskih jamah je potrebno dopolniti tudi površinske geološke karte.

Ključne besede: geološko kartiranje, kraško okno, Škocjanske jame, Slovenija.

Keywords: geological mapping, karst fenster, Škocjan Caves, Slovenia.

Uvod

Škocjanske jame so edina kraška jama v Slovenije, ki je vključena v UNESCO svetovno dediščino od leta 1986. Dolžina jame je 6200 m in globina 223 m.

Že Valvasor (1689) je opisoval ponor Reke in njen podzemeljski tok. Do 146 m globok in 2600 m dolg podzemeljski kanjon Reke je bil izjemen speleološki izziv številnim raziskovalcem. Za začetek sodobnega turizma v Škocjanskih jamah štejemo 1. januar 1819, ko so uredili stopnice v dno Velike doline (Debevc in drugi, 2002), sicer pa so prvi dokumentirani obiski že iz leta 1750.

Reka, ki izvira v Italiji kot Timavo je bila že med obema svetovnima vojnama predmet meteoroloških (Vercelli, 1931), speleoloških, hidroloških, geomorfoloških (Boegan, 1938) in geodetskih raziskav (Soler, 1934). Gospodarič je predstavil osnovne geološke, hidrološke in meteorološke značilnosti Škocjanskih jam (Gospodarič, 1965). Speleogeneza Škocjanskih jam je bila v letu 1983 dopolnjena s strukturno geološko in litološko karto površja nad Škocjanskimi jamami (Gospodarič, 1983). Prva geološka karta rovov Škocjanskih jam (brez Hankejevega kanala) izvira iz leta 1984 (Gospodarič, 1984). V letu 1989 (Habič in drugi, 1989) je bil objavljen pregledni članek o speleoloških značilnostih Škocjanskih jam. Prva strukturno geološka karta Hankejevega kanala je bila objavljena v letu 1992 (Kranjc in drugi, 1992). Litologija zakraselega površja nad Škocjanskimi jamami je predstavljena na geološki karti v merilu 1:50.000 (Jurkovšek in drugi, 1996).

Na primeru udornice Velike doline je Knez (1996, 1998) proučeval vpliv lezik na razvoj inicialnih rovov, Mihevc (2001) pa je nosilne lezike iz Velike doline povezal z brezstropimi jamami na površju. Raziskave razvoja rovov Škocjanskih jam in kraškega reliefa so prikazane v delu avtorjev Knez in Slabe (1999).

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

Podatki terenskega strukturno-geološkega kartiranja (1:500) jamskih rovov, ki so bili opravljeni v letih 1991-1992 (Hankejev kanal) in med leti 1997-2007 (Tiha in Šumeča jama), so bili analizirani in predstavljeni na strukturno-geološki karti (Šebela, 2009). Škocjanske jame so razvite znotraj 300 m debelega litološkega stolpca krednih in paleocenskih apnencev. Večina podzemeljske Reke teče znotraj 130 m debele Lipiške formacije (K_2^{4-5}) in sledi slemenitvi in vpadu plasti v Šumeči jami in Hankejevem kanalu. Plasti z medplastnimi zdrsi so bile še posebno ugodne za razvoj inicialnih rovov (Šebela, 2009).

V Škocjanskih jamah so se poleg geoloških raziskav opravljale tudi analize prenikajoče vode in odlaganje sige (Kogovšek 1992), kot tudi spremljanje reke Reke (Cucchi in Zini, 2002; Gabrovšek in Peric, 2006). Rezultati meritev temperatur v Škocjanskih jamah (1997 – 1999) so pokazali, da je del jame, kjer teče Reka, izrazito dinamičen in da obiskovalci ne morejo preveč vplivati na jamsko meteorologijo (Kranjc in Opara, 2002). Novejši rezultati o vplivu turizma so prikazani s spremljanjem aerosolov v zraku Škocjanskih jam (Grgić in drugi, 2014), lampenfloro (Mulec, 2014) ter mikrobiologijo (Mulec in drugi, 2017).

Tiha, Šumeča jama in Hankejev kanal so v preteklih letih že bili podrobno geološko kartirani, načrt pa objavljen v Acti Carsologici (Šebela, 2009). Terensko tektonskolitološko kartiranje Mahorčičeve, Mariničeve in Tominčeve jame ter Velike in Male doline pa do leta 2016 še ni bilo podrobno izvedeno. Zato smo v obdobju po 25.5.2016 začeli s terenskimi deli za podrobno tektonsko-litološko kartiranja v merilu 1:500. Rezultat prvih terenskih raziskav je tektonsko-litološka karta vzhodnega dela Škocjanskih jam v merilu 1:500 s prečnimi profili, ki bo del enotne tektonsko-litološke karta celotnega sistema Škocjanskih jam.

Rezultati

Zakraselo površje in podzemlje Škocjanskih jam gradijo tri litološke enote (Slika 1). Po geološki karti (Jurkovšek in drugi, 1996) predstavljajo najstarejše kamnine Sežansko formacijo (K_2^{2-4}) , ki jo gradi plastovit apnenec z redkimi rudistnimi biostromami. Debelina Sežanske formacije je od 400 do 500 m. Navzgor sledi Lipiška formacija (K_2^{4-5}) debeline 250-400 m. Gre za plastovit in masiven apnenec z rudistnimi biostromami in biohermami (Jurkovšek in drugi, 1996). Najmlajša je Liburnijska formacija (K-Pc) debeline 50-300 m, ki jo gradijo plastoviti in ploščasti apnenci.

Smer vpada plasti apnenca na kartiranem območju je proti J in JZ pod kotom 10-40 °. V Mahorčičevi jami smo na več mestih našli medplastne zdrse z reverznim premikom. Medplastni zdrsi so verjetno povezani z regionalnimi deformacijami gubanja in/ali narivanja. Na površju severno od Tominčeve jame je na geološki karti (Jurkovšek in drugi, 1996) označena sinklinala v smeri SV-JZ, ki tone proti JZ. Plasti v Marhorčičevi jami ležijo v JV krilu sinklinale. Medplastni zdrsi so lahko povezani s sinklinalnim gubanjem.

Skrajni severni delu Tominčeve jame se nahaja v bližini osi sinklinale (Jurkovšek in drugi, 1996). V tem delu jame se površinske lokalne deformacije gubanja ob oblikovanju sinklinale severno od Tominčeve jame kažejo z večjim vpadnim kotom plasti apnenca kot V Mahorčičevi in Mariničevi jami. Plasti apnenca na skrajnem SZ delu Tominčeve jame vpadajo proti JZ pod kotom 40° (200/40 in 210/40). Vpadni kot 40 ° je večji kot v Veliki in Mali dolini, kjer v povprečju znaša 20 °.



Slika 1 – Geologija širšega območja Škocjanskih jam. 1- prelom, 2- sinklinala, ki tone proti JZ, 3- Repenska formacija (K₂^{1,2}), 4- Sežanska formacija (K₂²⁻⁴), 5- Lipiška

proti JZ, 3- Repenska formacija (K₂^{1,2}), 4- Sežanska formacija (K₂²⁻⁴), 5- Lipiška formacija, plastovit in masiven apnenec z rudistnimi biostromami in biohermami (K₂⁴⁻⁵), 6-Liburnijska formacija (K-Pc), 7- Slivski apnenec (plastovit, prevladuje miliolidni apnenec) (Pc). Po Jurkovšek in drugi (1996), Placer (2015) in Šebela (2009). A-stari podatki, B-novi podatki s kraškima oknoma.



Slika 2 – Prelom z geološkimi elementi 170/85 na vhodu v Mariničevo jamo. Foto S. Šebela



S. Šebela 2017

Slika 3 – Geološke razmere prečnih profilov AB, CD in EF.

Tektonske razmere kartiranega dela Škocjanskih jam kažejo podobne značilnosti kot v preostalem delu Škocjanskih jam (Šebela, 2009). S terenskim geološkim kartiranjem v merilu 1:500 smo našli nekaj izrazitih prelomnih ploskev, ki pa jih je težko slediti na daljših razdaljah, saj jih sekajo druge tektonske strukture. Levi in desni zmiki ter vertikalni premiki ob prelomih kažejo na več fazno tektonsko dogajanje. Generalne smeri prelomov so SZ-JV, ZJZ-VSV in smeri skoraj V-Z.

Iz površja v Mariničevo jamo lahko sledimo prelomu 170/85 (Slika 2), ki seka prelom 70/85. Ob prelomu 170/85, ki ga je opisal že Pavlovec (1965-66), je nekaj morfoloških zajed, ki bi lahko kazale na vertikalni premik ob prelomu, kjer se je južno krilo spustilo glede na severno krilo. Premik znaša <2 m.

Z geološkim kartriranjem smo določili tudi številne razpoklinske in porušene cone, kot jih je na kraških terenih klasificiral Čar (1982). Le-te so dobro vidne v strugi Reke, npr. v Veliki dolini. Tu je razpoklinska cona s smerjo vpada 100 ° široka do 30 m in dolga vsaj 100 m.

Prečni profili AB, CD in EF (Slika 3) so pokazali novo geološko posebnost v Veliki in Mali dolini, ki je prejšnje geološke raziskave (Gospodarič, 1984; Knez, 1996; Jurkovšek in drugi, 1996; Šebela, 2009; Placer, 2015) niso zasledile. Glede na vpad apnenca Sežanske $(K_2^{2^{-4}})$ in Lipiške (K_2^{4-5}) formacije smo na podlagi terenskega geološkega kartiranja ter na podlagi interpolacije vpadov plasti in litološke meje med Sežansko in Lipiško formacijo na površju (Gospodarič 1983; Jurkovšek in drugi, 1996) ugotovili, da se plasti Sežanske formacije pokažejo v Veliki in Mali dolini, saj je kraška erozija (in korozija) pri nastanku obeh udornic izpodjedla mlajše plasti Lipiške formacije do spodnjih plasti Sežanske formacije. Gre torej za poseben geološki in geomorfološki pojav, ki ga imenujemo **kraško okno** (ali stratigrafsko erozijsko okno), kjer so starejše plasti, ki so sicer prekrite z mlajšimi v normalnem litološkem zaporedju, zaradi poglabljanja udornic pogledale na dan. Erozijsko okno ni tektonsko okno. Pri tektonskem oknu zaradi erozije pogleda na dan talninski blok pod narivnim kontaktom. Na Sliki 1A je geološka karta kot jo prikazujejo površinske geološke karte (Jurkovšek in drugi, 1996; Šebela, 2009; Placer, 2015), na Sliki 1B pa je nova karta, z dodanima kraškima oknoma.

Zaključek

Podrobno tektonsko-litološko kartiranje v merilu 1:500 Velike in Male doline v Škocjanskih jamah je pokazalo novo kraško-geološko značilnost, to je stratigrafsko erozijsko okno ali kraško okno, kjer geološko starejši apnenci (Sežanska formacija, $K_2^{2^{24}}$) izdanjajo pod geološko mlajšimi (Lipiška formacija, $K_2^{4^{-5}}$) apnenci zaradi oblikovanja udornic. Pri tem ne gre za tektonsko okno. V skladu s terenskim geološkim kartiranjem Velike in Male doline v Škocjanskih jamah je potrebno dopolniti tudi površinske geološke karte.

Raziskava je del programa Raziskovanje krasa (P6-0119) in projekta Krasoslovne raziskave za trajnostno rabo Škocjanskih jam kot svetovne dediščine (L7-8268).

Literatura

Debevc, A., Klemen, Z., Kranjc, A., Mihevc, A., Peric, B., Slapnik, R., Turk, P. in Zorman, T. 2002. Park Škocjanske jame. 1-101 str., Škocjan.

Boegan, E. 1938. Il Timavo. Studio sull' Idrografia Carsica Subaerea e Sotterranea. Mem. Dell' Istituto Ital. Speleol., Mem. 2, 16, 1-251 str., Stabilimento Tipografico Nazionale, Trieste.

- Cucchi, F. in Zini, L. 2002. Monitoring podzemeljske Reke Timave (Kras). Acta carsologica, 31/1, 75-84.
- Čar, J., 1982. Geologic setting of the Planina Polje ponor area. Acta Carsologica, 10 (1981), 75-105.
- Gabrovšek, F. in Peric, B. 2006. Monitoring the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifers: the case of Reka river system, Karst plateau, SW Slovenia. Acta carsologica, 35/1, 35-45.
- Gospodarič, R. 1965. Škocjanske jame. Guide book of the Congress Excursion through Dinaric Karst, 4th International Congress of Speleology in Yugoslavia, Union Yug. Spel., 137-140 str., Ljubljana.
- Gospodarič, R. 1983. About geology and speleogenesis of Škocjanske Jame. Geološki zbornik, 4, 163-172.
- Gospodarič, R. 1984. Cave sediments and Škocjanske jame speleogenesis. Acta Carsologica, 12 (1983), 27-48.
- Grgić, I., Iskra, I., Podkrajšek, B. in Debevec Gerjevič, V. 2014. Measurements of aerosol particles in the Škocjan Caves, Slovenia. Environmental science and pollution research international, 21/3, 1915-1923, doi: <u>10.1007/s11356-013-2080-4</u>.
- Habič, P., Knez, M., Kogovšek, J., Kranjc, A., Mihevc, A., Slabe, T., Šebela, S. in Zupan, N. 1989. Škocjanske jame Speleological Revue. International Journal of Speleology, 18/1-2, 1-42.
- Jurkovšek, B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M. in Šribar, L. 1996. Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau, Cretaceous and Paleogene carbonate rocks 1:50 000. Inštitut za geologijo, geotehniko in geofiziko, 1-143 str., Ljubljana.
- Knez, M. 1996. Vpliv lezik na razvoj kraških jam, primer Velike doline, Škocjanske jame (The bedding-plane impact on development of karst caves (An example of Velika dolina, Škocjanske jame caves). Založba ZRC 14, 1-186 str., Ljubljana.
- Knez, M. 1998. The influence of bedding-planes on the development of karst caves (a study of Velika Dolina at Škocjanske jame Caves, Slovenia). Carbonates and evaporates, 13/2, 121-131.
- Knez, M. in Slabe, T. 1999. Škocjanske jame, Slovenia: Development of caves related to rock characteristics and rock relief. V: Andreo Navarro, B., Carrasco Cantos, F. in J.J. Durán Valsero (ured.) Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico, 1999, Málaga. Patronato de la Cueva de Nerja, 217-229 str., Málaga.
- Kogovšek, J. 1992. Flowstone deposition in the Slovenian Caves. Acta carsologica, 21, 167-173.
- Kranjc, A., Kogovšek, J. in Šebela, S. 1992. Les Concrétionnements de la grotte de Škocjanske (Slovénie) et les changements climatiques. V: Salomon J.-N. & R. Maire (ured.) Karst et évolutions climatiques. Presses Universitaires de Bordeaux, 355-361, Bordeaux.
- Kranjc, A. in Opara, B. 2002. Temperature monitoring in Škocjanske jame. Acta carsologica, 31/1, 85-96.
- Mihevc, A., 2001. Speleogeneza Divaškega krasa. Založba ZRC, 27, 1-180 str., Ljubljana.
- Mulec, J. 2014. Human impact on underground cultural and natural heritage sites, biological parameters of monitoring and remediation actions for insensitive surfaces: case of Slovenian show caves. Journal for nature conservation, 22/2, 132-141, doi: 10.1016/j.jnc.2013.10.001.
- Mulec, J., Oarga-Mulec, A., Šturm, S., Tomazin, R. in Matos, T. 2017. Spacio-temporal distribution and tourist impact on airborne bacteria in a cave (Škocjan Caves, Slovenia). Diversity, 9, 3, 1-14.
- Pavlovec, R. 1965-66. Lep primer tektonike pri Škocjanskih jamah. Proteus, 28/2, 55-56.
- Peric, B. in Hribar, M. 2010. Velika dolina. DEDI digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem, <u>http://www.dedi.si/dediscina/195-velika-dolina</u>.
- Placer, L. 2015. Poenostavljena strukturno-geološka karta Krasa. Geologija, 58/1, 89-93.
- Šebela, S. 2009. Structural geology of the Škocjan Caves, Acta carsologica, 38/2-3, 165-177.
- Soler, E. 1934. Campagna geofisica eseguita dall' Istituto di geodesia della R. Universita di Padova nel 1932 nella zona S. Canziano Trebiciano. Bolletino della Societa Adriatica di Scienze Naturali in Trieste, 33, 67-90 str., Trieste.
- Valvasor, J.W. 1689. Die Ehre des Herzogtums Krain, IV. Laybach-Nürnberg: Wolfgang Moritz Endter, Buchhändlern.
- Vercelli, F. 1931. Il regime termico nelle Grotte di San Canziano. Le Grotte d' Italia, 5, 2, 49-62.

Hidrološka analiza poplav za porečje Savinje

Urban Jakop^{*}, Mira Kobold^{**}, Mojca Šraj^{*}

Povzetek

Porečje Savinje je eno najbolj poplavno ogroženih območij v Sloveniji. Njeno porečje se razprostira od Savinjskih Alp in Karavank preko Celjske kotline do izliva v Savo. Savinja je po naravi hudourniška reka, hudourniški značaj pa ima tudi pretežna večina njenih pritokov. Za Savinjo in pritoke so značilna velika nihanja v pretokih. Močnejše padavine povzročijo izredno hitre poraste pretokov. Do razlivanja vodotokov lahko pride v zelo kratkem času od nastopa padavin skoraj na celotnem porečju. Najbolj poplavno ogroženi sta mesti Celje in Laško ter manjši kraji v zgornjem delu porečja, kjer poplavljajo manjši hudourniški vodotoki. S hidrološko analizo poplav za porečje Savinje smo ugotovili, da poplave povzročijo predvsem močne in intenzivne jesenske padavine. Velik vpliv na obseg poplav ima tudi predhodna namočenost, ki močno zmanjša sposobnost zadrževanja padavin na porečju in s tem poveča površinski odtok. Trajanje poplavnih valov je kratko. Poplavna konica je običajno dosežena znotraj enega dneva, lahko pa se zgodi samo v nekaj urah. Z analizami mesečnih ekstremov smo ugotovili, da lahko največ poplavnih dogodkov pričakujemo novembra in oktobra.

Ključne besede: poplave, padavine, odtok, porečje Savinje, hidrološka analiza

Key words: floods, precipitation, runoff, Savinja River basin, hydrological analysis

Uvod

Porečje Savinje je eno najbolj poplavno ogroženih območij v Sloveniji in spada v okvir 61 območij pomembnega vpliva poplav, ki jih je razglasila država (MOP, 2015). Poplave Savinje niso novost, saj je Savinja poplavljala že v daljni preteklosti (Trontelj, 1997). Manjše poplave ob Savinji se dogajajo skoraj vsako leto (MOP, 2013). Pogoste pa so tudi velike poplave, ki povzročajo ogromno materialno škodo in ogrožajo človeška življenja. Intenziteta večjih poplav se je po letu 1990 precej povečala (Kobold, 2011). Zaradi širitve urbanizacije na poplavna območja, pa tudi zaradi sprememb podnebnih razmer škoda ob poplavah narašča (MOP, 2015).

Porečje Savinje ima zelo razvito rečno mrežo, ki pa je brez naravnih površinskih zadrževalnikov voda, z izjemo poplavnih območij dolin, na katerih se za krajši čas zadržijo visokovodni valovi (MOP, 2015). Po naravi je Savinja hudourniška reka, hudourniški značaj pa ima tudi pretežna večina njenih pritokov. Hudourniške poplave so kratkotrajne in izjemno silovite, povzročajo pa jih razmeroma kratkotrajne in intenzivne padavine, bodisi ob poletnih neurjih bodisi ob jesenskih deževjih (Komac in ostali, 2008). Zaradi hitrega odtoka je hidrogram pri hudourniških poplavah kratek, konica pa zelo izrazita in lahko nastopi zelo hitro. Zaradi teh značilnosti hudourniške poplave izmed vseh prinašajo največ nevarnosti.

Z analizo poplavnih dogodkov in mesečnih ekstremov pretokov na porečju Savinje smo želeli ugotoviti, kakšen tip padavin in vremenske situacije povzroči poplave na porečju Savinje, kakšen je odnos med padavinami in odtokom in v kakšni meri na poplavo vplivajo

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

^{**} Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

različni predhodni pogoji. Z analizo največjih mesečnih pretokov skozi celotno obdobje opazovanj smo poizkušali ugotoviti tudi sezonskost poplavljanja oz. mesece najverjetnejših poplav.

Poplavna ogroženost na porečju Savinje

Savinja je najmočnejši pritok reke Save v Sloveniji s povirjem v goratem svetu. Njeno porečje se razprostira od Savinjskih Alp, preko predalpskega in gričevnatega sveta prehaja v ravninski svet, pa vse do Posavskega hribovja. Njen tok je dolg 101,75 km in obsega 1847,7 km² prispevne površine, kar predstavlja 17 % vodnega območja Save (Kolbezen in Pristov, 1998). V zgornjem toku Savinje do Nazarij je porečje gorato z nadmorskimi višinami preko 2000 metrov. Zgradba površja je iz karbonatnih kamnin, apnenca in dolomita. Srednji, pretežno ravninski del pa leži med 200 in 400 metri nadmorske višine, grajen iz skrilavcev, tufov, peščenjakov in glin. Tla so povečini plitva na apnenčasti podlagi ali zelo prepustne aluvialne prodne formacije. Zaradi ponikanja padavinske vode skozi prodnato podlago v podzemlje ima Savinja več izvirov. Ob nastopu visokih voda Savinja bistveno prispeva k visokovodni konici spodnjega toka reke Save, tudi preko 40 % pretoka (Kobold, 2007).

Več kot 90 % porečja je prekritega z naravnimi (gozd, močvirje, vode) oz. s kmetijskimi površinami. V rečnih dolinah in na ravninah, predvsem v srednjem in spodnjem toku Savinje, pa se pojavi nekoliko več umetnih oziroma urbaniziranih površin. Ta območja so tudi najbolj izpostavljena poplavam.

Velika poplavna ogroženost Savinjske doline, ki v Sloveniji sodi v sam vrh poplavno ogroženih območij, izhaja v veliki meri iz dejstva, da ima Savinja izjemno velik delež poplavnih površin, ki segajo v urbana področja in je po tem kriteriju med slovenskimi rekami na prvem mestu (MOP, 2013). Na porečju Savinje je poplavno ogroženih 52 km² urbanih površin, kar je sicer precej manj kot ob Savi, Muri ali Dravi, vendar pa na tem območju živi več kot 20.000 ljudi, ki poseljujejo 15 % vseh poplavnih površin v Savinjski dolini. Mesti Celje in Laško, ki ležita ob Savinji, sta od večjih slovenskih mest največkrat ogroženi in zato tudi prizadeti zaradi visokih voda Savinje. Ob poplavi leta 1990, ki je bila ocenjena kot dogodek s 100-letno verjetno povratno dobo, je bilo poplavljenih kar 95 % površine mesta Celje in 66 % površine Laškega (MOP, 2013). V zadnjih 20-30 letih se je urbanizacija in gradnja stanovanjskih in drugih objektov razširila tudi na zelo poplavno izpostavljena območja, kar povzroča velik problem pri zagotavljanju protipoplavne varnosti.

Topografija porečja Savinje ima močan vpliv na meteorološko dogajanje v porečju. Vzdolž porečja se zaradi spreminjajočega se reliefa in terena padavine bistveno razlikujejo. V zgornjem goratem delu znašajo povprečne letne padavine okrog 2000 mm, v srednjem in spodnjem delu pa precej manj, do okrog 1300 mm letno (slika 1). Velik prispevek pa imajo tudi snežne padavine v visokogorju.



Slika 1: Padavinska karta Slovenije z označenim porečjem Savinje (vir karte: ARSO, 2017a).

Za porečje Savinje sta značilna dva tipa kritičnih vremenskih situacij (Marinček, 1992): jesensko-zimski tip in poletni tip. Za jesensko-zimske situacije so značilne frontalne padavine, ki so intenzivirane z orografskimi padavinami. Relativno široko padavinsko območje in obilne padavine, ki trajajo tudi več dni, povzročijo visokovodne situacije, ki lahko ob intenzivnejših padavinah proti koncu dogodka vodijo v poplave. Za poletne padavinske situacije so značilne konvekcijske padavine, kjer je intenziteta padavin neenakomerno porazdeljena. Te padavine zajamejo manjša območja, na katerih je intenzivnost padavin običajno velika, trajanje pa kratko, zato so poplave lokalnega značaja. Za nastop stoletnih visokih voda je na večjem delu porečja Savinje merodajna jesensko-zimska padavinska situacija.

Večje poplave na porečju Savinje

Zapisi pričajo, da je reka Savinja s svojimi pritoki poplavljala že v daljni preteklosti, že vse od rimskih časov (MOP, 2013). So pa starejši zapisi predvsem in samo informativne narave. Poplavni dogodki so bili zabeleženi zgolj opisno, brez kakršnihkoli konkretnih podatkov, ki bi nam omogočali kasnejše analize. Z vse večjo urbanizacijo in naseljevanjem ob rekah se je zaradi nevarnosti poplav pojavila tudi potreba po natančnejšem spremljanju hidroloških razmer. Z začetkom spremljanja in merjenja ter s postopno vzpostavitvijo hidrološke mreže na površinskih vodah lahko poplavne dogodke bistveno bolje analiziramo. Vedenje o poplavnih dogodkih nam preko merjenih padavin, odtoka in pretoka v strugi zelo pomaga pri napovedovanju ekstremnih dogodkov, kot so poplave, pri ravnanju pred njimi in po njih ter določanju poplavnih območij. Natančno analizirani pretekli poplavni dogodki predstavljajo preventivo pri zagotavljanju protipoplavne varnosti in čim večjem omejevanju poplavne škode. V preglednici 1 je podan pregled večjih poplav na porečju Savinje, tudi zgodovinskih izpred obdobja meritev, ko obstajajo le pisni viri (Trontelj, 1997).

LETO	KRATEK OPIS					
1550	Narasla Savinja odnesla žito, živino, vse brvi in mostove.					
1772	1					
1824	/					
1850	Uničene poljščine. Poplavljeno je bilo Celje.					
1852	Velikanska škoda. Zabeleženih tudi več smrtnih žrtev.					
1901	Poplavljanje reke Savinje s pritoki v oktobru in novembru. Najbolj ponovno prizadeto Celje z okolico.					
1923	Veliki povodnji ob koncu novembra.					
1926	Obilne padavine povzročile poplave v avgustu. Savinja skupaj z Voglajno ponovno					
	povzročila največ škode v Celju. Veliko mrtve živine in uničenih poljskih pridelkov.					
	Povodenj zahtevala tudi več človeških življenj.					
1927	Poplave v Savinjski dolini.					
1933	Poplavljeno Celje – voda ponekod segala tudi 2m visoko.					
1938	Poplave Savinje meseca maja.					
1954	Poplavljanje 5. in 6. junija, predvsem zaradi velike predhodne namočenosti. Največ					
	težav povzročil pritok Hudinja. Velikanska škoda predvsem na industriji in					
	infrastrukturi. Vodna ujma zahtevala kar 22 življenj.					
1964	Poplave na porečju predvsem na območju Celja, Mozirja, Nazarij med 24. in 25.					
	oktobrom.					
1969	Med 21. in 22. avgustom poplavljal predvsem pritok Bolska.					
1972	Poplavljalo v zgornjem toku (Solčava). Mesec maj.					
1980	Poplavljeni Zg. Savinjska in Zadrečka dolina. Poplavljala tudi Bolska.					
1990	V mesecu novembru največje poplave v tem stoletju. V zgornjem delu poplavljanje					
	Savinje in Lučnice.					
1992	Večkratne poplave Savinje. Najhujše v Laškem.					
1994	17. junija poplave na območju Laškega ter Žalca. 22. avgusta Celje in Laško.					
	Avgusta poplava Velunje v Soštanju.					
1996	Poplave v Laškem med 1. in 3. julijem.					
1997	Poplavljanje manjših pritokov Rečice, Mozirnice in Lučnice meseca avgusta.					
1998	14 15. julij poplave Savinje s pritoki (Dreta, Voglajna, Paka, Ložnica, Hudinja).					
	4 6. november največja naravna nesreča leta 1998. Najhujše prav na porečju Savinje –					
	primerljivo z letom 1990. Najhujše v Celju in Laškem.					
2007	Močne in izdatne padavine povzročile poplave v septembru, predvsem v srednjem in					
	spodnjem toku. Poplave terjale človeška življenja.					
2010	Poplave med 17. in 19. septembrom.					
2012	4. in 5. november poplavljanje Savinje s pritoki v zgornjem toku.					

Preglednica 1: Večje in obsežnejše poplave reke Savinje in njenih pritokov (do 1997 povzeto po: Trontelj, 1997; naprej po: MOP, 2013; Kobold, 2013; ARSO, 2010).

Hidrološki in meteorološki monitoring na porečju Savinje

Podatki hidrološkega monitoringa površinskih voda omogočajo ocenjevanje količinskega stanja voda, ugotavljanje hidroloških značilnosti vodnih območij in vodnih teles, vodno bilanciranje in ocenjevanje dolgoročnih sprememb, na katere vpliva podnebna spremenljivost. Samodejni podatki z merilnih mrež so osnova za sprotno spremljanje, napovedovanje in obveščanje o hidroloških razmerah ter opozarjanje pred izrednimi hidrološkimi pojavi (ARSO, 2016). Razvoj mreže merilnih mest v Sloveniji poteka po priporočilih Svetovne meteorološke organizacije Guide to hydrological practices (WMO, No. 168). Že v preteklosti je bila načrtovana tako, da omogoča skladen in izčrpen pregled

količinskega stanja površinskih voda in ostalih hidroloških parametrov (vodostaja in temperature vode ter vsebnosti suspendiranega materiala).

Na porečju Savinje je vzpostavljena zadovoljivo gosta opazovalna mreža vodomernih postaj. Nekatere so bile vzpostavljene že konec 18. in v začetku 19. stoletja, ko se je začelo spremljanje hidroloških parametrov površinskih voda na ozemlju Slovenije (Bat, 2008), spet druge so bile postavljene šele v zadnjih letih. Skozi čas so se nadgrajevale in posodabljale, tako da je trenutno na porečju Savinje 20 samodejnih postaj (avtomatske merilne postaje – AMP), ki omogočajo, da so podatki, ki jih postaje samodejno beležijo in pošiljajo v podatkovne zbirke na Agenciji RS za okolje, preko spleta ves čas dostopni javnosti (ARSO, 2017b). Na sliki 2 so prikazane vodomerne postaje, ki smo jih upoštevali v hidrološki analizi poplav na porečju Savinje.

Za izračun padavin na porečju in podporečjih smo upoštevali meteorološke postaje na porečju Savinje in v bližnji okolici (slika 2). Večina je navadnih padavinskih postaj s podatki o 24-urnih količinah padavin. Šest postaj je opremljenih s pluviografom, ki zapisujejo podatke o padavinah v 5-minutnih intervalih. Ploskovne padavine smo računali z metodo Thiessenovih poligonov (Jakop, 2017).



Slika 2: Obravnavane hidrološke in meteorološke postaje na porečju Savinje s podporečji.

Analiza mesečnih poplavnih konic

Za obravnavane vodomerne postaje (slika 2) smo izvedli analizo mesečnih poplavnih konic in pogostost nastopa letnih konic po mesecih (Jakop, 2017). Analiza pogostosti pojavljanja mesečnih poplavnih konic kaže, da po pogostosti pojavljanja največjega pretoka v letu izrazito izstopata november in oktober, ko se na vseh vodomernih postajah pojavi največje število ekstremnih pretokov (slika 3). Na drugi strani pa so februar, marec in april meseci, v katerih se le redko oziroma najmanjkrat v letu pojavi največji letni pretok. To so meseci z najmanjšim tveganjem nastanka visokih voda, ki so povod za poplave.

Vzdolž reke Savinje so rezultati primerljivi. Največji pretoki so bili na vseh postajah na Savinji izmerjeni novembra, ko je bil presežen pretok s povratno dobo 50 let (slika 3), ki predstavlja mejo, nad katero se že zgodijo večje poplave. Pri pritokih Savinje po analizi izstopa vodomerna postaja Celje II na Voglajni, na kateri so tudi v pomladnih mesecih zabeležene visoke konice in pogosto pojavljanje visokovodnih valov (slika 3). Ekstremni pretoki se lahko pojavljajo skozi vse leto, izjema sta le januar in februar. Voglajna ima za razliko od ostalih pritokov Savinje panonski dežno-snežni režim (Frantar in Hrvatin, 2008), hidrogram pa je manj razgiban tudi zaradi zadrževanja vode v Slivniškem jezeru, kar nekoliko zmanjša najvišje in nekoliko poveča najnižje pretoke.



Slika 3: Analiza mesečnih viskovodnih konic Qvk in pogostost nastopa letnih konic po mesecih za izbrane postaje na reki Savinji in pritokih.

Največja verjetnost nastopa ekstremnih pretokov in torej poplav na porečju Savinje obstaja novembra in oktobra, zato sta ta dva meseca poplavno najbolj nevarna. Kljub temu pa se poplave lahko zgodijo tudi v ostalih mesecih. Zlasti septembra so se na porečju Savinje že zgodile večje poplave.

Analiza visokovodnih valov

V analizi visokovodnih valov na porečju Savinje smo upoštevali večje viskovodne valove po letu 1990, med katerimi so tudi tisti, ki so povzročili obsežne poplave na tem območju (Jakop, 2017). Izbrali smo osem dogodkov glede na pretok konice visokovodnega vala v Laškem (preglednica 2). Izbranim poplavnim dogodkom smo v analizi določili pripadajoče padavine, ki so dogodek povzročile, izmerjene na padavinskih postajah (slika 2) z upoštevanjem utežnih razmerij Thiessenovih poligonov. Sedem od osmih situacij ustreza jesensko-zimskemu tipu hidroloških situacij, za primerjavo pa smo vzeli še en spomladanski visokovodni val. Dogodka iz 1990 in 1998 veljata zaradi svoje razsežnosti za največji poplavi na porečju Savinje v obdobju meritev.

Obravnavali smo urne podatke o merjenih pretokih za posamezen visokovodni dogodek ter padavine, ki so povzročile posamezen dogodek. Za vsak val smo izračunali volumen in koeficient odtoka.

	U			. 1	U		1 1		<u> </u>	
VALOVI - Qvk (m ³ /s)		27.109.11.	411.11. 1998	411.11. 2000	1822.9. 2007	29.31.4. 2009	1721.9. 2010	48.11.	1215.9. 2014	
6010	Solčava	Savinja	75,5	26,3	148	25,4	9,09	35,6	50,4	15,9
6060	Nazarje	Savinja	635	630	455	507	197	367	648	242
6140	Celje II - brv	Savinja	1208	1205	ni pod.	1052	333	803	988	ni pod.
6200	Laško	Savinja	1406	1395	653	1249	443	1028	1131	730
6210	Veliko Širje	Savinja	1490	1458	711	1272	508	1093	1176	782
6240	Kraše	Dreta	236	251	88,9	226	50.8	138	256	82,7
6300	Šoštanj	Paka	112	81,9	33	77,5	32,7	62,9	93,6	26,1
6340	Rečica	Paka	189	178	51,7	159	43,8	119	217	41,0
6550	Dolenja vas II	Bolska	182	193	51,5	150	42,4	124	121	113
6630	Levec I	Ložnica	82,3	94,0	ni pod.	120	37,2	78,1	52,3	56,5
6790	Škofja vas	Hudinja	87,1	142	35,6	171	40,1	90,2	84,1	9,2
6720	Celie II	Voglaina	66.6	118	419	60.8	48.6	97.5	30.5	104.8

Preglednica 2: Obravnavani poplavni dogodki z vrednostmi poplavnih konic Qvk.

- pretok nad rdečo opozorilno vrednostjo (ARSO-BOBER, 2017)

- pretok nad oranžno opozorilno vrednostjo (ARSO-BOBER, 2017)

- pretok nad rumeno opozorilno vrednostjo (ARSO-BOBER, 2017)

Kot primer prikazujemo poplavni val iz leta 1998 z urnimi intenzitetami padavin, ki predstavljajo utežene padavine (Thiessenovi poligoni), ki so padle na celotno porečje Savinje (slika 4, preglednica 3).



Slika 4: Hidrogrami poplavnih valov leta 1998 in pripadajoče povprečne urne intenzitete padavin na porečju.

	C	Poplavni val 1998				
Postaja	Vodotok	Čas pojava konice	Qvk [m ³ /s]			
Solčava I	Savinja	4.11. ob 20:06	26,3			
Šoštanj	Paka	4.11. ob 23:52	81,9			
Kraše	Dreta	5.11. ob 00:26	251			
Nazarje	Savinja	5.11. ob 00:46	630			
Rečica	Paka	5.11. ob 03:06	178			
Škofja vas	Hudinja	5.11. ob 04:16	142			
Levec	Ložnica	5.11. ob 04:37	94,0			
Dolenja vas II	Bolska	5.11. ob 05:18	193			
Celje II - brv	Savinja	5.11. ob 06:15	1205			
Celje II	Voglajna	5.11. ob 06:32	118			
Laško	Savinja	5.11. ob 08:38	1395			
Veliko Širje	Savinja	5.11. ob 09:07	1458			

Preglednica 3: Časovni potek konic valov za poplavni val 1998

Konica poplavnega vala se je ob poplavi leta 1998 na v.p. Solčava I pojavila že 4. novembra ob 20:06 uri (preglednica 3). Takrat so bile na pluviografski postaji v Solčavi zabeležene najintenzivnejše padavine (8,3 mm v eni uri). Na ostalih vodomernih postajah so se konice pojavljale bistveno kasneje. Val je od Nazarij do Laškega potoval skoraj 8 ur (preglednica 3), kar je za okoli 3 ure več kot je povprečni čas potovanja vala med tema vodomernima postajama.

Vsi obravnavani poplavni dogodki so pokazali, da po volumnih izrazito izstopajo vodomerne postaje na sami Savinji, z izjemo Solčave. Razlike v konici med najnižje

ležečima postajama Laško in Veliko Širje so zelo majhne. Pritoki Savinje prinesejo k poplavnemu valu Savinje različne volumne vode, odvisno od poplavnega in padavinskega dogodka. Še največjo količino vode glede na konico pretoka prinese reka Dreta, ki se v Savinjo izlije tik pred vodomerno postajo Nazarje in na njej povzroči dokaj močan porast. Povirna dela Drete in Lučnice na območju Kamniško Savinjskih Alp običajno dobita največ padavin na porečju Savinje in dosegata velike specifične odtoke, ki na Dreti v Krašah pri poplavnih dogodkih presegajo 2000 l/s/km² (Kolbezen in Pristov, 1998). Po doprinosu Dreti sledijo Bolska, Paka in Hudinja.

Za vsak poplavni dogodek smo izračunali tudi čas potovanja po vodotoku. Ob največjih poplavnih dogodkih na Savinji, ko so bili doseženi tudi največji pretoki, je bilo potovanje valov zelo različno (Jakop, 2017). Na to vpliva predvsem prostorska in časovna razporeditev padavin. V poplavi 1998 (preglednica 3) je trajalo potovanje konice vala po Savinji od Nazarij do Velikega Širja dobrih 8 ur. Povprečni čas potovanja konice vala obravnavanih dogodkov iz preglednice 2 znaša 5,5 ure. Večja raznolikost pri potovanju valov se je izkazala pri pritokih Savinje, kjer značilnega vzorca med pojavom konice na pritokih in dolvodno postajo na Savinji nismo zaznali. Na pritokih konica vala časovno različno nastopi in s tem pritoki različno vplivajo na konice vodomernih postaj na Savinji (Jakop, 2017).

Na razvoj poplavnega dogodka izredno vpliva prostorska in časovna razporeditev padavin. Večja poplavljanja Savinje povzročijo obilne, predvsem pa intenzivne padavine. Za obravnavane dogodke iz preglednice 2 smo z metodo Thiessenovih poligonov določili utežene padavine za podporečja Savinje, ki se nanašajo na zbirno območje obravnavanih vodomernih postaj (Jakop, 2017). V preglednici 4 so za vsa podporečja zbrane povprečne in maksimalne padavine osmih obravnavanih dogodkov. Ob podatku o padavinah smo dodali še standardni odklon in s tem pokazali razpršenost dobljenih rezultatov glede na povprečje. Največji standardni odklon je na podporečjih Voglajne, Drete in Savinje do Nazarij. Z upoštevanjem volumna neposrednega odtoka smo izračunali koeficiente odtoka za vsak poplavni val (preglednica 4).

	Padavine (mm)			Koeficienti odtoka		
Porečje do v. p vodotok	povprečne	stand. odklon	maksimalne	povprečni	maksimalni	
Solčava - Savinja	141,7	23,3	194,0	0,24	0,32	
Kraše - Dreta	148,9	30,5	227,5	0,66	0,79	
Nazarje - Savinja	148,6	30,2	218,2	0,49	0,66	
Šoštanj - Paka	99,1	-19,3	166,9	0,36	0,43	
Rečica - Paka	103,3	-15,1	164,7	0,34	0,50	
Dolenja vas - Bolska	132,6	14,2	243,3	0,47	0,60	
Levec - Ložnica	100,8	-17,6	198,7	0,56	0,68	
Celje-brv - Savinja	126,2	7,8	201,4	0,47	0,56	
Škofja vas - Hudinja	95,6	-22,8	172,0	0,32	0,42	
Celje - Voglajna	87,4	-31,0	158,9	0,39	0,53	
Laško - Savinja	118,0	-0,4	193,5	0,44	0,52	
Veliko Širje - Savinja	115,4	-2,9	193,3	0,43	0,50	

Preglednica 4: Padavine in koeficienti odtoka po posameznih porečjih.

Izkazalo se je, da so v osmih obravnavanih poplavnih dogodkih v povprečju največ padavin prejela območja v zgornjem, višjem in bolj reliefno razgibanem delu porečja (preglednica 4). Na teh območjih, predvsem zaradi vpliva orografije, v povprečju pade največ padavin, kar kaže tudi slika 1. V obravnavanih dogodkih je na večini porečij padla

maksimalna količina padavin v poplavnem dogodku leta 2010 (Jakop, 2017), konice valov pa v tem dogodku niso bile najvišje (preglednica 2). V dogodku 2010 gre za sestavljeni visokovodni val. Padavine so na porečju Savinje padle v dveh skoraj enakovrednih delih v treh dneh, zato imajo tudi hidrogrami poplavnega vala Savinje po višini skoraj enakovredni konici, ki bi jih lahko ločeno obravnavali kot dva neodvisna visokovodna valova. Po količini padavin na porečju Savinje poplavnemu dogodku 2010 sledijo padavine, ki so povzročile poplavo leta 1990, le temu pa padavine za dogodek 1998.

Maksimalni koeficienti odtoka se pri analiziranih poplavnih dogodkih gibljejo med 0,32 na Savinji v Solčavi do 0,79 na Dreti v Krašah. Koeficienti odtoka zavisijo od hidrogeografskih lastnosti porečja, količine padavin, predhodne namočenosti, pokrovnosti tal. Povirno porečje Drete dobi običajno največ padavin na porečju Savinje in ima zato velik specifični odtok (Kolbezen in Pristov, 1998). Preseneča pa nizek koeficient odtoka za v. p. Solčava, ki je lahko posledica geoloških lastnosti tega dela porečja, kjer so pretežno zastopane prepustne kamnine s kraško-razpoklinsko in razpoklinsko poroznostjo.

Zaključki

Analize so pokazale, da prihaja do večjih poplavnih dogodkov na porečju Savinje ob zares izdatnih in intenzivnih padavinah. Za nastop visokih voda je na večjem delu porečja Savinje merodajna jesensko-zimska padavinska situacija, za katero so značilne frontalne padavine, ki so intenzivirane z orografskimi padavinami. Široko padavinsko območje ter obilne in dolgotrajne padavine povzročijo visokovodne situacije, ki lahko vodijo v poplave. Časovna razporeditev padavin poleg prostorske odločilno vpliva na velikost in obseg poplav.

Analiza mesečnih visokovodnih konic je pokazala, da je največja verjetnost poplave na porečju Savinje v jesenskem času. Poplavno najbolj nevaren mesec je november. Glavni razlog je izrazit jesenski višek padavin, ki postaja v obdobju podnebnih sprememb še višji (Kobold in sod., 2012). Poleg novembra so izredno visoki pretoki lahko doseženi še v oktobru in septembru. Polovica izmed osmih obravnavanih poplavnih dogodkov se je zgodila novembra, trije pa septembra. Na obravnavanih vodomernih postajah je pojavljanje visokih pretokov podobno. Predvsem se to kaže na sami reki Savinji, kjer so vzorci pojavljanja visokih voda po celotnem toku skoraj identični. Nekoliko s svojim drugačnim rečnim režimom izstopa le pritok Voglajna.

Tovrstne hidrološke analize so pomembne za razumevanje hidrološkega dogajanja na porečju in so podlaga ukrepom za zmanjševanje poplavne ogroženosti in sistemom opozarjanja pred poplavami. Na osnovi rezultatov analiz se lahko prepozna potreba po dodatnih merilnih mestih na porečju, zlasti pluviografskih postaj v povirnem delu porečja.

Literatura

- ARSO (2010). Hidrološko poročilo o povodnji v dneh od 17. do 21. septembra 2010. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje. http://www.arso.gov.si/vode/poročila in publikacije/Poplave 17. - 21. september 2010.pdf (5. 5. 2017.)
- ARSO (2016). Pregled hidroloških razmer površinskih voda v Sloveniji. Poročilo o monitoringu za leto 2014. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 43 str.
- ARSO (2017a). Meteorološki portal. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje. http://meteo.arso.gov.si/met/sl/ (10. 5. 2017)
- ARSO (2017b). Arhiv površinskih voda. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (10. 2. 2017.)

ARSO – BOBER (2017). Hidrološko stanje in napoved. Interna baza. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje.

- Bat, M. (2008). 60 let slovenske državne hidrološke službe. V: 60 let slovenske meteorološke in hidrološke službe. Naše okolje, Bilten Agencija RS za okolje, Ljubljana. Posebna izdaja, 27-34.
- Frantar, P., Hrvatin, M. (2008). Pretočni režimi. V: Vodna bilanca Slovenije 1971-2000. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 43-50.
- Jakop, U. (2017). Hidrološka analiza poplav za porečje Savinje. Mag. delo. Ljubljana, UL FGG, Magistrski študijski program Vodarstvo in okoljsko inženirstvo. (samozaložba U. Jakop), 92 str.
- Kobold, M. (2007). Vpliv napake ocene padavin na napako napovedi odtoka pri napovedovanju poplav. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kobold), 134 str.
- Kobold, M. (2011). Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Ujma 25, 48-56.
- Kobold, M. (2013). Poplave konec oktobra in v začetku novembra 2012. Ujma 27, 44-51. http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2013/044.pdf (25. 4. 2017.)
- Kobold, M., Dolinar, M., Frantar, P. (2012). Spremembe vodnega režima zaradi podnebnih sprememb in drugih antropogenih vplivov. V: I. kongres o vodah Slovenije 2012. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana. Zbornik, 7-23.
- Kolbezen, M., Pristov, J. (1998). Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Hidrometeorološki zavod RS, 98 str.
- Komac, B., Natek, K., Zorn, M. (2008). Geografski vidiki poplav v Sloveniji. Ljubljana, Založba ZRC: 186 str. http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/9789612540913.pdf (20. 12. 2016.)
- Marinček, M. (1992). Vzroki poplave v Celju 1. novembra 1990. V: Poplave v Sloveniji. Ljubljana, Ministrstvo za obrambo, Republiška uprava za zaščito in reševanje. Zbornik, 155-161.
- MOP (2013). Zagotovitev poplavne varnosti na porečju Savinje. Ministrstvo za okolje in prostor. http://www.porecje-savinje.si/ (20. 12. 2016)
- MOP (2015). Načrt zmanjševanja poplavne ogroženosti (NZPO). Ministrstvo za okolje in prostor. http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/podrocja/voda/nzpo/NZPO_SLO_20 15_12_08.pdf (20. 3. 2017)
- Trontelj, M. (1997). Kronika izrednih vremenskih dogodkov XX. stoletja. Ljubljana, Hidrometeorološki zavod RS, 135 str.

ADM-Aeolus: zgodovinski korak v merjenju vetra iz vesolja in priložnost za izboljšanje napovedi vremena

Matic Šavli¹, Nedjeljka Žagar¹

Povzetek

Kvalitetne meritve stanja ozračja so poleg naprednih modelov za numerično napovedovanje osnovni pogoj za izboljšanje napovedi vremena. Kljub veliki količini meritev ozračja, z več kot 70 milijoni opazovanj vsakih 12 ur, obstoječi opazovalni sistem ponuja v glavnem satelitska opazovanja temperature, vlage in tlaka. Opazovanja vetra v prosti troposferi, ki so teoretično bolj pomembna za določanje začetnih pogojev za prognostične modele kot opazovanja mase, so še vedno omejena na meritve vetra z radiosondami, letali in posredne ocene vetra pridobljene iz gibanja oblakov.

Prvi korak k globalnemu merjenju vertikalnih profilov vetra iz vesolja je bil storjen leta 1999, ko je Evropska Vesoljska Agencija (ESA) sprejela predlog za misijo ADM-Aeolus (ang. Atmospheric Dynamic Mission - Aeolus) kot eno izmed misij v okviru programa za razvoj novih tehnologij za opazovanje Zemljinega ozračja. Po več kot 15 letih razvoja kompleksnega Dopplerjevega lidarja, bo polarno-orbitalni satelit ADM-Aeolus lansiran v orbito na približno 400 km v letu 2018.

Satelit ADM-Aeolus je narejen s ciljem, da izboljša globalne meritve vetra in globalne numerične napovedi. Vseeno pa planirajo tudi prognostični modeli na omejenem območju uporabljati nove meritve. V prispevku so predstavljene osnovne značilnosti satelitskega merjenja vetra z Dopplerjevim lidarjem, uporaba novih podatkov v sistemu za asimilacijo in nekatere ocene vpliva novih opazovanj na izboljšanje napovedi vremena. Posebnost novih meritev je, da gre za meritve ene komponente vektorja vetra, in sicer komponente v smeri, vzdolž katere satelit meri, t.i. komponenta HLOS (ang. horizontal line of sight). Uporaba meritev HLOS v prognostičnem modelu je večji izziv kot uporaba celotnega vektorja, ker je vpliv meritev na začetne pogoje bolj občutljiv na zanesljivost kovarianc napak prvega približka. Vzpodbudni rezultati, pridobljeni v sklopu projekta »Mesoscale wind profiles and data assimilation for numerical weather prediction«, ki je bil v preteklih letih izvajan na Katedri za meteorologijo Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, kažejo pozitiven učinek ansambelske metode Kalmanovega filtra na asimilacijo opazovanj HLOS v mezoskalnem modelu.

Ključne besede: ADM-Aeolus, Doplerjev lidar, ansambelski Kalmanov filter, mezoskalna asimilacija, kovariance napak prvega približka, veter vzdož smeri merjenja HLOS

Keywords: ADM-Aeolus, Doppler wind lidar, ensemble Kalman filter, mesoscale data assimilation, background-error covariances, horizontal line-of-sight (HLOS) wind

Uvod

Operativni modeli za numerično napovedovanje vremena (ang. Numerical Weather Prediction - NWP) rešujejo sistem parcialnih diferencialnih enačb. Te opisujejo časovne in krajevne lastnosti temperature, tlaka, vetra in vlage v ozračju. Reševanje tega sistema enačb zahteva začetne in robne pogoje. Časovna rešitev je v posameznih točkah uporabna toliko časa, da je še odvisna od začetnih pogojev. Napovedovanje vremena je zato problem

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, Ljubljana

začetnih pogojev. Za izboljšanje napovedi je potrebno tako izboljšati modele, kot tudi njihove začetne pogoje. To pomeni, da potrebujemo čimbolj natančno informacijo o vseh spremenljivkah v vsaki računski točki tridimenzionalnega modelskega prostora. Potrebujemo torej čimbolj kvalitetna opazovanja ozračja čimbolj pogosto v času in prostoru.

Globalni sistem opazovanj ozračja (ang. Global Observation System - GOS) sestavljajo konvencionalna opazovanja in opazovanja pridobljena iz satelitov (WMO, 2014). Opazovanja delimo na opazovanja polja vetra in polja mase. Slednjo sestavljajo količine kot so tlak, temperatura in vlaga. Sistem GOS zagotavlja veliko opazovanj. Naprimer, za potrebe napovedi vremena se v Evropskem centru za srednjeročne napovedi (ECMWF) vsakih 12 ur uporabi približno 70 milijonov opazovanj (ECMWF/EUMETSAT, 2013). Vendar to za potrebe NWP še zdaleč ni dovolj. Poleg tega je večina teh opazovanj pridobljenih iz satelitov. Za razliko od konvencionalnih opazovanj (npr. radiosondažne meritve), satelitska opazovanja omogočajo globalno pokritost, vendar njihova kvaliteta ponavadi ni primerljiva s kvaliteto konvencionalnih opazovanj. Ena izmed pozitivnih značilnosti konvencionalnih opazovanj je dobra uravnoteženost med opazovanji polja vetra in polja mase. To žal ne velja za satelitska opazovanja, kjer dominirajo opazovanja polja mase (Baker et al., 2014).

Fizikalni zakoni povezujejo porazdelitev polja mase in polja vetra v ozračju tako, da vremenske procese obravnavamo kot kontinuirani proces približevanja k hidrostatičnemu in geostrofskemu ravnovesju (npr. Kalnay, 2003). Geostrofsko ravnovesje je najbolj prisotno na večjih (več 1000 km) prostorskih skalah v zmernih zemljepisnih širinah. Za takšne primere namreč velja, da se tridimenzionalna struktura polja vetra lahko oceni iz horizontalnih gradientov polja temperature. Na manjših prostorskih skalah in v tropskih predelih so direktna opazovanja polja vetra ključnega pomena za definicijo začetnih pogojev za napovedovanje (Stoffelen et al., 2005, Žagar et al., 2008).

Trenutno opazovanja vetra pridobimo iz konvencionalnih opazovanj, kot so radiosondaže ter meritve z letali, iz opazovanj pri tleh, kot so meritve pridobljene z Dopplerjevim lidarjem in radarjem ter iz satelitskih opazovanj oblakov iz ocene gibanja oblakov (ang. Atmospheric Motion Vectors – AMV, ECMWF/EUMETSAT, 2013). Sateliti merijo tudi veter na površini morja s t.i. skaterometri in pasivnimi instrumenti, ki delujejo v območju mikrovalov. V sistemih za napovedovanje se najbolj uporabljajo opazovanja AMV, čeprav imajo ta opazovanja značilne napake (npr. zaradi ocene višine oblakov).

Različna opazovanja različno prispevajo k uspešnosti posameznih prognostičnih sistemov. Prispevek posameznega tipa opazovanj na izboljšanje 24 urne napovedi v modelu ECMWF je prikazan na sliki 1. V primeru konvencionalnih opazovanj je relativni prispevek opazovanj mase in vetra k izboljšanju napovedi približno enak. To velja tako glede na skupni prispevek opazovanj (modri stolpci), kot na prispevek posamezne vrste opazovanj (rumeni stolpci). Prav nasprotno, pri opazovanjih iz satelitov prevladuje skupni prispevek opazovanj mase. Vendar pa prispevek dveh vrst opazovanj kaže na izrazito večji relativni pomen opazovanj vetra iz satelitov. Primanjkljaj direktnih opazovanj vetra je zato ena izmed ključnih pomanjkljivosti globalnega opazovalnega sistema (Baker et al., 2014). Satelitske meritve vetra bi lahko igrale pomembno vlogo za napredek globalnih analiz in napovedi.

Prvi korak k merjenju vetra s satelitov je bil storjen leta 1999, ob sprejetju misije ADM-Aeolus (ang. Atmospheric Dynamics Mission Aeolus, Stoffelen et al. 2005). Glavni cilj misije je demonstrirati možnost merjenja vetra iz vesolja s pomočjo Dopplerjevega zamika laserske svetlobe, sipane na delcih in molekulah zraka v atmosferi. Opazovanja vetra misije ADM ne bodo meritve vektorja horizontalnega vetra kot ga dobimo iz konvencionalnih sistemov. Instrument ADM-Aeolus namreč meri radialno komponento hitrosti gibanja delcev (ang. Line-Of-Sight, LOS), ki jo določa usmerjenost Dopplerjevega lidarja. Ta predstavlja linearno kombinacijo meritev zonalne, meridionalne in vertikalne komponente vetra. Na večjih prostorskih skalah je vertikalna hitrost v povprečju zanemarljiva. Glavni produkt ADM-Aeolus je t.i. 'Horizontal Line-Of-Sight' (HLOS) hitrost, ki predstavlja projekcijo LOS na horizontalno ravnino, pri predpostavki, da je vertikalna hitrost zanemarljiva.



Slika 1: Relativni prispevek opazovanj mase (temperatura, zračni tlak in vlaga) in vetra k izboljšanju 24 urne napovedi v modelu ECMWF. Opazovanja so razdeljena v dve skupini: konvencionalna (npr. meritve pri tleh, radiosondaže) in satelitska opazovanja. Statistika je prikazana glede na vsa opazovanja (modro) oziroma glede na prispevek posameznega opazovanja (rumeno). Vsota vseh modrih oziroma vseh rumenih stolpcev znaša 100 %. Vir: Baker et al. (2014).

Lansiranje ADM-Aeolus v orbito in pričetek tri letne uporabe sistema je predviden v letu 2018. Glede na številne opravljene študije (Stoffelen et al., 2006, Tan et al., 2007, Marseille et al., 2008, Horanyi et al., 2015), je v globalnih sistemih za napovedovanje vremena pričakovan pozitivni vpliv novih opazovanj vetra na kvaliteto napovedi. Največji pričakovani pozitivni vpliv novih meritev je v tropskih predelih. Boljši začetni pogoji za napoved v tropskih predelih pozitivno vplivajo na srednjeročno napoved nad Evropo. Uporabnost opazovanj v modelih za omejeno območje (LAM, ali mezoskalni model) je vprašljiva predvsem zaradi relativno majhnega števila opazovanj. Modeli LAM se uporabljajo na relativno majhnih prostorskih domenah in so zaradi večje prostorske ločljivosti sposobni opisati pojave, ki se dogajajo na manjših prostorskih in krajših časovnih skalah. Meritve profilov vetra bi lahko značilno izboljšale začetne pogoje v mezoskalnem modelu, če bi bila opazovanja dostopna ob pravem času.

V povezavi s tem, je na Katedri za meteorologijo na Fakulteti za matematiko in fiziko v Ljubljani, potekal večletni projekt »Mesoscale wind profiles and data assimilation for numerical weather prediction«, ki ga je financirala Evropska vesoljska agencija v okviru programa za pridruževanje Slovenije ESA-i. Osnovni cilj projekta je vrednotenje novih opazovanj vetra na območju Severnega Atlantika in Evrope v mezoskalnih modelih. V pričujučem članku predstavljamo nekatere rezultate projekta povezane z vplivom opazovanj LOS na kvaliteto začetnih pogojev za napoved. Predtem bomo opisali delovanje satelita ADM-Aeolus, ki predstavlja prvi sistem za merjenja vetra s Dopplerjevim lidarjem iz vesolja.

Satelit ADM-Aeolus

Osnova platforme ADM-Aeolus je Dopplerjev lidar Aladin. Ta deluje v območju ultavijoličnega (UV) dela elektro-magnetnega (EM) spektra, z valovno dolžino 355 nm (Andersson et al., 2008). Lidar generira serijo pulzov, ki potujejo od laserja na satelitu na višini približno 400 km, proti površju Zemlje. Na tej poti se elektromagnetno valovanje delno sipa nazaj proti satelitu, delno v prostorski kot stran od satelita in je delno prepuščen v nižje plasti atmosfere. Izbrana delovna valovna dolžina lidarja omogoča, da je absorbcija UV na prevladujočih molekulah ozračja (N_2 , O_2 , O_3 , H_2O), zanemarljivo majhna (Liou, 2003).

Signal, ki se sipa nazaj v prostorski kot satelitskega sprejemnika, je zaradi Dopplerjevega efekta fazno zamaknjen. To je posledica gibanja molekul in večjih delcev v atmosferi, na katerih se signal siplje. To gibanje je v največji meri lastnost toka (veter). Hitrost premikanja molekul in delcev je sorazmerna s faznim zamikom, iz česar se lahko oceni hitrost vetra na mestu, kjer se je signal prvotno sipal (npr. Marseille in Stoffelen, 2003).



Slika 1: (a) Spekter Dopplerjevega zamika v primeru sipanja svetlobe na molekulah in večjih delcih ozračja. Spekter, ki ni fazno premaknjen, prikazuje črna polna krivulja. Fazni zamik, ki ustreza hitrosti vetra 50 m/s, prikazuje črna črtkana krivulja. Zvonasta oblika obeh krivulj ponazarja razpršenost v spektru kot posledica naključnega gibanja molekul (Brownovo gibanje). Širina Rayleighovega dela spektra je v enotah hitrosti 600 m/s. Ozek del krivulje z večjo amplitudo predstavlja Miejev del spektra, ki je posledica sipanja na večjih delcih. (b) Merjenje komponente vetra HLOS z ADM-Aeolus. Komponenta vetra HLOS je prikazana z modro puščico. Posamezno opazovanje je rezultat povprečenja meritev na dolžini akumulacije, ki je definirana na 90 km. Inštrument Aladin omogoča dva skoraj povsem ločena načina merjenja hitrosti vetra. V prvem se analizira Rayleighov del spektra laserske svetlobe, sipane na molekulah zraka. Porazdelitev molekul v atmosferi je opisana s porazdelitvijo gostote, ki z višino pada eksponentno. Meritev vetra iz Rayleighovega spektra je zaradi prisotnosti molekul teoretično možna v celotni atmosferi. Vendar se molekule zraka premikajo tudi naključno (t.i. Brownovo gibanje). Amplituda tega gibanja je odvisna od temperature in zračnega tlaka (Dabas et al., 2008). V spektru sipane svetlobe je to vidno kot razširitev približno Gaussovske oblike, t.i. Rayleigh–Brillouinov spekter, kar prikazuje slika 2(a). Širina spektra v enotah hitrosti znaša približno 600 m/s (npr. Stoffelen et al., 2005) in predstavlja glavni vir napak pri merjenju faznega zamika iz Rayleigh–Brillouinovega dela spektra (v nadaljevanju imenovan Rayleighov spekter).

Fazni zamik se meri tudi iz Miejevega delu spektra. Ta predstavlja sipanje laserske svetlobe na večjih delcih, kot so aerosol in prašni delci. Porazdelitev slednjih v atmosferi se v času in prostoru močno spreminja. Višje koncentracije teh delcev so prisotne predvsem v spodnjem delu atmosfere. V povprečju je v atmosferi značilno manj Miejevega kot Rayleighovega sipanja. Zaradi manjše nedoločenosti meritve vetra v Miejevem načinu $(\sim 10 \text{ m/s})$ (slika 2(a)), pa je slednji bolj zaželjen (Tan et al., 2008).

Rayleighovo in Miejevo sipanje sta kljub jasnim razlikam del istega spektra (slika 2(a)). Pri oceni Dopplerjevega zamika iz Rayleighovega dela spektra tako prihaja do onesnaženja signala z Mievim signalom in posledično večjih napak meritev hitrosti.

Zaradi velike nedoločenosti izračuna hitrosti vetra iz posameznega laserskega pulza je za uporabo meritev potrebno akumulirati 20 pulzov. Takšna meritev hitrosti vetra je osnovni produkt platforme ADM-Aeolus. Ker je hitrost gibanja satelita približno 7.6 km/s in frekvenca pošiljanja laserskih pulzov v atmosfero 50 Hz (ang. pulse repetition frequency), je meritev pridobljena s povprečevanjem 20 pulzov reprezentativna za območje ~3 km. Vendar takšen produkt zaradi svoje nedoločenosti še vedno ni primeren za asimilacijo v prognostičnem sistemu. Opazovanja z veliko napako namreč ne prispevajo veliko k izboljšanju analiz. Zato je potrebna dodatna akumulacija, približno 30 meritev v opazovanje profila HLOS, ki predstavlja povprečen veter na razdalji okoli 90 km. To razdaljo imenujemo razdalja akumulacije (L) in predstavlja območje reprezentativnosti oziroma horizontalno ločljivost opazovanj. Po zahtevah Svetovne Meteorološke Organizacije (ang. World Meteorological Organization - WMO) mora biti napaka opazovanj ADM-Aeolus primerljiva (oziroma manjša) napakam radisondažnih meritev (WMO, 2014, Stoffelen et al., 2005), ki so tipično 2-3 m/s. Vertikalna hitrost je pri izbrani razdalji akumulacije tipično zanemarljiva. Glavni produkt platforme ADM-Aeolus tako predstavlja horizontalna komponenta LOS (HLOS) (Tan et al., 2008). Shematsko to prikazuje slika 2(b).

Zaradi manjše koncentracije molekul višje v atmosferi in posledično večjih napak, je merjenje vetra iz Rayleighovega dela spektra omejeno na spodnjih ~ 25 km. Pri merjenju iz Miejevega dela spektra je to omejeno na spodnjih ~ 15 km. Podobno kot je definirana akumulacija v horizontali, je združevanje pulzov potrebno tudi v vertikali. To je narejeno tako, da je v celotnem profilu približno 21 meritev z vertikalno ločljivostjo, ki se določi vnaprej. Pri tleh ta znaša 500 m in na vrhu profila 2 km za Rayleigh oziroma 1 km za meritve tipa Mie (Tan et al., 2008).



Slika 3: 6-urna orbita ADM-Aeolus nad območjem Severnega Atlantika in Evrope. Razdalja med orbitami na zemljepisni širini 45 stopinj je približno 700 km. Razdalja med črnimi točkami je približno 90 km in prikazuje lokacijo profila opazovanja HLOS. Rdeče točke prikazujejo trenutno pokritost z radiosondažnimi meritami v 24 urah.

Satelit ADM-Aeolus je postavljen v orbito z inklinacijo 97 stopinj, v t.i. sončnosinhrono (ang. sun-synchronous) orbito, kjer je satelit vsak dan ob 06 UTC in 18 UTC nad neko točko na Zemlji vzdolž predpisane orbite, ki se ponovi vsakih 7 dni. Zaradi občutljivosti Dopplerjevega lidarja na hitrost gibanja sipalcev, je lidar obrnjen pod kotom 90 stopinj na smer potovanja. Poleg tega je zaradi delovne valovne dolžine v UV delu spektra, nagnjen pod kotom 35 stopinj stran od sonca, ki med drugim določa potreben odklon za merjenje HLOS (slika 2(b)). Satelit v 6 urah približno štirikrat prečka območje Severnega Atlantika in Europe kot prikazuje slika 3. Razdalja med sosednjima orbitama satelita bo v zmernih širinah okoli 700 km.

Osnovne lastnosti opazovanj HLOS

Lansiranje satelita v orbito je predvideno v letu 2018. Pred izstrelitvijo satelita je edini način analize produktov ADM-Aeolus uporaba simulatorja, ki prek osnovnih fizikalnih zakonitosti, ki opisujejo delovanje lidarja in sipanje EM valovanja v ozračju, simulira delovanje celotne platforme. Vhodni podatki v simulator, vzdolž predpisane orbite ADM-Aeolus so: vertikalni profil vetra, zračni tlak, temperatura in nekatere optične lastnosti atmosfere (npr. sipalni presek za molekule in aerosole). Glavni produkt simulatorja so opazovanja HLOS vzdolž zadane orbite. Realističnost simulatorja je predvsem omejena s kvaliteto vhodnih podatkov in z razumevanjem fizikalnih lastnosti ADM-Aeolus. Pomembna lastnost simulatorja pa je fleksibilnost.

Takšen simulator je bil narejen za misijo ADM-Aeolus v sklopu sodelovanja več skupin iz ESA in večih meteoroloških inštitutov, vključenih v razvoj misije: ECMWF, DLR, KNMI in Meteo France. Simulator se je uporabil v sklopu projekta na Katedri za meteorologijo v UL FMF. Vhodni podatki so bili prirejeni kot kompozicija dveh zelo kvalitetnih produktov. Prvi je 10 dnevna napoved ECMWF, narejena na visoki horizontalni ločljivosti približno 5 km. Ta predstavlja zelo konsistenten opis globalnega polja vetra, temperature in zračnega tlaka. Uporabil se je del simulacije nad območjem Severnega Atlantika in Evrope. Drugi del pa predstavljajo meritve nekaterih optičnih lastnosti ozračja v istem obdobju pridobljene s satelitom CALIPSO (Winker et al., 2010).

Osnovne karakteristike opazovanj HLOS so prikazane na primeru (slika 4). To je primer orbite, ki prečka območje Arktike, Evrope in Afrike (v tem vrstnem redu). Slika odraža nabor različnih procesov v atmosferi in z njimi povezanih lastnosti sistema ADM-Aeolus. Polja prikazana na sliki 4(a, b) predstavljajo vhodne podatke v simulator ADM-Aeolus. Sipalno razmerje (slika 4(a)) predstavlja razmerje med skupnim sipanjem na molekulah zraka in aerosolu in sipanjem na molekulah. V primeru, ko v atmosferi ni večjih delcev aerosola, je to razmerje enako 1, sicer je vrednost večja. Večje vrednosti, ki jih prikazuje slika, so povezane z oblaki baroklinih sistemov v zmernih zemljepisnih širinah, s padavinskimi sistemi v tropskem pasu in s transparentimi cirusnimi oblaki višje v troposferi. Pripadajoči profil vetra, simuliran z modelom ECMWF, preračunan v HLOS prikazuje slika 4(b). Rezultati simulatorja ADM-Aeolus so prikazani na sliki 4(c, d). To je veter HLOS v Rayleighovemu in Miejevemu delu spektra, prikazan za primer, ko je razdalja akumulacije približno 90 km. Opazimo več pomembnih značilnosti. Vsaka celica na sliki 4(c, d) predstavlja območje reprezentativnosti posameznega opazovanja. V obeh primerih so vrednosti HLOS, pridobljene s simulatorjem ADM-Aeolus, zelo primerljive simulirani resnici z ECMWF modelom. V Rayleighovem delu spektra je signal prisoten v celotnem profilu z izjemo območij povezanih z močno oslabitvijo signala v oblakih. Pod oblaki tipično ni dovolj dobrih opazovanj, razen pod optično tankimi cirusi, kjer je sipanje močno (Marseille and Stoffelen, 2003). Globlje v atmosferi oslabitev signala narašča in posledično pri tleh ni kvalitetnih opazovanj. Nasprotno je signal v Miejevem delu spektra prisoten predvsem tam, kjer so večje koncentracije aerosolov oziroma večji delci. To velja predvsem v oblakih (npr. cirus) in v izbranem primeru še posebej v prizemni plasti nad območjem Sahare, kjer je gostota prašnih delcev povečana.

Uporaba simulatorja predstavlja veliko prednost, saj poznamo vhodni signal, torej resnico. To dejstvo in obsežen nabor vhodnih podatkov (61 orbit) omogočata statistično obravnavo lastnosti opazovanj HLOS. V ta namen definiramo razliko E med vrednostmi HLOS dobljene iz simulatorja (slika 4(c, d)) in vrednostmi HLOS preračunane iz vhodnega vetra v simulator iz simulacije modela ECMWF (slika 4(b)). Izračunamo povprečno vrednost napake \bar{E} in njen standardni odklon σ_E (v nadaljevanju označeno STD), vključujoč vsa opazovanja vzdolž orbite. Prva količina predstavlja sistematično odstopanje in druga napako, oziroma odstopanje od povprečja.



Slika 4: Primer delovanja simulatorja ADM-Aeolus za orbito, ki prečka območje Afrike,
Europe in Arktike. (a) Vertikalni profil razmerja sipanja. Majhna slika kaže orbito satelita.
(b) Simulacija peofila vetra HLOS (m/s) vzdolž orbite. (c) HLOS izračunan iz
Rayleighovega dela spektra in iz (d) Mievega dela spektra v m/s.

Statistika je zbrana na sliki 5. Obliko profila napake opazovanj (STD) določata dva mehanizma. Gostota se z višino zmanjšuje, zato je v višjih plasteh troposfere in spodnjih plasteh stratosfere količina sipalcev majhna. Nižje v atmosferi se gostota molekul sicer poveča, kar predstavlja več sipanega signala. Vendar je signal, ko potuje nazaj proti satelitu, bolj oslabljen zaradi slojev ozračja, ki se nahajajo med sipalcem in satelitom. To prikazuje zmanjšanje količine kvalitetnih opazovanj (modra črtkana krivulja) v spodnji plasti troposfere (slika 5(a)). V obeh primerih se napaka pri oceni Dopplerjevega zamika, oziroma hitrosti HLOS, poveča. V osrednjih in višjih plasteh troposfere je napaka najmanjša. Ta za izbrano dolžino akumulacije 100 km znaša 2-3 m/s. Značilna sprememba napake se zgodi na približno 16 km in se pojavi zaradi spremembe v vertikalni ločljivosti opazovanj z 1 km na 2 km. Za uporabo HLOS opazovanj v prognostičnih modelih, je ključna primerjava ocene napake HLOS z dejansko napako. To se na sliki opazi iz primerjave oranžne in črne črtkane krivulje. Opazimo, da se ocena napake zelo dobro ujema z dejansko napako, kar kaže na konsistentnost platforme ADM-Aeolus.



Slika 5: Statistične lastnosti simuliranega vetra HLOS iz (a) Rayleighovega in(b) Mievega dela spektra. Sistematično odstopanje prikazuje črna polna krivulja. Standardni odklon (napaka), pridobljen iz primerjave s simuliranim vetrom je opisan z črno črtkano krivuljo. Napaka HLOS ocenjena s simulatorjem je prikazana z oranžno krivuljo. Modra črtkana krivulja opisuje število opazovanj na voljo v 10-dnevnem analiziranem obdobju. Rdeče obravane krivulje v tekstu niso obravnavane.

V Miejevem delu spektra so napake vetra in sistematično odstopanje v splošnem manjše kot v Rayleighovem delu spektra (slika 5(b)). Napake, pri izbrani razdalji akumulacije 60 km, znašajo približno 1 m/s, kar je za skoraj 2 m/s bolje kot v Rayleighovem delu spektra. To je pričakovano, saj je spekter Mie značilno ožji od spektra Rayleigh (slika 2(a)). Podobno kot v Rayleighovem delu spektra, so napake večje predvsem pri tleh in tudi višje v atmosferi. Tam se količina aerosolov in prašnih delcev značilno zmanjša, oziroma oslabitev signala je velika. Profil količine opazovanj (modra črtkana krivulja) poleg tega prikazuje dvoje. Maksimalna količina opazovanj je v povprečju skoraj 2 krat manjša kot v Rayleighovem delu spektra. Oblika profila pa nakazuje, da obstajata dve preferenčni plasti, kjer je opazovanj veliko. V plasteh do približno 2 km je to predvsem posledica sipanja na prašnih delcih (npr. prašni delci nad območjem Severne Afrike) in delcih v nižjih plasteh oblakov. Za plast nad 6 km pa je značilno sipanje na delcih v oblakih povezanih s konvektivnimi sistemi. Kot omenjeno so relativno majhne napake, poleg majhnega sistematičnega odstopanja, glavni pogoj za uporabo HLOS v postopku napovedovanja (WMO, 2014). Odvisnost napake opazovanj HLOS od razdalje akumulacije je prikazana na sliki 6. V Rayleighovem delu spektra je odvisnost napake približno obratno sorazmerna s kvadratnim korenom razdalje akumulacije. To je posledica napake pri procesu štetja fotonov na detektorju, kar opisuje Poissonova porazdelitev (Marseille et al., 2008). Zmanjšanje napake je mogoče s povprečevanjem meritev na večji skali. Vendar to vpliva na zmanjšanje števila opazovanj (slika 6(b)). V Miejevem delu spektra je odvisnost podobne oblike, vendar napaka doseže minimalno vrednost pri točno določeni vrednosti razdalje akumulacije. To je približno pri L = 90 km, kjer napaka znaša 1 m/s. Izbira optimalne dolžine akumulacije je tako kompromis med kvaliteto opazovanj in številom opazovanj. V modelih na omejenem območju je oboje pomemben faktor, saj je domena modela ponavadi majhna, potrebe po večji ločljivosti opazovanj pa velike.



Slika 6: (a,c) Napaka opazovanj HLOS in (b,d) količina opazovanj v odvisnosti od razdalje akumulacije v različnih plasteh atmosfere za meritve tipa (a,b) Rayleigh in (c,d) Mie. Količina opazovanj je v enotah 1000. Polne krivulje v (a, b) prikazujejo standardni odklon na celotnem vzorcu 61 orbit v obdobju 10 dni. Črktane krivulje prikazujejo oceno napake opazovanj HLOS pridobljeno iz simulatorja

Uporaba opazovanj HLOS v mezoskalnih prognostičnih modelih

Vpliv opazovanj HLOS je v modelih na omejenem območju zaenkrat komaj raziskan. Število uporabnih opazovanj ADM je določeno z velikostjo domene in izbrano dolžino akumulacije. Slika 3 prikazuje primerjavo med trenutnim sistemom meritev profila vetra iz radiosondaž (približno 100 profilov) in profili vetra ADM-Aeolus (približno 160 profilov) v šestih urah z dolžino akumulacije 90 km. Število novih opazovanj vertikalnih profilov vetra je nad kopnim primerljivo, oziroma je nekoliko manjše kot je število profilov vetra iz radiosondaž v obdobju 24 ur. Čeprav vsebujejo opazovanja ADM-Aeolus le polovico informacije vetra v primerjavi z radiosondažnimi podatki, so lahko zelo pomembna za

opazovanje nastanka nevihtnih sistemov nad Atlantikom. Kot lahko opazimo, so edina opazovanja vetra nad Severnim Atlantikom opazovanja ADM-Aeolus (pritem zanemarimo AMV). Zanima nas vpliv opazovanj HLOS na izboljšanje napovedi vremena nad Evropo.

Priprava sistema za asimilacijo podatkov HLOS in napovedovanje

V okviru projekta smo na Katedri za meteorologijo FMF UL postavili sistem za asimilacijo opazovanj HLOS v mezoskalni model. Sistem sestavlja napredna shema za asimilacijo DART, ki je razvita na oddelku za razvoj metod asimilacije podatkov (DAReS) v Nacionalnem centru za raziskave atmosfere (ang. National Center for Atmospheric Research - NCAR) v ZDA (Anderson et al., 2009). DART je sklopljen z modelom za napovedovanje vremena WRF (ang. Weather Research and Forecasting, Skamarock et al., 2008). Asimilacijska shema DART spada v skupino asimilacijskih metod s pomočjo ansamblov, t.i. EnKF (ang. Ensemble Kalman filter). V primerjavi z variacijsko metodo, ki se je uporabila v preteklih študijah vpliva ADM-Aeolus, metoda z ansambli ocenjuje kovariance napak prvega približka iz ansambla kratkoročnih napovedi. Kovariance so zelo pomembna količina v postopku asimilacije, saj določajo, kako so napake napovedi različnih spremenljivk (npr. temperatura in veter) med seboj povezane. Lahko pričakujemo, da so kovariance pridobljene z metodo EnKF bolj realistične kot kovariance, ki jih uporablja variacijska metoda.

Nov sistem je zastavljen z ansamblom 50 članov, kar predstavlja tipično izbiro za modele podobnih lastnosti (Schwartz et al., 2015). Pri mezoskalnem modeliranju, poleg dobrih začetnih pogojev vsak član ansambla potrebuje tudi stranske robne pogoje. To je zelo pomembno v asimilaciji tipa EnKF, saj omejena velikost ansambla in nepoznavanje napak modela lahko privedejo do slabe učinkovitosti asimilacije. V našem sistemu so robni pogoji določeni za vsakega člana v ansamblu posebej, kar predstavlja trenutno najbolj učinkovito metodo. Za pripravo robnih pogojev se uporablja ansambel 50 članov napovedi operativnega sistema ECMWF.

Asimilacija meritev HLOS

Opazovanje HLOS je linearna kombinacija dveh komponent horizontalnega vetra. V neki točki se HLOS računa z naslednjo enačbo

$$HLOS(\alpha) = Usin(\alpha) + Vcos(\alpha), \tag{1}$$

kjer kot α predstavlja azimut, kot med linijo usmeritve lidarja in severom (slika 2(b)), U in V sta zonalna in meridionalna komponenta vetra. V bližini ekvatorja je HLOS skoraj enak zonalnemu vetru, ker je azimut okoli 80°. Na zemljepisni širini 45° azimut znaša približno 60° oziroma je HLOS za 30° odmaknjen od zonalne smeri. Globalno bodo opazovanja ADM-Aeolus bolj prispevala opisu zonalnega kot meridionalnega toka.

V postopku asimilacije se opazovanje kombinira s prvim približkom, ki je na razpolago iz prejšnje modelske napovedi (običajno 3-urne ali 6-urne napovedi). Pri tem se dve informaciji utežita glede na njuni napaki. Rezultat linearne kombinacije enega ali več opazovanj v neki točki in prvega približka je analiza. Razlika med analizo in prvim približkom se imenuje prirastek analize in opisuje vpliv opazovanj. Posamezno opazovanje ne vpliva samo na vrednost v točki, v kateri je narejeno, ampak se njegov vpliv razprši v sosednje točke v horizontali in vertikali v modelskem prostoru. Razpršitev je določena z

lastnostmi napak, opisanih v matrikah kovarianc napak prvega približka in opazovanj. Razpršitev se dogaja tudi med spremenljivkami, tako da opazovanja vetra vplivajo na analizo polja temperature in nasprotno. To medsebojno delovanje spremenljivk v asimilaciji imenujemo multivariatna asimilacija.

V postopku asimilacije ohranjamo opazovanja čimbolj v njihovi izvirni obliki, in njihov prvi približek določimo iz modelskih spremenljivk. Tako pri asimilaciji posameznega opazovanja

HLOS najprej iz prvega približka vetra izračunamo prvi približek HLOS kot $HLOS_b = U_b sin(\alpha) + V_b cos(\alpha)$, kjer sta U_b in V_b kratkoročna napoved vetra, azimut α je znan vnaprej. $HLOS_b$ se primerja z meritvijo $HLOS_o$ in se določi prirastek analize $\Delta HLOS$ kot $\Delta HLOS = HLOS_a - HLOS_b = k(HLOS_o - HLOS_b)$, kjer je utež k definirana kot razmerje varianc napak prvega približka (σ_b) in opazovanja (σ_o): $k = \sigma_b^2/(\sigma_b^2 + \sigma_o^2)$. Prirastek Δ HLOS je na koncu potrebno preračunati v prirastke zonalne in meridionalne komponente vetra. Opisani postopek bomo ilustrirali s primerom.

Pri ansambelski asimilaciji lahko prirastke analize analiziramo za vsak član ansambla. Prirastek bo zaradi opazovanj HLOS vplival na prirastke v polju zonalnega vetra, meridionalnega vetra, temperature in vlage. Amplituda prirastkov je odvisna od dveh lastnosti. Prva je kovarianca prvega približka. Ta opisuje, kako dobra je napoved in kako so med seboj povezane napake v prostoru in med različnimi spremenljivkami. Drugo lastnost predstavlja azimut in napaka opazovanj HLOS. To najlažje razložimo s pomočjo eksperimenta, v katerem smo asimilirali samo eno opazovanje HLOS. Opazovanje je asimilirano na relativno mirnem območju na ploskvi 850 hPa nad Severnim Atlantikom.

Veter na izbrani lokaciji je v prvem približku skoraj povsem zonalen $\overline{V_b} = (U,V) = (10.38, 0.91)$ m/s. Smer vetra je za približno 5° severno od zonalne komponente. Opazovanje v isti točki kaže v enako smer kot $\overline{V_b}$, vendar je veter za približno 3 m/s močnejši; $\overline{V_o} = (U,V) = (13.00, 1.14)$ m/s.

Iz opazovanja $\overrightarrow{V_o}$ smo izračunali HLOS za poljuben azimut med 0° (meridionalni veter) in 90° (zonalni veter). Opazovanje HLOS je nato asimilirano v EnKF in analizirani so prirastki analize v odvisnosti od azimuta. Za primerjavo je narejen eksperiment (označen UV), v katerem sta obe komponenti vetra, U in V, asimilirani skupaj. Rezultati so prikazani na sliki 7. Najprej opazimo, da je informacija opazovanja vetra v eni točki razpršena v bližnjo okolico kot je določeno s poljem kovarianc. Amplituda prirastka vetra je največja, ko HLOS kaže približno v enako smer kot izmerjeni veter, torej za $\alpha = 85^\circ$. Najmanjši prirastki pa so v primeru, ko je HLOS postavljen pravokotno na prvi približek $HLOS_b$, oziroma $\alpha = -5^\circ$. Zaradi povezave med kovariancami napak v poljih prvega približka vetra in temperature opazovanje HLOS povzroča tudi prirastke v polju temperature. Prirastki temperature so sicer majhni (reda 0.1 K), kar kaže, da je korelacija med vetrom in temperaturo v izbranem primeru majhna.

Odvisnost amplitude prirastkov analize od azimuta je prikazana na sliki 8. Amplituda prirastka zonalnega vetra monotono narašča z naraščanjem azimuta. V meridionalem vetru pa je odvisnost kvadratna, kar je posledica dveh mehanizmov. Bolj kot je azimut blizu 0°, bolj naraščajo prirastki v meridionalnem vetru, zaradi večje korelacije med HLOS in meridionalno komponento vetra. Vendar ko bo azimut dovolj majhen, prevladuje dejstvo, da je vrednost HLOS v opazovanju in v prvem približku zelo blizu 0 m/s, kar povzroči, da so prirastki zanemarljivi. Zelo podobni rezultati so predstavljeni v študiji (Žagar, 2004), kjer so v primeru tridimenzionalne variacijske metode asimilacije opazovanja HLOS komaj vplivala na drugo komponento vetra in druge spremenljivke. Rezultati na sliki 8 torej predvsem odražajo lastnosti opazovanj HLOS.


Slika 7: Prirastki analize pri asimilaciji enega opazovanja HLOS za različne vrednosti azimuta . Opazovanje je asimilirano v mirnem območju na ploskvi 850 hPa nad Severnim Atlantikom (modra točka). Prirastki temperature v K so v pobarvanih izolinijah, hitrost v m/s je predstavljena z črtastimi izolinijami in vektorji. Referenčni eksperiment (UV) predstavlja asimilacijo zonalne in meridionalne komponente vetra (zgoraj levo). Barvna tabela in velikost vektorjev vetra sta na spodnjih dveh slikah prilagojena manjšim prirastkom analize.



Slika 8: Amplituda prirastkov analize na lokaciji opazovanja na sliki 7 v zonalnem vetru (rdeče), meridionalnem (modro) in komponenti HLOS (črno) v m/s. Dve horizontalni črti označujeta prirastka v zonalnem in meridionalnem vetru za primer, ko se asimilirata obe komponenti vetra (UV).

Primerjava vpliva meritev HLOS s posameznimi komponentami vetra

Glavni eksperiment, narejen v sklopu projekta, je asimilacija opazovanj HLOS v daljšem časovnem obdobju. Cilj tega eksperimenta je primerjati statističen vpliv opazovanj HLOS na kvaliteto analize v primerjavi z vplivom opazovanj U in V. Ker realnih opazovanj ni, so opazovanja generirana na posebno pripravljeni mreži, prikazani na sliki 9 skupaj z modelskim računskim območjem. Mreža opazovanj je homogena, kar omogoča zelo učinkovito primerjavo vpliva opazovanj različnih komponent vetra.



Slika 9: Domena mezoskalnega modela v študiji vpliva opazovanj HLOS v mezoskalnem modelu. Oranžne točke predstavljajo lokacije profilov opazovanj. V vsaki točki je pod ploskvijo 100 hPa približno 50 opazovanj temperature, zonalnega in meridionalnega vetra in opazovanj HLOS.

V vsaki točki z opazovanji je med tlemi in 100 hPa definiran profil s približno 50 opazovanji U, V, HLOS in temperature (T). Opazovanja so generirana iz daljše simulacije z modelom WRF na ločljivosti 10 km in z različnimi parametrizacijami kot v asimilacijskem ciklu. Tako pripravljen eksperiment spada v skupino t.i. eksperimentiov OSSE (ang. Observing System Simulation Experiment, Atlas, 1997). Narejenih je več eksperimentov, v katerih so vsakih 6 ur, v obdobju od 5-20 septembra 2015, asimilirana opazovanja T, U, V in HLOS ali njihove kombinacije. V referenčnem eksperimentu TUV se asimilira opazovanja T, U in V. V eksperimentih TU, TV in THLOS pa se asimilira temperatura in ena izmed komponent vetra: U, V oziroma HLOS. Asimilirana opazovanja temperature simulirajo karakteristike trenutnega opazovalnega sistema, saj je večina opazovanja prav opazovanja temperature.



Slika 10: Primer fronte v Severnem Atlantiku (a) na ploskvi 925 hPa in (b) na ploskvi 200 hPa. Temperatura v K (pobarvane konture), vektorji in hitrost vetra v m/s in lokacija hladne fronte (rumena črta).



Slika 11: Primerjava polja vetra in temperature na delu fronte iz slike 10 na ploskvi 925 hPa. (Levo) Simulirana resnica,(sredina) povprečni prvi približek in (desno) prvi približek za prvi član ansambla. Hitrost v m/s (barvne izolinije), temperatura v K (črne izolinije) in vektorji vetra. Opazovanja so asimilirana na lokaciji modre točke.

Po pričakovanjih so najboljši rezultati pridobljeni v eksperimentu TUV. Opazovanja HLOS vplivajo na kvaliteto napovedi podobno kot katerakoli komponenta vetra (U ali V). Prispevek HLOS k kvaliteti analize U in V komponent vetra je razporejen sorazmerno z azimutom 60°, kar pomeni, da HLOS vpliva okoli dvakrat več na zonalni kot na meridionalni veter. Rezultati projekta nakazujejo, da lahko opazovanja HLOS iz satelita ADM-Aeolus prispevajo k izboljšanju napovedi vremena nad Evropo. To velja še posebej v primeru, ko satelit prispeva opazovanja profilov vetra nad frontami v Severnem Atlantiku. Prav takšen primer je predstavljen na naslednjih slikah.

Slika 10 prikazuje primer hladne fronte v Severnem Atlantiku na ploskvi 925 hPa. Fronto zaznamujejo procesi na dveh prostorskih skalah, znani kot semi-geostrofska cirkulacija. Vzdolž fronte, z velikostnim redom 1000 km, približno velja geostrofsko ravnovesje med poljem vetra in temperature, ki je sicer tipično na sinoptičnih skalah. Pri takšnem ravnovesju je možno vsaj delno določiti polje vetra iz opazovanj temperature. Druga skala opisuje bolj pomembne procese čez fronto z velikostnim redom do 100 km. Ti so močno ageostrofske narave in so povezani z vertikalno cirkulacijo in padavinami ob fronti. Opazovanja vetra so tu posebej koristna za zanesljiv opis cirkulacije, saj iz meritev temperature ne moremo oceniti komponente vetra prečno na fronto.



Slika 12: Prirastki analize v točki s slike 11. Prikazani so eksperimente, kjer se asimilirajo različne kombinacije opazovanj horizontalnega vetra (U), meridionalnega vetra (V), temperature (T) in HLOS z azimutom 60°. Prirastki v polju temperature v K so prikazani z barvnimi izolinijami, v polju hitrosti v m/s z črnimi izolinijami in z vektorji vetra.

V primeru fronte na sliki 10, so opazovanja U, V, T in HLOS asimilirana v eni sami točki nekaj 10 km vzhodno od hladne fronte, kot je prikazano na sliki 11. Prikazana je primerjava med simulirano resnico (ang. Nature run) in prvim približkom. Opazimo lahko, da je v prvem približku gradient v polju temperature za fronto značilno večji in da je striženje vetra čez fronto bolj izrazito kot v resnici. Poleg tega, fronti v prvem približku manjka ukrivljenost. V točki, kjer se asimilira opazovanje (modra točka na sliki 11), je veter v prvem približku enak $\overrightarrow{V_b} = (U, V) = (4, -7)$ m/s, izmerjeni veter pa je $\overrightarrow{V_o} =$ (U, V) = (8, -9) m/s in je torej usmerjen nekoliko bolj zonalno kot v prvem približku. Asimilira se tudi opazovanje temperature, ki je v prvem približku 284 K, izmerjena vrednost pa je za 2 K večja. Opazovanje HLOS je izračunano iz vrednosti $\overrightarrow{V_o}$ z azimutom 60°.

Prirastki analize iz različnih opazovanj so prikazani na slikah 12 in 13. Razlika med resnico in prvim približkom, ki predstavlja referenčno polje za prirastke analiz, je prikazana na sliki 13. Med eksperimenti, v katerih je asimilirano samo eno opazovanje, je največje prirastke v polju vetra povzročilo opazovanje temperature. Prirastki v polju temperature so sicer zelo majhni (10% razlike med resnico in prvim približkom), kar je posledica majhne napake v prvem približku temperature. Prirastki v polju vetra so, v primerjavi z ostalimi eksperimenti, zelo veliki (do 3 m/s). To je posledica močne sklopitve med vetrom in temperaturo vzdolž fronte. Opazovanji zonalnega in meridionalnega vetra prispevata k analizi različno. V primeru, ko se asimilira meridionalni veter, so prirastki

podobni kot v eksperimentu T, vendar z manjšo amplitudo. Ko pa se asimilira zonalni veter, imajo prirastki vetra nasprotno smer. Glavni razlog teh razlik je v sklopitvi med zonalnim in meridionalnim vetrom, ki ga določajo kovariance v polju prvega približka. Na sliki 11 opazimo, da je lokacija opazovanja ravno na območju, kjer je prisotno močno striženje. Tako povečanje (zmanjšanje) zonalne hitrosti sovpada s povečanjem (zmanjšanjem) meridionalne hitrosti. Ker opazovanje V_0 sugerira, da je v primerjavi s prvim približkom V_b potrebno hkrati povečati zonalno hitrost in zmanjšati meridionalno hitrost, bodo prirastki dveh komponent vetra nasprotni v smeri, kot prikazuje slika 12. Asimilacija opazovanja HLOS z azimutom 60° po pričakovanjih ustvari prirastke bolj podobne tistim iz eksperimenta U kot V. Prirastki analize imajo večjo amplitudo in so bolj natančni, če se asimilirata opazovanji temperature in vetra hkrati (slika 12 levo). Pričakovano, največje prirastke prispeva eksperiment TV.



Slika 13: (Levo) Kot na sliki 12 vendar za primer, ko se asimilirata obe komponenti vetra in ko se asimilira HLOS, ki je merjen vzdolž vektorja vetra. (Desno) Razlika med resnico in prvim približkom.

Pomembno lastnost opazovanja HLOS lahko opazimo, če primerjamo prirastke iz eksperimentov UV in HLOSuv na sliki 13. V obeh eksperimentih se asimilira celotna informacija o vetru, vendar v primeru HLOSuv asimilacijo dveh ločenih komponent vetra nadomesti HLOS usmerjen v smer vektorja vetra. Kljub enaki informaciji o opazovanju vetra, so prirastki analiz značilno različni. Eno samo opazovanje v eksperimentu HLOSuv prispeva večje prirastke kot če se asimilirata dve skalarni komponenti. Ker je metoda asimilacije sekvenčna, se vsako opazovanje asimilira posebej. To pomeni da se prirastki v eksperimentu UV približno odštevajo, kot prikazujejo prirastki v eksperimentu HLOSuv asimilira naenkrat, kar se izkaže za bolj učinkovito. Ta primer fronte kaže, da so opazovanja HLOS ne le bolj učinkovita kot ena sama komponenta vetra, ampak so lahko celo bolj učinkovita kot celotni vektor vetra.

Zaključki

Satelitske meritve prispevajo več kot 90% vseh opazovanj ozračja. Pri tem pa prevladujejo opazovanja polja mase (večinoma temperature), katerih je veliko več kot

opazovanj vetra. Primanjkljaj direktnih opazovanj profilov vetra bo leta 2018 poskušal vsaj nekoliko zapolniti satelit Evropske vesoljske agencije ADM-Aeolus. V članku so predstavljene osnovne značilnosti satelita ADM-Aeolus. Njegova opazovanja Dopplerjevega zamika laserskega signala na molekulah in delcih ozračja spremljajo velike napake. Glavni razlog je naključno gibanje molekul, ki v spektru izmerjenih hitrosti lahko znaša več 100 m/s. Zaradi velikih napak je potrebna akumulacija več meritev v posamezno opazovanje. Akumulacija več meritev prispeva k zmanjšanju napake, vendar pa se sorazmerno zmanjša tudi število opazovanj. Za uporabo opazovanj v postopku priprave začetnih pogojev numerične napovedi vremena je predvidena akumulacija meritev vzdolž orbite dolžine 90 km. Opazovanja imajo v tem primeru napake reda 1-2 m/s, kar je primerljivo s trenutnimi napakami radiosondažnih meritev. Meritev Dopplerjevega zamika se opravlja ločeno za Ralyeighov in Miev del spektra. Zelo kvalitetna so opazovanja, izračunana iz Miejevega dela spektra, vendar pa je teh v zmernih zemljepisnih širinah tipično dvakrat manj kot opazovanji iz Ralyeighovega dela spektra.

Pričakuje se, da bo globalna pokritost satelitom ADM-Aeolus pozitivno vplivala na kvaliteto začetnih pogojev (analiz) predvsem na območjih, kjer opazovanj vetra trenutno ni. To so območja v tropskem pasu in nad oceani, predvsem nad južno poloblo. Sicer bodo nova opazovanja koristna povsod in za opis procesov, pri katerih je sklopitev med poljem mase in poljem vetra šibka. V preteklosti narejene študije vpliva opazovanj vetra na izboljšanje napovedi vremena kažejo, da imajo profili vetra pomembno vlogo za kvaliteto napovedi, posebej informacija o vertikalnem striženju vetra. V zmernih zemljepisnih širinah je striženje vetra ključno za razvoj ciklonov. Študije vpliva ADM-Aeolusa so pokazale, da je izboljšanje 6 dnevne napovedi v tropskih območjih lahko tudi do 2 dni.

Katedra za meteorologijo UL FMF je v sklopu posebnega projekta ocenjevala potencialni vpliv opazovanj ADM-Aeolus v modelih na omejenem območju nad Evropo in severnim Atlantikom. Nekateri rezultati projekta so predstavljeni v tem članku. Opisano je, kako uporabljeni sistem za asimilacijo in napovedovanje DART/WRF asimilira posamezno opazovanje HLOS. Na primeru je pokazano, kako ena komponenta vetra vpliva na prirastke analize v okolici fronte nad Severnim Atlantikom. Posebej je zanimiv rezultat, ki kaže, da je v primeru ansambelske asimilacije lahko asimilacija vetra v obliki HLOS komponente v smeri toka bolj učinkovita kot asimilacija dveh komponent vektorja vetra.

Literatura

- Anderson J., Hoar T., Raeder K., Liu H., Collins N., Torn R., Avellano A. (2009). The data assimilation research testbed a community facility. Bulletin of the American Meteorological Society, 90(9):1283–1296.
- Andersson E., Dabas A., Endemann M., Ingmann P., Källén E., Offiler D., Stoffelen A. (2008). ADM-Aeolus Science Report, ESA.
- Atlas R. (1997). Observing System Simulation Experiments: Methodology, examples and limitations. Proceedings of CGC/WMO Workshop on Impact of various observing systems on numerical weather prediction, Geneva, 7–9 April, WorldWeatherWatch Technical Report No 18, TD No. 868, WMO, Geneva, Switzerland, 155–163
- Baker W. E., Atlas R. M., Cardinali C., Clement A., Emmitt G. D., Gentry B. M., Hardesty R. M., Källén E., Kavaya M. J., Langland R., Ma Z., Masutani M., McCarty W., Pierce R. B., Pu Z., Riishøjgaard L. P., Ryan J., Tucker S., Weissmann M., Yoe J. G. (2004). Lidar-measured wind profiles: The missing link in the global observing system. Bulletin of the American Meteorological Society, 95(4):543–564.
- Dabas A., Denneulin M. L., Flamant P., Loth C., Garnier A., Dolfi-Bouteyre A. (2008). Correcting winds measured with a Rayleigh Doppler lidar from pressure and temperature effects. Tellus A, 60:206–215

- ECMWF/EUMETSAT. (2013). Satellite data assimilation course. URL <u>http://www.ecmwf.int/newsevents/training/2013/nwp-saf/</u> (1.11.2017).
- Flamant P., Cuesta J., Denneulin M. L., Dabas A., Huber D. (2008). ADM-Aeolus retrieval algorithms for aerosol and cloud products. Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 60 A(2):273–288.
- FMF. (2016). Workshop on Wind Profiles and Mesoscale Data Assimilation. URL <u>http://meteo.fmf.uni-lj.si/en/workshop</u> (1.11.2017).
- Horanyi A., Cardinali C., Rennie M., Isaksen L. (2015). The assimilation of horizontal line-of-sight wind information into the ECMWF data assimilation and forecasting system. Part I: The assessment of wind impact. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(689):1223–1232.
- Kalnay E. (2003). Atmospheric Modeling Data Assimilation and Predictability. Cambridge University press.
- Liou Y. Y. (2002). An introduction to atmospheric radiation, druga izdaja, Academic press.
- Marseille G. J., Stoffelen A. (2003). Simulation of wind profiles from a space-borne Doppler wind lidar. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 129(594 PART A):3079–3098.
- Marseille G. J., Stoffelen A., Berkmeijer J. (2008). Impact assessment of prospective spaceborne Doppler wind lidar observation scenarios. Tellus A, 60:234–248, 2008.
- Schwartz C. S., Romine G. S., Sobash R. A., Fossell K. R., Weisman M. L. (2015). NCAR's experimental real-time convection-allowing ensemble prediction system. American Meteorological Society, 30(6): 1645-1654.
- 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. URL <u>http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/</u> (1.11.2017).
- Stoffelen A., Pailleux J., Källén E., Vaughan J. M., Isaksen L., Flamant P., Wergen W., Andersson E., Schyberg H., Culoma A., Meynart R., Endemann M., Ingmann P. (2005). The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement. American Meteorological Society, 86:73–87.
- Stoffelen A., Marseille G. J., Bouttier F., Vasiljevic D., Haan S. D., Cardinali C. (2006). ADM-Aeolus Doppler wind lidar Observing System Simulation Experiment. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 132:1927–1947.
- Tan D. G. H., Andersson E., Fisher M., Isaksen L. (2007). Observing-system impact assessment using a data assimilation ensemble technique: application to the ADM–Aeolus wind profiling mission. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133:381–390.
- Tan D. G. H., Andersson E., Kloe J. D., Marseille G. J., Stoffelen A., Poli P., M. Denneulin L., Dabas A., Huber D., Reitebuch O., Flamant P., Rille O. L., Nett H. (2008). The ADM-Aeolus wind retrieval algorithms. Tellus A, 60:191–205.
- Winker D. M., Pelon J., Coakley J. A., Ackerman S. A., Charlson R. J., Colarco P. R., Flamant P., Fu Q., Hoff R. M., Kittaka C., Kubar T. L., Le Treut H., McCormick M. P., Megie G., Poole L., Powell K., Trepte K., Vaughan M. A., Wielicki B. A. (2010). The Calipso Mission: A Global 3D View of Aerosols and Clouds. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(9):1211–1229.
- WMO. (2014). Global obseravtions system. URL

http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html (1.11.2017).

- Žagar N. (2004). Assimilation of Equatorial Waves by Line-of-Sight Wind Observations. Journal of the Atmospheric Sciences, 61:1877–1893.
- Žagar N., Stoffelen A., Marseille G. J., Accadia C., Schlüssel P. (2008). Impact assessment of simulated Doppler wind lidars with a multivariate variational assimilation in the Tropics. Monthly Weather Review, 136:2443–2460.

Avtomatske meritve vetra

Primož Mlakar^{*}, Marija Zlata Božnar^{*}, Boštjan Grašič^{*}, Franci Gabrovšek^{**}

Povzetek

Veter predstavlja pomembno naravno spremenljivko, ki vsakodnevno vpliva na življenja in delo ljudi. Kljub nenadomestljivosti človeka pri opazovanju in beleženju nekaterih naravnih pojavov so se meritve za potrebe napovedovanja vremena in proučevanja podnebja relativno hitro avtomatizirale. V prispevku so predstavljene avtomatske meritve vetra z različnimi senzorji, ki se uporabljajo za različne namene kot so na primer tudi določanje razširjanja onesnaževal v ozračju ali spremljanje klime v kraških jamah.

Ključne besede: veter, pretok zraka, avtomatske meritve, kraške jame **Key words**: wind, air flow, automatic measurements, karst caves

Uvod

Veter je naravna spremenljivka, ki nas spremlja skozi celo življenje. Lahko smo ljubitelji vetra, na primer jadralci in si želimo močnejši veter, lahko sovražimo veter in iščemo zatišje, vsi pa se bojimo močnega vetra, ki nas lahko poškoduje. Veter nam daje tudi energijo. Veter poganja jadrnice, mline, vodne črpalke, v zadnjem času pa nam daje električno energijo.

Ljudje, ki so bili odvisni od vetra, so začeli meriti veter, najprej z opazovanjem posledic na okolici. Tako je nastala zelo znana Beaufortova lestvica, ki je dobila ime po angleškem mornariškem oficirju iz začetka 19. stoletja (Huler, 2007; Wikipedia, 2017b). Lestvica je razdeljena na 13 stopenj od 0. za brezvetrje do 12. za najmočnejše vetrove. Skala je določena tudi opisno, na primer za 3. stopnjo: hitrost od 12 do 19 km/h, manjši valovi, vrhovi se začno lomiti, višina valov na odprtem morju okoli 0,6 m.

Če želimo razumeti, kako merimo veter, moramo poznati njegove lastnosti. Veter je gibanje zraka, ki pa ni nikoli enakomerno. Zato je merjenje vetra še danes velik izziv. Napravo, ki meri veter, imenujemo vetromer oziroma s tujko anemometer. Lahko merimo samo hitrost vetra, vendar pa običajno merimo skupaj smer in hitrost vetra v vodoravni smeri. Za posebne analize pa merimo veter v vseh treh dimenzijah.

Mehanski anemometer naj bi že v 15. stoletju iznašel Leon Battista Alberti, vendar za očeta anemometra z vrtečimi se skodelicami priznavamo J.T.R Robinsona v 19. stoletju (Dines, 2007; Wikipedia, 2017a).

Mehanski anemometri so imeli zapletene mehanizme za prikaz hitrosti vetra. Take meritve pa je moral opravljati človek. Šele z razvojem elektronike in mikroračunalnikov v 70. letih prejšnega stoletja pa so se uveljavile avtomatske meritve. Avtomatske se imenujejo, ker je stroj oziroma računalnik nadomestil človeka pri merjenju, obdelavi meritev, prenosu podatkov, shranjevanju in prikazovanju. V stroki običajno uporabljamo izraz "avtomatski" ker izraz "samodejen" lahko zavede, ker avtomatska naprava ne dela sama od sebe, ampak po točno določenih in vnaprej predvidenih programskih ukazih programerja.

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

^{**} Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija

Senzorji za avtomatske meritve vetra

Za avtomatske meritve vetra potrebujemo senzorje, ki glede na veter oddajajo analogne ali digitalne električne signale. V preteklosti so se zaradi cenenosti največ uporabljali mehanski z vrtečimi se skodelicami za hitrost vetra in smernim krilom za smer vetra. Vrteče se skodelice so poganjale majhen enosmerni generator, ki je proizvajal enosmerno napetost. Napetost je bila sorazmerna hitrosti vetra, smerno krilo pa je bilo povezano s krožnim potenciometrom. Potenciometer je spremenljiv upor v odvisnosti od smeri vetra. Če je bil potenciometer priklopljen na enosmerno napetost, je bila izhodna napetost na potenciometru proporcionalna smeri vetra. Največja pomankljivost te metode pa je, da pri določeni smeri napetost preskoči med najmanjšo in največjo napetostjo. Ti senzorji se danes redkeje uporabljajo, ker so predvsem pri šibkejših vetrovih manj natančni.

Napredek pri mehanskih senzorjih je prinesla optoelektronika. Optoelektronski senzor za hitrost vetra ima na osi vrtečih se skodelic nazobčano ploščico (stroboskop), ki prekinja svetlobo svetleče diode. Na drugi strani je foto tranzistor, ki sprejema svetlobo diode. Ko se ploščica vrti, foto tranzistor ojači spreminjanje svetlobe in tako dobimo na izhodu senzorja električne inpulze. število impulzov v določenem času je sorazmerno povprečni hitrosti vetra v tem času.



Slika 1 - Klasični optoelektronski senzor za hitrost vetra, izdelan na Institutu Jožef Stefan (IJS) sredi 80. let preteklega stoletja



Slika 2 - Posebni optoelektroski senzor z magnetnimi ležaji, izdelan na IJS konec 80. let preteklega stoletja za zanesljivejše meritve šibkih vetrov

Pri optoelektronskem senzorju za smer vetra je smerno krilo povezano s ploščico ali skodelico, ki ima vgravirano Gray-evo kodo (Gray, 1953; Wikipedia, 2017c), ki zagotavlja beleženje smeri vetra brez nezaželenih preskokov. Pod in nad ploščico so pari fotodiod in foto tranzistorjev, ki se odzivajo na spremembe smeri. Več kot je parov, bolj natančen je senzor. Običajno imajo senzorji šest parov, kar pomeni šestbitni senzor. Šestbitni senzor omogoča meritve z ločljivostjo pet kotnih stopinj.



Slika 3 - Primer tribitne Gray-eve kode (Gray, 1953; Wikipedia, 2017c)



Slika 4 - Klasični optoelektronski senzor za smer vetra razvit na Institutu Jožef Stefan (IJS)



Slika 5 - Razstavljen senzor za smer vetra, kjer se lepo vidi črna skodelica s šestbitno Gray-evo kodo

Za natančnejše meritve vetra in za meritve turbulentnosti vetra uporabljamo ultrazvočne (UZ) senzorje, ki merijo hitrost zvoka med oddajnikom in sprejemnikom zvoka nad frekvencami, ki jih slišimo. Če piha veter proti sprejemniku, se hitrost zvoka poveča, pri obratni smeri pa se zmanjša. Z dvema paroma oddajnik–sprejemnik merimo veter v dveh dimenzijah (2D UZ anemometri), s tremi pari pa v treh dimenzijah (3D anemometri). Ultrazvočne senzorje za veter imenujemo UZ anemometri oziroma UZ merilniki vetra, ker so to mikroprocesorsko vodeni merilniki. Izhod UZ anemometra je običajno serijski računalniški prenos preko protokola RS-485. Opcijsko imajo običajno tudi analogne izhode za priklop na starejše merilne postaje.



Slika 6 - 2D UZ anemometer v Brežicah

Smeri in hitrosti vetra lahko merimo tudi na daljavo, brez fizičnega stika. Eden od takih merilnikov je SODAR (ang. SOnic Detection And Ranging) (Beyrich, 1997; Wikipedia, 2017d). Merilnik deluje tako, da odda zvočni signal v izbrano smer atmosfere, potem pa posluša povratne odboje. Odboji nastanejo zato, ker zvok ne prodira zgolj naprej, temveč se tudi odbija nazaj od zračnih mas. Če se zračna masa v smeri razširjanja zvoka premika, potem pride do doplerjeve spremembe frekvence zvoka. Na sprejemni enoti se to doplerjevo spremembo frekvence izmeri in iz tega neposredno izračuna hitrost zračne mase v smeri razširjanja zvoka. Iz časa prispetja odboja pa lahko izračunamo oddaljenost posamezne zračne plasti, ki je odboj povzročila. Če tako meritev z zvokom izvedemo v treh delno odklonjenih smereh (naprimer odklonjenih od vertikale) tako dobimo za vsako plast hitrost vetra v treh različnih smereh, iz česar potem izračunamo vektor vetra v horizontalni smeri na izbrani oddaljenosti od senzorja in posebej vertikalno hitrost. Ta način podajanja je ustaljena praksa pri merilnikih SODAR, lahko pa bi seveda podali zgolj 3D vektor za posamezno plast. Na podoben način delujejo tudi laserski merilniki hitrosti vetra, ki pa imajo to dobro lastnost, da ne motijo okolice s piskanjem v slišnem spektru kot to dela SODAR.



Slika 7 - V Sloveniji je MEIS d.o.o. v bližini marsikaterega večjega industrijskega objekta ocenjeval vpliv izpustov onesnaževal v zrak s pomočjo avtomatskih meritev navpičnih profilov vetrov s SODAR-jem

Zakaj avtomatske meritve?

Klasične glavne meteorološke opazovalnice so imele tro izmensko posadko opazovalcev oziroma meteorologov, da so zabeležili meteorolške pojave. Človek je še sedaj nenadomestljiv pri opazovanju nekaterih vremenskih pojavov, ki jih ne moremo dovolj dobro meriti z najmodernejšimi senzorji.

V nasprotju s potrebami napovedovanja vremena in proučevanja podnebja so se meritve za določevanje razširjanja (disperzije) onesnaževal v ozračju hitreje avtomatizirale. Za določevanje razširjanja onesnaževal so najpomembnejše meritve vetra in stabilnosti ozračja. (Stabilnost ozračja se lahko določi s pomočjo meritev navpičnega temperaturnega profila in/ali globalnega sončnega obseva.)

Že v 70. letih prejšnega stoletja so na Institutu Jožef Stefan naredili prvo avtomatsko meteorološko postajo, ki je merila veter, temperaturo in relativno vlažnost zraka na štirih nivojih 70-metrskega stolpa in podatke prenašala v kontrolno sobo Nuklearne elektrarne Krško (NEK). Narejena je bila z analognimi in digitalnimi moduli brez mikroprocesorja.

Leta 1985 smo prvo postajo zamenjali s takrat moderno zasnovano avtomatsko merilno postajo (AMP) na osembitnem mikroprocesorju Intel 8080. Intel 8080 je bil "pra-pra dedek" današnjih Intelovih 64-bitnih procesorjev I, ki so srce današnjih osebnih računalnikov. AMP je bila narejena na IJS, kar pomeni, da smo jo dobesedno naredili iz osnovnih elementov: tiskanih vezij, tranzistorjev, kondenzatorjev, uporov in drugih elektronskih elementov. Tudi tiskana vezja smo sami izdelali.

AMP je bila povezana s "koncentratorjem" v komandni sobi, ki je prejemal meteorološke podatke, procesne parametre in podatke o izpustih iz NEK in sproti

ocenjeval disperzijske sposobnosti ozračja ter računal vpliv NEK na okolje. Seveda je imel glavno vlogo pri tem veter. Od tedaj je minilo že več kot trideset let. V tem času smo zamenjali veliko avtomatskih postaj, senzorjev, računalnikov in programov, tako da izpuste iz NEK vedno nadzoruje najsodobnejša oprema.

V NEK SODAR avtomatsko meri hitrost vetra v plasteh nad kotlino že od konca devetdesetih let. Meritev je izjemnega pomena za pravilno diagnostično določanje potencialne poti širjenja onesnaženja v ozračju.



Slika 8 - Avtomatske meritve vetra 40 in 70 metrov nad tlemi. Pogled z vznožja stolpa proti vrhu. Lepo so vidne zaščite proti streli.

Posebno poglavje so meritve vetra za potrebe prometa. Jadrnice so sedaj namenjene predvsem zabavi, zato nas v ladijskem, letalskem in cestnem prometu zanima predvsem (pre)močan veter. Avtomatske meritve vetra so se hitro "prijele". Nevarni odseki cest so opremljeni z anemometri, ki avtomatsko prožijo opozorila v primeru premočnih vetrov. Letala v zraku avtomatsko prejemajo podatke z letališča, na katerem nameravajo pristati.

Avtomatske meritve vetra za nadzor klime v kraških jamah

Pred davnimi časi so jame dajale zavetje ljudem, danes pa so turistična zanimivost. Našo Postojnsko jamo vsako leto obišče več sto tisoč ljudi. Po svetu jamski turizem strmo narašča predvsem na Kitajskem. Vse te množice ljudi vplivajo na klimo v jamah. V okviru aplikativnega raziskovalnega projekta ARRS "L6-2156 Meritve in analiza izbranih klimatskih parametrov v kraških jamah: Primer sistema Postojnskih jam" smo pred sedmimi leti začeli z avtomatskimi meritvami. Najbolj zanimivi spremenljivki sta "veter" in vsebnost ogljikovega dioksida. V jamah težko rečemo, da piha veter. Gibanje zraka lahko poimenujemo tudi prepih ali prezračevanje. Za turizem je zelo pomembno, kako hitro se zrak v jami zamenja.



Slika 9 - Avtomatske meritve "vetra" z 2D UZ anemometrom ob želežniški progi v Postojnski jami.

Zaključki

V okviru tega prispevka so predstavljene avtomatske meritve vetra oz. pretoka zraka v okolju. Avtomatske meritve vetra se izvajajo z različnimi senzorji, ki temeljijo na različnih principih. Izbira senzorja za avtomatske meritve je odvisna od namena uporabe meritev ter okolja v katerem meritve potekajo. Meritve se uporabljajo za različne namene kot so na primer napovedovanje vremena, proučevanje podnebja, določanje razširjanja onesnaževal v ozračju ali spremljanje klime v kraških jamah.

Zahvala

Projekte (Ocena vpliva naravnih in antropogenih procesov na mikrometeorologijo Postojnske jame z uporabo numeričnih modelov ter sodobnih metod zajemanja in prenosa okoljskih podatkov, L2-6762, Krasoslovne raziskave za trajnostno rabo Škocjanskih jam kot svetovne dediščine, L7-8268 in Metoda za lokalno napovedovanje radiološkega onesnaženja atmosfere z uporabo modelov na podlagi Gaussovih procesov, L2-8174) je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura

Beyrich, F. (1997). Mixing height estimation from sodar data—a critical discussion. Atmospheric Environment, 31(23), 3941–3953.

Dines, W. H. (2007). Anemometer comparisons. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 18(83), 165–185. https://doi.org/10.1002/qj.4970188303

Gray, F. (1953). Pulse code communication. Google Patents. https://www.google.com/patents/US2632058 (27.11.2017)

Huler, S. (2007). Defining the wind: The Beaufort Scale and how a 19th-century admiral turned science into poetry. Crown. New York, 304 p.

Wikipedia (2017a). Anemometer --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anemometer&oldid=811483547 (27.11.2017)

Wikipedia (2017b). Beaufort scale --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Beaufort_scale&oldid=812185205 (27.11.2017)

- Wikipedia (2017c). Gray code --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gray_code&oldid=810115711 (27.11.2017)
- Wikipedia (2017d). SODAR --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SODAR&oldid=802787046 (27.11.2017)

Prve gravimetrične meritve v okolici Cerkniškega jezera

Polona Pavlovčič Prešeren^{*}, Miran Kuhar^{*}

Povzetek

Gravimetrične meritve so izhodišče modeliranja težnostnega polja Zemlje. Razen na absolutnih točkah meritve izvajamo relativno ob upoštevanju posebej določenih pravil izvedbe izmere. Po definiciji je vrednost težnega pospeška v obravnavani točki odvisna od gostote razporeditve zemeljskih mas. V prispevku opisujemo prve gravimetrične meritve v okolici presihajočega Cerkniškega jezera, kjer se gostota zemeljskih mas zaradi različnega vodostaja jezera vseskozi spreminja. Območje smo izbrali z namenom empirične določitve vpliva hidroloških sprememb na meritve težnega pospeška v odvisnosti od vodostaja jezera. Vzpostavili smo mrežo točk, kjer bomo z večkratnimi meritvami ob različnih vodostajih preverili, ali lahko zaznamo spremembe v težnem pospešku, ki so posledica nihanja vodostaja jezera. Rezultat ponovljenih meritev bo empirična ocena hidrološkega vpliva na gravimetrične meritve, ki je trenutno ne poznamo.

Ključne besede: gravimetrične meritve, težni pospešek, vodostaj, presihajoče Cerkniško jezero

Keywords: gravimetric measurements, gravity, water level, intermittent Lake Cerknica

Uvod

Gravimetri so instrumenti za merjenje težnega pospeška. Gravimetri za kopenske meritve se razlikujejo od gravimetrov za izvedbo meritev na morju ali v zraku. Z gravimetričnimi meritvami pridobimo podatke o težnostnem polju Zemlje. To je pomembno pri geodetskih nalogah določitve oblike Zemlje (npr. za modeliranje ploskve geoida) in izvedbi geodetskih terestričnih meritev ter njihovi povezavo z meritvami GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*). Z gravimetričnimi meritvami lahko določimo velikost sile teže (težni pospešek) in vertikalni gradient težnega pospeška, ki opisuje spremembo težnosti z višino. Težni pospešek se zaradi sploščenosti Zemlje in spremembe centrifugalne sile spreminja z geografsko širino in je istočasno odvisen tudi od nadmorske višine opazovališča. Razlike v izmerjenih težnostih so posledica neenakomerne razporeditve gostot mas v notranjosti Zemlje. Ker razporeditve mas v notranjosti Zemlje ne poznamo, so gravimetrične meritve, ki nam podajo odgovor na to, še toliko bolj pomembne.

Uradno je enota za težni pospešek m/s². V geodeziji še vedno uporabljamo enoto Gal (poimenovana je po Galileju), to je 1 cm/s². Z relativnimi gravimetri lahko na kopnem dosežemo natančnost določitve težnega pospeška nekaj μ Gal-ov. Dosegljiva natančnost gravimetra Scintrex CG-5, s katerim smo izvajali meritve, je 2,1 ± 1,1 μ Gal (Lederer, 2009).

Merjeno vrednost težnega pospeška g na dani točki opišemo z enačbo (Lederer, 2009):

$$g = \hat{g}_r + \sum o_i + Z(t) \tag{1}$$

Pri tem so:

^{*} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana

\hat{g}_r	relativna vrednost težnega pospeška,
$\sum o_i$	vsota popravkov in

Z(t) hod gravimetra v odvisnosti od časa.

Enačbo (1) zapišemo bolj podrobno tako, da vplive razdelimo na zunanje in z izvorom v instrumentu:

$$g = \hat{g} \cdot k + \sum o_i^I(t) + \sum o_i^{II} + Z(t)$$
⁽²⁾

Pri tem so:

ĝ	odčitek na gravimetru,					
k	merilo ali kalibracijska funkcija,					
$\sum o_i^I(t)$	vsota popravkov zaradi zunanjih vplivov (plimovanje Zemlje in oceanov, spremembe v zračnem tlaku) in					
$\sum o_i^{II}$	vsota popravkov zaradi delovanja instrumenta (barometrični vpliv in histereza).					

Kalibracijska funkcija (ali merilo) je potrebna, da enote merilne naprave (senzorja) gravimetra lahko pretvorimo v enote težnega pospeška. Postopek določitve kalibracijske funkcije se imenuje kalibracija gravimetra. Najbolje je kalibracijo izvesti z meritvami na odprtem – z gravimetričnimi meritvami na točkah z znanimi vrednostmi težnega pospeška (Medved, 2008). Po zagotovilih proizvajalca in izkušnjah uporabnikov zadošča za vse gravimetre Scintrex linearna kalibracijska funkcija.

Sodelavci Geodetske uprave RS opravijo kalibracijo instrumentov na absolutnih gravimetričnih točkah osnovne gravimetrične mreže Slovenije in sicer AGT200 – Gotenica in AGT300 – Sevnica.

Vplivi na izmero z izvorom v instrumentu

Pri delu je pomembno poznati vpliv nagiba in tresljajev gravimetra ter ostalih vplivov iz preglednice 1, na meritve. Lahko bi rekli, da se pravilna izvedba gravimetričnih meritev prične v laboratoriju, nadaljuje s pravilnim transportom in terenskim delom in končna z obdelavo meritev. Vplive iz naslova konstrukcije instrumenta lahko odstranimo, če tekom izmere vedno postopamo na enak način.

Med transportom mora biti gravimeter vseskozi postavljen vertikalno. Pomembno je, da za izmero izberemo lokacije, ki so čim manj obremenjene s tresljaji (prometnice, železnica, bližina rudnika). Sodobni gravimetri, kot je npr. Scintrex CG, sicer upoštevajo popravek nepopolne horizontalnosti instrumenta, vendar to ni v neposredni povezavi z nagibom instrumenta med transportom (angl. *tilt*). Ničelni položaj libel moramo periodično preverjati, zato se popravki meritev zaradi dejanskega nagiba instrumenta lahko upoštevajo, če nagib znaša do okoli 3' (Lederer, 2009). Bolj problematičen je dolgotrajni nagib instrumenta pred izvedbo meritev. Le-tega libele ne zaznajo in lahko se zgodi, da je horizontiran instrument še vedno obremenjen z vplivom daljšega nagiba, ki se je dogajal med transportom, in tega libele ne zaznajo.

Vplivi na elastičnost in dolžino vzmeti, kot so spreminjanje temperature in zračnega tlaka v notranjosti instrumenta, staranje vzmeti ter drugi tresljaji, povzročajo, da gravimeter tekom daljšega obdobja spremeni ničelni odčitek. Pojav imenujemo hod gravimetra (angl. *drift*). V meroslovju pravijo hodu *lezenje* in ga razdelimo na:

- dolgoročni hod, ki je posledica staranja vzmeti, temperaturnih sprememb in sprememb zračnega tlaka. Dolgoročni hod instrumenta znaša od 10 do 100 μGal-ov na dan in se s staranjem instrumenta zmanjšuje;
- kratkoročni hod, ki je posledica tresljajev med transportom instrumenta; kratkoročni hod instrumenta znaša do 100 µGal-ov na uro in je v kratkih časovnih periodah (nekaj ur) skoraj linearen ter je odvisen od instrumenta, načina transporta in zaščite instrumenta.

Zaradi nepoznavanja dnevnega hoda moramo meritve izvajati tako, da lahko v obdelavi hod ocenimo iz odčitkov v različnih delih dneva. Dolgoročni hod instrumenta določajo na eni ali več stabilnih točkah, kije/so neobremenjene s tresljaji, v določenih časovnih intervalih, navadno po preteku vsaj treh mesecev.

Za oceno dnevnega hoda instrumenta moramo meritve pričeti in končati na točki z znano vrednostjo g, zato meritve izvajamo v zaključenih zankah. Za modeliranje hoda iz odčitkov gravimetra uporabimo polinomsko funkcijo (Torge, 1989):

$$z(t) = z(t_0) + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2 + c(t - t_0)^3 + \cdots$$
(4)

 t_0 je referenčni trenutek in *a, b, c,* ... koeficienti polinoma, ki jih ocenjujemo. Te določimo s ponovitvami meritev na dani točki ob različnih trenutkih v dnevu. Za določitev dnevnega hoda poznamo več shem izvedbe meritev, ki jih podrobneje opisuje Medved (2008). V preglednici 1 podajamo pregled vplivov s pripadajočim velikostnim redom, medtem ko so podrobneje opisani v (Medved in dr., 2009).

Vpliv	Velikostni red [µGal]	Odstranitev [µGal]	Odvisno od
plimovanje	280	< 1	kakovosti modela
spremembe tlaka	več deset enot	< 1	vrednosti tlaka
hidrološki vplivi	nekaj enot	~ 5	hidroloških razmer
kalibracijska funkcija	več deset enot	110/100 mGal	razlik v težnosti
periodični vplivi	več deset enot	1 do 5	gravimetra
hod gravimetra	več sto enot	1 do 5	gravimetra
dolgotrajni nagib	nekaj enot	< 2	pazljivosti operaterja
barometrični vpliv	več deset enot	nekaj enot	zračnega tlaka
histereza	1 do 3	< 1	gravimetra
temperaturna nihanja	več deset enot	nekaj enot	temperature
magnetno polje	nekaj enot	< 1	orientacije
ostali vplivi	nekaj enot	1 do 2	gravimetra
vertikalni gradient	več deset enot	1 do 2	gravimetra in terena

Preglednica 1: Pregled vplivov na gravimetrične meritve (Lederer, 2009)

Zunanji vplivi na gravimetrično izmero

Med zunanje vplive uvrščamo:

- plimovanje oceanov in trdne Zemlje,
- vpliv zračnega tlaka in
- hidrološke vplive.

Plimovanje je podrobno razloženo v (Pavlovčič Prešeren in Kuhar, 2016). Spremembe v zračnem tlaku moramo upoštevati in jih iz meritev odstraniti. Za to uporabimo enačbo:

$$\Delta g_P = 0,3(p - p_n) \tag{5}$$

Pri tem je p na vsaki točki izmerjeni zračni tlak v hPa in p_n normalni zračni tlak mednarodne standardne atmosfere (ISA). Iz enačbe (5) sledi, da sprememba 1 hPa glede na standardno atmosfero povzroči spremembo v meritvah velikosti 0,3 µGal.

Odstranitev hidroloških vplivov je zelo problematično, zato jih običajno meritve še vedno vsebujejo. V literaturi vpliv podtalnice obravnavajo v odvisnosti od letnega časa (Seigel, 1994). Vpliv je težko oceniti, razen če izmero večkrat zaporedoma ponovimo na območjih, kjer se velikost vodnih mas spreminja. V kolikor se želimo v največji meri izogniti hidrološkemu vplivu in ne moremo pridobiti hidroloških podatkov, je najbolje, da gravimetrične meritve ponavljamo v času, ko so na opazovališčih podobne razmere.

Hidrološki vplivi na gravimetrične meritve

Na meritve težnega pospeška imajo hidrološke spremembe v okolici meritev vpliv, ki ga ne bi smeli zanemariti. Pomemben predvsem tekom izvedbe izmer daljšega časovnega obdobja, kot so primer regionalne gravimetrične mreže. Čeprav vemo, da je velikostni red hidrološkega vpliva precej večji od natančnosti meritev in bi ga morali upoštevati, obstajajo omejitve pri njegovem obravnavanju. Glede na to, da je spremembe v nivoju podtalnice težko zaznati, je težko tudi vzpostaviti matematično zvezo med hidrološkimi spremembami in povezavo le-teh na spremembo težnega pospeška. Lederer (2009) navaja, da kakršnekoli hidrološke spremembe v oddaljenosti 1 km od točke, kjer izvajamo gravimetrične meritve, že vplivajo na rezultate gravimetrične izmere. V kolikor v bližini točke lahko pridobimo meritve vlažnosti zemljine in višine podtalnice, lahko podatke obravnavamo kot dodatne informacije o spremembi zemeljskih mas. Hidrološki popravek predstavimo s preprosto enačbo (Lederer, 2009):

$$\Delta g_{hidro} = f(P, E, Q) \tag{3}$$

pri čemer je *P* vsebnost vode v zemljini, *E* izhlapevanje in *Q* pretok vode na danem območju. Kratkoročne spremembe v težnosti (zaradi padavin) so lahko velikostnega reda tudi do nekaj 10 μ Gal-ov (Torge, 1989, Harnisch in Harnisch, 2002) in naj bi bile odvisne od letnega časa.

Hipotezo, da spremembe vodnih mas vplivajo na izmerjeni težni pospešek, je v večini primerov zaradi pomanjkljivih informacij težko empirično potrditi. Zato so meritve na območju periodičnega poplavljanja večje površine, kjer lahko enostavno pridobimo tudi podatke o vodnih masah, za študije še toliko bolj pomembne. Da bi pridobili empirično oceno vpliva, smo v okolici presihajočega Cerkniškega jezera (slika 1) vzpostavili točke, kjer bomo v prihodnosti izvajali gravimetrične meritve ob različnih vodostajih jezera. Točke se nahajajo na območju med Dolenjo vasjo, Dolenjim Jezerom in Otokom (slika 1).

Praktična izvedba meritev

Gravimetrične meritve smo pričeli in končali na točki v kleti Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, na Jamovi cesti 2 v Ljubljani (slika 2), ki ima znano vrednost težnega pospeška. Meritve smo izvajali po metodi profila, zato smo za določitev dnevnega hoda gravimetra meritve ponavljali na točkah 3 in 8 (slika 2), (Koler, Kuhar in Medved, 2006).

Na terenu smo počakali okoli 20 minut, da se je instrument Scintrex CG-5M umiril in nato naredili pet zaporednih meritev s trajanjem 60 s na točkah. Za nadaljnje izmere in ustrezno obdelavo podatkov, kot je plimovanje trdne Zemlje in izračun zračnega tlaka na določeni višini, smo le-tem z GNSS-RTK metodo izmere določili koordinate v koordinatnem sistemu D96/TM oz. ETRS89.



Slika 1: Območje Cerkniškega jezera z oznakami točk, na katerih smo izvajali gravimetrične meritve

Na terenu smo gravimetrične meritve izvajali tudi v neposredni bližini late vodomernega mesta *Dolenje Jezero* vodotoka Stržen (ARSO, 2017), slika 3. Cilj v nadalje je vzpostaviti empirični model povezave višine vodostaja in sprememb v izmerjenem težnem pospešku.



Slika 2: Točki FGG in 3, na katerih smo ponavljali meritve. Točka 3 je služila za oceno hoda.





Slika 3: Meritve na terenu (levo) in meritve ob potoku Stržen, vodomerno mesto *Dolenje jezero* (desno)

Obdelava meritev

Plimovanje trdne Zemlje (Pavlovčič Prešeren in Kuhar, 2016) smo iz gravimetričnih meritev odstranili z Longmanovim modelom, prav tako smo odstranili vplive zračnega tlaka ter upoštevali kalibracijsko funkcijo. Oceno hoda smo naredili po postopku, opisanem v (Schüler, 2000; Urek, 2002). Za oceno smo privzeli linearno funkcijo. Za tako obdelane gravimetrične meritve smo predpostavili, da so obremenjene le z zunanjimi vplivi. Med temi naj bi bili izhodišče obravnave vplivi zaradi spremembe gostote razporeditve zemeljskih mas.

Prvi rezultati meritev

Prve meritve smo izvedli v marcu 2016, ko je vodostaj jezera na merilni postaji Dolenje Jezero znašal 486 cm. Druge meritve smo izvedli v septembru 2016, v času nizkega vodostaja (101 cm). Iz ponovljenih meritev ob srednjem vodostaju smo ugotovili precejšnje odstopanje marčevskih meritev iz leta 2016. Te so lahko bile posledica precej neprimernih vremenskih razmer za izvedbo gravimetričnih meritev (vetrovno vreme). Zato imamo v nadalje v načrtu izvesti še nekaj izmer, da bi imeli na voljo kakovostne rezultate, iz katerih bomo v nadalje potrdili v začetku postavljene hipoteze.

Zaključek

Če ne upoštevamo vseh dejavnikov, ki vplivajo na gravimetrične meritve, je zelo težko doseči ustrezno kakovost meritev in iz teh izvedenih modelov. Na rezultate meritev vplivajo zunanji vplivi kot tudi dejavniki, ki nastanejo zaradi konstrukcije gravimetra. Dobro poznavanje in primerno upoštevanje vplivov je pomembno tudi pri nadaljnjih

izračunih gravimetričnega modela geoida. Ravno zato vseskozi spremljamo lastnosti gravimetra, ki se s časom spreminjajo. Kljub vsemu pa o nekaterih zunanjih vplivih na gravimetrične meritve lahko le sklepamo. Zato so empirične ocene zunanjih vplivov na območjih, kjer lahko spremljamo in modeliramo vzroke za spremembe, zelo pomembne. S primerno interpretacijo terensko pridobljenih gravimetričnih podatkov in korelacijo le-teh s fizičnim stanjem v naravi lahko šele dobimo kakovostne podatke za nadaljnja modeliranja.

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeva kolegom z Geodetske uprave Republike Slovenije za možnost izposoje gravimetra Scintrex CG-5.

Literatura

ARSO (2017). Arhiv hidroloških podatkov - dnevni podatki:

- http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (pridobljeno 25. 10. 2017)
- Harnisch, M. in Harnisch, G. (2002). Seasonal variations of hydrological influences on gravity measurements at Wettzel. Bulletin d'Information, št. 137, 10937–10951. <u>http://www.eas.slu.edu/GGP/BIM_Recent_Issues/bim137-</u> 2002/harniach_harniach_accent_hydrology_Wettzella_him127_02.pdf (pridabliang_24.10)

2002/harnisch_harnisch_seasonal_hydrology_Wettzellr_bim137_02.pdf (pridobljeno 24.10. 2017)

- Koler B., Medved K., Kuhar M. (2006). Testne gravimetrične meritve za potrebe projekta nove gravimetrične mreže Slovenije. Referat Zbornika SZGG, 2006.
- Lederer, M. (2009). Accuracy of the relative gravity measurement. Acta Geodyn. Geomater. 6 (3) (155), 383–390.
- Medved, K. (2008). Osnovna gravimetrična mreža Slovenije. Magistrska naloga. UL FGG, Ljubljana.
- Medved K., Koler B., Kuhar M. (2009). Izračun osnovne gravimetrične mreže Slovenije. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008: zbornik predavanj. V Ljubljani: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2009, str. 49-58.
- Torge, W. (1989). Gravimetry, Berlin New York, Walter de Gruyter.
- Schüler, T., 2000. Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. University FAF Munich, Institute of Geodesy and Navigation, Germany.
- Pavlovčič Prešeren, P. in Kuhar, M. (2016). Modeliranje plimovanja trdne Zemlje za geodetsko določanje 3D-položaja točk kombinirane geodetske mreže. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016: zbornik predavanj. V Ljubljani: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016, str. 93-102.
- Seigel, H. O. (1994). A guide to high precision land gravimeter surveys. Scintrex Limited, Concord, ON: Scintrex Ltd.
- Urek, D., 2005. Avtomatska obdelava in analiza testnih meritev z relativnim gravimetrom SCINTREX CG-3M. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 106 str.

Elektromagnetni valovi daljši od premera Zemlje

Rudi Čop¹

Povzetek

V prispevki so obravnavane meritve elektromagnetnih valov na observatoriju PIA (Piran, Slovenia) s sprejemnikom ELF (Extremely Low Frequency) v frekvenčnem območju od 50 Hz do 1 mHz. Antena tega sprejemnika je usmerjena proti središču Zemlje. Frekvenčno območje meritev je na prehodu iz meritev električnega polja pojavov, ki se odvijajo predvsem v atmosferi, v meritve zemeljskega magnetnega polja, ki nastaja v notranjosti planeta. Obsega valovne dolžine Mm ($\lambda \sim 10^6$ m), ki so valovi naravnih resonanc Zemlje, in valovne dolžine Gm ($\lambda \sim 10^9$ m), ki so valovi magnetnih impulzov. Geomagnetni impulzi, ki izvirajo iz vesolja in magnetosfere, se proučujejo že dvesto let. Naravne resonančne frekvence, ki izvirajo iz električnih resonatorjev Zemlje, se raziskujejo od sredine prejšnjega stoletja in jih relativno slabo poznamo. Vzbujajo jih strele v troposferi in razelektritve v ionosferi. Za popolnejši pregled električnih lastnosti Zemlje so opisani še telurski električni toki, ki tečejo v zemeljski skorji, in so prav tako odraz razmer v bližnjem vesolju in razelektritev v atmosferi. Tudi ob njihovi spremembi nastanejo elektromagnetni valovi zelo nizkih frekvenc.

Ključne besede: sprejemnik ELF, magnetni impulzi, motnje, telurski toki.

Key words: Earth's receiver, magnetic pulsations, artificial noise, telluric currents.

Gostota energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje

Gostota energije elektromagnetnega polja (v nadaljevanju besedila: EM polje) merjenega na površini Zemlje v območju od 10^{-9} Hz do 10^{7} Hz je porazdeljeno enakomerno padajoče (Füllekrug & Fraser–Smith, 2011). V več kot 16 eksponentnih stopnjah se ta gostota energije da opisati z enačbo (1), kjer je f [Hz] frekvenca EM polja merjenega na zemeljski površini.

$$u(f) = u_0 \left(\frac{f_0}{f}\right)^2$$
(1)

$$u_0 = 10^{-16} J m^{-3} H z^{-1}$$

$$f_0 = 1 H z$$

Merjena gostota EM polja na površini Zemlje ne odstopa od enačbe (1) za več kot ± 2 eksponentni stopnji po celotnem frekvenčnem območju od 10⁻⁹ Hz do 10⁷ Hz. Frekvenčna spremenljivost tega EM polja se torej da opisati z razmerjem 1/f². To polje povzročajo različni prehodni pojavi, ki se med seboj sestavljajo (superponiranje). Ugotovljena porazdelitev in lastnost EM polja Zemlje, merjenega na njeni površini, ni primerljiva z nobenimi podobnimi primeri porazdelitve v fiziki. Ugotovitev, da je gostota energije EM valov naravnega izvora porazdeljena po enačbi (1) v frekvenčnem območju od 10⁻⁹ Hz do 10⁷ Hz, ni uporabna le v teoretični geofiziki temveč tudi pri konstruiranju novih širokopasovnih merilnih instrumentov.

Gostota energije EM polja Zemlje merjena na njeni površini se lahko na grobo deli v dva dela: geomagnetno polje, ki obsega področje pod 1 Hz, in atmosfersko električno polje, ki obsega področje nad 1Hz. Izvori energije EM polja Zemlje frekvence manjših od 10^{-8} Hz so v notranjosti Zemlje. Spremembo geomagnetnega polja frekvenc od 10^{-8} Hz do

¹ Zavod Terrra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje

 10^{-3} Hz povzročajo geomagnetne nevihte in ionosferski električni toki. Geomagnetni impulzi so izvor njegove hitre spremembe frekvenc od 1 mHz do 1 Hz. Spremembe frekvenc od 1 Hz do 10 MHz povzročajo razelektritve v atmosferi skupaj s sevanjem iz višjih plasti atmosfere in bližnjega vesolja (Čop, 2017a).

Vsi izvori EM valovanj, ki se nalagajo k osnovnemu geomagnetnemu polju, so prehodne narave. Zanje je značilno tudi, da so šibkejši pojavi pogostejši od energijsko močnejših. Vplivi teh izvorov se nalagajo eden na drugega, ter se spreminjajo v velikem območju časa in mesta nastanka. Zato je zelo nenavadno, da taki izvori, s povečevanjem njihove frekvence, povzročajo zelo enakomerno padajočo porazdelitev gostote energije EM polja merjenega na površini Zemlje.

Elektromagnetni valovi frekvenc pod 50 Hz

Leta 1883 je irski fizik George Francis FitzGerald (1851–1901) predvidel nastanek EM valovanja pri naglih spremembah električnega toka. Na osnovi poznavanja lastnosti EM valovanja je leta 1889 predvidel krčenje v smeri gibanja proporcionalno razmerju v^2/c^2 (FitzGerald–Lorentzovo krčenje) (Rahaman, 2014). Ta njegova ugotovitev je danes del posebne relativnostne teorije, ki jo je leta 1905 objavil Albert Einstein (Jackson, 2007).



Slika 1 – Absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja izmerjena na observatoriju 5. julija 2017 ter vrednosti geomagnetnih indeksov *K* in ekvivalenta dnevne amplitude *A* za ta dan.

Prvi, ki je dejansko raziskoval EM valove ekstremno nizkih frekvenc je bil Nikola Tesla (1856–1943). Na začetku 20. stoletja je opravil pionirsko delo na tem področju. Valovanje s približno frekvenco 8 Hz, ki je stojno valovanje med zemeljsko površino in ionosfero, je nameraval izkoriščati za brezžični prenos energije. Leta 1952 je nemški fizik Winfried Otto Schumann (1888–1974) objavil svoje teoretične izsledke o resonančnem pojavu našega planeta. Dve leti kasneje je skupaj s svojim sodelavcem objavil tudi rezultate meritev teh resonančnih frekvenc EM valov v področju ELF (Extremely Low Frequency). Po njem se ta pojav imenuje tudi Schumannove resonance (Rycroft, 1965; Besser, 2007; Schlegel & Füllekrug, 2002). Osnovna harmonska frekvenca je 7,8 Hz, višje harmonske

frekvence pa: 14,2 Hz, 19,6 Hz, 25,9 Hz in 32 Hz. Te frekvence so zelo stabilne, njihove amplitude pa znašajo okoli 1,0 pT (10⁻¹² T). Nastajajo v votlih resonatorjih med Zemljo in njeno ionosfero. Preko 2000 nevihtnih celic, razporejenih po zemeljski obli, povzroča vsako sekundo okoli 50 atmosferskih razelektritev, ki vzdržujejo to naravno resonanco (Barr et al., 2000).

Po označbah mednarodne zveze za telekomunikacije spadajo elektromagnetni valovi od 30 mHz do 300 Hz v področje ELF (Recommendation, 2015). Za izhodiščno meritev EM valov ELF na observatoriju PIA (Piran, Slovenia) (v nadaljevanju besedila: observatorij) od 1 mHz do 50 Hz je bil izbran geomagnetno miren dan, ker je takrat vpliv Sonca najmanjši. V času enega efektivnega obrata Sonca od 1. julija do 27. julija 2017 je bil najbolj miren geomagnetni dan 5. julij 2017. Tega dne je geomagnetni indeks *A*, ekvivalent dnevne amplitude, dosegel vrednost A = 2,25. Ta linearni indeks je primeren za opisovanje geomagnetnih razmer v preteklosti in doseže največjo vrednost $A_{max} = 400$. Najbolj mirno obdobje v dopoldanskih urah tega dne je bilo med 06:00 in 09:00 uro UTC. V tem času je bila vrednost geomagnetnega indeksa K = 0. Ta logaritmični indeks, primeren za opisovanje trenutnih razmer v zemeljskem magnetnem polju, lahko doseže največjo vrednost $K_{max} = 9$ (Čop et al., 2015). Za analizo merilnih podatkov sprejemnika ELF je bila izbrana zadnja ura v tem triurnem obdobju od 08:00 do 09:00 UTC. V tem enournem intervalu je bil geomagnetni indeks K = 0, vendar se je na začetku te ure upočasnilo pojemanje absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja F [nT] (Slika 1).



Slika 2 – Spektralna analiza od 1 Hz do 95 Hz rezultatov meritev s sprejemnikom ELF na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 UTC.

Podrobnejša frekvenčna analiza od 1 Hz do 95 Hz pokaže spodnji in zgornji bočni pas (Slika 2). Ta dva bočna pasa sta rezultat frekvenčne modulacije (Spectrum, 2001; Der, 2001) za regulacijo vrtljajev asinhronega motorja (Luo et al., 2005; Pande & Singh, 2017). Stopnja modulacije obravnavanega primera meritev je enaka $\beta = 1$, v vseh naslednjih primerih istega dne pa $\beta > 1$. Simetrija po amplitudah ni popolna zaradi velike širine izbranega časovnega okna v katerem je bila narejena frekvenčna analiza. Naravne resonančne frekvence Zemlje frekvenc od 5 Hz do 46 Hz so sicer prisotne, vendar so pri tako močnih motnjah nenaravnega izvora del EM šuma.

Magnetni impulzi v zemeljskem magnetnem polju

O spremembah geomagnetnega polja v frekvenčnem območju od 1 mHz do 1 Hz je prvi poročal 1741 švedski fizik, astronom in matematik Anders Celsius (1701–1744). Primerjal je kratkotrajne in majhne spremembe smeri kompasne igle s spremembami v polarnem siju (Kangas et al., 1998). V začetku raziskovanja so premike konice dolge kompasne igle opazovali z mikroskopom in jih zato imenovali magnetni mikroimpulzi. Z razvojem merilne opreme so se ti pojavi v geofiziki preimenovali najprej v magnetne impulze (ang. magnetic pulsation) in nato v EM valove ULF (ultra low frequency). Frekvenca teh valov je namreč nižja od naravna frekvenca plazme, ionske žiro–magnetne frekvence hladne plazme. 1963 so bili ti valovi v okviru mednarodne organizacije IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) razdeljeni glede na njihovo valovno dolžino in čas trajanja (Tabela 1). Oscilacije s približno sinusno obliko so ciklični magnetni impulzi Pc (pulsation continuous), tisti s težje določljivo obliko pa neciklični magnetni impulzi Pi (pulsation irregular) (McPherron, 2005).

Vrsta	Oznaka	Čas trajanja	Frekvenčno območje
		[sekund]	[Hz]
Ciklični impulzi:	Pc1	0,2-5	0,2 – 5 Hz
	Pc2	5 - 10	0,1-0,2 Hz
	Pc3	10 - 45	22 – 100 mHz
	Pc4	45 - 150	7 – 22 mHz
	Pc5	150 - 600	2 – 7 mHz
Neciklični impulzi:	Pi1	1 - 40	0,025 – 1 Hz
-	Pi2	40 - 150	2 – 25 mHz

Tabela 1 – Klasifikacija geomagnetnih impulzov

Sodobni merilni instrumenti na geofizikalnih observatorijih na zemeljski površini in meritve v vesolju s pomočjo satelitov omogočajo zelo obsežne raziskave EM valov ULF. Izvori teh valov so procesi v sončnem vetru in v posameznih delih magnetosfere, ki pa so različni za posamezno frekvenčno območje. Magnetosfera je pri tem tako valovod kot tudi votli resonator. Električni toki, ki tečejo vzdolž silnic geomagnetnega polja, izsevajo energijo v obliki EM valov proti Zemlji. Votle resonatorje magnetosfere vzbujajo izvori, ki delujejo v širokem frekvenčnem spektru. Ti resonatorji nato zanihajo v diskretnih resonančnih frekvencah. Na te frekvence vplivajo predvsem spremembe usmerjenosti medplanetarnega magnetnega polja in spremembe hitrosti širjenja sončnega vetra v tem prostoru. Zaradi interferenc se vsi ti valovi, ki dosežejo zemeljsko površino, pojavljajo kot nagle spremembe magnetnega polja različnih frekvenc, amplitud, faz in polarizacij. Zato so dober pokazatelj razmer v sončnem vetru in v magnetosferi. Ker so odvisni tudi od geoloških razmer na mestu meritve, se uporabljajo tudi kot detektor za notranjo strukturo Zemlje (McPherron, 2005; Woodroffe, 2010).

Rezultati meritev EM valov ULF na površini Zemlje se standardno obdelujejo z valovno analizo (ang. wavelet analysis) (Xu et al., 2013). Ta analiza se uporablja kot filter za eno–sekundne merilne podatke izmerjene z magnetometrom na geomagnetnih observatorijih (Kumar & Foufoula–Georgiou, 1997; Torrence & Compo, 1998). Globalni indeks moči EM valov ULF se izračunava iz merilnih podatkov magnetometrov na zemeljski površini ter na geostacionarnih in medplanetarnih satelitih. Je v neposredni korelaciji s hitrostjo sončnega vetra in zato zelo primeren za prikaz razmer v vesolju v neposredni bližini Zemlje (Pilipenko et al., 2017; Singh et al., 2013). Je v slabi korelaciji z

geomagnetnimi indeksi in bi ga bilo potrebno ustrezno prirediti za spremljanje pojavov v zemeljski skorji (Currie & Waters, 2014).

Na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 UTC izmerjeni EM valovi ULF so predstavljeni v frekvenčnem prostoru od 2,0 mHz do 5,5 Hz po amplitudi (Slika 2). Po mednarodnih priporočilih (Tabela 1) je ta frekvenčni prostor razdeljen na posamezne skupine. Po amplitudi so v frekvenčnem prostoru dobro predstavljeni ciklični impulzi Pc. Predstavitev necikličnih impulzov Pi je mogoča v časovnem prostoru ali v močnostnem spektru v frekvenčnem prostoru.



Slika 3 – EM valovi ULF izmerjeni na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 ure UTC in njihova razdelitev po skupinah cikličnih in necikličnih magnetnih impulzov.

Za primerjavo so v frekvenčnem prostoru predstavljeni tudi rezultati meritev v času od 20:10 do 20:20 UTC, ko je bil observatorij v osojni legi (Slika 4). Opazno je zmanjšanje amplitud magnetnih impulzov v skupinah od Pc3 do Pc5.

Enaka analiza EM valov ULF kot na merilnih podatkih sprejemnika ELF je mogoča tudi na enosekundnih merilnih podatkih iz triosnega magnetometra fluxgate (Luo et al., 2005). Rezultate frekvenčnih analiz obeh merilnih instrumentov je mogoče med seboj primerjati le če sta oba instrumenta med seboj dobro časovno sinhronizirana (Linthe et al., 2012; White et al., 2014).

Električni toki v notranjosti Zemlje

Spreminjajoče se geomagnetno polje inducira električne toke, ki pod površjem Zemlje tečejo v horizontalni smeri. Ti električni toki so telurski toki, ki jih merimo s pomočjo dveh nepolariziranih elektrod zakopanih v tla na stalni razdalji med 10 in 100 metri. Ker smer teh tokov ni poznana, se za njihovo meritev uporablja dodaten par nepolariziranih elektrod postavljenih pravokotno na izhodiščni dve elektrodi (Lowrie, 2007). Pomembno vlogo pri pretoku telurskih tokov imajo podzemne vode in geološka sestava tal. V literaturi je razloženih 32 različnih mehanizmov, ki povzročajo te toke (Amory–Mazaudier, 1995; Helman, 2013). Najvplivnejše so spremembe razmer v sončnem vetru v bližini Zemlje in v ionosferi ter razelektritve v atmosferi.

Električne toke, ki tečejo v notranjosti Zemlje, poznamo na osnovi teorije, ki razlaga nastanek magnetnega polja našega planeta. Irski fizik in matematik Joseph Larmor (1857–1942) je 1919 razložil nastanek magnetnega polja Sonca s principom uni–polarnega enosmernega električnega dinama. Ta razlaga nastanka magnetizma zvezd se je iz astrofizike prenesla tudi v geofiziko za razlago magnetizma planetov. Zemlja ima lastno magnetno polje, ki se zaključuje le v njej bližnjemu vesolju zaradi vpliva sončnega vetra nanj. V tekoči sredici Zemlje se radialno širijo vzgonski toki plazme, električni toki, ki povzročajo magnetno polje. Zaradi vrtenja planeta nastajajo Coriolisovi pospeški, ki te toke plazme nesimetrično vrtinčijo. Zato se magnetno polje Zemlje ne zaključuje samo vase, temveč se širi tudi v njeno okolico. Začetni model, postavljen na osnovi teorije magnetnega dinama, dopolnjen z nestabilnim obnašanjem zemeljskega magnetnega polja je magneto–hidrodinamični model magnetnega polja Zemlje (Dormy, 2006).



Slika 4 – EM valovi ULF izmerjeni na observatoriju 5. julija 2017 od 20:10 do 20:20 ure UTC in njihova razdelitev po skupinah cikličnih in necikličnih magnetnih impulzov.

Zaključki

Način širjenja EM valov ULF je odvisno od stanja ionosfere in magnetosfere. Ta stanja pa so rezultat aktivnosti Sonca, usmerjenosti magnetnega polja v medplanetarnem prostoru in hitrosti ter sestave sončnega vetra v njem. Podrobnejša analiza EM valov ULF nam omogoča spremljanje vremena v vesolju (angl. space weather). Od samega stanja v ionosferi pa je odvisen način širjenja celotnega spektra radijskih valov in mikrovalov (Čop, 2016b).

Po teoriji o resonančnem pojavu Zemlje, ki jo je Winfried Schumann objavil leta 1952, lahko naš planet in njeno atmosfero obravnavamo kot radialno oblikovano školjko sestavljeno iz treh plasti: električno prevodno ionosfero in zemeljsko površje ter vmesno troposfero, najnižjo plast atmosfere, ki je električni izolator. Te tri plasti tvorijo zaključen valovod kroglaste oblike, ki sicer ni idealen zaradi nepopolne simetrije. Ta votli resonator vzbujajo atmosferske razelektritve. Po tej teoriji se sicer da razložiti sprememba resonančne frekvence s spremembo dimenzij in lastnosti votlega resonatorja, nikakor pa ne spremembe njihovih amplitud (Silber, 2015). Na osnovi meritev s sateliti je bilo ugotovljeno, da so Schumannove resonance v povezavi s temperaturami hladne plazme v zunanjih delih magnetosfere (Nosikova et al., 2016). Izvor energije za naravne resonančne frekvence Zemlje torej niso le strele v troposferi in razelektritve v ionosferi TLE (transient luminous event), temveč tudi spremembe v zunanjih plasteh magnetosfere. Z meritvami v področju EM valov naravnega izvora frekvenc od 5 Hz do 50 Hz lahko izboljšamo razumevanje notranje zgradbe planeta na katerem živimo. Predvsem pa je to lahko vzporedna meritev za spremljanje klimatskih sprememb na Zemlji (Kruger, 2013) in vzporedna meritev povečane napetosti tektonskih plošč (Čop, 2016a; Čop, 2017b).

Opravičilo za nadaljnje raziskovalno delo na področju EM valov ELF v frekvenčnem območju od 1 mHz do 100 Hz je predvsem v nadzoru okolice v kateri živimo. Spremembe v tej okolici lahko nastajajo zaradi naravnih procesov ali pa jih povzroča civilizacija. Vpliv na človeka se je začel raziskovati v tem stoletju (Palmer et al., 2006; Deželjin & Čop, 2013) in se še nadaljuje (Belova & Acosta–Avalos, 2015; Kleimenova et al., 2008). V področju EM valov ULF in resonančnih frekvenc Zemlje so namreč tudi frekvence živčnih impulzov našega srca in možganov.

Literatura

- Amory–Mazaudier, C. (1995). On the electric current systems in the Earth's environment some historical aspects Part I : external part / ionosphere / quiet variation. GEOACTA, 1–15.
- Barr, R. D. Jones, L. Rodger, C. J. (2000). ELF and VLF radio waves. Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 62, 1689–1718.
- Belova, A. N. Acosta–Avalos, D. (2015). The Effect of Extremely Low Frequency Alternating Magnetic Field on the Behaviour of Animals in the Presence of the Geomagnetic Field. Journal of Biophysics.
- Besser, B. P. (2007). Synopsis of the historical development of Schumann resonances.

Radio Science, 42, RS2S02.

- Currie, J. L. Waters, C. L. (2014). On the use of geomagnetic indices and ULF waves for earthquake precursor signatures. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 119, 992–1003.
- Čop, R. (2016a). Determination of the Earth crust's tectonic stress on the basis of one-minute average data of variation of the geomagnetic field. XVIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing. Abstracts. Dourbes (Belgium): Royal Meteorologic Institut RMI, September 5–10.
- Čop, R. (2016b). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. Geodetski vestnik, 60 (4), 197–211.
- Čop, R. (2017a). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Zbornik del. 22. Srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko; Ljubljana, 26. Januarja 2017. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–79.
- Čop, R. (2017b). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. Elektrotehniški vestnik, 84 (4), 148–154.
- Čop, R. Deželjin, D. DeReggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. Determination of lokal geomagnetic K-index. In Slovenian. Geodetski vestnik, 59 (4), 697–708.
- Der, L. (2001). Frequency Modulation (FM) Tutorial. Austin (TX, US): Silicon Laboratories.
- Deželjin, D. Čop, R. (2013). IT System for Alarming of Possible Health Risks Caused by Geomagnetic Storms. Global Telemedicine and eHealth Updates: Knowledge Resorces, 6, 512–515.
- Dormy, E. (2006). The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research? Europhysics News, 2 (37), 22–25.
- Füllekrug, M. Fraser–Smith, C. A. (2011). The Earth's electromagnetic environment. Geophysical Research Letters, 38, L21807.

- Helman, S. D. (2013). Earth electricity: a review of mechanisms which cause telluric currents in the lithosphere. Annals of Geophysics, 56 (5), G0564.
- Jackson, J. D. (2007). Examples of the Zeroth Theorem of the History of Science. LBNL-63374. Berkeley (CA, US): University of California, Physics Department.
- Kangas, J. Guglielmi, A. Pokhotelov, O. (1998). Morphology and physics of shortperiod magnetic pulsations (A Review). Space Science Reviews, 83: 435–512.
- Kleimenova, N. G. Kozyreva, O. V. Breus, T. K. Rapoport, S. I. (2008). Seasonal Variation of Magnetic Storm Influence on Myocardial Infarctions. Apatity (Russia): Russian Academy of Science; Polar Geophysical Institute; Kola Science Centre; Physics of Auroral Phenomena, Procidings of XXXI Annual Seminar, 203–205.
- Kruger, A. (2013). Construction and Deployment of an ULF Receiver for the Study of Schumann Resonance in Iowa. Ames (IA, US): Iowa State University; Iowa Space Grant Consortium.
- Kumar, P. Foufoula–Georgiou, E. (1997). Wavelet analysis for geophysical applications. Reviews of Geophysics, 35 (4), 385–412.
- Linthe, H. J. Reda, J. Isac, A. Matzka, J. Turbitt, C. (2012). Observatory Data Quality Control The Instrument to Ensure Valuable Research. XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments and Data Processing, Cadiz, Spain, 4–14 June. Proceedings, 173–177.
- Lowrie, W. (2007). Fundamentals of Geophysics. Second edition. Cambridge: Cambridge University.
- Luo, F. L. Ye, H. Rashid, M. (2005). Digital Power Electronics and Applications. London (UK): Elsever.
- McPherron, L. R. (2005). Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity. Surveys in Geophysics, 26, 545–592.
- Nosikova, N. S., Yagova, N. V. Pilipenko, V. A., Heilig, B. Schekotov, A. Y. (2016). Electromagnetic Disturbances in the Frequency Range 5—20 Hz in the Upper Ionosphere and on the Ground. Atmosphere, ionosphere, safety. Editor I. V. Karpov. Proceedings of V International conference, Kaliningrad 2016. Kaliningrad (Russia): Immanuel Kant Baltic Federal University.
- Palmer, S. Rycroft, M. Cermack, M. (2006). Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. Surveys in Geophysics, 27 (5), 557–595.
- Pande, S. Singh, S. (2017). Operation of Induction Motor with Different Modulation Index. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4 (4), 2002–2006.
- Pilipenko, V. A. Kozyreva, O. V. Engebretson, M. J. Soloviev, A. A. (2017). ULF wave power index for space weather and geophysical applications: A review.
- Russian Journal of Earth Sciences, 17, ES2002.
- Rahaman, F. (2014). The Special Theory of Relativity; A Mathematical Approach. Chapter 2: Michelson–Morley Experiment and Velocity of Light. Springer India.
- Recommendation ITU-R V.431-7 (08/20145); Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. (2015). Geneva (CH): International Telecommunication Union; Radio–communication Sector.
- Rycroft, M. J. (1965). Resonances of the Earth–Ionosphere Cavity Observed at Cambridge, England. Radio Science Journal of Research, 69D (8).
- Schlegel, K. Füllekrug, M. (2002). 50 Years of Schumann Resonance. Translation: Catarina Geoghan, 2007. Physik in unserer Zeit, 33 (6), 256–26.
- Spectrum Analysis Amplitude and Frequency Modulation. (2001). Application Note 150–1. Santa Clara (CA, US): Agilent Technologies.
- Silber, I. Price, C. Galanti, E. Shuval, A. (2015). Anomalously strong vertical magnetic fields from distant ELF/VLF sources. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 120.
- Singh, K. A. Mishra, S. Singh, R. (2013). ULF wave index as magnetospheric and space-weather parameters. Advances in Space Research, 52 (8), 1427–1436.
- Torrence, C. Compo, P. G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 79 (1), 61–78.
- Woodroffe, J. R. (2010). Ultra-low frequency waves, magnetic pulsations, and the ionospheric Alfven resonator. Dissertation. University of Minnesota; Faculty of the Graduate School.

- White, C. T. Sauter, A. E. Stewart, C. D. (2014). Discovery and Analysis of Time Delay Sources in the USGS Personal Computer Data Collection Platform (PCDCP) System. Scientific Investigations Report 2014–5045. Reston (VA, US): U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.
- Xu, Z. Gannon, J.L. Rigler, E.J. (2013). Report of Geomagnetic Pulsation Indices for Space Weather Applications. Open–File Report 2013–1166. Reston (Virginia, US): U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.
Ob 101. obletnici brežiškega potresa

Ina Cecić¹, Dušan Nečak², Marko Berus³

Povzetek

Ob stoletnici brežiškega potresa sta bili narejeni obsežni zgodovinski (Nečak, 2016; Nečak, 2018) in seizmološki raziskavi (Cecić, 2018), ki sta prinesli vrsto novih ugotovitev. Potres se je zgodil 29. januarja 1917 ob 8. uri in 22 minut po svetovnem oz. ob 9. uri in 22 minut po lokalnem času. Največjo intenziteto (VIII EMS-98) je dosegel v štirih naseljih: Brežice, Krška vas, Šentlenart in Zakot.

Najpomembnejši podatkovni viri za ocenjevanje intenzitet potresa v ožjem nadžariščnem območju so vsekakor originalni zapisniki o škodi, ki jih hrani Arhiv RS (ARS). Omogočili so nam natančni vpogled v situacijo na najbolj poškodovanem območju, kot tudi izdelavo statistike poškodb po zahtevah Evropske potresne lestvice (Grünthal, 1998).

Glede na makroseizmične podatke je bilo žarišče potresa en kilometer jugozahodno od centra Brežic. Njegova makroseizmična magnituda (M_m) je 5,0. Potres je zahteval dve smrtni žrtvi, več ljudi je bilo ranjenih. Poškodovanih je bilo več sto hiš.

Po doseženi intenziteti je bil potres 29. januarja 1917 najmočnejši potres v 20. stoletju z žariščem v Sloveniji. Po intenziteti je bil od njega močnejši le potres 6. maja 1976, vendar z žariščem zunaj slovenskih meja, v Furlaniji. V Sloveniji je dosegel intenziteto VIII–IX EMS-98 v Podbeli. Po magnitudi ($M_m = 5,3$) se je najmočnejši potres v 20. stoletju z žariščem v Sloveniji zgodil 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju, vendar ni dosegel take intenzitete kot brežiški potres. Največjo intenziteto, tj. VII–VIII EMS-98, je dosegel v krajih Lepena, Magozd, Spodnje Drežniške Ravne in Tolminske Ravne.

Popolna novost v tej raziskavi je prvič pripravljena karta potresne škode v Brežicah. Le-ta nam nazorno pokaže položaj poškodovanih stavb, njihove karakteristike in stopnjo poškodovanosti. To je prvi korak h grafični predstavitvi obdelanih podatkov v informacijskem sistemu za obdelavo prostorskih podatkov, ki je trenutno v izdelavi na ARSO.

Abstract

The earthquake on 29 January 1917 near Brežice happened in the difficult times during the First World War. Small town Brežice (Rann, as it was called then) was in the Austro-Hungarian Monarchy, and administratively belonged to the province of Styria. Before the earthquake there were approximately 1200 people living there, predominantly in one-storey houses made of stone, bricks, wood or combined materials.

In the morning of 29 January, at 8:22 UTC (9:22 local time) a strong earthquake caused damage in Brežice and the surroundings. Two women died and several people were wounded. The damage was extensive. Due to the harsh winter conditions and lack of provisions due to the war, the inhabitants were left in dire situation. In the region there were many refugees from the frontline regions elsewhere in Monarchy, as well as numerous wounded soldiers, who were taken care of in military hospitals. Soon after the earthquake the city officials managed to persuade the authorities to send help. It was too cold to live in the tents, so the matter of retrofitting the houses was urgent.

Some weeks after the earthquake the administration sent to Brežice and surrounding area a team of experts with the task to make an overview of damage, house by house, and provide the estimate of the cost of reparation.

¹ ARSO, Vojkova 1 b, Ljubljana, ina.cecic@gov.si

² dusan.necak@guest.arnes.si

³ marko.berus1@gmail.com

The find of original documents produced by this team coincided with the beginning of a new study of the Brežice earthquake in 2016. The aim of seismologists was to find as many of primary data sources as possible and re-evaluate the intensities of the main shock according to European Macroseismic Scale (EMS-98). We have managed to find 26 different photographs and postcards and 6 drawings of damage in Brežice, Čatež ob Savi, Krška vas and Dobeno. For the region of Croatia 140 questionnaires and cards are obtained from the archives of the Geophysical Institute in Zagreb. Several eyewitnesses' reports are preserved in Posavje Museum in Brežice, in Macroseismic archive of ARSO in Ljubljana and were also printed in newspapers and studies. For this study we have consulted 35 newspapers and journals from Slovenia, Austria, Croatia and Italy and found 323 published articles considering the earthquake, its effects, collection of aid and reconstruction process.

Several studies, books and papers were consulted as well, together with some older earthquake catalogues.

The earthquake has caused the strongest effects in four localities: Brežice, Krška vas, Šentlenart and Zakot, where the intensity was VIII EMS-98. Brežice was the largest locality with the largest number of damaged buildings. We have used cadastral plans and parcel records of the land cadastre and combined them with the data from the documents on damage, in order to visualize the spatial distribution of the damaged buildings. This is the first such visualisation of damage for some Slovenian earthquake.

After consulting all the data sources we were able to evaluate intensities for 344 localities, and to present 338 among them on the intensity map. For 287 localities (83%) we were able to estimate the intensity on the basis of primary or combination of primary and secondary sources. The earthquake was felt up to 130 km away (the farthest point being Graz in Austria).

The macroseismic epicentre of the main shock was 1 km SW from Brežice. Its macroseismic magnitude was 5.0.

Ključne besede: seizmologija, potres, Brežice, makroseizmika, intenziteta, EMS-98

Key words: seismology, earthquake, Brežice, macroseismology, intensity, EMS-98

Uvod

Potres 29. januarja 1917 se je zgodil v obdobju, ko je seizmologija v Evropi že imela solidno podlago. V regiji so delovali številni strokovnjaki, ki so zbirali in interpretirali seizmološke podatke, tako instrumentalne kot neinstrumentalne (makroseizmične). Poleg opazovalnice v Ljubljani, ki je bila tudi prva potresna opazovalnica v avstrijskem delu Monarhije, so delovale opazovalnice v Zagrebu, Trstu, Pulju, Gradcu, na Dunaju in v Budimpešti.

Brežice so takrat imele približno 1200 prebivalcev. Administrativno so sodile v ozemlje Štajerske, v takratni Avstro-Ogrski monarhiji. Večina ljudi je živela v enonadstropnih hišah, zgrajenih iz opeke, lesa ali kombinacije materialov.

Glavni potres se je zgodil 29. januarja 1917 ob 8. uri in 22 minut po UTC (9.22 po lokalnem času) v neposredni bližini Brežic. Najmočnejši popotresi so bili isti dan ob 8.38, 9.14, 10.29 in 21.18 UTC. Povzročili so dodatno gmotno škodo in prestrašili prebivalce.

Glavni potres je zahteval vsaj dve smrtni žrtvi. Veliko je bilo ranjenih, več sto ljudi je ostalo brez strehe nad glavo. Razmere so bile zelo zahtevne zaradi vojne, revščine in nizkih zimskih temperatur. Takrat je gradbeni material potrebovala predvsem vojska. Manjkalo je tudi ljudi za popravila in obnovo, ker so bili moški večinoma na frontah, daleč od poškodovanih domov (Nečak, 2016). Potres se je namreč zgodil ob koncu prve svetovne vojne, ki jo je dvojne monarhija že izgubljala .Vsa država je bila v zelo težkem položaju. Zato je bila sanacija povzročene škode še težja. Lokalne, deželne (dežele Štajerske in

dežele Kranjske) in centralne oblasti so sicer hitro priskočile na pomoč, vendar je bila pomoč v strokovni delovni sili potrebni za obnovo, gradbenem materialu, prevoznih sredstvih, varnostnih silah, odvisna pretežno od vojske. Finančna podpora oblasti obnovi je bila razmeroma majhna, pa tudi delitev finančnih sredstev za obnovo je bila zelo natančno in restriktivno predpisana. Zato so bile organizirane različne nabirke sredstev, na pomoč pa so priskočile tudi cerkvene oblasti in na pol zasebne organizacije ter celo judovska skupnost v Gradcu. Kljub temu se je obnova zavlekla še tudi v čas po prvi svetovni vojni, nekako do srede dvajsetih let.

Uporabljeni viri podatkov

Primarni in sekundarni podatkovni viri, ki so bili uporabljeni za to raziskavo, se nahajajo v Makroseizmičnem arhivu Agencije Republike Slovenije za okolje v Ljubljani (ARSO MsA).

V času po potresu so najprej nastale fotografije škode; seizmološki opazovalci so izpolnili in odposlali temu namenjene vprašalnike, zapisana so bila pričevanja očividcev. To so podatki, ki prikazujejo posledice potresa s sliko, ali pa so pričevanja ljudi, ki so potres osebno doživeli.

Uradne komisije so nekaj mesecev po potresu popisale škodo. Ves ta čas pa so o potresu, njegovih posledicah in o popotresih poročali časopisi. Te informacije so do nas prišle skozi filter, ker so bile odvisne od popisovalca škode, ki je moral v nekaj besedah opisati celotno zgradbo in njeno stanje, ali pa od novinarja, ki je povzemal videno ali besedila drugih poročevalcev.

Temu so sledile strokovne študije, ki so jih objavili v letih po potresu. V njih primarnih podatkov praviloma ni (izjema je nekaj zapisanih poročil ljudi, ki so potres doživeli). Preberemo pa lahko strokovno interpretacijo zbranih podatkov. Na koncu tega časovnega prikaza so katalogi potresov, ki so večinoma nastali mnogo let pozneje. V njih so vsi podatki o potresu povzeti le z nekaj številkami. Te nam podajo časovno in prostorsko opredelitev potresa ter oceno njegove moči.

Za analizo posledic potresa 29. januarja 1917 smo uporabili veliko primarnih podatkov. To so: fotografije, vprašalniki, poročila očividcev, časopisi in zapisniki o škodi.

Posavski muzej Brežice (PMB) hrani deset razglednic in štiri črno-bele fotografije potresne škode in prenove. Motivi na njih so večinoma poškodbe, ki jih je potres povzročil na posameznih stavbah, in tudi prizori iz obdobja po potresu (vojaški šotori, odstranjevanje ruševin). Dva posnetka poškodb (nad oknom na brežiškem gradu in Kroflova hiša) sta v lasti Judite Marolt. Nekatere fotografije so bile objavljene v časopisih, časnikih in študijah.

Ljubljanski časopis Ilustrirani glasnik je 15. marca 1917 objavil šest fotografij s Čateža ob Savi in iz Krške vasi (glej Literaturo). To so edine znane ohranjene fotografije iz teh dveh naselij. Poleg vsake fotografije je kratek opis (lastnik, namen objekta, druge zanimivosti).

Tornquist (1918) je v svoji študiji objavil tri fotografije in dve risbi iz Brežic. Heritsch in Schwinner (1919) sta objavila dve fotografiji poškodb na Dobenem in eno s pokopališča na Čatežu ter risbe rotacij objektov na Dobenem in v Brežicah.

Vprašalnike za Slovenijo je v času potresa zbirala Potresna komisija s sedežem na Dunaju (danes je to Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, okrajšano ZAMG). Vprašalniki naj bi se nahajali v njihovem arhivu, toda med izvajanjem te raziskave jih tam nismo našli. Vprašalniki za Slovenijo za obdobje 1918–1941 (in mogoče še za kakšen potres pred tem, ker je proti koncu vojne vladala zmeda) so se pošiljali v hrambo v takratni centralni seizmološki arhiv v Beograd. Tamkajšnji kolegi zagotavljajo, da v njihovem današnjem arhivu vprašalnikov za Slovenijo ni več. Vprašalniki za Hrvaško se hranijo v arhivu Geofizikalnega zavoda Fakultete za naravoslovje in matematiko Univerze v Zagrebu. Prejeli smo kopije 140 pozitivnih vprašalnikov (všteto nekaj pisem in dopisnic) in tudi seznam naselij, v katerih prebivalci tega potresa niso čutili.

Pismo očividke iz Celja (Ria Šribar) je shranjeno v Makroseizmičnem arhivu ARSO (ARSO MsA). V Posavskem muzeju Brežice hranijo pričevanji Ivanke Ferenčak (roj. 1906) in Cilke Lukež (roj. 1901), ki ju je leta 1987 in 1993 zapisala kustosinja Ivanka Počkar (Dejak, 2017)

Nekaj tednov po potresu so takratne oblasti na teren v širše nadžariščno območje poslale ekipe za popis in oceno škode (ARS). Njihova naloga je bila popisati škodo na posameznih objektih in oceniti, koliko bi stalo popravilo.

Rokopis zapisnikov vsebuje podatke o škodi za mesto Brežice in njegovo predmestje ter 21 naselij v okolici (Brezina, Cundrovec, Trnje, Gornji Lenart, Šentlenart, Črnc, Sela, Mihalovec, Veliki Obrež, Gaberje, Mali Obrež, Mostec, Zakot, Bizeljska vas, Sromlje, Artiče, Glogov Brod, Trebež, Pesje, Stari Grad in Libna). Rokopise hrani Arhiv Republike Slovenije. V slovenščino jih je prevedla M. Nečak (Nečak, 2016), celoten prepis in prevod je objavil Nečak (2018). Gre za zelo pomemben in bogat vir podatkov o posledicah potresa. Sezname sestavljajo naslednji podatki: hišna številka, ime lastnika, površina objekta (v kvadratnih metrih), opis zgradbe, opis poškodb in na koncu ocena stroškov za obnovo (v kronah). Popisovalci so zapisali kratke in jedrnate opise stavb (gradbeni materiali, število nadstropij, tip strehe in tal, število prostorov, včasih tudi kvaliteta gradnje ...).

Med primarne podatke sodijo tudi časopisni članki. Uporabili smo časopise iz treh nacionalnih digitalnih knjižnic: avstrijske ANNO, slovenske dLib in hrvaške NSK.

Za to raziskavo smo pregledali 35 različnih časopisov iz dveh (zdaj štirih) držav, v treh različnih jezikih (slovenščina, hrvaščina in nemščina). Članke o potresu 29. januarja 1917 najdemo v 25 pregledanih časopisih. Skupno smo našteli 323 objavljenih člankov o potresu, zbiranju pomoči in o popotresni prenovi.

Poleg naštetih primarnih virov smo v raziskavi uporabili številne sekundarne vire – študije, oziroma kompilacije narejene na podlagi primarnih virov, kot tudi starejše kataloge potresov.

Učinki potresa in analiza poškodb

Številni časopisi so poročali o posledicah, ki jih je povzročil potres v Brežicah. Prva, bolj skopa poročila so bila objavljena že na dan potresa. V naslednjih dneh se je v večini pregledanih časopisih našel vsaj en članek o nesreči, ki je prizadela Brežice. Nekateri časopisi so se zanašali na dopise, ki so jih pošiljali tamkajšnji prebivalci, drugi pa so v najbolj prizadete kraje poslali svoje poročevalce.

Vse objekte, omenjene v zapisnikih o škodi, smo analizirali s pomočjo Evropske potresne letvice EMS-98. V zapisnikih za Brežice so le na eni stavbi (hišna številka 54c) poškodbe ocenjene kot nepomembne. Opisana sta tudi dva nestandardna objekta, in sicer grad in cerkev. V zapisnikih o škodi so poročila za mesto Brežice in njegovo predmestje ločeni enoti. Šele po izrisu objektov na karto smo videli, da so hiše dejansko tako pomešane, da področji tvorita eno celoto. Zato smo pri oceni intenzitete potresa za Brežice upoštevali podatke za mesto in predmestje skupaj.

Zgodovinska raziskava (Nečak, 2016) nam pove, da je v zapisnikih o škodi v Brežicah omenjenih 266 objektov. Škoda je bila ocenjena za 181 objektov. Razlog je ta, da je na posamezni hišni številki isti lastnik poleg stanovanjske stavbe imel še več pomožnih ali

gospodarskih objektov, za katere v 85 primerih ni bila podana posebna opredelitev škode. V primerih, ko ni bilo jasno, na kateri objekt istega lastnika na isti hišni številki se opis škode nanaša, smo upoštevali, da je opisana škoda za glavni (stanovanjski) objekt.

Pri prikazovanju ocenjenih objektov na karti smo naleteli še na težavo, da se jih s pomočjo ohranjenih dokumentov ni dalo identificirati v popolnosti. Uspelo nam je nedvomno določiti položaj 159 objektov, omenjenih v zapisnikih o škodi.

Večina objektov v Brežicah je sodila v ranljivostno skupino B. To so zidane stavbe ali pa take iz mešanih materialov, iz enostavnega kamna, brez ojačenja, lahko z vgrajenimi elementi iz obdelanega kamna. Pri določanju, v katero ranljivostno skupino sodi stavba, igrata pomembno vlogo tudi njena starost in stanje, v katerem se nahaja. Zato je za nekatere stavbe, za katere je bilo poudarjeno, da so bile nove ali v zelo dobrem stanju, določena ranljivostna kategorija C. V kategorijo A pa sodijo najslabše grajene stavbe ali pa take, ki so bile v slabem stanju.

Večina izmed 159 na karti prikazanih objektov, tj. 62 %, je utrpela tretjo stopnjo poškodovanosti. Tretja stopnja pomeni znatno do veliko poškodovanost: konstrukcija je zmerno poškodovana, nekonstrukcijski elementi pa so močno poškodovani, na večini zidov so široke in velike razpoke, zdrsnejo strešniki, dimniki se odlomijo v višini strehe, porušijo se posamezni nekonstrukcijski elementi.

Karta poškodb

Kot osnovo za izdelavo karte smo uporabili zemljiško-katastrski načrt v merilu 1 : 2880 v seženjskem merskem sistemu in koordinatnem sistemu z izhodiščem v Schökelbergu pri Gradcu v današnji Avstriji (Berus, 2017). To je grafični prikaz zemljiških in stavbnih parcel ter stavb. Za potrebe izdelave karte poškodb so parcelne številke s katastrskega načrta (GURS, 2017a) povezane s posestniki (lastniki), vpisanimi v oceno škod, ter oceno ranljivosti in stopnje poškodovanosti posamezne stavbe (Cecić, 2018).

V reambulančnem katastru za območje Brežic so na voljo štirje listi, od katerih sta bila za izdelavo karte uporabna dva: prvi s prikazom središča Brežic severno od brežiškega gradu in tretji, na katerem je predmestje južno od gradu. Ključ za povezavo kart, na katerih so le parcelne številke, in zapisnikov o škodi, ki vsebujejo naslove in lastnike, je Parcelni zapisnik. Le-ta med drugim vsebuje potrebne podatke o posestniku (ime, priimek in bivališče), hišno številko in številko parcele, kar je dovolj za enolično identifikacijo poškodovanih objektov. Vse našteto gradivo hrani Geodetska pisarna v Brežicah.

Identifikacija objektov, za katerega imamo na razpolago zapisnike o škodi ali fotografije, ni bila enostavna. Priimki lastnikov v seznamu poškodb in parcelnem zapisniku niso vedno zapisani na enak način. Enako je z drugimi viri. Tornquist (1918) opisuje zamik dimnika pri Antonu Glančarju – oseba se je dejansko pisala Anton Klavžar (Počkar, 2005).

Pri izdelavi karte poškodb za Brežice (slika 1) je bilo območje prikaza razdeljeno na dva lista, ker lista obravnavanih katastrskih načrtov nista usklajena na robovih. Za predstavitev podatkov na karti so bili izdelani kartografski znaki. Vsak znak sočasno predstavlja dva podatka, stopnjo poškodovanosti stavb zaradi potresa (1–5) in stopnjo ranljivosti stavb (A–C). Stopnja poškodovanosti je prikazana v barvni lestvici, kjer zelena barva ponazarja rahlo poškodovan objekt (1), temno rdeča barva pa porušen objekt (5). Stopnja ranljivosti je prikazana z obrobo kartografskega znaka. Znak, obrobljen z belo barvo, ponazarja stopnjo ranljivosti A, obrobljen delno s črno in belo B in črno obrobljen C.

Na karto smo vrisali tudi objekte, ki smo jih lahko identificirali glede na njihovo velikost, namen in tip gradnje, nismo pa mogli jasno opredeliti stopnje poškodovanosti. Prikazani so s črno obrobljenimi belimi krogci.

Karta poškodb za Brežice je prva med kartami poškodb za naselja, opisana v seznamu poškodb. Ta proces na ARSO še poteka.

Potres so čutili tudi v številnih drugih naseljih; opisi učinkov v posameznih naseljih so objavljeni v Cecić (2018).

Ocenjevanje intenzitet in interpretacija podatkov

Zapisniki o škodi prikazujejo le podatka o hišni številki in lastniku objekta, podatki v katastru (GURS, 2017; GURS, 2017a) pa so navezani na katastrsko številko parcele. Da bi povezali lastnike in številke parcel, smo uporabili parcelni zapisnik (GURS, 2017a). Kljub temu v več primerih ni bilo mogoče točno identificirati položaja objekta, ki je opisan v zapisnikih škode, ker se podatki niso ujemali.

Intenzitete smo ocenjevali po Evropski potresni lestvici. Evropska potresna lestvica, z okrajšavo EMS-98, je orodje, ki seizmologom omogoča klasifikacijo in statistično obdelavo podatkov o škodi, ki jo potres povzroči v naseljenem kraju. Tako dobimo podatek o intenziteti potresa v tem kraju. Pri interpretaciji podatkov iz 1917 je bila za vsako stavbo oz. skupino stavb določena stopnja ranljivosti (A, B in občasno C) kot tudi stopnja poškodovanosti (1–5). Stopnji veljata glede na EMS-98 lestvico.

Interpretacija podatkov ni bila enostavna. Lastniki so imeli poleg stanovanjskega objekta še nekaj pomožnih zgradb (hlevi, gospodarska poslopja, kozolci, mlini, lope ...). Zaradi obilice dela so popisovalci pogosto popisali skupaj vse poškodbe za vse stavbe v lastništvu iste osebe. Tudi opisi škode so pogosto skopi (npr. »Dimniki, stene, omet«), kar lahko dejansko pomeni širok razpon škode. S podatki v stolpcu, v katerem so zapisane ocene škod, si nismo mogli veliko pomagati, ker se vsote ne skladajo. Poleg tega v tej rubriki niso bile zabeležene odškodnine za objekte ali dele objektov, ki jih je vojska že popravila pred začetkom popisa. Glede tipizacije ranljivosti objektov lahko ugotovimo, da so bile hiše v velikem številu primerov grajene iz mešanice materialov – delno zidane, delno lesene. Strehe so bile delno pokrite s strešniki in delno s slamo; tla so bila delno mehka, delno tlakovana ali lesena.

V zapisnikih o škodi ni podatka o številu zgradb v posameznem naselju. Zato sta upoštevana kot okvirna podatka pri računanju statistike: podatek o največji omenjeni hišni številki in podatek o skupnem številu omenjenih objektov. Za nekatera naselja je bilo podatkov premalo in ni bilo možno narediti statistike poškodb ter določiti intenzitete. V teh primerih je uporabljena oznaka D (angleško damage = škoda). V primeru naselja Mali Obrež, za katerega imamo samo podatek, da je komisija pregledala dve hiši brez poškodb, ni bilo možno določiti niti opisne intenzitete. Potres so tam zagotovo čutili, toda o tem nimamo prav nobene informacije. Zato se Mali Obrež ne pojavlja v končnem seznamu intenzitet.





Slika 1. Karta poškodb v Brežicah po potresu 29. januarja 1917 (list 1 in list 3)

Figure 1. Damage in Brežice due to the 29 January 1917 earthquake (sheets 1 and 3).

Čeprav so takratni časopisi izvrsten vir podatkov o potresih, so včasih objavili tudi napačne informacije. V prvih dnevih po potresu je bilo še nekaj zmede pri poročanju o številu žrtev. Kmalu so obe ženski, ki sta zaradi potresa umrli, identificirali. Prva je umrla v Brežicah, kjer je bila na obisku in se je nanjo porušila stena hiše (živela je v Dobrni). Druga je na Savi pri Krškem prala perilo in zaradi potresa utonila. Ni jasno, ali se je znašla v vodi zaradi strahu ali zaradi morebitnega zdrsa dela brežine. Dejstvo je, da v zimskih oblačilih in v ledeno mrzli vodi (temperature so bile tiste dni globoko pod ničlo) ni mogla preživeti.

V Brežicah in okoliških vaseh je bilo ranjenih več oseb, civilistov in vojakov. Mediji so posebej izpostavili dva fanta v Krški vasi, ki sta bila rešena izpod porušene stene hiše. Oba sta bila hudo poškodovana.

Vsi zbrani primarni in sekundarni viri so bili skrbno analizirani. Intenzitete so bile ocenjene po EMS-98. V primeru, da za neki kraj obstaja več primarnih in sekundarnih podatkovnih virov, smo privzeli, da so podatki iz primarnih virov zanesljivejši.

Skupno smo zbrali podatke o intenziteti v 344 krajih. Od tega se na tri kraje nanaša lažno (fake) poročilo, in sicer Dunaj, Trst in Pulj. Za tri kraje (Deutchlandsberg, Đurašić in Tišinac) nismo uspeli določiti, kje so se nahajali. Tako so na karti intenzitet prikazani podatki za 338 naselij.

Za 287 naselij (83 %) smo lahko ocenili intenziteto na podlagi primarnih virov ali iz kombinacije primarnih in sekundarnih virov. Za preostalih 57 naselij (17 %) je bila intenziteta ocenjena iz sekundarnih virov.

Ocenjene intenzitete so izrisane na karti (sliki 2 in 3). Vsaka barvna pika ponazarja naselje, za katerega obstaja podatek o potresnih učinkih. Rumene pike so naselja, za katera obstajajo poročila, da prebivalci niso čutili potresa.

Intenziteto VIII EMS-98 je potres 29. januarja 1917 dosegel v štirih naseljih. To so: Brežice, Krška vas, Šentlenart in Zakot. Intenziteto VII–VIII EMS-98 je dosegel v štirih naseljih, VII EMS-98 v 4, VI–VII EMS-98 v 6, VI EMS v 23, V–VI EMS-98 v 21, V EMS-98 v 35, IV–V EMS-98 v 27, IV EMS-98 v 48, III–IV EMS-98 v 16 in III EMS-98 v 14 naseljih. Za 24 naselij imamo podatek, da je potres povzročil gmotno škodo, toda ni dovolj podatkov, da bi določili intenziteto. Zato je v teh naseljih določena opisna intenziteta D (damage = škoda). Podobno imamo za 34 naselij le podatek, da so prebivalci potres čutili, ob tem pa ni nobenih podrobnosti, ki bi omogočile oceno intenzitete. Za ta naselja je določena opisna ocena F (felt = čutili). Za 67 naselij imamo podatke, da prebivalci potresa niso čutili (intenziteta I EMS-98).

Makroseizmična magnituda potresa 29. januarja 1917, izračunana po formuli, objavljeni v Živčić in Cecić (1998) za polje intenzitete V EMS-98 in srednji polmer 52 km, je 5,1. Vrednost makroseizmične magnitude za področje intenzitete VI EMS-98 je 4,9 (srednji polmer 22 km). Za intenziteto IV EMS-98 ni mogoče izračunati makroseizmične magnitude, ker na zahodnem in severnem robu polja učinkov ni dovolj podatkov. Zato področje intenzitete IV EMS-98 ni dobro definirano.



Slika 2. Intenzitete za potres 29. januarja 1917 ob 8.22 UTC. Prikazani so podatki za 338 naselij.

Figure 2. Intensitiy (EMS-98) of the earthquake on 29 January 1917 in 338 localities. Nadžarišče = epicentre; škoda = damage; čutili = felt; niso čutili = not felt.



Slika 3. Intenzitete za potres 29. januarja 1917 ob 8.22 UTC v širšem nadžariščnem območju.

Figure 3. Intensitiy (EMS-98) of the earthquake on 29 January 1917 in wider epicentral area. Nadžarišče = epicentre; škoda = damage; čutili = felt.

Iz navedenega sledi, da je makroseizmična magnituda potresa 29. januarja 1917 enaka srednji vrednosti dveh magnitud, ki sta bili izračunani za intenziteti V in VI EMS-98, torej 5,0.

Preglednica 1: Parametri potresa 29. januarja 1917, po Ribarič (1982) in Cecić (2018).

Table 1. Parametres of earthquake on 29 January 1917, according to Ribarič (1982) and
Cecić (2018).

Vir	Leto	Μ	D	h	m	Zem. š.	Zem. d.	Kraj	Ι	Lestv	Mag.	Tip
				UTC						•		Μ
Source	Year	Μ	D	h	m	Lat	Lon	Epicen.	Ι	Scale	Mag.	Mag.
				UTC				area				type
Ribarič,	1917	01	29	08	22	45.900	15.567	Brežice	8.00	MSK	5.59	ML
1982												
Cecić,	1917	01	29	08	22	45.90	15.58	Brežice	VIII	EMS-	5.0	M _m
2018										98		

Na podlagi prikazanih podatkov je določena nova parametrizacija potresa 29. januarja 1917, ki je podana v preglednici 1. Glede na zbrane makroseizmične podatke je bilo nadžarišče potresa en kilometer jugozahodno od centra Brežic, med Brežicami in Krško vasjo. Položaj nadžarišča je določen kot uteženo povprečje vrednosti intenzitete za naselja z intenziteto VIII, VII–VIII, VII in VI–VII EMS-98. Ocenjena napaka tako določenega makroseizmičnega nadžarišča je ±1 km.

Sklep

Sto let po tem, ko so prebivalci Brežic in okolice doživeli močen potres, ki je povzročil smrtne žrtve in veliko gmotno škodo, je ta dogodek ponovno raziskan. Takoj po potresu so o njemu pisali takratni geologi in seizmologi. Tokrat se je prvič z njim ukvarjal zgodovinar. Pri tem so bili najdeni novi, do sedaj neobjavljeni podatki. Seizmološke raziskave so odkrile nove vire podatkov, ki so bili uporabljeni za izdelavo karte intenzitet in izračun parametrov potresa. Prvič je bila za nek slovenski zgodovinski potres izdelana tudi karta poškodb, na podlagi zapisnikov o škodi, ki jih hrani Arhiv RS.

Čeprav se nova parametrizacija potresa ne razlikuje bistveno od tiste, ki jo je leta 1982 v katalogu potresov objavil Ribarič, so podatki v tej raziskavi dobro dokumentirani, posamezni parametri pa določeni z večjo natančnostjo.

Brežiški potres nas opozori na dejstvo, ki ga radi pozabljamo: potresi z močnejšimi poškodbami so nekaj, na kar je v Sloveniji treba računati. Potresa ne moremo napovedati, ne moremo ga tudi preprečiti, lahko pa se na njega ustrezno pripravimo. Edina zanesljiva zaščita je potresno odporna gradnja novih in utrjevanje starih objektov, kot tudi poznavanje ustreznega obnašanja med potresom in po njem.

Literatura

- ANNO AustriaN Newspapers Online : Historische österreichische Zeitungen und Zeitschriften online. http://anno.onb.ac.at.
- ARS glej Zapisniki o škodi.

ARSO MsA – glej Makroseizmični arhiv ARSO.

- Berus, M., 2017. Kartografska podpora študiji potresa v Brežicah 1917. Diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geologijo.
- Cecić, I. Potres pri Brežicah 29. januarja 1917 makroseizmične raziskave. (v tisku)
- Dejak, V., 2017. Stoletnica brežiškega potresa (1917-2017). Govor ob odprtju razstave Posavskega muzeja Brežice, 29. 1. 2017.
- Digitalna knjižnica Slovenije dLib.si. http://www.dlib.si.
- Grünthal, G., ur., 1998. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15, 99 str.
- GURS, 2017. Katastrski načrt in katastrski podatki zemljiškega katastra. Brežice: Pisarna Geodetske uprave RS.
- GURS, 2017a. Reambulančni kataster za k.o. Brežice, Parcelni zapisnik (Parzellen Protokoll der Gemeinde Brežice). Brežice: Pisarna Geodetske uprave RS.
- Heritsch, F. in Schwinner, R., 1919. Über die Drehungen beim Ranner Erdbeben vom 29. Jänner 1917. Mitt. Erdbeben-Komm., N.F. No. 57. Akad. d. Wiss. Wien, Mathem.-naturwiss. Klasse, Wien.
- Ilustrirani glasnik, 15. 3. 1917, št. 28, str. 230–231.
- Judita Marolt, privatna zbirka, Brežice.
- Makroseizmični arhiv ARSO, Ljubljana (ARSO MsA).

Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu. http://www.nsk.hr.

Nečak, D., 2016. Raziskave potresa 1917 - pregled arhivov. Rokopis. Ljubljana, 234 str.

Nečak, D., 2018. Zgodovin(ar)ski pogled na potres v Brežicah in okolici 29. 1. 1917 (v tisku)

PMB, 2017 - gradivo, ki ga hrani Posavski muzej Brežice.

- Počkar, I., 2005. Dve gasi, dva policaja, sto obrtnikov : življenje mestnih obrtnikov od sredine 19. stoletja do druge svetovne vojne na primeru Brežic. Brežiške študije 2, Brežice, 406 str.
- Ribarič, V., 1982. Seizmičnost Slovenije. Publikacije Seizmološkega zavoda SR Slovenije, Serija A, Št. 1-1, Ljubljana, 649 str.
- Tornquist, A., 1918. Das Erdbeben von Rann an der Save vom 29. Jänner 1927, Erster Teil, Mitteilungen der Erdbeben-Kommission, Neue Folge, Nr. 52, (Kais. Akad. d. Wiss., Math. naturwiss. Klasse), Wien.
- Vprašalniki za Hrvaško hrani jih Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- Zapisniki o škodi, sign. Si AS Dež. predsedstvo za Kranjsko POTRESNI SPISI. Arhiv Republike Slovenije, Ljubljana (oznaka ARS).
- Živčić, M. in Cecić, I., 1998. Revised magnitudes of historical earthquakes in Slovenia. EGS XXXII General Assembly, Nice, France, 20-24 April 1998.

Preliminarna analiza potresne aktivnosti po prelomnih potresnih izvorih v Sloveniji

Gregor Rajh^{*}, Barbara Šket Motnikar^{**}, Mladen Živčić^{**}, Polona Zupančič^{**}, Andrej Gosar^{*,**}

Povzetek

Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti upošteva učinke potresov različnih magnitud z vseh znanih potresnih izvorov na nekem območju. Izhodišče za opredelitev in parametrizacijo prelomnih potresnih izvorov predstavljajo aktivni prelomi, ki so bili v zadnjih letih na območju Slovenije predmet obsežnih raziskav. Na izračun potresne nevarnosti v veliki meri vpliva potresna aktivnost, ki jo podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti. V tej študiji smo za namen izdelave nove karte potresne nevarnosti v Sloveniji analizirali potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvorih, in sicer na podlagi seizmoloških (*seizmološka potresna aktivnost*) in geoloških podatkov (*geološka potresna aktivnost*). Seizmološko potresno aktivnost smo izračunali na podlagi zgodovinsko-instrumentalnega kataloga potresov (od leta 456 do leta 2014), iz katerega smo odstranili odvisne potresne dogodke in analizirali njegovo popolnost za pet izbranih vrednosti magnitude. Geološko potresno aktivnost smo izračunali na podlagi geometrijskih lastnosti prelomnih potresnih izvorov in hitrosti premikanja ob prelomih. Z opravljeno analizo potresne aktivnosti smo poizkusili opredeliti njeno negotovost ter poiskati razloge zanjo. Kljub temu, da so rezultati analize potresne aktivnosti preliminarni, bodo pomembno prispevali k izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

Ključne besede: potresna aktivnost, magnitudno-frekvenčna porazdelitev, prelomni potresni izvor, prelomno območje, katalog potresov, hitrost premikanja ob prelomu, ocenjevanje potresne nevarnosti

Key words: earthquake activity rate, magnitude-frequency relationship, fault seismogenic source, fault zone, earthquake catalog, fault slip rate, seismic hazard analysis

Uvod

Potresna nevarnost je opredeljena z jakostjo tresenja tal, ki so jo na nekem območju zmožni povzročiti potresi v izbrani povratni dobi in predstavlja izhodišče za analizo potresne ogroženosti. Potresno nevarnost običajno ponazorimo s kartami projektnega pospeška tal. Projektni pospešek tal lahko ocenimo z determinističnim ali verjetnostnim pristopom. Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti (PSHA) upošteva porazdelitev in učinke potresov različnih magnitud z vseh znanih potresnih izvorov na obravnavanem območju (Reiter, 1991; McGuire, 2004). Izhodišče za opredelitev in parametrizacijo prelomnih potresnih izvorov predstavljajo aktivni prelomi, ki so bili v zadnjih letih na območju Slovenije predmet obsežnih raziskav. Rezultat tovrstnih raziskav je karta aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov ter pripadajoča parametrizacijska tabela s podatki o prelomih (lokacija, geometrija, hitrost premikanja ob prelomu, aktivnost), ki ju je za namen PSHA izdelal Geološki zavod Slovenije (Atanackov et al., 2014 in 2015). Ti podatki so poleg analize seizmogene globine in največje opažene magnitude potresov (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017) spodbudili tudi natančnejšo analizo

^{*} Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

^{**} MOP, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

potresne aktivnosti (ang. earthquake activity rate) po prelomnih potresnih izvorih. Potresno aktivnost podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti, izračunamo pa jo lahko na podlagi seizmoloških (seizmološka potresna aktivnost) ali geoloških podatkov (geološka potresna aktivnost). Z opredelitvijo prelomnih območij okrog tras prelomnih potresnih izvorov smo vzpostavili prostorski odnos med prelomi in preteklo seizmičnostjo. Podatke o pretekli seizmičnosti smo črpali iz zgodovinskoinstrumentalnega (od leta 456 do leta 2014) kataloga potresov (ARSO, 2015), iz katerega smo odstranili odvisne potresne dogodke po metodi, opisani v Gardner & Knopoff (1974) in nato analizirali njegovo popolnost za pet izbranih vrednosti magnitude. Celotno analizo potresne aktivnosti smo izvedli s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika Python z razširitvami. Omenjena orodja so olajšala analizo večje količine podatkov ter nam omogočila preizkušanje različnih parametrov in metod za izračun potresne aktivnosti. Seizmološko potresno aktivnost smo za oceno negotovosti izračunali z dvema pristopoma in za izbrane vrednosti magnitude popolnosti, kar ponazorimo z razponom med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti za nek prelomni potresni izvor. Primerjali smo ga tudi z izračunano geološko potresno aktivnostjo. Za izbrane prelomne potresne izvore oziroma pripadajoča prelomna območja prikazujemo magnitudno-frekvenčne porazdelitve v obliki dvojno odrezanih eksponentnih krivulj, vrednosti seizmološke potresne aktivnosti po vseh prelomnih potresnih izvorih pa prikazujemo na karti. Izračunane vrednosti potresne aktivnosti smo primerjali tudi z Evropsko bazo seizmogenih prelomov ali krajše EDSF (Basili et al., 2013), ki je bila izdelana v okviru ocenjevanja potresne nevarnosti za Evropo.

Analiza potresne aktivnosti

Potresno aktivnost podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti. V okviru analize potresne aktivnosti smo izračunali seizmološko in geološko potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvorih. Analizo seizmološke potresne aktivnosti izvedemo na podlagi štetja potresov, ki pripadajo posameznim prelomnim potresnim izvorom. Ocenjevanje potresne nevarnosti poenostavimo s Poissonovim modelom pojavljanja potresov. To pomeni, da predpostavimo časovno neodvisnost med posameznimi potresnimi dogodki, zato moramo pred analizo seizmološke potresne aktivnosti oziroma pred štetjem potresov iz kataloga odstraniti odvisne potresne dogodke (predpotrese in popotrese). S predpostavko stacionarne seizmičnosti moramo analizirati tudi popolnost (ang. completeness) kataloga potresov. Katalog je v nekem obdobju popoln, če so v njem zabeleženi vsi potresi nad izbrano magnitudo popolnosti (ang. magnitude of *completeness*). Popolnost instrumentalnega kataloga potresov je odvisna od spodnje meje detekcije in prostorske porazdelitve seizmografov, popolnost zgodovinskega kataloga potresov pa od zanesljivosti zgodovinskih virov makroseizmičnih podatkov (Reiter, 1990). Za popoln katalog potresov velja magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov, ponazorjena z dvojno odrezano eksponentno krivuljo (Cornell & Vanmarcke, 1969; enačba 1). Pri tem je N[m] kumulativno letno število potresov nad magnitudo m.

$$N[m] = N[m_0] \left(e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_u - m_0)} \right) \left(1 - e^{-\beta(m_u - m_0)} \right)^{-1}$$
(1)

Dvojno odrezana eksponentna krivulja oziroma magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov je definirana na intervalu magnitude $[m_0, m_u)$. V našem primeru smo pri vseh prelomnih potresnih izvorih izbrali fiksno vrednost spodnje meje porazdelitve $(m_0 = 0,0)$, medtem ko je zgornja meja porazdelitve (m_u) pri posameznih prelomnih potresnih izvorih

različna. Spodnja meja porazdelitve na ta način predstavlja magnitudo, za katero računamo potresno aktivnost. Naklon dvojno odrezane eksponentne krivulje določa koeficient β (b * ln10), ki podaja razmerje med številom šibkih in močnih potresov. Koeficient b se v svetovnem merilu približuje vrednosti 1,0, kar sta z analizo potresne dejavnosti pokazala že Gutenberg & Richter (1945). Seizmološko potresno aktivnost *a* opredelimo kot $N[m_0]$ in v našem primeru predstavlja letno število potresov nad magnitudo 0,0.

Rezultat analize popolnosti kataloga potresov so različna obdobja popolnosti, določena za izbrane vrednosti magnitude popolnosti (m_i). Za vsako magnitudo popolnosti torej določimo obdobje popolnosti kataloga in v njem preštejemo potrese $N[m_i]$ nad magnitudo popolnosti. Pri štetju upoštevamo le glavne potrese, njihovo število pa delimo s številom let v obdobju popolnosti kataloga potresov (normirano prešteto število potresov). Vsak popoln katalog potresov opredeljuje svojo magnitudno-frekvenčno porazdelitev (enačba 1), s katero lahko izračunamo seizmološko potresno aktivnost. Glede na izbrano magnitudo popolnosti jo označimo z a_{mi} . Seizmološko potresno aktivnost lahko torej izračunamo za različne vrednosti magnitude popolnosti (tj. obdobja popolnosti kataloga potresov), katero od teh bomo upoštevali, pa je odvisno od števila potresov in namena izračuna potresne aktivnosti.

V našem primeru smo seizmološko potresno aktivnost računali na dva načina, in sicer za najmanjšo izbrano vrednost magnitude popolnosti ($m_i = 3,5$) z največjim številom potresov ($a_{3,5}$), ter za največjo vrednost magnitude popolnosti (m_i), pri kateri je prelomnemu potresnemu izvoru pripisanih vsaj še pet potresov (a_{mi}). Rezultati enega in drugega izračuna se lahko medsebojno razlikujejo zaradi privzetih, a ne v popolnosti veljavnih, predpostavk (Poissonova porazdelitev potresov, stacionarna seizmičnost), ocenjene popolnosti kataloga potresov in nepopolnega ujemanja dejanskega stanja v naravi z modelom magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov. Rezultati obeh izračunov se bodo zagotovo ujemali takrat, ko bo omejitev števila potresov zadostila isti vrednosti magnitude popolnosti kataloga potresov. Vse opisane negotovosti se odražajo v velikosti razpona med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane glede na posamezna obdobja popolnosti kataloga potresov. V ta razpon smo vključili tudi vrednosti seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za popolne kataloge z manj kot petimi potresi, pripisanimi posameznim prelomnim potresnim izvorom.

Geološko potresno aktivnost ($N[m_0]$ oziroma *a*) izračunamo iz definicije *spremembe* potresnega navora (ang. seismic moment rate; Brune, 1968), s pomočjo katerega je mogoče vzpostaviti odnos med potresno aktivnostjo in dolgoročno oziroma povprečno hitrostjo premikanja ob prelomu (ang. slip rate; *S*) ter površino celotne prelomne ploskve (A_f). V obliki dvojno odrezane eksponentne krivulje oziroma magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov ta odnos zapišemo kot (Youngs & Coppersmith, 1985):

$$N[m_0] = \frac{\mu A_f S(c-b) \left(1 - e^{-\beta(m_u - m_0)}\right)}{b M_0[m_u] e^{-\beta(m_u - m_0)}},$$
(2)

kjer potresni navor pri zgornji meji porazdelitve $(M_0[m_u])$ izrazimo kot

$$M_0[m_u] = e^{\ln 10(cm_u + d)}.$$
 (3)

Koeficient μ v enačbi 2 predstavlja strižni modul. Vrednosti koeficientov *c* in *d* sta iz odnosa med potresnim navorom in magnitudo (enačba 3) empirično izpeljala že Hanks & Kanamori (1979). Vse vrednosti omenjenih koeficientov smo za izračun geološke potresne aktivnosti privzeli na podlagi literature (npr. Gutenberg & Richter, 1945; Hanks & Kanamori, 1979; Youngs & Coppersmith, 1985; Bungum, 2007). Podajamo jih v preglednici 1. Geološka potresna aktivnost je izračunana na letno vrednost in primerljiva s seizmološko potresno aktivnostjo, če je hitrost premikanja ob prelomu podana v dolžinski enoti na leto.

Na podlagi izračunanih vrednosti seizmološke in geološke potresne aktivnosti po posameznih prelomnih potresnih izvorih lahko prikažemo magnitudno-frekvenčno porazdelitev potresov (enačba 1). Za spodnjo mejo porazdelitve (m_0) smo v vseh izračunih potresne aktivnosti privzeli vrednost magnitude enako 0,0. Zgornja meja porazdelitve (m_u) predstavlja največjo magnitudo potresa, ki ga lahko generira nek potresni izvor. V analizi geološke potresne aktivnosti je treba upoštevati tudi delež aseizmične komponente premika ob prelomu, ki pripada duktilnim deformacijam oziroma lezenju (ang. creep).

Preglednica 1 – Koeficienti in njihove vrednosti, uporabljene v analizi potresne aktivnosti (npr. Gutenberg & Richter, 1945; Hanks & Kanamori, 1979; Youngs & Coppersmith,

koeficient	vrednost
b	1,0
β	<i>b</i> * <i>ln</i> 10
С	1,5
d	16,1
μ	$3 * 10^{10} \text{ N/m}^2$

1985; Bungum, 2007).

Prikaz in priprava podatkov

Analizo potresne aktivnosti smo izvedli po prelomnih potresnih izvorih, ki jih je v okviru projekta "Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije" pripravil Geološki zavod Slovenije (Atanackov et al., 2014 in 2015). Prelomni potresni izvori (slika 1) so geometrijsko podani kot linijski sloj s številnimi parametri in temeljijo na trasah 89 aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov. V preglednici 2 podajamo izsek iz parametrizacijske tabele za izbrane prelomne potresne izvore.

V programskem okolju GIS smo za vsak prelomni potresni izvor oblikovali prelomno območje, ki je na podlagi testiranj široko 5 km v obe smeri od linije prelomnega potresnega izvora, prečno nanj. S tem smo vsaj delno upoštevali napako lokacije nadžarišč potresov in zaobjeli globinsko geometrijo prelomnih potresnih izvorov. Dobljena območja smo podaljšali vzdolžno za 2 km v obe smeri ter s tem bolje pokrili obravnavano območje. Končna oblika prelomnih območij je prikazana na sliki 1. Zaradi prekrivanja je en potres lahko pripadal več kot enemu prelomnemu območju, zato smo take potrese pri štetju ustrezno utežili in sicer z obratno vrednostjo števila ponovitev. En potres je h končnemu številu tako prispeval delež, obratno sorazmeren s številom prelomnih območii. v katerih se pojavi. Število $N[m_i]$ v primeru analize seizmološke potresne aktivnosti tako predstavlja prešteto število potresov z navorno magnitudo $M_W \ge m$, uteženo glede na število ponovitev posameznih potresov v različnih prelomnih območjih in normirano glede na obdobje popolnosti kataloga potresov za ustrezno vrednost magnitude popolnosti.



Slika 1 – Karta aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomnih potresnih izvorov (po Atanackov et al., 2014 in 2015) s pripadajočimi prelomnimi območji.

aktivnost	aktiven	verjetno aktiven	aktiven	aktiven	aktiven	potencialno aktiven	aktiven
največja navorna magnituda potresa	7,3	7,0	7,5	7,3	6,9	7,1	7,2
hitrost premikanja ob prelomu [mm/leto]	0,20	20'0	1,00	0,70	0,10	50,05	0,5
seizmogena globina [km]	8,0	11,2	16,0	16,9	11,6	20,5	15,9
naklon [°]	20	85	85	85	80	80	80
smer [°]	315	350	310	315	310	310	315
dolžina [km]	83	40	125	87	36	17	70
vrsta	nariv	desnozmični	desnozmični	desnozmični	desnozmični	desnozmični	desnozmični
ime prelomnega potresnega izvora	Črnokalsko- Palmanovski prelom	Hrastniški prelom	Idrijski prelom	Raški prelom	Ravenski prelom	Vrhniški prelom	Žužemberški prelom

Preglednica 2: Parametri za izbrane prelomne potresne izvore po Atanackov et al. (2014 in 2015), Rajh et al. (2017) in Rajh (2017).

Temelj analize seizmološke potresne aktivnosti je zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov (ARSO, 2015), ki obsega obdobje od leta 456 do leta 2014 ter vsebuje 2064 zmernih in močnih potresov ($M_W \ge 2,7$) na območju med 44° in 48° SGŠ in med 12° in 18.5° VGD (slika 2). Najmočnejši potres v katalogu doseže M_W 6,5. V katalogu so podane tudi ocene napak parametrov potresov (npr. lokacije, globine in magnitude).



Slika 2 – Zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov (od leta 456 do leta 2014) s prikazanimi lokacijami nadžarišč in navornimi magnitudami potresov (ARSO, 2015).

Zaradi privzete predpostavke Poissonovega modela pojavljanja potresov oziroma časovne neodvisnosti med posameznimi potresnimi dogodki smo iz kataloga odstranili odvisne potresne dogodke (predpotrese in popotrese) po metodi, opisani v Gardner & Knopoff (1974). V katalogu je po odstranitvi teh potresnih dogodkov preostalo še 1261 glavnih potresov, od tega 390 znotraj meja Slovenije. Nadalje smo analizirali še popolnost kataloga potresov. Ob predpostavki stacionarne seizmičnosti jo dokaj preprosto analiziramo z družinami krivulj, s katerimi prikažemo kumulativno število potresov nad magnitudo popolnosti v odvisnosti od časa (npr. Poljak et al., 2000). Točka, v kateri se kumulativna krivulja zadnjič prelomi oziroma bistveno spremeni naklon, določa začetek obdobja popolnosti kataloga potresov. V našem primeru smo popolnost kataloga potresov analizirali za pet izbranih vrednosti magnitude popolnosti (slika 3). Pri odčitavanju obdobja popolnosti iz kumulativnih krivulj smo si pomagali s štetjem potresov po dekadah.

Analizo geološke potresne aktivnosti smo izvedli na podlagi najboljših ocen parametrov prelomov (Atanackov et al., 2014 in 2015) ter rezultatov analize seizmogene globine in največje opažene magnitude potresov (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017), zapisanih v parametrizacijski tabeli prelomnih potresnih izvorov (preglednica 2). Največjo magnitudo potresa smo za vsak prelomni potresni izvor določili na tri načine: dva na podlagi empirično izpeljanih odnosov med površino prelomne ploskve in navorno magnitudo,

oziroma med dolžino preloma in navorno magnitudo (Wells & Coppersmith, 1994) ter tretjega na podlagi analize pretekle seizmičnosti (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017). Izmed dobljenih treh vrednosti največjih magnitud potresov smo za vsak prelomni potresni izvor izbrali največjo. Pri izračunu geološke potresne aktivnosti smo upoštevali še 30 % delež aseizmičnosti (npr. Wallace, 1970; Ward, 1998; Hunstad et al., 2003).



Slika 3 – Analiza popolnosti zgodovinsko-instrumentalnega kataloga potresov (ARSO, 2015) za pet izbranih vrednosti magnitude popolnosti. S puščicami so prikazani začetki obdobja popolnosti kataloga potresov.

Rezultati

Na slikah 4, 5 in 6 prikazujemo magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi seizmoloških podatkov za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti in geoloških podatkov. Na slikah so poleg magnitudno-frekvenčnih porazdelitev prikazane tudi točke, ki predstavljajo uteženo in normirano (prešteto) število potresov iz kataloga za različna obdobja oziroma različne magnitude popolnosti. Ponazorjene so s polnimi (ko je število potresov znotraj prelomnega območja \geq 5) in praznimi krogi (ko je število potresov znotraj prelomnega območja \leq 5). Največja in najmanjša vrednost seizmološke potresne aktivnosti določata razpon, ki ga omejujeta ustrezni dve točki uteženega in normiranega števila potresov iz kataloga (npr. slika 8).

Razhajanje med seizmološko potresno aktivnostjo za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti $(a_{3,5})$ in geološko potresno aktivnostjo je, na primerih Raškega preloma (slika 4) in Idrijskega preloma (slika 5), veliko. Vizualno prileganje magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi $a_{3.5}$, z uteženim in normiranim številom potresov za ostale vrednosti magnitude popolnosti je za omenjena preloma dobro. Izračunana magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Idrijski prelom se vizualno dobro prilega točkam uteženega in normiranega števila potresov za vrednosti magnitude popolnosti vse do M_w 4,5, pri točkah za zadnji dve vrednosti magnitude popolnosti pa je odstopanje nekoliko večje. Na primeru Ravenskega preloma (slika 6) opazimo ravno obratno, in sicer zelo majhno razhajanje med seizmološko in geološko potresno aktivnostjo ter slabo vizualno prileganje izračunane magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov za a_{35} z uteženim in normiranim številom potresov za vse ostale vrednosti magnitude Seizmološko določena magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov popolnosti. Ravenskega preloma gre samo skozi točko, s katero je krivulja opredeljena. Ta točka ponazarja uteženo število potresov z $M_W \ge 3.5$, normirano na obdobje popolnosti za ustrezno vrednost magnitude. Nekoliko se približa samo še točkama uteženega in normiranega števila potresov za naslednji dve vrednosti magnitude popolnosti, od ostalih dveh pa je že bistveno bolj oddaljena. Za pripadajoče prelomno območje je število močnejših potresov v katalogu večje od vrednosti, ki jih predvideva model, izračunan na podlagi $a_{3,5}$. Število potresov znotraj prelomnega območja tega preloma je bistveno manjše v primerjavi s številom potresov za isto vrednost magnitude popolnosti za Raški in Idrijski prelom.

Za vse tri prikazane prelome je geološka potresna aktivnost večja od seizmološke potresne aktivnosti $(a_{3,5})$. Pri nekaterih prelomih, npr. Vrhniškemu prelomu, pa je geološka potresna aktivnost manjša od seizmološke potresne aktivnosti (slika 7). Tu razhajanje med omenjenima potresnima aktivnostima sicer ni veliko. Za ta prelom je dobro tudi vizualno prileganje magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi $a_{3,5}$, z uteženim in normiranim številom potresov za ostale vrednosti magnitude popolnosti.







Slika 5 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Idrijski prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \ge m_i$.



Slika 6 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Ravenski prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (prekinjena rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \ge m_i$.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Vrhniški prelom $m_0 = 0.0, m_u = 6.6$



Slika 7 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Vrhniški prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \ge m_i$.

Za prve tri že omenjene prelome v nadaljevanju prikazujemo rezultate analize seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za največjo vrednost magnitude popolnosti, nad katero je bilo posameznemu prelomnemu potresnemu izvoru pripisanih vsaj pet potresov (slike 8, 9 in 10). Na ta način smo za Raški prelom (slika 8) izračunali seizmološko potresno aktivnost za vrednost magnitude popolnosti enako M_W 4,0 ($a_{4,0}$), ki je v primerjavi z a_{3.5} večja za približno 175 potresov letno. Razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane iz posameznih uteženih in normiranih števil potresov za različne magntude popolnosti, ni bistveno večji od te vrednosti. Tudi za Idrijski prelom (slika 9) smo v tem primeru izračunali $a_{4,0}$, ki pa je v primerjavi z $a_{3,5}$ manjša za približno 66 potresov letno. Razpon med najmanjšo in največjo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti je v tem primeru bistveno večji, kar je posledica majhnega števila potresov (< 5) za večje vrednosti magnitude popolnosti. Znotraj prelomnega območja Ravenskega preloma je število potresov enako pet ali več samo pri najmanjši vrednosti magnitude popolnosti, zato je seizmološka potresna aktivnost v primeru drugega izračuna ostala nespremenjena. Razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti je tudi v tem primeru dokaj velik. Največja razlika med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti se pojavi pri prelomih z manjšim številom potresov pri vrednostih magnitude popolnosti nad M_w 4,0. Pri takih prelomih je zato za seizmološko potresno aktivnost smiselno privzeti kar vrednost $a_{3.5}$.



Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov s prikazanim razponom za različna obdobja popolnosti kataloga potresov (Raški prelom)

Slika 8 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Raški prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{4,0}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.



Slika 9 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Idrijski prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{4,0}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.



Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov s prikazanim razponom za različna obdobja popolnosti kataloga potresov (Ravenski prelom)

Slika 10 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Ravenski prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.

Na karti potresne aktivnosti (slika 11) po prelomnih potresnih izvorih je prikazan logaritem seizmološke potresne aktivnosti, izračunan za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti ($a_{3,5}$) in pripadajoče obdobje popolnosti kataloga potresov od leta 1866 do leta 2014. Največje vrednosti seizmološke potresne aktivnosti pripadajo (od največje proti najmanjši vrednosti) Raškemu prelomu (RAŠ), Žužemberškemu prelomu (ŽUŽ) in Idrijskemu prelomu (IDR). Za te prelomne potresne izvore so vrednosti $a_{3,5}$, glede na število potresov znotraj pripadajočih prelomnih območij, določene dokaj zanesljivo. Najmanjše vrednosti izračunane potresne aktivnosti zasledimo na velikem številu prelomnih potresnih izvorov v severni in severozahodni Sloveniji, posamezni prelomni potresni izvori z majhno potresno aktivnostjo pa se pojavljajo tudi v južni Sloveniji. To so predvsem tisti z majhnim številom potresov znotraj pripadajočih prelomnih območij prelomnih območij, zato izračunana seizmološka potresna aktivnost za njih najverjetneje ni zanesljiva. Prelomni potresni izvori z manj kot petimi potresi znotraj prelomnih območij so na karti označeni z obarvanimi prekinjenimi črtami.

Diskusija

Vrednosti potresne aktivnosti za nekatere prelomne potresne izvore lahko primerjamo s tistimi, ki so bile v okviru projekta SHARE ("Seismic Hazard Harmonization in Europe") izračunane po prelomnih potresnih izvorih iz baze EDSF ("The European Database of Seismogenic Faults") (Giardini et al., 2013). Primerjavo podajamo na sliki 12 za logaritem seizmološke potresne aktivnosti. Podrobnosti analize za izračun potresne aktivnosti v projektu SHARE ne poznamo, zato razlogov za odstopanje v primerjavi z našimi vrednostmi ne moremo ustrezno komentirati.

Za primerjane prelomne potresne izvore se seizmološka potresna aktivnost med različnima pristopoma za izračun bistveno ne razlikuje (slika 12, levo), zato podrobneje komentiramo le primerjavo med seizmološko potresno aktivnostjo, izračunano za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti (a3.5) in projektom SHARE. Z vrednostmi potresne aktivnosti iz projekta SHARE se dobro ujemajo vrednosti $a_{3,5}$ za Idrijski prelom, Periadriatski prelom (PADR) in Raški prelom. Vrednost $a_{3,5}$ je v primerjavi z vrednostjo iz projekta SHARE bistveno manjša za Črnokalsko-Palmanovski prelom (Č-P) in Vipavski prelom (VIP). Geološka potresna aktivnost je za ta dva prelomna potresna izvora bistveno bližje vrednosti potresne aktivnosti iz projekta SHARE, zato sklepamo, da je bila tudi slednja izračunana na podlagi geoloških podatkov. Pri izračunu seizmološke potresne aktivnosti za Črnokalsko-Palmanovski prelom in Vipavski prelom smo imeli na voljo bistveno premalo podatkov, da bi lahko podali ustrezne zaključke, saj sta bila znotraj prelomnega območja prvega opažena dva potresa, znotraj prelomnega območja drugega pa le en potres. Bistveno večjo vrednost potresne aktivnosti smo v primerjavi s projektom SHARE izračunali za Labotski prelom (LAB), Šoštanjski prelom (ŠOŠ) in Zahodnosavski prelom (ZSAV). Razlog za nastalo razliko je deloma lahko vrednost koeficienta b, saj so v projektu SHARE za omenjene prelome uporabili manjšo vrednost koeficienta (0,83), kar zmanjša naklon dvojno odrezane eksponentne krivulje in s tem izračunano potresno aktivnost.



Slika 11 – Logaritem vrednosti *a*_{3,5}, prikazan po prelomnih potresnih izvorih za prelomna območja (slika 1). S prekinjeno črto so označeni prelomni potresni izvori z manj kot petimi potresi znotraj pripadajočih prelomnih območij.

Na podlagi analize seizmološke potresne aktivnosti ugotavljamo, da je določitev le-te otežena za dokaj velik delež prelomnih potresnih izvorov, pri katerih je število potresov znotraj prelomnega območja majhno. Seizmološko potresno aktivnost smo zato z zelo omejeno zanesljivostjo lahko določili 42 prelomnim potresnim izvorom, brez izračunane vrednosti pa je ostalo 15 prelomnih potresnih izvorov. Da bi za tovrstne prelomne potresne izvore pridobili več informacij o potresni aktivnosti, bi bilo treba izvesti analizo na podlagi številčnejšega instrumentalnega kataloga potresov z bistveno manjšo magnitudo popolnosti. Kljub privzetim predpostavkam smo lahko dokaj dobro določili seizmološko potresno aktivnost za daljše prelomne potresne izvore z večjim številom potresov. S Poissonovim modelom pojavljanja potresov predpostavimo, da se potresi pojavljajo naključno in neodvisno od časa, s čimer ne ugodimo teoriji elastičnega odskoka in odvisnim dogodkom v katalogu potresov. Kljub napaki, vpeljani z omenjeno predpostavko, menimo, da nam Poissonov model, skupaj z metodami odstranjevanja odvisnih dogodkov, omogoča dovolj dobro oceno ključnih parametrov za ocenjevanje potresne nevarnosti. Poleg tega je treba upoštevati, da je ocena popolnosti kataloga potresov le približna, štetje potresov znotraj posameznih prelomnih območij pa omejeno na zelo majhno površino v primerjavi s celotno razsežnostjo kataloga potresov.



Slika 12 – Primerjava rezultatov analize seizmološke potresne aktivnosti. Medsebojno za oba načina izračuna in z vrednostmi, ki so bile izračunane v okviru projekta SHARE. Z a_{mi} je označena potresna aktivnost za največjo vrednost magnitude popolnosti, nad katero je bilo prelomu pripisanih vsaj še pet potresov.

Kot smo videli na nekaterih primerih (npr. slika 10), lahko močnejši potresi z daljšimi povratnimi dobami povzročijo nekoliko večje odstopanje uteženega in normiranega števila potresov od izračunane magnitudno-frekvenčne porazdelitve in s tem bistveno vplivajo na izračun potresne aktivnosti oziroma na razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za različne vrednosti magnitude popolnosti. Tovrstni potresni dogodki zaradi relativno kratkega časovnega razpona kataloga potresov najverjetneje niso ustrezni za analizo ali pa smo za te vrednosti magnitude popolnosti napačno ocenili obdobje popolnosti kataloga potresov. Razpon vrednosti potresne aktivnosti hitrosti premikanja ob prelomu. Opozoriti je treba, da "vizualen" pristop k vrednotenju rezultatov ni najbolj ustrezen. Iskanje parametrov magnitudno-frekvenčne porazdelitve, izračunane iz seizmoloških podatkov, namreč ne poteka po metodi najmanjših kvadratov, ker so vrednosti kumulativne in zato med sabo niso neodvisne.

Velik vpliv na izračun seizmološke potresne aktivnosti ima tudi način pripisovanja potresov posameznim prelomnim potresnim izvorom. Predstavljena študija potresne

aktivnosti je le preliminarna, zato pri prostorski analizi še nismo upoštevali kinematskih lastnosti (geometrije) prelomnih potresnih izvorov in napake določitve lokacije nadžarišč potresov. Slednja upada s časom, ko je bil potres zabeležen, saj so lokacije današnjih potresov določene točneje.

Zaključek in nadaljnje delo

Ta študija predstavlja dopolnitev in nadaljevanje dosedanje analize potresne aktivnosti na območju Slovenije (Rajh, 2017). Na podlagi seizmoloških in geoloških podatkov smo analizirali potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvorih (seizmološka in geološka potresna aktivnost). Tovrstna analiza je v Sloveniji zelo zahtevna zaradi relativno počasnih premikov ob prelomih in zmerne potresne dejavnosti. Seizmološko potresno aktivnost smo za oceno negotovosti izračunali po dveh pristopih ter jo, kjer je bilo to mogoče, primerjali z vrednostmi iz literature. Ugotavljamo, da je izračun potresne aktivnosti negotov za kar precej prelomov na območju Slovenije, kar se odraža v velikosti razpona med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za različne vrednosti magnitude popolnosti ter v razliki med seizmološko in geološko potresno aktivnostjo. Razlogov za to je več (npr. privzete predpostavke, uporabljene metode, privzete vrednosti parametrov), v največji meri pa k odstopanju prispevajo relativno kratek časovni razpon kataloga potresov, majhno število potresov v nekaterih prelomnih območjih, negotovosti v prostorski analizi in negotovosti v določanju parametrov prelomnih potresnih izvorov. Negotovosti pri izračunu seizmološke potresne aktivnosti bomo pred izračunom potresne nevarnosti poizkusili zmanjšati predvsem z izboljšano prostorsko analizo. Izvedli bomo tudi analizo seizmološke potresne aktivnosti z uporabo instrumentalnega kataloga potresov, pri kateri bo poudarek na prelomnih potresnih izvorih z nezanesljivo določeno potresno aktivnostjo. Podane vrednosti izračunane seizmološke potresne aktivnosti (slika 11) so preliminarne. Kljub temu predstavljajo pomemben člen pri izračunu končnih vrednosti potresne aktivnosti, ki bodo pomembno prispevale k izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2015). Katalog potresov od leta 456 do 2014. Arhiv Agencije RS za okolje.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2014). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 1. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2015). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 2. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Basili, R., Kastelic, V., Demircioglu, M. B., Garcia Moreno, D., Nemser, E. S., Petricca, P., Sboras, S. P., Besana-Ostman, G. M., Cabral, J., Camelbeeck, T., Caputo, R., Danciu, L., Domac, H., Fonseca, J., García-Mayordomo, J., Giardini, D., Glavatovic, B., Gulen, L., Ince, Y., Pavlides, S., Sesetyan, K., Tarabusi, G., Tiberti, M. M., Utkucu, M., Valensise, G., Vanneste, K., Vilanova, S., Woessner, J. (2013). The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE [online]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.

http://diss.rm.ingv.it/share-edsf (28.11.2017).

- Brune, J. N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. Journal of Geophysical Research, 73(2), 777–784.
- Bungum, H. (2007). Numerical modelling of fault activities. Computers & Geosciences, 33(6), 808-820.
- Cornell, C. A., Vanmarcke, E. H. (1969). The major influences on seismic risk. V: Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago (Čile) : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, A-1, 69-83.
- Gardner, J. K., Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? Bulletin of the Seismological Society of America, 64(5), 1363–1367.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeeck, T., Campos-Costa, A., Douglas, J., Demircioglu, M. B., Erdik, M., Fonseca, J., Glavatovic, B., Lindholm, C., Makropoulos, K., Meletti, C., Musson, R., Pitilakis, K., Sesetyan, K., Stromeyer, D., Stucchi, M., Rovida, A. (2013). Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource [online]. European Facility for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR), Swiss Seismological Service (SED).
 - doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE.

http://www.efehr.org:8080/jetspeed/portal/hazard.psml (28.11.2017).

- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1945). Seismicity of the Earth (Supplementary Paper). Bulletin of the Geological Society of America, 1945, 56(6), 603–668.
- Hanks, T. C., Kanamori, H. A. (1979). Moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, 84(B5), 2348–2350.
- Hunstad, I., Selvaggi, G., D'Agostino, N., England, P., Clarke, P., Pierozzi, M. (2003). Geodetic strain in peninsular Italy between 1875 and 2001. Geophysical Research Letters, 30(4), 1181.
- McGuire, R. K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Kolorado, ZDA, 240 str.
- Poljak, M., Živčić, M., Zupančič, P. (2000). The seismotectonic characteristics of Slovenia. Pure and Applied Geophysics, 157, 37–55.
- Rajh, G., Zupančič, P., Živčić, M., Gosar, A., Čarman, M. (2017). Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016 : zbornik del, 22. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 26. januar 2017. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 39–49.
- Rajh, G. (2017). Analiza seizmotektonskih podatkov v Sloveniji z uporabo GIS orodij za verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 108 str.
- Reiter, L. (1991). Earthquake hazard analysis: Issues and insights. Columbia University Press, New York, ZDA, 254 str.
- Wallace, R. E. (1970). Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. Geological Society of America Bulletin, 81, 2875–2890.
- Ward, S. (1998). On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135, 1011–1018.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), 974–1002.
- Youngs, R. R., Coopersmith, R. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4), 939–964.

Prvi dve leti delovanja kombinirane geodetske mreže 0. reda

Klemen Ritlop¹, Niko Fabiani¹, Katja Oven¹, Mihaela Triglav Čekada¹

Povzetek

Z vzpostavitvijo kombinirane geodetske mreže 0. reda je Slovenija dobila najkakovostnejše ogrodje za realizacijo in nadzor prihodnjih državnih geodetskih referenčnih sistemov. V okviru kombinirane geodetske mreže 0. reda deluje tudi deset stalno delujočih postaj GNSS, ki sestavljajo omrežje GNSS 0. reda. Konec leta 2017 bo minilo dve leti od začetka delovanja omrežja GNSS 0. reda. Omrežje je operativno od 1. 1. 2016, popolno opremljeno pa je od konca novembra 2017. V članku na kratko opišemo vzpostavitev kombinirane geodetske mreže 0. reda, nato pa se osredotočimo na omrežje GNSS 0. reda, njegovo vzpostavitev in prvi dve leti njegovega delovanja.

Ključne besede: kombinirana geodetska mreža 0. reda, opazovanja GNSS, omrežje GNSS

Keywords: zero order combined geodetic network, GNSS observations, GNSS network

Uvod

Kakovostne uradne evidence prostorskih podatkov so pomemben del državne prostorske podatkovne infrastrukture. Vsi prostorski podatki uradnih prostorskih evidenc morajo biti umeščeni v uradni državni geodetski referenčni sistem, v njem pa se izvaja tudi zajem prostorskih podatkov. Osnovni in najpomembnejši pogoj za obstoj kakovostnih evidenc prostorskih podatkov je obstoj kakovostnega geodetskega referenčnega sistema, ki zagotavlja skladnost koordinat točk in geodetskih opazovanj skozi daljše časovno obdobje, neodvisno od lokacije geodetskih točk (Sterle in Stopar, 2016). Raziskave zadnjih let (Sterle, 2015; Sterle in Stopar 2016) kažejo, da je kakovost trenutne realizacije horizontalne komponente državnega koordinatno komponento, če koordinate točk določamo na podlagi omrežja SIGNAL. V primeru uporabe mreže pasivnih točk GNSS pa je kakovost koordinatnega sistema D96 le še na nivoju nekaj centimetrov. Jasno je, da je trenutni horizontalni geodetski datum D96 zastarel in da je nujna vzpostavitev novega.

Aktivnosti za vzpostavitev nove realizacije državnega horizontalnega koordinatnega sistema so v polnem teku (Medved, 2016), prav tako je v teku vzpostavitev nove višinske komponente državnega geodetskega referenčnega sistema (Stopar in sod., 2015). Veliko dela na tem področju je bilo opravljenega v okviru projekta Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav, ki se je izvajal med leti 2013 in 2016 v okviru Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora (EGP). Kot enega najpomembnejših rezultatov tega projekta velja izpostaviti izgradnjo kombinirane geodetske mreže 0. reda. Kombinirana geodetska mreža povezuje tri stebre geodezije: geodinamiko, težnostno polje in rotacijo Zemlje tako na konceptualni in globalni ravni, kot tudi na državni ravni (Stopar in sod., 2015). Kombinirana geodetska mreža 0. reda bo združila tradicionalno ločeni horizontalno in višinsko komponento državnega koordinatnega sistema v enoten in moderen državni geodetski referenčni sistem, ki bo predstavljal temelj državne prostorske infrastrukture.

Glavna naloga mreže 0. reda je izvajanje najkakovostnejših geodetskih opazovanj, ki jih potrebujemo za, kolikor je mogoče, neprekinjen nadzor nad kakovostjo realizacije

¹ Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

državnega koordinatnega sistema. Vsa opravljena opazovanja na točkah geodetske mreže 0. reda sestavljajo kakovosten in čim bolj popoln arhiv opazovanj (arhiv opazovanj GNSS, tj. arhiv datotek RINEX, arhiv nivelmanskih opazovanj, arhiv gravimetričnih opazovanj in arhiv terestričnih opazovanj za potrebe ugotavljanja stabilnosti mikrolokacij točk 0. reda). Lastnik kombinirane geodetske mreže 0. reda je Geodetska uprava RS, nadzorni center mreže pa je na Geodetskem inštitutu Slovenije.

V članku bomo opisali osnovne značilnosti kombinirane geodetske mreže 0. reda, nato pa se bomo osredotočili na omrežje postaj GNSS. Podrobneje bomo opisali omrežje postaj GNSS, časovnico pričetka delovanja posameznih stalno delujočih postaj GNSS in njihovo opremo ter rezultate prvih dveh let delovanja omrežja GNSS.

Vzpostavitev kombinirane geodetske mreže 0. reda

Pred pričetkom izgradnje kombinirane geodetske mreže 0. reda je bila v okviru idejnega projekta njene vzpostavitve opravljena obsežna analiza, v kateri se je določilo optimalno število točk, njihova razporeditev in končna lokacija. Pri tem so bili upoštevani sledeči dejavniki (Berk in sod., 2012a; 2012b): oblika in velikost državnega ozemlja, reliefne danosti, vegetacija, geološke, hidrološke in geotektonske danosti ter drugi vplivni dejavniki. Osnovo za določitev makrolokacij točk so predstavljale osnovne geometrijske lastnosti državnega ozemlja. Postavljena sta bila dva geometrijska kriterija:

- točke mreže 0. reda naj bodo čim vsaksebi, oziroma na kar največji medsebojni oddaljenosti,
- točke mreže 0. reda naj čim bolj enakomerno pokrivajo celotno državno ozemlje.

Analizirane so bile konfiguracije mreže z različnim številom točk (n = 2, 3, ..., 6). Kot najprimernejša je bila izbrana konfiguracija mreže s šestimi točkami, katerih predvidene makrolokacije (območja znotraj krogov s polmerom 25 km in hkrati znotraj državnega ozemlja) in končne mikrolokacije so prikazane na sliki 1. Za posamezno točko je bilo znotraj pripadajoče makrolokacije izbranih več mikrolokacij, katerih primernost se je ocenjevala na podlagi sledečih dejavnikov (Stopar in sod., 2013; 2014a; 2014b):

- <u>Reliefne danosti</u>: Za vsako izbrano mikrolokacijo so se preverile reliefne oblike v njeni neposredni okolici, z namenom analize primernosti mikrolokacije za izvajanje opazovanj GNSS. Dodatno je bila analizirana tudi primernost dostopa do mikrolokacije za namen izgradnje točke in seveda za namen izvajanja geodetskih del.
- <u>Vegetacija</u>: Za posamezno mikrolokacijo se je naredila analiza vpliva okoliške vegetacije na vidnost neba in na vpliv večpotja. V kombinaciji z analizo reliefa so bile izdelane karte vidnosti neba.
- <u>Geološke, hidrološke in geotektonske danosti</u>: Za izbrane mikrolokacije so se izdelale podrobne geološke ocene in poročila o litostratigrafskih in hidroloških značilnostih lokacije.
- <u>Drugi dejavniki</u>: Prisotnost za GNSS in gravimetrična opazovanja motečih objektov in naprav, bližina moteče prometne infrastrukture, možnosti priključitve na električno in telekomunikacijsko infrastrukturo, prostorska ureditev (dovoljeni posegi v prostor na območju izbrane mikrolokacije, predvideni posegi v prostor v okolici mikrolokacije) in lastništvo parcele (državna ali občinska last).



Slika 1: Karta predvidenih makrolokacij šestih točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, ob upoštevanju postavljenih geometrijskih kriterijev, in njihovih končnih mikrolokacij (Berk in sod., 2012b)

Poleg naštetih dejavnikov je morala mikrolokacija ustrezati tudi smernicam EUREF za vzpostavitev mrež stalno delujočih postaj GNSS, višinske mreže in gravimetrične mreže. Iskanje primernih mikrolokacij, ki bi izpolnjevale vse zahtevane pogoje je bil zahteven in dolgotrajen projekt. Opravljenih je bilo veliko usklajevanj z upravniki ali lastniki državnih ali občinskih parcel, na kateri naj bi stala posamezna točka, pogovorov in pogajanj z zasebnimi lastniki sosednjih parcel posamezne mikrolokacije glede samega dostopa do točk in izgradnje potrebne električne in telekomunikacijske infrastrukture. Izvedli smo tudi terenske preglede lokacij. Končni izbor mikrolokacij za posamezne točke kombinirane geodetske mreže 0. reda je podan v preglednici 1 in prikazan na sliki 1.

sod., 2016)						
Točka	Lokacija	e [m]	n [m]	H [m]		
severozahodna točka	Korada	388660	103811	810		
jugozahodna točka	Koper	400408	46146	7		
osrednja točka	Šentvid pri Stični	487286	90562	342		
osrednja severna točka	Areh	539055	150677	1243		
jugovzhodna točka	Kog	596071	146151	245		
severovzhodna točka	Prilozje	520338	50129	165		

Preglednica 1: Končni izbor mikrolokacij posameznih točke kombinirane geodetske mreže 0. reda s pripadajočimi približnimi koordinatami v državnem horizontalnem koordinatnem sistemu D96/TM (e, n), oz. slovenskem višinskem sistemu SVS2000 (H) (Stopar in

Pet izmed šestih državnih točk 0. reda je bilo vzpostavljeno na novo (Stopar in sod., 2013; 2014a; 2014b; Režek, 2015). Izjema je točka na lokaciji Koper za katero se je uporabila infrastruktura obstoječe mareografske postaje Koper. Točke mreže 0. reda so bile vzpostavljene po mednarodnih standardih, s čimer je omogočena vključitev kombinirane

geodetske mreže 0. reda v Evropsko kombinirano geodetsko mrežo (ECGN) (Stopar in sod., 2015). Posamezna točka 0. reda je sestavljena iz več točk:

- matične referenčne točke ob vznožju stebra,
- referenčne točke v osi stebra (v kolikor se na stebru nahaja več točk),
- ene ali dveh referenčnih točk GNSS na stebru,
- treh referenčnih reperjev za nivelmansko in gravimetrično izmero ob vznožju stebra,
- treh ali štirih točk zavarovalne terestrične in nivelmanske mreže,
- referenčne točke za mareografska opazovanja le točka na lokaciji Koper.

Na sliki 2 so fotografije posameznih točk 0. reda. Primer konfiguracije točke 0. reda z dvema referenčnima točkama GNSS je prikazan na sliki 3 (točka na lokaciji Šentvid pri Stični).



Areh (16. 11. 2017)



Kog (16. 11. 2017)







Prilozje (3. 11. 2017) Slika 2: Fotografije točk kombinirane geodetske mreže 0. reda (foto: Niko Fabiani)

Korada (3. 11. 2017)





Slika 3: Točka mreže 0. reda na lokaciji Šentvid pri Stični. ST00 – matična referenčna točka; ST01 – referenčna točka v osi stebra; STA1 in STA2 – referenčni točki GNSS; STR1, STR2 in STR3 – referenčni reperji; STZ1, STZ2 in STZ3 – točke zavarovalne mikromreže (Stopar in sod., 2016)

V okviru vzpostavitve mreže 0. reda so se poleg vseh pripravljalnih in gradbenih del izvedle tudi številne geodetske meritve:

- izmera terestričnih mikromrež posameznih točk 0. reda,
- izmera mikromrež GNSS posameznih točk 0. reda,
- izmera nivelmanskih mikromrež posameznih točk 0. reda.

Z namenom analize stabilnosti točk 0. reda so bile vse naštete izmere opravljene dvakrat. Poleg že naštetih izmer je bila na točkah 0. reda opravljena tudi nivelmanska izmera z namenom navezave točk 0. reda na državno nivelmansko mrežo in gravimetrična izmera z namenom navezave točk 0. reda na državno gravimetrično mrežo (Stopar in sod., 2014c). Leta 2016 pa so bile tiste referenčne točke GNSS, na katerih so že delovale postaje GNSS (ARA2, KDA2, KGA1, KOPE, PZA1, PZA2, STA1, STA2), vključene v GNSS-kampanjo *EUREF Slovenija 2016* (Medved, 2016).

Omrežje stalno delujočih postaj kombinirane geodetske mreže 0. reda

Omrežje stalno delujočih postaj GNSS kombinirane geodetske mreže 0. reda (v nadaljevanju omrežje GNSS 0. reda) je sestavljeno iz desetih stalno delujočih postaj GNSS – na lokacijah Areh, Kog, Prilozje in Šentvid pri Stični so vzpostavljene t. i. dvojne GNSS-točke, kar pomeni, da sta na stebru posamezne točke 0. reda stabilizirani dve referenčni točki GNSS. Dvojne GNSS-točke naj bi zagotavljale podatke najvišje kakovosti skozi daljše časovno obdobje (Medved in sod., 2017). Vse na novo zgrajene točke 0. reda (tj. vse točke, razen točka na lokaciji Koper) so opremljene s senzorjem nagiba, s katerim se kontinuirano spremlja nagib oziroma stabilnost betonske plošče, na kateri so stabilizirane posamezne referenčne točke mreže 0. reda. Štiri točke 0. reda (na lokacijah Areh, Korada, Prilozje in Šentvid pri Stični) so opremljene tudi z meteorološko postajo. Senzorji nagiba in meteorološke postaje so povezani z eno izmed stalno delujočih postaj GNSS na posamezni točki 0. reda in delujejo v sklopu omrežja GNSS 0. reda. Vse stalno delujoče postaje GNSS so opremljene z namenskimi antenami in sprejemniki, ki zagotavljajo opazovanja GNSS najvišje kakovosti. Oprema, nameščena na posamezni postaji GNSS, je podana v preglednici 2.

Lokacija točke 0. reda	Ime referenčne točke GNSS	Sprejemnik GNSS	Antena GNSS	Senzor nagiba	Meteorološka postaja	Datum namestitve postaje GNSS
Auch	ARA1	Leica GR30	Leica AR20	/	/	22. 11. 2017
Alen	ARA2	Leica GR25	Leica AR20	Leica Nivel 210	Vaisala WXT520	16. 11. 2015
Korada	KDA1	Leica GR30	Leica AR20	/	/	28. 11. 2017
	KDA2	Leica GR25	Leica AR20	Leica Nivel 210	Vaisala WXT520	2. 1. 2016
Kog	KGA1	Leica GR25	Leica AR20	Leica Nivel 210	/	30. 6. 2015
Koper	KOPE	Leica GR25	Leica AR20	/	/	12. 12. 2005 ²
Prilozje	PZA1	Leica GR25	Leica AR20	Leica Nivel 210	Vaisala WXT520	5. 6. 2015
	PZA2	Leica GRX1200 PRO	Leica AR20	/	/	5. 6. 2015
Šentvid pri Stični	STA1	Leica GRX1200 PRO	Leica AR20	/	/	9. 11. 2015
	STA2	Leica GR25	Leica AR20	Leica Nivel 210	Vaisala WXT520	9. 11. 2015

Preglednica 2: Oprema stalno delujočih postaj GNSS na posameznih točkah mreže 0. reda

Omrežje postaj GNSS je stalno delujoča komponenta kombinirane geodetske mreže 0. reda. Posamezne postaje GNSS delujejo neprestano od njihove vzpostavitve dalje. Omrežje je operativno od 1. 1. 2016 (Medved in sod., 2017), popolno opremljeno pa je od konca novembra 2017, ko sta bili opremljeni še zadnji dve postaji GNSS (ARA1 in KDA1). Podatki s stalno delujočih postaj GNSS se shranjujejo v arhivu omrežja GNSS 0. reda v formatu RINEX. Arhiv vsebuje sledeče podatke za posamezne postaje GNSS:

- dnevne datoteke z intervalom registracije 30 sekund z opazovanji GPS in GLONASS³ v stisnjeni različici formata RINEX 2.11 (*Hatanaka-compressed*),
- dnevne datoteke z intervalom registracije 30 sekund z opazovanji GPS in GLONASS³ v stisnjeni različici formata RINEX 3.02 (*Hatanaka-compressed*),
- dnevne datoteke z intervalom registracije 60 sekund z opazovanji meteorološke postaje⁴ (zračni tlak, temperatura, relativna vlažnost, smer in moč vetra, količina padavin ter indikator toče) v formatu RINEX 2.11,
- dnevne datoteke z intervalom registracije 60 sekund z opazovanji senzorja nagiba⁵ (velikost nagiba v smeri dveh med seboj pravokotnih osi, ene usmerjene približno proti severu, druge približno proti vzhodu, in temperatura senzorja nagiba) v formatu RINEX 2.20.

² Postaja KOPE je obstoječa postaja omrežja SIGNAL. V omrežje GNSS 0. reda je bila vključna 2. 1. 2016.

³ Ne velja za postaji PZA2 in STA1, kjer je nameščen sprejemnik GRX1200 PRO, ki sprejema le signal GPS.

⁴ Na voljo za tiste postaje, ki imajo nameščeno meteorološko postajo (glej preglednico 2).

⁵ Na voljo za tiste postaje, ki imajo nameščen senzor nagiba (glej preglednico 2).
Za upravljanje omrežja GNSS 0. reda se uporablja programski paket Alberding GNSS Status Software, ki zagotavlja tudi številne osnovne indikatorje kakovosti delovanja omrežja: dosegljivost postaje, število vidnih satelitov, število izvedenih opazovanj v enem dnevu, razmerje med številom izvedenih in vseh možnih opazovanj v enem dnevu, vrednosti faktorjev HDOP, VDOP in PDOP, razmerje C/N₀, število izpadov signala, indikatorji večpotja in letence (zakasnitve) podatkov. Za vse naštete indikatorje so nastavljene mejne vrednosti. V primeru, da je določena mejna vrednost presežena, se sproži alarm, ki skrbnika omrežja obvesti (preko SMS sporočila ali elektronske pošte) o težavi na omrežju. Kakovost opazovanj GNSS in stabilnost točk omrežja se preverja tudi s posebnim modulom programskega paketa Alberding GNSS Status Software, imenovana PPP Monitoring. Modul PPP Monitoring izvaja dnevne izračune koordinat vseh referenčnih točk GNSS po metodi PPP (angl. Precise Point Positioning) in jih primerja z referenčnimi koordinatami. V primeru prevelikega odstopanja se sproži alarm, ki obvesti skrbnika omrežja o težavi. Tako za vse naštete indikatorje kakovosti delovanja omrežja, kot tudi za odstopanja dnevnih preračunov koordinat od referenčnih vrednosti je za vsako postajo na voljo celotna zgodovina od pričetka njenega delovanja. Najkakovostnejšo kontrolo kakovosti delovanja omrežja in stabilnosti točk pa izvaja analitični center mreže 0. reda, ki deluje na Katedri za matematično in fizikalno geodezijo ter navigacijo (KMFGN) UL FGG. V okviru te kontrole kakovosti se izračunavajo dnevne rešitve koordinat referenčnih točk GNSS s programskim paketom Bernese GNSS Software, Version 5.2 in programskim paketom gPPP, ki ga je razvila KMFGN (Stopar in sod., 2016). Na podlagi dnevnih rešitev se nato analizira kakovost delovanja omrežja in stabilnost posameznih točk 0. reda.

Analiza odstopanj dnevnih preračunov koordinat, dobljenih z modulom *PPP Monitoring*, od referenčnih koordinat pokaže, da omrežje GNSS 0. reda deluje kakovostno in da so posamezne točke omrežja stabilne. Časovna vrsta odstopanj dnevnih preračunov koordinat od referenčnih vrednosti je za osem od desetih postaj prikazana na sliki 4. Odstopanja niso prikazana za postaji ARA1 in KDA1, saj sta ti dve postaji začeli delovati šele pred kratkim (preglednica 2). Zaradi spreminjanja referenčnih vrednosti koordinat v prvi polovici leta 2016 so v tem obdobju opazni večji skoki v časovnih vrstah odstopanj koordinat nekaterih postaj. Omrežje GNSS 0. reda deluje kakovostno, vendar ne povsem brez težav. Težave v delovanju omrežja povzročajo predvsem dejavniki, na katere nimamo neposrednega vpliva, npr. odpoved opreme zaradi udarov strele, izpadi električne energije zaradi neurij, težave, povezane s telekomunikacijsko infrastrukturo.



Slika 4: Odstopanja dnevnih preračunov koordinat posameznih postaj omrežja GNSS 0. reda

Zaključek

Izgradnja in vzpostavitev kombinirane geodetske mreže 0. reda je bila dolgotrajen, organizacijsko, predvsem pa strokovno zahteven in obsežen projekt. Rezultat projekta je šest geodetskih točk 0. reda, ki omogočajo izvajanje najkakovostnejših geodetskih opazovanj in sestavljajo najpomembnejšo državno geodetsko mrežo. Z vzpostavitvijo kombinirane geodetske mreže 0. reda je bil storjen prvi korak k vzpostavitvi novega, visokokakovostnega geodetskega referenčnega sistema. Kombinirana geodetska mreža 0. reda bo v prihodnosti predstavljala osnovo za realizacije referenčnih koordinatnih sistemov in spremljanje njihove kakovosti skozi daljše časovno obdobje. Prav tako bo kombinirana geodetska mreža 0. reda osnova za morebitno povezovanje z različnimi mednarodnimi mrežami.

Omrežje GNSS 0. reda je poleg mareografske postaje edini stalno delujoči del kombinirane geodetske mreže 0. reda. Stalno delujoče postaje GNSS zagotavljajo nepretrgan niz opazovanj GNSS na pripadajočih referenčnih točkah GNSS 0. reda. Kot prvi sta 5. 6. 2015 začeli delovati postaji GNSS na točki 0. reda v Prilozju (PZA1 in PZA2), od 2. 1. 2016 na vsaki točki 0. reda deluje vsaj ena postaja GNSS (tj. skupaj osem postaj GNSS). Od 28. 11. 2017, ko je bila opremljena še zadnja postaja GNSS (tj. KDA1) pa je na voljo popoln arhiv datotek RINEX za vseh deset postaj. Za konec velja omeniti, da podatki arhiva RINEX niso uporabni le na področju geodezije, temveč tudi na področju meteorologije, seizmologije, geodinamike in drugih znanstvenih področjih.

Literatura

- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Bitenc, M., Hari, J., Klanjšček, M., Triglav Čekada, M., Žagar, T., Radovan, D., Ambrožič, T., Koler, B., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Savšek, S., Sterle, O., Stopar, B. (2012a). Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Končno poročilo. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 149 str.
- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Radovan, D., Komadina, Ž., Medved, K., Ambrožič, T., Koler, B., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Savšek, S., Sterle, O., Stopar, B. (2012b). Idejni projekt za kombinirano geodetsko mrežo ničtega reda. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Zbornik predavanj. Ljubljana, str. 37–44.
- Medved, K. (2016). GNSS-kampanja "EUREF Slovenija 2016". Geodetski vestnik, 60(4), 752-758.
- Medved, K., Berk, S., Fabiani, N., Koler, B., Komadina, Ž., Kuhar, M., Oven, K., Pavlovčič Prešeren, P., Režek, J., Sterle, O., Stopar, B. (2017). National Report of Slovenia to the EUREF 2017 Symposium in Wrocław. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Vroclav, 4 str.
- Režek, J. (2015). Odprtje prve državne geodetske točke 0. reda Prilozje. Geodetski vestnik, 59(3), 634–636.
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 196 str.
- Sterle, O., Stopar, B. (2016). Stanje horizontalne komponente državnega koordinatnega sistema D96. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015. Zbornik del. Ljubljana, str. 123–133.
- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Bric, V., Berk, S. (2013). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 1. faza, 2. faza. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 166 str.
- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Bric, V., Berk, S. (2014a). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane geodetske mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 3. faza: točke Areh, Koper in Korada. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 43 str.

- Stopar, B., Koler, B., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Štebe, G., Urbančič, T., Oven, K., Janežič, M., Bajec, K., Bric, V., Berk, S. (2014b). Izdelava projektne dokumentacije za točke kombinirane mreže 0. reda. Projekt 2433-13-0003. Elaborat: 3. faza: točka Šentvid pri Stični. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 46 str.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Kregar, K., Štebe, G., Urbančič, T., Goršič, J., Mencin, A., Berk, S., Bajec, K., Mesner, N., Fabiani, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2014c). Razvoj geodetskega referenčnega sistema 2014. Projekt št. 2433-13-0003. Zaključni elaborat. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 295 str.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Kregar, K., Štebe, G., Urbančič, T., Goršič, J., Mencin, A., Berk, S., Fabiani, N., Mesner, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016). Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem. Projekt št. 2433-13-0003. Končno poročilo: sklop 1. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana, 216 str.
- Stopar, B., Režek, J., Komadina, Ž., Medved, K., Berk, S., Bajec, K., Oven, K., Koler, B., Urbančič, T., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O. (2015). Aktivnosti pri vzpostavitvi sodobnega geodetskega referenčnega sistema v Sloveniji. Zbornik posveta 43. geodetskega dne. Sežana, str. 37–56.

Prostorska spremenljivost prepuščenih padavin pod krošnjo breze

Katarina Zabret^{*}, Mojca Šraj^{*}

Povzetek

Padavine, ki padejo na vegetacijo (drevesa), se razdelijo na prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu. Razporeditev prepuščenih padavin po prostoru je zaradi predhodnega zadrževanja v drevesni krošnji nehomogena. Prepuščene padavine smo v raziskavi merili pod krošnjo breze, ki je v letu 2016 v povprečju na dogodek prestregla 48% (± 33%) padavin. Za 30 izbranih dogodkov s skupno količino padavin 738,8 mm smo podrobno analizirali prostorsko spremenljivost prepuščenih padavin v 11 točkah. Delež prepuščenih padavin je bil največji v točki, nad katero je bila pokritost s krošnjo najmanjša, velika koncentracija pa je prevladovala tudi na robu krošnje. Pri več kot polovici dogodkov smo v vsaj eni točki izmerili večjo količino prepuščenih padavin kot je bilo padavin na prostem. Prostorska razporeditev prepuščenih padavin pod brezo ni bila odvisna od oddaljenosti od drevesne krošnje temveč od lastnosti krošnje in lastnosti padavinskega dogodka.

Ključne besede: prestrežene padavine; prepuščene padavine; breza; hierarhično razvrščanje

Key words: rainfall interception; throughfall; birch tree; hierarchical clustering

Uvod

Vegetacija je pomemben element v našem okolju, ki jo je potrebno upoštevati tudi pri ovrednotenju hidrološkega kroga. Vegetacija namreč del padavin prestreže in s tem vpliva na količino padavin, ki prispevajo k odtoku. Padavine, ki padejo nad tlemi, pokritimi z vegetacijo, se razdelijo na prestrežene padavine, prepuščene padavine in odtok po deblu. Prestrežene padavine so tiste, ki tal ne dosežejo, ostanejo zadržane na vejah in listju ter izhlapijo nazaj v ozračje. Prepuščene padavine dosežejo tla na različne načine: kot direktno prepuščanje, kapljanje ali kot skladiščene padavine (Dunkerley, 2000; Bassette in sod., 2008). Direktne prepuščene padavine padejo skozi odprtine med vejami in listi ter nimajo neposrednega stika z drevesno krošnjo (Brandt, 1989). Kapljanje opisuje prepuščene padavine, ki so najprej zadržane v krošnji, nato pa zaradi zasičenosti krošnje padejo na tla, skladiščene padavine pa so prav tako zadržane v krošnji, vendar na tla padejo zaradi vpliva zunanjih dejavnikov kot so tresljaji zaradi padavin ali vetra (Levia in sod., 2017). Odtok po deblu pa opisuje tiste padavine, ki po vejah in deblu pritečejo do tal. Na to, kolikšen delež predstavlja katera izmed komponent prestrezanja padavin, vplivajo različne vegetacijske (npr. fenofaze, površina krošnje, debelina lubja, indeks listne površine (LAI), naklon vej) in meteorološke (npr. količina padavin, trajanje dogodka, hitrost in smer vetra, temperatura) spremenljivke (Crockford in Richardson, 2000; Xiao in sod., 2000; Deguchi in sod., 2006; Andre in sod., 2008; Šraj in sod., 2008; Zabret, 2013; Zabret et al., 2015).

Prehajanje padavin skozi drevesno krošnjo zaradi različnih komponent in vplivnih spremenljivk ni homogeno. Tako pride do prostorske spremenljivosti v količini prepuščenih padavin, v njihovi intenziteti, pa tudi v kemijski sestavi (Keim in sod., 2018). Med začasnim zadrževanjem padavin v krošnji, te ne mirujejo, ampak se gibljejo oziroma

^{*} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

tečejo po vejah in listju (Herwitz, 1987). Raziskave prostorske spremenljivosti prepuščenih padavin pogosto poročajo o točkah, v katerih je bila količina prepuščenih padavin pod drevesom večja od količine padavin na prostem (Gomez in sod., 2002; Carlyle-Moses in sod., 2004; Keim in sod., 2005; Šraj in sod., 2008; Yousefi in sod., 2017; Zabret in sod., 2017). Take točke največkrat imenujemo točke kapljanja (ang. *drip points*; Carlyle-Moses in sod., 2004; Šraj in sod., 2008) ali vroče točke (ang. *hot spots*; Yousefi in sod., 2017).

Prostorsko spremenljivost prepuščenih padavin so pogosteje raziskovali v gozdovih (Carlyle-Moses in sod., 2004; He in sod., 2014; Kowalska in sod., 2016; Dohnal in sod., 2017; Yousefi in sod., 2017) kot pod posameznimi drevesi (Gomez in sod., 2002; Nanko in sod., 2011; Fang in sod., 2015). V gozdovih zaradi strnjenosti drevesnih krošenj, ki se med seboj prekrivajo, težje ovrednotimo vpliv njihovih lastnosti na porazdelitev prepuščenih padavin. V predstavljeni raziskavi smo spremljali količino prepuščenih padavin v 11 točkah pod drevesno krošnjo posameznega drevesa. Naš namen je bil, poleg nekaterih osnovnih meteoroloških spremenljivk (količina padavin, trajanje in intenziteta dogodka), ovrednotiti tudi vpliv lastnosti drevesne krošnje na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin in ugotoviti, ali je ta res odvisna od oddaljenosti od debla.

Metode in podatki

Raziskava poteka na eksperimentalni ploskvi v centru Ljubljane, v bližini stavbe Oddelka za okoljsko gradbeništvo UL FGG (46°02'32" severno in 14°29'34" vzhodno, na 292 m nadmorske višine). Gre za približno 600 m² veliko travnato površino, na kateri na zahodni strani najdemo dve skupini dreves: severno rastejo borova drevesa (*Pinus nigra*), južno pa breze (*Betula pendula*).

Prepuščene padavine pod brezo smo merili z dvema koritoma s površino 0,75 m², ki sta postavljeni od debla proti robu krošnje. Prepuščene padavine iz enega korita se stekajo v plastične zbiralnike z volumnom 10 in 50 litrov, ki jih redno ročno praznimo. Drugo korito pa je povezano s prekucnikom (Unidata 6506G) in avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset HOBO Event). V koncentrični mreži pa je pod drevesno krošnjo razporejenih še 11 totalizatorjev (78,5 cm²), ki jih prav tako praznimo ročno.

Totalizatorje smo razporedili pod delom drevesne krošnje, kjer smo lahko zanemarili vpliv bližnje stavbe in ni bilo prisotnega prekrivanja krošenj med sosednjimi drevesi. Po tri merilnike smo postavili v tri linije od drevesnega debla proti robu krošnje v koncentrično mrežo (Slika 1). Med totalizatorji na zunanjem robu, ki so bili med seboj najbolj oddaljeni, smo postavili še po dva dodatna totalizatorja.

Odtok po deblu smo zbirali z gumijasto polcevko, ki je ovita okrog drevesnega debla in nanj pritrjena z žebljički ter zatesnjena s silikonom. Zbrane padavine se stekajo na prekucnik z avtomatskim zapisovalnikom podatkov (Onset RG2-M, Onset HOBO Event). Padavine na prostem smo merili na čistini, ki se nahaja na vzhodnem delu eksperimentalne ploskve. Meritve padavin potekajo z avtomatskim dežemerom Onset RG2-M (0.2 mm/prekuc) z avtomatskim zapisovalcem podatkov (Onset HOBO Event).



Slika 1: Postavitev totalizatorjev pod krošnjo breze

Lastnosti krošnje smo opisali z naslednjimi spremenljivkami: vegetacijsko obdobje, indeks listne površine (ang. Leaf Area Index, LAI) in pokritost površine s krošnjo. Vegetacijska obdobja za brezo smo določili na podlagi opazovanj stanja listja: začetek olistanja, polna olistanost krošnje, začetek rumenenja in odpadanja listja ter krošnja brez listja. Definirali smo jih kot obdobje gole krošnje, obdobje ozelenjevanja, obdobje olistane krošnje in obdobje odpadanja listja. Pri določanju polne olistanosti krošnje smo si pomagali tudi z meritvami LAI. LAI opisuje količino vse listne površine v krošnji in je enak skupni enostranski površini zelenih listov na enoto površine $[m^2/m^2]$ (Zabret, 2013). Meritve smo izvajali s senzorjem LAI-2200C (LI-COR) z 90° zaslonko leče. Meritve pod posameznim drevesom smo izvajali izmenično na prostem in pod krošnjo v štirih ponovitvah. Točke meritev pod krošnjo so bile vnaprej določene in vedno iste, postavljene na višini 1,5 m od tal. Meritve smo izvajali občasno, v povprečju enkrat na mesec, v obdobjih ozelenjevanja in odpadanja listja pa praktično vsak dan. Za posamezne točke pod krošnjo, kjer smo merili prepuščene padavine s totalizatorji, pa smo določili tudi pokritost s krošnjo (delež neba, zakritega z vejami in listjem). Na vrh posameznega totalizatorja smo vzporedno s tlemi in pravokotno na drevesno deblo postavili fotoaparat (Sony DSC-RX100M2) in posneli fotografije z 1,4-kratno povečavo. Fotografije smo v programu ImageJ obrezali na velikost 2200 x 3080 pikslov, jih pretvorili v 1-bitne slike ter določili število belih (nebo) in črnih (krošnja) pikslov. Iz deleža črnih pikslov smo izračunali pokritost s krošnjo nad vsako točko meritev prepuščenih padavin.

Za osnovne statistične analize izmerjenih vrednosti smo uporabili program Excell, analizo prostorske razporeditve prepuščenih padavin pa smo izdelali v programu R (R Core team, 2015). Pri tem smo uporabili funkcijo levelplot v paketu lattice (Sarkar, 2017). Tako pripravljene slike smo z uporabo programa Orange (Demsar in sod., 2013) po Wardovi metodi hierarhično razvrstili v skupine, pri čemer smo upoštevali kosinusno razdaljo, ki je za razvrščanje slik najbolj primerna.

Rezultati

Prepuščene padavine, odtok po deblu in prestrežene padavine

V analizi prostorske porazdelitve prepuščenih padavin pod brezo smo upoštevali podatke, zbrane v letu 2016. Tega leta smo z avtomatskimi merilniki zabeležili 113 padavinskih dogodkov, 72 v obdobju olistane krošnje, 35 v obdobju gole krošnje, 2 v času ozelenjevanja in 4 med odpadanjem listja. Skupno je padlo 1139 mm padavin s povprečno intenziteto 1,8 mm/h (\pm 3,3 mm/h), povprečna dolžina dogodka pa je bila 9,7 ur (\pm 12,3 h).

Pod brezo smo v celem letu namerili 831,6 mm prepuščenih padavin, povprečno na dogodek pa je delež prepuščenih padavin znašal 51% (\pm 32%) in je bil v povprečju višji v obdobju gole (65 \pm 29%) kot v obdobju olistane krošnje (45 \pm 31%). Odtok po deblu je skupno znašal 31,7 mm, povprečno na dogodek pa je predstavljal le 0,9% (\pm 1,9%) padavin na prostem. Delež prestreženih padavin breze se je v letu 2016 gibal med -9% in 100%, v povprečju pa je znašal 48% (\pm 33%).

Prostorsko spremenljivost prepuščenih padavin smo spremljali z merilniki, postavljenimi v koncentrično mrežo. Merilnike smo praznili ročno, če se je le dalo po vsakem dogodku, kar pa ob vikendih, praznikih in ponoči ni bilo mogoče. V tej analizi smo upoštevali le tiste dogodke, za katere smo imeli hkrati na voljo ustrezne ročno pobrane in avtomatsko zabeležene podatke. Poleg tega smo izločili tudi dogodke z manj kot 5 mm padavin. Tako so za analizo prostorske porazdelitve prepuščenih padavin našim pogojem ustrezali podatki za 30 dogodkov (Preglednica 1). Skupno je tekom teh dogodkov padlo 738,8 mm padavin s povprečno intenziteto 2,0 mm/h (\pm 1,43 mm/h) ter v povprečnem trajanju 16,1 ur (\pm 13,7 h). Delež prepuščenih padavin pod brezo je v povprečju znašal 71% (\pm 15%), odtok po deblu pa je bil enak 2,0% (\pm 2,5%). Odtoka po deblu v 9 dogodkih ni bilo, največje vrednosti pa smo opazili v obdobju gole krošnje. V celoti je breza za izbrane dogodke prestregla 22,7% padavin.

		Padavine	Intenziteta	Trajanje	Prepuščene	Odtok po	Prestrežene
	DATUM	[mm]	[mm/h]	[h]	padavine	deblu	padavine
ıja	1112.1.2016	17,4	1,3	13,2	56%	0,0%	44%
	34.2.2016	35,2	2,0	17,4	74%	9,7%	16%
roši	78.2.2016	8,4	0,4	22,9	50%	1,4%	48%
la k	910.2.2016	34,4	2,9	11,8	71%	3,1%	26%
ß	2729.2.2016	22,4	0,5	41,5	85%	0,9%	14%
	29.21.3.2016	16,8	1,1	15,5	92%	0,9%	7%
	810.4.2016	16,6	0,5	35,6	75%	4,0%	21%
	14.4.2016	22,2	2,7	8,3	76%	4,4%	20%
rošnja	2324.5.2016	8,4	0,4	21,6	84%	1,6%	14%
	3031.5.2016	6,4	0,4	14,7	75%	0,1%	25%
ıa k	5.6.2016	5,6	1,3	4,2	68%	0,2%	31%
Olistar	910.6.2016	18,4	1,1	17,5	79%	3,5%	18%
	1112.6.2016	31	2,3	13,5	73%	1,6%	26%
	1415.6.2016	93	4,3	21,5	79%	0,5%	20%
	17.6.2016	8	2,0	3,9	67%	0,0%	33%

Preglednica 1: Lastnosti izbranih 30 dogodkov

	20.6.2016	11,4	1,4	8,0	86%	3,1%	11%
	3.7.2016	36,8	2,8	13,1	86%	0,0%	14%
	1314.7.2016	26,6	7,3	3,7	86%	0,2%	14%
	18.7.2016	14,6	3,3	4,4	54%	0,0%	46%
	56.8.2016	9	1,3	7,1	64%	0,3%	36%
	10.8.2016	28,8	2,1	13,7	69%	1,4%	29%
	17.8.2016	12,6	3,4	3,7	24%	0,0%	76%
	2122.8.2016	12,8	1,2	10,3	36%	0,0%	64%
	29.8.2016	5,6	2,6	2,2	61%	0,0%	39%
	12.9.2016	16,6	3,6	4,6	67%	0,0%	33%
	23.10.2016	25,6	1,7	15,4	73%	4,9%	18%
ija	2526.10.2016	31,6	3,1	10,0	76%	4,9%	19%
la krošr	58.11.2016	84,4	1,3	67,2	78%	5,1%	17%
	1112.11.2016	29,0	1,5	19,6	86%	0,0%	14%
Gol	1820.11.2016	49,2	1,3	38,1	77%	7,0%	16%

Prostorska spremenljivost prepuščenih padavin

Prostorsko razporeditev prepuščenih padavin smo spremljali v 11 točkah pod krošnjo breze (Slika 1). Pri primerjavi točk, v katerih smo izmerili največje in najmanjše deleže prepuščenih padavin, izstopajo predvsem vse tri točke (1, 2 in 3), ki so najbližje deblu drevesa (Slika 2). V primeru 25 dogodkov smo največji delež prepuščenih padavin izmerili v točki 3, po 2 dogodka sta največ prepuščenih padavin prispevala v točkah 4 in 8, 1 dogodek pa v točki 7. Najmanjše deleže prepuščenih padavin pa smo za 19 dogodkov izmerili v točki 1, za 5 dogodkov v točki 2, za 4 dogodke v točki 4, v ostalih dveh primerih pa v točkah 6 in 8.

V posameznih točkah je količina prepuščenih padavin občasno presegla količino padavin, izmerjenih na prostem. V kar 63% vseh dogodkov smo ta pojav opazili v točki 3, v preostalih 11 dogodkih pa tega pojava nismo zasledili. Izmed vseh dogodkov, ko smo pod drevesom izmerili več padavin kot na prostem, je bilo sedem takih, ko smo ta pojav zabeležili v več kot eni točki (petkrat v točki 2 in po enkrat v točkah 4, 5, 8, 10 in 11). Večinoma smo v tem primeru večje vrednosti prepuščenih padavin izmerili v dveh točkah in sicer za dogodke v obdobju gole krošnje. Izstopa pa dogodek 13.-14.7.2016, ki se je zgodil v obdobju olistane krošnje, delež prepuščenih padavin pa je bil večji kot 100% v kar 4 točkah. Ta dogodek je bil izmed vseh analiziranih najintenzivnejši z intenziteto 7,3 mm/h (Preglednica 1).

Delež prepuščenih padavin pod brezo je v povprečju v posameznih točkah znašal več kot 60%, kar se na slikah kaže v oranžnih in rdečih tonih (Slika 2). V obdobju olistane krošnje pa lahko opazimo tudi 4 dogodke v avgustu, v katerih količina prepuščenih padavin v nobeni točki ni presegla 60% (Slika 2).

S pomočjo programa Orange (Demsar in sod., 2013) smo glede na podobnost med vzorci prostorske porazdelitve, ki jih na sliki 2 tvori delež prepuščenih padavin pod brezo, smo dogodke s hierarhičnim razvrščanjem združili v 6 skupin (Preglednica 2). V prvo skupino je bil uvrščen en sam dogodek, 17.8.2016. Izmed vseh ostalih dogodek izstopa zaradi najnižjega deleža prepuščenih padavin, saj v nobeni točki niso presegle 30%, čeprav količina padavin ni bila majhna (12,6 mm), intenziteta padavin pa je bila z 3,4 mm/h celo

med večjimi (Preglednica 1). V drugi skupini so združeni štirje dogodki iz olistanega obdobja krošnje, vsi z manj kot 20 mm padavin, nizke intenzitete in z visokim deležem prepuščenih padavin (> 75%), ki so v primeru dveh dogodkov v točki 3 presegle padavine na prostem. Tudi v tretji skupini so združeni dogodki iz olistanega obdobja krošnje, z najmanjšimi količinami padavin (< 10 mm) in v povprečju z dokaj kratkim trajanjem (8,7 ± 7,1 h), kar se odraža tudi pri nizkih deležih prepuščenih padavin, ki nikoli niso presegle 100%. Obilnejši dogodki z več kot 20 mm padavin iz olistanega obdobja so združeni v četrti skupini. Njihovo trajanje, ki se je gibalo med 4 in 15 urami, je bilo dokaj kratko, zato je bila njihova intenziteta v povprečju med višjimi $(2,5 \pm 0,5 \text{ mm/h})$, delež prepuščenih padavin pa je bil blizu povprečja, skoraj pri vseh dogodkih pa je v točki 3 presegel 100%. Večina dogodkov iz obdobja neolistane krošnje je bila uvrščena v peto skupino, ki glede na količino padavin, trajanje in intenziteto združuje zelo raznolike dogodke, katerih delež prepuščenih padavin pa je bil visok in le v primeru enega dogodka v nobeni točki ni presegel 100%. Šesta skupina pa glede na meteorološke pogoje združuje zelo raznolike dogodke, katerim je skupno to, da so prepuščene padavine količino padavin na prostem presegle v več kot eni točki.

Skupina Št.		Veget.	Padavine	Trajanje	Intenziteta	Prepuščene
	dogodkov	obdobje	[mm]	[h]	[mm/h]	padavine
1	1	Olistano	12,6	3,7	3,4	24%
2	4	Olistano	13,7	20,7	0,8	81%
3	6	Olistano	8,2	8,5	1,5	58%
4	6	Olistano	26,5	11,4	2,5	72%
5	8	Neolistano	32,5	27,3	1,5	79%
6	5	Mešano	40,6	12,0	3,8	74%

Preglednica 2: Povprečne lastnosti dogodkov, združenih v skupine s hierarhičnim razvrščanjem





Slika 2: Prostorska porazdelitev prepuščenih padavin pod brezo za posamezen dogodek

Vpliv lastnosti krošnje

Na prostorsko porazdelitev prepuščenih padavin pod drevesno krošnjo vplivajo tudi njene lastnosti. Za brezo so značilna različna vegetacijska obdobja (olistana krošnja, odpadanje listja, gola krošnja in ozelenjevanje), za katera lahko spremembe v krošnji opišemo z indeksom listne površine (LAI), ki smo ga na raziskovalni ploskvi za brezo merili od 15.3.2016. V obdobju gole krošnje se je vrednost LAI gibala med 0,5 in 0,9 v obdobju polno olistane pa je dosegla vrednost 2,8 (Slika 3).



Slika 3: Spreminjanje vrednosti LAI za brezo v letu 2016

Določili pa smo tudi pokritost tal s krošnjo nad vsako mersko točko, v kateri smo merili prepuščene padavine. Razlike so relativno majhne (do 14%), vendar pa je očitno, da je krošnja najredkejša nad točko 3, najgostejša pa nad točko 11 (Preglednica 3).

Preglednica 3: Pokritost s krošnjo nad točkami merjenja prepuščenih padavin

Točka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Pokritost s krošnjo	76,6%	82,6%	69,9%	79,2%	83,0%	80,4%	73,7%	83,2%	74,8%	73,5%	83,9%

Razprava

Pri analizi prostorske porazdelitve padavin pod drevesno krošnjo breze najbolj izstopata dve točki (1 in 3), in sicer na desnem in levem robu merilne mreže tik ob drevesnem deblu. Na desnem robu mreže je bila postavljena točka 1, v kateri smo v večini primerov (63% dogodkov) izmerili najmanjši delež prepuščenih padavin. Na levem robu pa se je nahajala točka 3, v kateri smo večinoma zabeležili največje deleže prepuščenih padavin (87%

dogodkov), ki so v tej točki v kar 63% vseh dogodkov presegle količino padavin na prostem. Ta rezultat nakazuje, da prostorska spremenljivost prepuščenih padavin ni odvisna od oddaljenosti od drevesnega debla, temveč od drugih spremenljivk, kar so ugotovili tudi drugi raziskovalci (Carlyle-Moses in sod., 2004; Kowalska in sod., 2016).

Ena izmed spremenljivk, ki vpliva na prostorsko porazdelitev, je pokritost z drevesno krošnjo. Najmanjši delež neba je bil namreč pokrit ravno nad totalizatorjem v točki 3 (Preglednica 3), kjer smo zabeležili največji delež prepuščenih padavin. Ne glede na to pa v točki 1, kjer je prevladovala najnižja vrednost prepuščenih padavin, pokritost s krošnjo ni bila največja. Podobne rezultate so dobili tudi Dohnal in sodelavci (2014). Podrobnejša analiza s primerjavo hemisferičnih fotografij krošnje nad totalizatorji je pokazala, da se nad točko 1 nahaja več debelih vej. Llorens in Gallart (2000) sta pokazala, da je specifična kapaciteta zadrževanja vode za veje do šestkrat večja kot za listje. Posledično torej veje zadržijo več padavin kot listje. Podobno so He in sodelavci (2014) ugotovili, da je prostorska spremenljivost prepuščenih padavin odvisna od indeksa vegetacijske površine (ang. *Plant Area Index*, PAI) in ne od LAI. PAI za razliko od LAI namreč poleg listja upošteva tudi veje. Nanko in sodelavci (2011) pa so prostorsko razporejenost prepuščenih padavin pripisali obliki krošnje in razporeditvi vej.

Rezultati hierarhičnega grupiranja (Preglednica 2) kažejo še na dve vplivni spremenljivki: vegetacijsko obdobje in količino padavin. V prvih štirih razredih so večinoma združeni dogodki iz obdobja olistane krošnje, v petem pa dogodki iz obdobja gole krošnje. Pri razvrščanju je bil ta parameter torej upoštevan kot eden izmed vodilnih. V obdobju olistane krošnje so bile pri večini dogodkov največje vrednosti prepuščenih padavin izmerjene na zunanjem robu krošnje, med tem ko so bile najmanjše pri srednji oddaljenosti od debla. Podobno so ugotovili tudi Nanko in sodelavci (2011), in sicer so bile večje vrednosti prepuščenih padavin pod cipreso izmerjene ob deblu, v osrednjem območju so upadle, največje pa so bile na robu krošnje. Tudi v obdobju gole krošnje smo ugotovili, da so največji deleži prepuščenih padavin poleg točke 3 še na robu krošnje, med tem ko so najmanjši deleži prepuščenih padavin v tem obdobju prevladovali na desnem robu merilne mreže (točke 1, 4, 7). Vegetacijsko obdobje je vplivalo tudi na razporeditev prepuščenih padavin v listnatem gozdu na severu Irana, kjer so v obdobju gole krošnje zabeležili več točk z več kot 100% prepuščenih padavin kot v obdobju olistane krošnje (Yousefi in sod., 2017). Povezave med LAI in prostorsko porazdelitvijo prepuščenih padavin pa niso opazili Kowalska in sodelavci (2016) ter He in sodelavci (2014), ki pa so prepuščanje padavin merili v borovem in smrekovem gozdu, kjer vegetacijska obdobja niso tako izrazita.

Posamezni razredi hierarhičnega razvrščanja, ki združujejo dogodke iz obdobja olistane krošnje (skupine 1, 2, 3, 4), pa se med seboj razlikujejo predvsem po količini padavin. V povprečju je najmanj padavin padlo za dogodke v skupini 3 (Preglednica 2), pri katerih prepuščene padavine v nobeni točki niso presegle padavin na prostem, prav tako pa pri majhnih količinah padavin, podobno kot Gomez in sodelavci (2002), nismo opazili izrazitih vzorcev razporeditve prepuščenih padavin (Slika 2). Pri manjši količini padavin drevesna krošnja namreč še ni zasičena, zato so prepuščene padavine sestavljene predvsem iz dežnih kapljic, ki padejo direktno skozi odprtine in ne preko kapljanja z vej in listov (Gomez in sod., 2002; Nanko in sod, 2011). Dogodki z večjimi količinami padavin pa so bili združeni v skupini 4. V tem primeru so bile količine padavin na prostem v točki 3 vedno presežene, porazdelitev padavin pa je pri večini dogodkov sledila enakemu vzorcu; večje deleže prepuščenih padavin smo izmerili na zunanjem robu krošnje. Podoben vzorec lahko opazimo tudi za dogodke s povprečnimi količinami padavin, uvrščene v skupino 2. Proti robu drevesne krošnje se veje namreč tanjšajo, vse več je listja, kar nakazuje tudi večanje LAI od debla proti robu krošnje (Fang in sod., 2015). Zato je tam delež

prepuščanja padavin večji, o čemer so poročali tudi Fang in sodelavci (2015) ter Nanko in sodelavci (2011).

Večinoma so prepuščene padavine presegle padavine na prostem le v eni točki, med tem ko smo za 5 dogodkov ta pojav zabeležili v več točkah. Taki dogodki so bili združeni v skupini 6. Čeprav so količine padavin in intenzitete teh dogodkov dokaj raznolike, sta bila v to skupino uvrščena dogodka z največjo količino padavin in z najvišjo intenziteto (Preglednica 1). Pri teh dogodkih smo večje vrednosti prepuščenih padavin izmerili še v točkah 2, 4, 5, 8, 11 in 12. Vse se nahajajo v osrednji liniji totalizatorjev oziroma na zunanjem robu krošnje (Slika 1), kjer smo večkrat opazili povečano koncentracijo prepuščenih padavin. Tudi pod oljkami v Španiji so Gomez in sodelavci (2002) večkrat namerili deleže prepuščenih padavin večje od 100%, najpogosteje prav v točkah na robu drevesne krošnje, med tem ko je v hrastovem gozdu v Mehiki količina prepuščenih padavin presegla količino padavin na prostem v določenih točkah, t.i. »drip points« (Carlyle-Moses in sod., 2004).

Zaključki

Prepuščene padavine pod drevesno krošnjo niso razporejene homogeno, ampak se njihova količina spreminja od točke do točke. Na posameznih mestih lahko celo presežejo količino padavin na prostem. Razporeditev prepuščenih padavin pa ni odvisna od oddaljenosti od drevesne krošnje, temveč od lastnosti krošnje in lastnosti padavinskega dogodka. Izmed lastnosti krošnje bolj kot indeks listne površine na prostorsko porazdelitev padavin vpliva pokritost s krošnjo in položaj vej v sami krošnji. Pod območjem z gostejšimi in debelejšimi vejami je prepuščanje padavin manjše. Velik vpliv pa ima tudi količina padavin. Pri padavinah, manjših od 10 mm, prepuščene padavine v nobeni točki niso presegle padavin na prostem, v primeru padavin v avgustu, manjših od 13 mm, pa je bila poleg tega porazdelitev padavin še homogena. Največja koncentracija prepuščenih padavin je za dogodke z več kot 10 mm padavin, ne glede na vegetacijsko obdobje, prevladovala na robu krošnje, kar je bilo največkrat ugotovljeno tudi v ostalih podobnih študijah.

Literatura

- Andre, F., Jonard, M., Ponette, Q. (2008). Influence of species and rain event characteristics on stemflow volume in a temperate mixed oak-beech stand, Hydrological Processes 22, 4455–4466.
- Bassette, C., Bussiere, F. (2008). Partitioning of splash and storage during raindrop impacts on banana leaves, Agricultural and Forest Meteorology 148, 991-1004.
- Brandt, C.J. (1989). The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies, Catena 16, 507–524.
- Carlyle-Moses, D.E., Flores Laureano, J.S., Price, A.G. (2004). Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico, Journal of Hydrology 297, 124–135.
- Crockford, R.H., Richardson, D.P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate, Hydrological Processes 14, 2903–2920.
- Demsar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., Milutinovic, M., Mozina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Staric, A., Stajdohar, M., Umek, L., Zagar, L., Zbontar, J., Zitnik, M., Zupan, B. (2013). Orange: Data Mining Toolbox in Python, Journal of Machine Learning Research 14, 2349–2353.

- Deguchi, A., Hattoria, S., Park, H. (2006). The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model, Journal of Hydrology 318, 80–102.
- Dohnal, M., Černý, T., Votrubová, J., Tesař, M. (2011). Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand, Journal of Hydrology and Hydromechanics 62, 277–284.
- Dunkerley D. (2000). Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies, Hydrological Processes 14, 669–678.
- Fang, S., Zhao, C., Jian, S. (2015). Spatial variability of throughfall in a Pinus
- tabulaeformis plantation forest in Loess Plateau, China, Scandinavian Journal of Forest Research, DOI: 10.1080/02827581.2015.1092575.
- Gomez, J.A., Vanderlinden, K., Giraldez, J.V., Fereres, E. (2002). Rainfall concentration under olive trees, Agricultural water management 55, 53-70.
- He, Z., Yang, J., Du, J., Zhao, W., Liu, H., Chang, X. (2014). Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China, Agricultural and Forest Meteorology 188, 58–63.
- Herwitz, S.R. (1987). Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation, Earth Surface Processes and Landforms Volume 12, 425-432.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Weiler, M. (2006). Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity, Advances in Water Resources 29, 974–986.
- Kowalska, A., Boczon, A, Hildebrand, R., Polkowska, Z. (2016). Spatial variability of throughfall in a stand of Scots pine (Pinus sylvestris L.) with deciduous admixture as influenced by canopy cover and stem distance, Journal of Hydrology 538, 231–242.
- Levia, D.F., Hudson, S.A., Llorens, P., Nanko, K. (2017). Throughfall drop size distributions: a review and prospectus for future research, WIREs Water 4, e1225.
- Llorens, P., Gallart, F. (2000). A simplified method for forest water storage capacity measurement. Journal of Hydrology 240, 131-144.
- Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Moriwaki, H. (2011). Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy, Agricultural and Forest Meteorology 151, 1173–1182.
- R Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing 2015, Vienna, Austria. <u>http://www.R-project.org/</u> (4. 10. 2017).
- Sarkar, D. 2017. Package 'lattice'. http://lattice.r-forge.r-project.org/ (25. 10. 2017)
- Šraj, M., Brilly, M., Mikoš, M. (2008). Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia, Agricultural and Forest Meteorology 148, 121–134.
- Xiao, Q., McPherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E., Simpson, J.R. (2000). Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. Hydrological Processes 14, 763-784.
- Yousefi, S., Sadeghi, S.H., Mirzaee, S., van der Ploeg, M., Keesstra, S., Cerdà, A. (2017). Spatiotemporal variation of throughfall in a hyrcanian plain forest stand in Northern Iran. Journal of Hydrology and Hydromechanics 65, DOI: 10.1515/johh-2017-0034.
- Zabret, K. (2013). The influence of tree characteristics on rainfall interception. Acta hydrotechnica 26, 99–116.
- Zabret, K., Šraj, M. (2015). Can Urban Trees Reduce the Impact of Climate Change on Storm Runoff? Urbani izziv 26, 165-178.
- Zabret, K., Rakovec, J., Šraj, M. (2017). Evaluation of drop size distribution impact on rainfall interception by trees. Proceedings 1, 117, 1-10.

Projekt Sinica- nadgradnja sistema za ocenjevanje kakovosti zraka in ugotavljanje vzrokov čezmernih obremenitev v Sloveniji

Boštjan Paradiž^{*}, Jure Cedilnik^{*}, Heda Kočevar^{*}, Irena Malešič^{*}, Janja Turšič^{*}

V Sloveniji se zaradi specifične strukture virov onesnaževanja in neugodnih meteoroloških razmer soočamo s čezmerno onesnaženostjo zraka. Za spremljanje učinkovitosti in posodabljanje ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka je treba nadgraditi poznavanje in razumevanje izpustov onesnaževal, njihovega razširjanja ter posledičnih ravni v ozračju. Zato smo na Agenciji RS za okolje zasnovali in že začeli izvajati projekt Sinica, ki je sofinanciran z evropskimi kohezijskimi sredstvi. Prenovili bomo merilno mrežo kakovosti zraka, omogočili izvajanje intenzivnih merilnih kampanj, razširili nabor meritev onesnaženosti zraka in stanja atmosfere ter nadgradili modelska orodja. Glavne izziva predstavljajo ustrezna kvantifikacija dominantnih izpustov zaradi ogrevanja z lesno biomaso ter obravnava disperzije v pogojih izrazite vertikalne stratifikacije atmosfere. Zato bo poseben poudarek namenjen meritvam parametrov turbulence in vertikalnega profila vetra, temperature ter povratnega sipanja svetlobe na aerosolih za analize epizod onesnaženosti ter za asimilacijo in verifikacijo pri modeliranju kakovosti zraka. Za večjo robustnost in boljšo interpretacijo določanja prispevkov različnih virov k ravnem onesnaženosti bomo hkrati uporabili neodvisni komplementarni tehniki disperzijskega in receptorskega modeliranja.

Ključne besede: ocenjevanje kakovosti zraka, evidence izpustov, disperzijsko modeliranje, receptorsko modeliranje

Key words: air quality assessment, emission inventories, dispersion modelling, receptor modelling

Uvod

Onesnaženost zraka v Sloveniji je zaradi specifičnih okoliščin posebej izražen problem. V precejšnjem delu Slovenije prevladujejo neugodne razmere za disperzijo, kjer lahko že manjši izpusti povzročajo visoke ravni onesnaževal v zraku. Poleg tega onesnaženost zraka stopnjujejo izpusti malih kurilnih naprav zaradi velikega deleža gospodinjstev, ki se ogrevajo z lesom v zastarelih pečeh in kotlih ter intenziven tranzitni in lokalni promet. Zato je Slovenija v evropskem merilu med državami z bolj onesnaženim zrakom (European Environmental Agency, 2017). Ocenjuje se, da je na čezmerno onesnaženih območjih pričakovana življenjska doba zaradi onesnaženega zraka okvirno eno leto krajša.

Za učinkovito ukrepanje za izboljšanje kakovosti zraka ter obveščanje javnosti je potrebno zagotoviti ustrezne podatke o ravneh onesnaženosti zraka ter analizo izpustov in njihovih vplivov na kakovost zraka. Zadnjo večjo posodobitev sistema za spremljanje kakovosti zraka smo na Agenciji RS za okolje (ARSO) izvedeli leta 2002 v okviru projekta Phare. Ta sistem zaradi iztrošenosti merilne opreme le težko in z velikimi stroški vzdrževanja zagotavlja potreben obseg in kvaliteto podatkov. Še več, v Sloveniji ni vzpostavljene zadostne infrastrukture in znanja, da bi lahko ustrezno načrtovali ukrepe za izboljšanje kakovosti zraka in spremljali učinke njihovega izvajanja. V ta namen bo potrebno razviti ustrezna orodja za identifikacijo in kvantifikacijo vzrokov za čezmerno

^{*} Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

onesnaženost zraka ter kvantifikacijo učinkov posameznih ukrepov za izboljšanje stanja. Na ta način bo ob novelaciji načrtov za kakovost zraka mogoče glede na vložena sredstva doseči večje okoljske učinke in hkrati strokovno podpreti procese usklajevanja države, lokalnih skupnosti in drugih deležnikov glede nabora in obsega izvajanja posameznih ukrepov. Zato je nujno potrebna posodobitev obstoječega sistema za spremljanje kakovosti zraka in njegova nadgradnja v enovit sistem spremljanja izpustov, modelske obravnave njihovega vpliva na kakovost zraka, meritev ravni onesnaževal v zraku in drugih orodij za celovito analizo stanja.

Namen projekta

Namen projekta je nadgradnja in razširitev obstoječega sistema tako, da bo omogočeno celovito spremljanje stanja onesnaženosti zraka in priprava strokovnih podlag odločevalcem za načrtovanje in spremljanje izvajanja politik in ukrepov za izboljšanje kakovosti zraka.

Nadgrajen sistem bo:

- omogočal ustrezno poročanje o izpustih na čezmerno onesnaženih območjih, ravneh onesnaženosti zraka v Sloveniji in vzrokih zanjo, ter o že doseženih in predvidenih učinkih ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti zraka Evropski komisiji,
- nudil odločevalcem strokovno osnovo za pripravo, novelacijo in spremljanje načrtov za kakovost zraka,
- prispeval k hitrejšemu in učinkovitejšemu doseganju soglasja med vlado in lokalnimi skupnostmi o naboru in intenziteti izvajanja posameznih ukrepov v okviru načrtov za kakovost zraka,
- prispeval k doseganju okoljskih ciljev z nižjimi sredstvi zaradi ustreznejšega nabora in prioritet izvajanja ukrepov varstva zraka,
- omogočal večje upoštevanje sinergij in obvladovanje nasprotij med politikami varstva kakovosti zraka in blaženja podnebnih sprememb ter na ta način nižjim skupnim stroškom izvajanja obeh politik,
- zagotavljal boljše obveščanje javnosti o onesnaženosti zraka in boljšo kratkoročno napoved ravni onesnaženosti in s tem večje možnosti prebivalstva, da zmanjša svojo izpostavljenost,
- omogočal boljše možnosti za celovito informiranje javnosti o vzrokih za čezmerno onesnaženost zraka in na ta način prispeval k večji osveščenosti prebivalcev o možnostih za zmanjšanje onesnaženosti zraka na nivoju posameznika,
- olajšal dialog in iskanje soglasja s civilno družbo pri perečih problemih varstva zraka,
- omogočal ustreznejšo pripravo in obravnavo strateških okoljskih presoj, presoj vplivov na okolje in okoljevarstvenih dovoljenj,
- pripomogel k raziskavam na področju onesnaženosti zraka in vplivov na ljudi in okolje.

Struktura projekta

Projekt se bo izvajal v okviru štirih vsebinsko zaokroženih sklopov:

- evidence in scenariji izpustov,
- sistem za spremljanje kakovosti zraka in disperzijskih lastnosti atmosfere,

- disperzijsko modeliranje,
- receptorsko modeliranje.

Ena izmed osnovnih značilnosti in hkrati tudi prednosti projekta je integriran pristop k ocenjevanju kakovosti zraka. To bo doseženo z uporabo komplementarnih pristopov in upoštevanjem objektivnih ocen, rezultatov meritev in različnih pristopov k modeliranju pri interpretaciji rezultatov in celoviti oceni stanja.

Evidence in scenariji izpustov

Evidence izpustov omogočajo prvo analizo vzrokov onesnaženosti zraka in so osnovni vhodni podatek disperzijskih modelov. Poleg tega je časovni niz evidenc izpustov nepogrešljiv za ugotavljanje sprememb onesnaževanja posameznih virov in tudi učinka ukrepov za zmanjševanje onesnaževanja zraka. V Sloveniji imamo dobre letne evidence izpustov na nacionalni ravni, velike vrzeli pa so pri evidencah izpustov v zrak z boljšo krajevno in časovno ločljivostjo.

Največji poudarek bo namenjen izpustom malih kurilnih naprav za ogrevanje stavb, ki v Slovenji prispevajo več kot dve tretjini izpustov delcev. Izpuste malih kurilnih naprav se bo modeliralo na osnovi potreb po ogrevanju ob upoštevanju vrste kurilnih naprav in energentov za ogrevanje za posamezno stanovanjsko enoto (Trozzi et al. 2016). Na ta način bomo lahko natančneje opisali prostorsko nehomogenost izpustov, predvsem zaradi različne prostorske porazdelitve kurilnih naprav na lesno biomaso. Poleg tega bodo hkrati pridobili tudi natančnejše ocene o energetski rabi lesa v gospodinjstvih, kar je pomembno, ker kurilne naprave na lesno biomaso prispevajo večino izpustov delcev.

Pri izpustih prometa, ki je v Sloveniji po količini izpustov delcev na drugem mestu bomo izpuste določali individualno za vsak odsek državnih mest ter prometnejše ceste v urbanem okolju. Izpuste, ki se zaradi prometa sproščajo na drugih cestah bomo krajevno razločili na podlagi evidenc na nacionalni ravni in posrednih podatkov, kot je gostota prebivalstva.

Izpuste večjih industrijskih virov bomo določali individualno. Za ostale vire izpustov se bodo razvili postopki, ki bodo izpuste, določene na nivoju države, disagregirali na ustrezno krajevno in časovno resolucijo ob uporabi posrednih podatkov.

Izpusti večine virov bodo podani v prostorski mreži kvadrantov velikosti 100 x 100 m², izpusti prometnejših cest bodo podani kot linijski vir, večje industrijske vire pa bomo obravnavali kot točkovne. Za vse vire bodo pripravljeni tudi časovni poteki.

Orodja za izdelavo evidenc bodo omogočala tudi hitro oceno sprememb izpustov zaradi posameznih ukrepov, kot na primer sprememba vrste energenta ali vrste kurilnih naprav na določenem območju. V evidence izpustov bodo vključeni tudi neposredni izpusti toplogrednih plinov. To bo omogočilo oceno učinkov posameznih ukrepov tako z vidika vplivov na kakovost zraka kakor tudi blaženja podnebnih sprememb.

Scenariji predstavljajo možen časovni potek izpustov onesnaževal zraka ob upoštevanju izbranih predpostavk. Za potrebe projekta in načrtovanja politik in ukrepov zmanjševanje čezmerne onesnaženosti zraka bosta pripravljeni dve vrsti scenarijev in sicer scenarij brez dodatnih ukrepov za zmanjševanje onesnaženosti zraka in scenarij, ciljno usmerjen v zagotavljanje skladnosti s standardi kakovosti zraka, predvsem za delce PM₁₀.

Sistem za spremljanje kakovosti zraka in disperzijskih lastnosti atmosfere

Posodobitve oziroma nadgradnje sistema za meritve kakovosti zraka in disperzijskih lastnosti atmosfere so potrebne tako zaradi zastarelosti obstoječe opreme in razvoja novih merilnikov kot zaradi sprememb profilov izpustov. V okviru nadgradnje sistema bomo:

- posodobili državno merilno mrežo meritev kakovosti zraka na stalnih merilnih mestih,
- vzpostavili indikativne bienalne meritve kakovosti zraka,
- uvedli dopolnilne meritve kakovosti zraka,
- nadgradili meteorološke meritve za obravnavanje onesnaženosti,
- pripravili opremo za merilne kampanje,
- posodobili analitsko-informacijski sistem.

Nadgradnja merilne mreže kakovosti zraka na stalnih merilnih mestih

Meritve na stalnem merilnem mestu dajejo osnovne podatke o kakovosti zraka in so najpomembnejše za ugotavljanje skladnosti s predpisanimi mejnimi in ciljnimi vrednostmi, za obveščanje javnosti in verifikacijo modelov. V Sloveniji v kompleksnem terenu prevladuje lokalna cirkulacija zraka, zato je polje ravni onesnaževal v zraku zelo nehomogeno. Ustrezno zasnovati številčno omejeno mrežo meritev na stalnih merilnih mestih je zato poseben izziv.

Zaradi omejenih virov se število stalnih merilnih mest ne bo bistveno povečalo. Predvidena so 4 nova stalna merilna mesta. V skladu z ravnmi posameznih onesnaževal, ki jih beležimo v Sloveniji in predvidenimi trendi bo večji poudarek bo namenjen meritvam delcev, meritve ogljikovega monoksida se bodo opustile, obseg meritev žveplovega dioksida pa se bo močno zmanjšal. Mikrolokacije obstoječih merilnih mest se bodo preverile glede na njihovo reprezentativnost, pri spremembi mikrolokacij pa se bo zaradi zagotavljanja kontinuitete časovnih nizov uporabil konservativni pristop.

Na stalnih merilnih mestih onesnaženosti zraka se bodo izvajale tudi meteorološke meritve. Predvidene so meritve hitrosti in smeri vetra ter parametrov turbulence atmosfere s tridimenzionalnim ultrazvočnim anemometrom. S prehodom iz klasičnih rotacijskih anemometrov, ki se uporabljajo v obstoječi mreži, na tridimenzionalne ultrazvočne anemometre se bo doseglo bolj zanesljive in točne meritve vetra v obdobjih z nizko hitrostjo vetra, ko je v Sloveniji povečini zrak čezmerno onesnažen. Uporabljeni bodo ultrazvočni anemometri, ki določajo tudi parametre turbulence atmosfere, kar bo olajšalo analizo situacij s čezmerno onesnaženostjo zraka.

Vzpostavitev indikativnih bienalnih meritev kakovosti zraka

Indikativne meritve skladno z zakonodajo dopolnjujejo meritve na stalnih mestih, imajo lahko manjšo časovno pokritost in nudijo predvsem večjo prostorsko gostoto podatkov. Indikativne meritve delcev bodo osredotočene na kurilno sezono in bodo praviloma potekale bienalno. To pomeni, da bo mogoče z enim merilnikom zagotavljati podatke za dve merilni mesti, a le vsako drugo leto. Indikativne meritve delcev se bodo izvajale z referenčnimi gravimetričnimi vzorčevalniki. Te merilnike je zaradi majhnih dimenzij lažje umestiti v prostor, še posebej, ker za svoje delovanje ne potrebujejo namestitev v posebne zabojnike. Hkrati za njihovo delovanje zaradi njihove enostavnosti in zanesljivosti ni potrebno procesiranje parametrov meritev na sami postaji, kar tudi olajša izbiro in ureditev lokacije meritev. Prednost referenčnih vzorčevalnih delcev je tudi, da je mogoče izbrane filtre delcev analizirati v laboratoriju in pridobiti podatke o elementni in kemični sestavi delcev.

Dopolnilne meritve kakovosti zraka

Nekaterih meritev, ki lahko ključno prispevajo k interpretaciji vzrokov za onesnaženost zraka in v vplivih na zdravje, zakonodaja ne zahteva. Njihova vključitev v projekt bo pripomogla k celovitejši obravnavi problematike kakovosti zraka. Načrtovana je uvedba meritev črnega ogljika in nano delcev.

Meritve črnega ogljika povezuje vidik kakovosti zraka in podnebnih sprememb. Poleg tega je črni ogljik pomembna metrika za ugotavljanje vplivov onesnaženega zraka na zdravje. Meritve spektralne odvisnosti optične absorpcije delcev, ki je podlaga za določanje črnega ogljika, pomagajo tudi pri ugotavljanje prispevka posameznih virov k onesnaženosti z delci.

Merilnik nanodelcev omogoča določitev vsebnosti delcev v zraku, ki sodijo v različne razrede velikosti, a so manjši od 100 nm. Meritve nanodelcev zakonsko še niso urejene in področje se še razvija, še zlasti, ker študije kažejo velik vpliv najdrobnejših delcev na zdravje.

Nadgradnja meteoroloških meritev za obravnavanje onesnaženosti

Zaradi orografije in lege Slovenije je onesnaženost zraka močno odvisna od šibke lokalne cirkulacije zraka in lokalno pogojenih temperaturnih obratov. Kvalitativno in kvantitativno poznavanje trodimenzionalne lokalne cirkulacije zraka, vertikalnega profila temperature in ter drugih parametrov stabilnosti in turbulentnosti atmosfere je bistvenega pomena za razumevanje vzrokov in mehanizmov epizod povišanih ravni onesnaževal, objektivnih analiz in modeliranja kakovosti zraka. Brez ustreznih meteoroloških vhodnih podatkov ni mogoče s pričakovano gotovostjo kvantificirati vzrokov onesnaženosti, še manj pa ocenjevati vpliv ukrepov za zmanjševanje izpustov na kakovost zraka. Nujna posodobitev obstoječih meritev se bo izvedla z uvedbo novih merilnih tehnik na stalnih merilnih mestih. Na teh postajah se bodo izvajale meritve s tridimenzionalnimi ultrazvočnimi anemometri in drugo opremo, opisano v podpoglavju o stalnih merilnih mestih onesnaženosti zraka. Te meritve posredujejo točkovne podatke o stanju atmosfere.

Disperzijske procese je težko opisati brez poznavanja vertikalnega profila izbranih meteoroloških veličin. V okviru projekta bosta zato dve posebni postaji za meritve vertikalnega profila vetra in temperature ter določanje višine mešanja. Delovanje obeh postaj bo bistveno pripomoglo k analizi vzrokov onesnaženosti. Pomemben bo tudi prispevek k zanesljivejšim napovedim koncentracij delcev, zato bo zagotovljen prenos podatkov v realnem času.

Za določanje vertikalnega profila vetra bo uporabljen sodar (SOund Detection And Ranging), ki s pomočjo Dopplerjevega premika frekvence sipanega zvočnega impulza določa tridimenzionalni profil vetra do višine nekaj sto metrov. Pri tehniki RASS (Radio Acoustic Soundig System) se z radarjem spremlja hitrost širjenja vertikalnega zvočnega impulza. Ker je hitrost širjenja zvočnega valovanja odvisna predvsem od temperature atmosfere, se na ta način določi vertikalni profil temperature do višine nekaj sto metrov. Izbrana bo konfiguracija merilnikov, kjer bo RASS nadgradnja sodarja. Stalno merilno mesto sodar-RASS bo na območju Ljubljane.

Za določanje višine mešanja se bomo uporabil laserski ceilometer. Ta merilnik meri intenziteto povratnega sipanja na vertikalnem snopu svetlobe. Intenziteta povratnega sipanja je odvisna od koncentracije delcev v zraku. Višina mešanja praviloma ustreza plasti z izrazito spremembo v povratnem sipanju svetlobe. Dodatno bo ceilometer posredoval tudi indikacijo o vertikalnem profilu koncentracije delcev v prizemni pa tudi v višjih plasteh atmosfere.

Merilne kampanje

Z merilnimi kampanjami bomo na izbranem območju v obdobju ene sezone ali še krajši čas povečali gostoto meritev delcev ter črnega ogljika. Poleg tega bodo vse merilne postaje za izvajanje kampanj opremljene tudi s tridimenzionalnim ultrazvočnim anemometrom. Poleg meritev onesnaženosti in točkovnih meritev meteoroloških veličin bomo na lokaciji kampanj zagotovili tudi vertikalne profile stanja atmosfere z sodar /RASS in ceilometrom. Rezultati kampanj bodo pripomogli k boljšemu razumevanju procesov, ki določajo onesnaženost zraka. Izmerjeni meteorološki podatki se bodo uporabili tudi za asimilacijo in verifikacijo lokalnih meteoroloških modelov, rezultati meritev kakovosti zraka pa za verifikacijo celotne modelske verige vključno z evidencami izpustov.

Analitsko- informacijski sistem

Z nadgradnjo merilne opreme in novimi merilniki kot so sodar/RASS in ceilometri se bo razširila struktura in obseg podatkov. Bistvena sprememba glede na obstoječe stanje bo tudi prehod s 30 minutnega na 10 minutno časovno metriko rezultatov meritev. Pripravljen in vzpostavljen bo nov podatkovni model relacijske baze podatkov, ki bo sistemsko vključil tudi rezultate indikativnih meritev in merilnih kampanj. V podatkovnem modelu bodo vključeni tudi metapodatki o meritvah, da bo zagotovljena ustrezna sledljivost lokacij in drugih pogojev izvajanja meritev. Na strukturiran način bodo v podatkovnem modelu opredeljeni surovi rezultati meritev, podatki za sprotne analize in podporo napovedim onesnaženosti zraka, podatki za objavo na spletu v realnem času ter verificirani uradni podatki za izkazovanje skladnosti z mejnimi vrednostmi in njihovo poročanje Evropski okoljski agenciji.

Zasnovana in razvita bodo orodja za obdelavo in prikaz rezultatov meritev in spremljajočih parametrov za:

- podporo kontroli delovanja merilnikov,
- pripravo rezultatov meritev za njihovo objavo na spletu in poročanje Evropski okoljski agenciji v skoraj realnem času,
- podporo končni verifikaciji rezultatov meritev,
- ugotavljanje skladnosti s standardi kakovosti zraka in poročanje Evropski okoljski agenciji,
- pripravo rednih letnih in mesečnih poročil,
- celovite analize situacij s povišanimi ravnmi onesnaževal v zraku za podporo izvajanju načrtov za kakovost zraka in druge potrebe.

Disperzijsko modeliranje

Z disperzijskimi ter disperzijsko-kemičnimi modeli lahko v diagnostičnem načinu uporabe ocenimo prispevek posameznih skupin virov ali območja k onesnaženosti zraka. Ti modeli so nepogrešljivi pri evaluaciji scenarijev izpustov in oceni učinkov posameznih ukrepov. Poleg tega zagotavljajo podatke o prostorski porazdelitvi onesnaženosti zraka in tako dopolnjujejo rezultate omejenega števila meritev na stalnih merilnih mestih. Negotovost rezultatov v veliki meri določa negotovost vhodnih podatkov o izpustih ter

nenatančen opis polja vhodnih meteoroloških parametrov. Zakonodaja predvideva in spodbuja uporabo modelov tudi v regulatorne namene.

Obstoječa raven tehnologije disperzijskega modeliranja v regionalni in urbani skali je nezadostna za resno uporabo v operativnem smislu. Načrtovane investicije v tem sklopu bodo omogočile:

- izboljšanje ocene kakovosti zraka, zlasti na z meritvami slabše pokritih območjih,
- boljšo oceno reprezentativnosti obstoječih merilnih mest kakovosti zraka in ustreznejšo izbiro lokacij za nova merilna mesta,
- analizo situacij s povišanimi ravnmi onesnaževal, kar bo omogočalo lažje prepoznavanje vzrokov za onesnaženost zraka in kvantifikacijo vpliva lokalnih in regionalnih virov na onesnaženost zraka na izbranih območjih,
- analizo učinkov posameznih ukrepov in scenarijev zmanjšanja izpustov za izboljšanje kakovosti zraka in zanesljivejše napovedovanje možnosti za preseganje onesnaženosti za nekaj dni vnaprej.

Regionalna skala – fotokemijski disperzijski model

Na regionalni skali (v ločljivosti okoli nekaj kilometrov) bomo na ARSO nadaljevali implementacijo in razvoj modela (CAMx), sklopljenega z operativnim meteorološkim modelom (Žabkar et al, 2012). Fotokemijski disperzijski model CAMx bo s svojo ločljivostjo sledil nadgradnjam meteorološke modelske verige. Ciljna ločljivost obeh modelskih verig je 2 km, in sicer za celotno območje Slovenije s širšo okolico.

Poleg izboljšav na strani modelskih orodij bo velik napredek na področju modeliranja omogočila izboljšana evidenca izpustov. Ena glavnih negotovosti rezultatov modela je namreč posledica pomanjkljive kvantifikacije izpustov. Poleg transporta onesnaženja z vetrovi je za slabo kakovost zraka največji razlog v lokalnih izpustih predvsem zaradi malih kurišč. Ambiciozno zastavljen cilj na področju evidence izpustov je dober obet za precejšnjo izboljšavo rezultatov pri modeliranju kakovosti zraka.

Pomembno izboljšanje je povezano z vhodnimi meteorološkimi podatki. Sklopitev med modelom onesnaženja in meteorološkim modelom je zelo tesna in meteorološki pogoji so ključni za pojav velike onesnaženosti zraka v slovenskem prostoru. Kakovost meteoroloških numeričnih napovedi se ves čas postopno izboljšuje, zato se pričakuje, da se bo ta trend jasno pokazal tudi v simulacijah atmosferske kemije. Poleg tega se bo v času trajanja projekta nadgradilo tudi meteorološko operativno verigo (predvidoma na ločljivost 2 km), za pripravo začetnih pogojev pa se bo uporabljalo še več meritev, tudi tistih iz drugih sklopov projekta Sinica. Pri slednjih gre predvsem za meritve vetra in vertikalne stratifikacije ozračja.

Vse nove meritve, bodisi meteorološke bodisi meritve kakovosti zraka, bodo pomembno služile kot orodje za fizikalno validacijo in sistematično verifikacijo modela. Na ta način bo lahko zagotovljeno stalno spremljanje kakovosti modela.

Urbana skala - modeliranje vetra, stabilnosti atmosfere in disperzije

Največ dela v sklopu disperzijskega modeliranja bo v urbani skali. Načrtuje se simuliranje in napovedovanje meteoroloških razmer in disperzije onesnaževal z ločljivostjo okoli 100 m za nekaj izbranih območij po Sloveniji. Trenutno na ARSO ni orodja, s katerim bi lahko zadovoljivo dobro operativno simulirali vetrovno polje, še manj pa celotno meteorološko dogajanje v skali okoli 100 metrov. Poseben izziv na področju simulacije vetra in turbulence predstavljajo specifične nacionalne okoliščine s prevladujočimi nizkimi hitrostmi vetra, izrazitimi lokalnimi vplivi vključno z mestnim

toplotnim otokom na cirkulacijo zraka in poudarjeno vertikalno stratifikacijo nižjih plasti atmosfere.

V prvem delu tega sklopa bo potrebno identificirati orodja in raziskati možnosti, s katerimi se bo doseglo končni cilj. Raziskati bo treba delovanje, težavnost implementacije in računsko zahtevnost ter uporabnost različnih družin meteoroloških modelov:

- tistih, ki temeljijo na masni konsistenci (INCA, CalMET, ALADIN v načinu dinamične adaptacije, GRAM/GRAL...),
- obstoječe meteorološke modele (ALADIN/AROME, MesoNH...) v ustrezno visoki ločljivosti (Termonia et al, 2017),
- pregledati možnosti na področju LES in CFD (Code Saturne, PALM, ARPS, WRF, openFOAM) modelov.

Na podlagi zgornjih ocen in tehničnih zmožnosti se bo izbralo in na ARSO računski infrastrukturi implementiralo model za napovedovanje in predvsem simuliranje meteoroloških polj v ločljivosti okoli 100 m za več omejenih območij. Vhodni podatki za ta model bodo vetrovna polja iz meteorološke verige modelov, v primeru simulacij za pretekle dogodke pa se bo za asimilacijo uporabilo tudi talne meritve vetra ter vertikalnih profilov atmosfere. (npr. sodar/RASS in ultrazvočni anemometri).

Vzporedno z zgornjo aktivnostjo bo za potrebe disperzije onesnaževal v urbani skali implementiran tudi model disperzije v urbani skali. Projektna ekipa bo morala preizkusiti različne pristope, njihovo ustreznost v specifičnih razmerah Slovenije in se na podlagi natančne analize odločila za eno rešitev ter jo tudi implementirala.

Posodobitev računskega centra

Nadgrajen fotokemijski disperzijski model s podvojeno ločljivostjo bo približno 16-krat računsko zahtevnejši od sedanjih računskih operacij, zato je nujna s tem povezana nadgradnja računskih zmogljivosti superračunalnika.

Predvidena je nadgradnja superračunalnika ARSO z novimi računskimi vozlišči (približno 30 računskih vozlišč). Ob tem je bilo upoštevano zgolj povečanje računskih zmogljivosti na področju fotokemijskega disperzijskega modeliranja kemije ozračja. Za celotno sliko novih potreb pa bi bilo treba upoštevati celotno verigo modeliranja disperzije v urbani skali (kar v času pisanja tega dokumenta ni bilo mogoče, ker še ni bil dokončno izbran pristop k modeliranju v urbani skali). Prav tako bo postala velika težava shranjevanje velike količine podatkov, povezanih z modeliranjem kakovosti zraka po nadgradnji modelskih orodij. Za ta namen se bo kupilo veliko podatkovno skladišče, ki bo poleg ustrezne kapacitete nudilo tudi primerno logiko za ravnanje s podatki. Starejši, manjkrat zahtevani podatki, se bodo kopirali na počasnejše medije, bolj pomembni podatki pa bodo ostajali na hitro dostopnem delu podatkovnega skladišča in po potrebi se bo avtomatsko izdelovala tudi njihova varnostna kopija.

Receptorsko modeliranje

Pri receptorskem modeliranju lahko na podlagi rezultatov kemične in elementne analize delcev na mestu meritev- receptorju določimo prispevek virov k ravnem onesnaževal (Belis et al, 2014). Prednost je, da ne potrebujemo natančnih evidenc izpustov in vhodnih meteoroloških podatkov ter majhna računska zahtevnost, zahtevajo pa obsežne kemijske analize. Pomanjkljivost receptorskih modelov v primerjavi z disperzijskimi je predvsem, da jih ne moremo uporabljati v prognostičnem načinu, hkrati pa dobimo informacijo o

prispevkih virov le v točki receptorja. V okviru projekta bomo nadgradili obstoječe in uvedli nove modele, pridobili profile lokalnih virov izpustov ter posodobili kemijski laboratorij.

Nadgradnja obstoječih in uvajanje novih modelov

Na ARSO se za določitev prispevkov virov k ravnem delcev že uporablja model PMF (Positive Matrix Factorisation), ki ga je razvila Agencija za okolje Združenih držav Amerike (US-EPA). V dosedanjem delu smo prispevek posameznih skupin virov določevali le v letnem povprečju. V okviru nadgradnje modela se bomo osredotočilo na obdobja, ko prihaja do preseganj dnevne mejne vrednosti. Poleg tega pa se bo za zanesljivejšo oceno prispevka virov k onesnaženosti zraka v operativno uporabo uvedlo tudi model CMB (Chemical Mass Balance), ki so ga tudi razvili na US EPA. Preskušen bo tudi pristop vključitve meteoroloških parametrov v receptorsko modeliranje za določanje virov onesnaževanja.

Pridobitev profilov lokalnih virov izpustov

V okviru projekta se načrtuje tudi določitev profilov značilnih virov izpustov. Ti podatki so sicer dostopni v različni literaturi, vendar pa je potrebno preveriti, ali so ti podatki reprezentativni za razmere v Sloveniji. Glede na perečo problematiko emisij zaradi kurjenja z lesno biomaso v dotrajanih kuriščih se bo projektna skupina osredotočila na pridobitev karakterističnih profilov na dimnikih manjših objektov. Z vzorčenjem prahu ob cestiščih in na drugih lokacijah, kjer prihaja do prašenja (npr. zaradi obdelovanja kmetijskih površin), pa se bo pridobilo informacijo o vplivu resuspenzije na nivoje delcev v posameznem okolju. Reprezentativni profili virov so kot vhodni podatek potrebni za uporabo modela CMB. Poleg tega reprezentativni profili virov olajšajo tudi interpretacijo rezultatov modela PMF.

Posodobitev kemijsko analitskega laboratorija

Za receptorsko modeliranje je potrebno poznati sestavo atmosferskih aerosolov na lokacijah, kjer se želi pridobiti informacijo o prispevku posameznih virov k onesnaženosti zraka. Potrebne so kemijske analize, ki obsegajo meritve elementov v sledovih, vsebnosti ionov, zvrsti ogljika, ter različnih organskih indikatorjev v delcih. Za statistične modele receptorskega modeliranja kot je na primer model PMF, je za vsako receptorsko mesto potrebno zagotoviti podatke o elementni in kemijski sestavi vsaj 100 vzorcev. V okviru projekta Sinica se bo pridobilo predvsem opremo, ki bo omogočala analizo večjega števila vzorcev.

Zaključek

V okviru projekta Sinica bomo naslovili ključne vidike kakovosti zraka v Sloveniji in s premostitvijo vrzeli v poznavanju in kvantifikaciji procesov, ki bistveno določajo onesnaženost zraka, podprli pripravo učinkovitih ukrepov za izboljšanje stanja. Projekt je zasnovan tako, da upošteva specifične nacionalne razmere. V zasnovi projekta smo posebno pozornost namenili usklajenosti in povezanosti posameznih sklopov, kar je pri tako širokem projektu predstavljalo poseben izziv. Izkoriščanje sinergij med sklopi projekta in komplementarni pristopi k analizi stanja bodo bistveno pripomogli k zanesljivosti rezultatov in prispevali k učinkovitejši izrabi virov projekta. Tak pristop nam je omogočil širok spekter kompetenc, ki smo jih na ARSO razvili na področju okolja in meteorologije.

Projekt Sinica sofinancirata Republika Slovenija (15 %) in Evropska unija iz Kohezijskega sklada (v višini 85 % upravičenih stroškov projekta). Projekt se izvaja v okviru Operativnega programa za izvajanje evropske kohezijske politike v obdobju 2014-2020, prednostne osi »Boljše stanje okolja in biotske raznovrstnosti«, prednostne naložbe »Ukrepi za izboljšanje urbanega okolja, oživitev mest, sanacijo in dekontaminacijo degradiranih zemljišč (vključno z območji, na katerih poteka preobrazba), zmanjšanje onesnaženosti zraka in spodbujanje ukrepov za zmanjšanje hrupa« in prispeva k doseganju specifičnega cilja »Boljše spremljanje kakovosti zraka za boljšo podporo pri pripravi načrtov na tem področju«.

Literatura

- Belis C.A., Larsen B.R., Amato F., El Haddad I., Favez O., Harrison R.M., Hopke P.K., Nava S., Paatero P., Prévôt A., Quass U., Vecchi R., Viana M. (2014). European Guide on Air Pollution Source Apportionment with Receptor Models, European Commission, Joint Research Centre, doi:10.2788/9307
- European Environmental Agency. (2017). Air quality in Europe 2017 report, doi:10.2800/358908
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derkova, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Spaniel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., and Joly, A. (2017) The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, Geosci. Model Dev. Discuss., https://doi.org/10.5194/gmd-2017-103, in review
- Trozzi C., Nielsen O-K., Plejdru M.S., Nielsen M., Kubica K., Paradiz B., Dilara P., Klimont Z., Kakareka S., Debsk B., Woodfield M., Stewart R., Whiting R., Visschedijk A., Kuenen J. (2016). Smal Combustion v EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2016, European Environmental Agency
- Žabkar R., Rus M., Rakovec J., Štrajhar M. (2012): Prvi rezultati vrednotenja modelskega sistema ALADIN-CAMx za napovedovanje ozona in delcev v ozračju, Vetrnica (glasilo slovenskega meteorološkega društva), št. 04/12, str. 30-35

Prostorski razpored in časovni potek temperatur v Potočki zijalki na Olševi - osnova za razumevanje morfologije jamskih tal

Andrej Mihevc^{1*}

Povzetek

Potočka zijalka je morfološko enostavna, 120 m dolga jama, ki se od vhoda do konca vzpne za 20 m. Njen vhod (46°26'57.38"S,14°40'8.29"V) je v južnem pobočju Olševe, na nadmorski višini 1662 m. Je pomembna arheološka jama, znana je tudi kot paleontološko nahajališče kvartarnih sesalcev. Manj znani so jamski pliocenski ali spodnje pleistocenski sedimenti, ki so pomešani v mlajše arheološke plasti.

V jami smo v letu 2017 na štirih mestih merili temperaturo zraka. Meritve so pokazale prostorsko razporeditev in letni potek temperatur na osnovi katerih lahko jamo razdelimo na dva dela. V vhodnem, spodnjem delu jame lahko zrak kroži celo leto, zato so tu velika temperaturna nihanja, ki sledijo poteku zunanjih teperatur. V notranjem, zgornjem delu jame prihaja do kroženje in izmenjave zraka le v topli polovici leta. V hladni polovici leta se ta cirkulacija prekine. Temperaturo zraka v njem tedaj določa temperatura okoliške kamnine, zato temperatura zraka nikoli ne pade pod ledišče.

Taka razporeditev temperatur je omogočila v notranjem delu hibernacijo jamskim medvedom, v vhodnih delih pa povzroča krioturbacijske procese. Ti procesi delujejo tudi v današnji klimi. Z njihovo prostorsko razporeditvijo lahko razložimo oblikovanje jamskih tal: enakomerne naklone v vzdolžnem in prečnem profilu pa tudi nastanek in oblikovanje arheoloških plasti.

Ključne besede: jama, temperatura, klima, morfologija tal, sedimenti, krioturbacija **Key words:** cave, temperature, climate, ground morphology, sediments, cryoturbation

Uvod

Ob arheoloških izkopavanjih med leti 1928-1935 je Srečko Brodar opazoval tudi klimatske poteze jame. Temperaturo je poleti meril s termografom, nekajkrat pa je obiskal in izmeril temperaturo v jami tudi pozimi. Opazil je, da hladni zrak v jami sega le do določene višine, nad njo tudi pozimi temperatura ni padla pod ledišče. Vhodni del jame je bil hladen, v njem so rasli ledeni kapniki, gruščnata tla pa so zmrzovala več metrov globoko in so bila zamrzla še v avgustu (Brodar, 1931).

Med izkopavanji je našel v jami med ostrorobim avtohtonim gruščem s paleolitskimi najdbami prodnike iz miocenskih apnencev, miocenske morske polže in drobce metamorfnih kamnin. Ker je predpostavljal, da jame ni oblikovala podzemna reka, oziroma, da je »tipična tektonska jama« (Brodar & Brodar 1983, str. 94), je sklepal, da so jih v jamo prinesli aurignacienski lovci. Mioč (1997) jih je pripisal občasnim tokovom s površja, zato naj bi jama takrat ležala v nižji nadmorski višini. Do tektonskega dviga Olševe in jame v sedanjo višino pa naj bi prišlo šele po odložitvi prodov in arheoloških plasti. Kasneje so arheologi njihov izvor tolmačili s spiranjem na površju nad jamo odloženih miocenskih sedimentov (Kralj &Pohar 2001). Skozi špranje v stropu ali skozi jamski vhod naj bi se pomešali v arheološke plasti pred okrog 30.000 leti (Rabeder &Pohar 2004).

^{*}Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230, Postojna, Slovenija



Slika 1: Lega Potočke zijalke v južnem pobočju Olševe.

Izvor eksotičnih sedimentov je po analogiji s Snežno jamo na Raduhi pripisal jamski reki ponikalnici, ki je jamo oblikovala, potem pa v njej odložila alogene sedimente. V analiziranem profilu v Snežni jami je sedimentacija potekala od okrog 5Ma do okrog 2 Ma (Zupan et al. 2008, Mihevc et al. 2013, Hauselmann et al. 2015). Prenehanje sedimentacije ima vzrok v tektonskemu dvigovanju, ki je povzročilo vrezovanje Savinje in njenih pritokov. Potočka zijalka je zadnji ostanek nekdaj velike jame, ki je nastala podobno kot Snežna jama. Ko so jo dosegli pobočni procesi v doline Savinje in se je odprl sedanji vhod, je v jamo začela prodirati tudi zimska zmrzal. Ta je ustvarila pogoje za krioklastične in krioturbatne procese. Zato se je začel stari sediment mešati s stropa odpadlim kamenjem in polzeti po jami pa tudi ven iz jame. Zlasti hitre odjuge in močne padavine so povzročale polzenje površinske plasti sedimenta po še zamrzlih tleh, pri čemer so nastale nove plasti. To se je dogajalo v času aurignacienskih lovcev, dogaja pa se še danes (Mihevc 2001).



Slika 2: Tloris in shematični prerez Potočke zijalke. Označena so mesta kjer so bili nameščeni termoregistratorji. Na prerezu je narisana le najvišja višina stropa, različne višine tal pa predstavljajo debelejše in tanjše oziroma prekinjene črte

Ker so najdbe starih jamskih sedimentov, s katerimi lahko datiramo ali rekonstruiramo razvoj reliefa v čas pred nastankom sedanjega reliefa v alpskih jamah redka, je nahajališče starega proda v Potočki jami zelo pomembno. Da bi ugotovili prostorsko razporeditev pogojev, ki omogočajo polzenje ali drugačno premikanje sedimentov v jami smo merili letno nihanje temperature zraka.

Meritve

V jami smo s pomočjo termoregistratorjev (uporabili smo termoregistratorje iButton, DS1922L, z ločljivostjo 0,1 °C in natančnostjo $\pm 0,5$ °C) merili temperature med 2. decembrom 2016 in 29. septembrom 2017. V jami smo namestili štiri registratorje in merili temperature v dvournih intervalih (glej sl. 2). En registrator smo namestili zunaj, vendar tako, da nanj gibanje zraka iz jame ni moglo vplivati. Zračne vlage in gibanja zraka v jami

nismo merili, nanje lahko sklepamo iz poteka in razporeditve temperatur v različnih delih jame.

Rezultati in interpretacija meritev

Čeprav meritve niso potekale celo leto, manjkata meseca oktober in november, so izmerjene vrednosti dovolj značilne, da pokažejo temperaturne razmere v jami in njihovo odvisnost od zunanjih temperatur.

Termometer, ki smo ga pritrdili na smreko, 2 m nad tlemi, je zabeleži najvišjo temperaturo, $26,3^{\circ}$ C v začetku avgusta, najnižjo pa v prvi polovici januarja, -18° C (glej tab. 1). Povprečna vrednost vseh izmerjenih temperatur je bila $5,9^{\circ}$ C.

Temperaturo zraka v jamah določa temperatura okoliške kamnine in prenašanje toplote s površja s tekočo vodo ali zrakom. Ker v Potočki zijalki ni večjih dotokov kapljajoče vode določa letni potek temperatur predvsem kroženje zraka, ki ga določa oblika jame.

V topli polovici leta je zrak v Potočki zijalki hladnejši in gostejši, oziroma težji kot zunanji zrak. Zato se pri tleh giblje navzdol in nato ven iz jame, kar povzroči, da pod stropom vhoda priteka v jamo zunanji, toplejši zrak. Ta zrak ogreva strop in stene, pri tem se ohladi in pri tleh izteka iz jame. Poletna kroženje zraka tako zajame celo jamo.

Tabela 1: Temperature izmerjene pred in v Potočki zijalki med 2.12.2016 in 29. 9. 2017. Višine termometrov v jami so merjene od srednje višine tal vhoda, ki je v nadmorski višini

1662 m.

Merilno	Višina	Oddaljenost od	Temperatura (° C)			
mesto		vhoda	minimalna	maksimalna	povprečna	
Zunaj	1665 m	20 m	-18,1	26,3	5,9	
T 1	2	20	-9,5	12,4	3,6	
T 2	8	78	-3,7	12,4	5,1	
T 3	12	80	1,4	16	7,1	
T 4	20	110	6,4	15,6	8,9	

Pozimi je jamski zrak toplejši kot zunanji, saj se ogreva od stropa in sten jame. Toplejši in zato lažji zrak stagnira v notranjem, zgornjem delu jame. Mejo med notranjim in vhodnim delom jame približno določa odprtina jamskega vhoda, ki je približno 7 m visoka. Kroži lahko zrak, ki leži pod to višino. Jama se tako razdeli na dva klimatsko ločena dela, notranjega v katerem zrak stagnira in odraža temperaturo okoliške kamnine in na zunanjega, v katerem zrak kroži in se izmenjuje z zunanjim. Zato se v njem pozimi temperature približajo zunanjim temperaturam zraka.

Takšno gibanje zraka dobro potrjuje potek na štirih mestih v jami izmerjenih temperatur. Termometer T1 smo namestili v spodnjem delu jame 20 m od vhoda v višini 2 m nad višino tal pri vhodu. Povprečna temperatura merilnega obdobja je bila 2,2° C, temperatura pa je nihala v razponu med -9,5° C v januarju in 12,4° C v avgustu (glej tab1). Temperaturna krivulja ima pozimi in spomladi podoben potek kot krivulja zunanjih temperatur, vendar so dnevna nihanja močno dušena, kar kaže vpliv jame (glej sl. 3). Zunaj so nihale temperature med -18° C in 15° C, pri T1 pa med -9° C in 3° C. Po zadnji močni ohladitvi v aprilu se je temperatura zraka počasi dvigovala, vendar do srede maja ni presegla 4° C. Temperatura je nato počasi naraščala ter julija dosegla 12° C. Po prvih septembrskih ohladitvah pa so se v jami spet močneje izražali vplivi zunanje temperature.

Termometra T2 in T3 smo namestili okrog 80 m od jamskega vhoda v višini 8 in 12 m, ob vznožju in na vrhu velike skale. To mesto smo izbrali, ker v tej višini poteka klimatska meja med spodnjim in zgornjim delom jame, ki jo je zaznal že Brodar (1931).

Na spodnjem termometru je (T2) bila najnižja zabeležena temperatura -3,7 ° C v januarju, najvišja 12,4° C, pa konec julija (glej sl. 3). Povprečna temperatura je bila 5,1° C. Potek temperatur preko leta je zelo podoben poteku pri T1, le temperature so bile za okrog 4° C višje, manjše pa so bile amplitude v hladni polovici leta, med -3,7° C in 4° C. Od sredine maja do konca septembra pa sta poteka temperatur skoraj enaka.



Slika 3: Potek temperatur v Potočki zijalki med 2. dec. 2016 in 29. sept. 2017.

Termometer T3 je bila nameščen na vrhu velike skale, 4 m nad T2 oziroma 12 m nad vhodom. Najnižja temperatura je bila 1,4° C sredi aprila , najvišjo pa 16° C v začetku avgusta (glej sl. 3). Povprečna letna temperatura zraka je bila 7,1° C, kar je več kot povprečna temperatura zraka izmerjena pred jamo.

Od začetka decembra do srede maja je temperatura nihala med 2° C in 6° C. Krivulja kaže krajša in tudi daljša nihanja, ki pa ne odražajo vedno sprememb zunanje temperature. Od sredine maja je krivulja skoraj identična s potekom temperatur na T4 a z močneje izraženimi dnevnimi nihanji. Dnevna nihanja prekine prva močna ohladite, vzpostavi se zimska cirkulacija ali celo mirovanje zraka.

Termometer T4 je bil nameščen na najvišjem delu jamskih tal, v višini 20 m in 110 m od vhoda, na skalah, ki jih pokriva jamsko mleko. Najnižjo temperaturo, 6,4° C, je zabeležil konec marca, najvišjo 15,6° C pa konec julija (glej sl. 3). Povprečna letna temperatura pa je bila 8,9° C.

Temperatura zraka se je tu od začetka decembra, ko je bila okrog 9° C, zniževala do okrog 6,5° C sredi maja. V tem delu je potek temperatur brez dnevnih nihanj, kar nakazuje ogrevanje zraka od stropa in njegovo počasno ohlajanje. To omogoča stagnacijo oziroma le počasno gibanje zraka. Nato se v krivulji začnejo odražati krajši nato pa vedno daljši in močnejši vdori zunanjega, toplejšega zraka, ki pa se seveda v jami že precej ohladi. Temperaturni potek kaže izrazita dnevna, pa tudi daljša temperaturna nihanja, ki odražajo spremembe vremena. V začetku septembra, po prvi močni ohladitvi se nihanje temperature

oziroma zračna cirkulacija, ki to nihanje povzroča prekine, temperature zraka nato odražajo temperaturo okoliške kamnine.

Zaključki

Meritve so potrdile dve izraziti temperaturni sezoni v jami, pa tudi dva klimatsko različna dela jame. Topla sezona se prične sredi maja, konča pa s prvo močno jesensko ohladitvijo, ki ji sledi tudi splošno znižanjem zunanjih temperatur. V tem času jamski, relativno hladnejši zrak teče pri tleh iz jame, pod stropom pa v jamo priteka topel zunanji zrak.

V hladnem delu leta se kroženje zraka v jami spremeni. Še naprej kroži zrak v delu jame, ki leži pod višino zgornjega roba jamskega vhoda. V zgornjem delu jame, nad višino stropa pri vhodu, kroženje preneha, temperatura zraka pa se uravna na temperaturo okoliške kamnine.

Tak potek in razporeditev temperatur določa oblika jame, predvsem oblika in velikost vhoda. Ker se oblika vhoda ne spreminja hitro, lahko sklepamo, da so bili podobni temperaturni pogoji v jami tudi v času zadnje poledenitve oziroma v času nastanka arheoloških paleolitskih plasti.

Potek temperatur v jami ima tudi morfološki učinek na jamska tla. Del tal, ki sezonsko zamrzuje ima manjši naklon, tla visijo zvezno ven iz jame, manjši kamni in drobir pa kaže sortiranost oziroma poligonalna tla, to pa pomeni premikanje sedimenta. Le večje skale, ki so padle s stropa ležijo pod mesti odloma. Nad njimi leži del jame, kjer tla nikoli ne zamrznejo. Tu so jamska tla bolj strma in zvegana, kar kaže na počasnejše premikanje sedimentov oziroma oblikovanje tal z odpadanjem skal s stropa in gravitacijskimi procesi.

Literatura

- Brodar S., 1931. Temperature v Potočki zijalki na Olševi. Geografski vestnik, 7, 109-114, Ljubljana.
- Brodar S., & Brodar M., 1983. Potočka zijalka visokogorska postaja aurignacienskih lovcev (Potočka zijalka eine hochalpine Aurignacjäger-Station). Dela 1. in 4. razr. SAZU, 24.1-213, Ljubljana.
- Häuselmann P., Mihevc A., Pruner P., Horaček I., Čermak S., Hercman H., Sahy D., Fiebig M., Zupan Hajna N., Bosak P. 2015: Snežna jama (Slovenia) : interdisciplinary dating of cave sediments and implication for landscape evolution. Geomorphology, vol. 247, pp. 10-24.
- Kralj P. & Pohar V., 2001. Klastični sediment v Potočki zijalki (Clastic Deposits in the Potočka zijalka cave). Razpr. 4. razr. SAZU, 42(1):25–36, Ljubljana.
- Mihevc A., 2001. Jamski fluvialni sedimenti v Snežni jami na Raduhi in v Potočki zijalki. Geol. zbor. (Povzetki referatov), 16:60–63, Ljubljana.
- Mihevc, A., Horáček, I., Pruner, P., Zupan Hajna, N., Čermák, S., Wagner, J., Bosak, P., 2013.
 Miocene–Pliocene age of Cave Snežna jama na Raduhi, Southern Alps, Slovenia. V: Filippi, M., Bosák, P. (Ur.), Proceedings of the 16th International Congress of Speleology. vol. 3. Czech Speleological Society, Praha, pp. 379–383.
- Mioč P., 1997. Tectonic Structures Along the Periadriatic Lineament in Slovenia. Geologia Croatica, 50/2, 251-260, Zagreb.
- Rabeder G. & Pohar V., 2004. Stratigraphy and Chronology of the Cave Sediments from Potočka zijalka (Slovenia). Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss., 13:235–246, Wien.
- Zupan Hajna N., Mihevc A., Pruner P., Bosák P. 2008. Palaeomagnetism and magnetostratigraphy of Karst sediments in Slovenia, (Carsologica, 8). Založba ZRC, Ljubljana.

Vpliv števila točk aerolaserskega skeniranja na izračun koordinat vrha stožčaste tarče

Tilen Urbančič^{*}, Božo Koler^{*}, Bojan Stopar^{*}, Mojca Kosmatin Fras^{*}

Povzetek

V prispevku predstavljamo rezultate analize določitve minimalnega števila točk laserskega skeniranja na plašču stožčaste tarče, ki so potrebne za dovolj natančno določitev vrha tarče. Uporabimo oblake točk na stožcu, ki so pridobljeni z aerolaserskim skeniranjem z višinami leta 100, 200 in 400 m. Minimalno potrebno število točk na plašču stožca za vsako obravnavano snemalno višino določimo iz rezultatov 50-krat ponovljene določitve parametrov stožca z naključnim izborom točk po metodi najmanjših kvadratov. Kot prave vrednosti parametrov stožca privzamemo vrednosti, določene z vsemi točkami na stožcu. Rezultat predstavljajo povprečne vrednosti odstopanj parametrov stožca iz 50-kratnih ponovitev določitve parametrov stožca od prave vrednosti. Ponovljivost rezultatov ocenimo z izračunom standardnih odklonov odstopanj povprečnih vrednosti.

Ključne besede: stožec, umetna tarča, aerolasersko skeniranje **Key words:** cone, artificial target, airborne laser scanning

Uvod

Sodobno pridobivanje prostorskih podatkov se od svojih začetkov razlikuje po vrsti dostopnih tehnologij, hitrosti pridobivanja, količini in natančnosti podatkov. Med tehnologije, ki omogočajo pridobivanje velike količine podatkov z visoko natančnostjo v kratkem času, uvrščamo tudi lasersko skeniranje ali lidar (angl. light detection and ranging). Poznamo različne vrste laserskega skeniranja, ki se razlikujejo predvsem po dosegu in platformi, na katere je laserski skener pritrjen: satelitsko, aero- (ALS), terestrično (TLS) in mobilno (MLS) ter lasersko skeniranje s kratkih razdalj.

V postopkih georeferenciranja in ocenjevanja kakovosti oblakov točk laserskega skeniranja se pogosto uporabljajo umetne tarče različnih oblik. Najpogosteje so uporabljene ravne tarče s črno-belim vzorcem (Csanyi et al., 2005; Becerik-Gerber et al., 2011; Kregar et al., 2013), ravne retroreflektivne tarče (Pesci & Teza, 2008), tarče enostavnih geometrijskih oblik, npr. krogla in valj (Bienert & Maas, 2009; Barbarella & Fiani, 2013; Witzgall et al., 2006) in tudi stožec (Artese et al., 2004; Urbančič, 2017). Za umetno tarčo laserskega skeniranja (lidarska umetna tarča) je pomembno, da je samodejno prepoznavna, enostavno razločljiva od ostalih objektov v oblaku, omogoča natančno določitev 3D položaja in ima optimalno obliko, velikost in barvo (Csanyi et al., 2005). Poseben primer umetne lidarske tarče je bil predstavljen v doktorski disertaciji Urbančič (2017), kjer je bil v postopkih ALS prvič uporabljen in analiziran stožec. Zaradi svojega namena je tarča poimenovana stožec ALS. Uporaba umetnih tarč kot oslonilnih točk skupaj z izravnavo snemalnih pasov po metodi najmanjših kvadratov (MNK) v postopku georeferenciranja omogoča bolj kakovostno georeferenciranje oz. doseganje višje točnosti georeferenciranja oblakov točk.

Pomembno je, da dobro poznamo lastnosti uporabljenih tarč, zato v danem prispevku obravnavamo določitev minimalno potrebnega števila točk na plašču stožca, ki omogoča določitev koordinat vrha stožca ALS z natančnostjo vsaj 2 cm. Končno vrednost bomo

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

določili z izvedbo večkratnih ponovitev izravnave parametrov stožca po MNK in z naključnim izborom točk na plašču stožca. Kriterij za določitev minimalnega števila točk na plašču bo povprečno odstopanje vrednosti parametrov stožca, določenih na osnovi 50-ih določitev parametrov stožca, od prave vrednosti.

Aerolasersko skeniranje

Nosilec ALS je najpogosteje letalo ali helikopter. Manjše in lažje laserske skenerje lahko nosijo tudi brezpilotna plovila. Snemalni sistem ALS lahko razdelimo na zračni in terenski segment (slika 1). Zračni segment sestavljajo plovilo, laserski skener in sistem za pozicioniranje in orientacijo, to sta antena GNSS in inercialna merska enota (angl. inertial measurement unit, IMU). Terenski segment predstavlja referenčna postaja GNSS.



Slika 1: Princip aerolaserskega skeniranja

Naknadna obdelava opazovanj vseh senzorjev snemalnega sistema omogoča izračun koordinat skeniranih točk v izbranem refernečnem koordinatnem sistemu. Uporabimo opazovanja laserskega skenerja, GNSS in IMU enote ter kalibracijske parametre snemalnega sistema. Ti opisujejo relativne odnose med položaji vseh treh omenjenih senzorjev (Vosselman & Mass, 2010).

Georeferenciranje oblakov točk

Koordinate točk, ki so rezultat laserskega skeniranja, so določene v lokalnem koordinatnem sistemu skenerja. Umestitev oblaka točk v izbran koordinatni sistem imenujemo georeferenciranje. Ker se snemalni sistem ALS skupaj s plovilom med skeniranjem premika, se skener za vsako izmerjeno točko nahaja drugje. S premikom skenerja se spremeni tudi njegova orientacija. Določitev pravega položaja in orientacije skenerja omogoča integracija GNSS in IMU opazovanj. Obravnavamo torej dinamičen sistem, kjer opazovanja različnih senzorjev sinhroniziramo na osnovi izmerjenih časov

posameznih opazovanj (Vosselman & Mass, 2010). Za določitev položaja GNSS-antene z visoko točnostjo je pomembno, da določimo njen relativni položaj glede na referenčno postajo GNSS. Na kakovost koordinat točk ima vpliv tudi kakovost kalibracijskih parametrov snemalnega sistema. Proizvajalec izvede kalibracijo skenerja, pri skeniranju pa je potrebno čim bolje določiti vektorje med skenerjem, anteno GNSS in IMU (Friess, 2007). Medseboje zasuke osi koordinatnih sistemov IMU in laserskega skenerja imenujemo kotna neporavnanost. Določajo jo koti nagiba (angl. roll), naklona (angl. pitch) in zasuka (angl. yaw) (Kuwano, 2008). Postopku georeferenciranja, kjer upoštevamo vsa našteta opazovanja in podatke kalibracije, imenujemo direktno georeferenciranje (slika 2) (Hebel & Stilla, 2012).



Slika 2: Direktno georeferenciranje

Prostorski položaj (e,n,h) posamezne točke T pri direktnem georeferenciranju izračunamo kot vsoto vektorjev (slika 2):

$$\overline{r_T} = \overline{r_{GNSS}} + \overline{r_{CAL}} + \overline{r_{LS}}$$
(1)

Pri tem uporabimo časovno sinhronizirane vektorje:

- $\overline{r_{GNSS}}$ položaj faznega centra antene GNSS na plovilu,
- $\overline{r_{CAL}}$ kalibrirana in pravilno orientirana razdalja med faznim centrom antene GNSS na plovilu in koordinatnim izhodiščem skenerja,
- $\overline{r_{LS}}$ poševna razdalja od izhodišča koordinatnega sistema laserskega skenerja do merjene točke (upoštevamo dolžino, izmerjeno z laserskim razdaljemerom, orientacijo vektorja pa določajo koti, določeni z inercialno mersko enoto, in notranji koti skenerja).

Direktno georeferencirani oblaki točk so glede na točnost in natančnost koordinat točk v oblaku zelo odvisni od kakovosti senzorjev in postopkov naknadne obdelave opazovanj. Točnost in natančnost georeferenciranja oblakov točk lahko izboljšamo z izravnavo snemalnih pasov po MNK ter uporabo oslonilnih točk. Te v praksi najpogosteje predstavljajo talne označbe ali drugi objekti, posebna oblika pa so umetne tarče.

Stožec kot umetna tarča ALS

Raziskovanje primerne oblike in velikosti umetne tarče za postopke ALS lahko povezujemo z razvojem postopkov ocenjevanja točnosti georeferenciranja oblakov točk snemalnih pasov. Wotruba et al. (2005) so uporabili tarče v obliki zaporednih črt ter v obliki zvezde. Boljši primer tarče so predlagali Csanyi et al. (2005), ki so oblikovali ravno črno-belo tarčo z že poznanim vzorcem bele pike na črni podlagi. Ker postopek postavljanja in izmere umetnih tarč predstavlja velik strošek, so kljub zagotavljanju visoke kakovosti koordinat tarč raziskovalci poskušali tarče nadomestiti z objekti v naravi. Pri tem so uporabili talne označbe (Toth et al., 2008) in ravnine streh (Kager, 2004; Höhle & Pedersen, 2010; van der Sande et al., 2010).

Zaradi geometrije, ki omogoča enolično določitev 3D koordinat karakteristične točke tarče, smo v doktorski disertaciji Urbančič (2017) analizirali tarče v obliki stožča. Z izvedbo dveh testov s TLS je bilo ugotovljeno, da je za uporabo v postopkih laserskega skeniranja najprimernejši naklon plašča stožca od osnovne ploskve 45°. Za odločitev polmera stožca 1 m smo uporabili izsledke raziskav iz Csanyi et al., (2005) ter Csanyi & Toth (2007). Za raziskavo smo izdelali stožec ALS iz epoksi smole, ki ga sestavimo iz petih delov. Štirje deli sestavljajo plašč in peti vrh stožca (slika 3).

Podrobnosti o določitvi najprimernejšega naklona, postopku prepoznavanja točk stožca v oblaku, izračunu njegovih parametrov, razvoju algoritma za samodejno prepoznavanje v oblaku točk ter primerjavi rezultatov uporabe stožcev ALS s črno-belimi tarčami so podrobno opisani v doktorski disertaciji (Urbančič, 2017). V danem prispevku že opravljeno raziskavo vpliva števila točk na plašču stožca nadgradimo s postopkom, ki je predstavljen v nadaljevanju.



Slika 3: Stožec ALS z anteno GNSS

Vpliv števila točk na določitev parametrov stožca z izravnavo po MNK

Za izračun koordinat vrha stožca uporabimo t. i . splošni model izravnave po MNK, kjer ob neznanem naklonu plašča stožca za pridobitev rešitve potrebujemo vsaj šest točk na
plašču (Urbančič et al., 2016). Na oceno vrednosti parametrov stožca in njihove natančnosti vplivata število in natančnost koordinat skeniranih točk na plašču. Za izvedbo analize vpliva števila točk na parametre stožca smo uporabili oblake točk velike gostote skeniranja na višinah leta 100 m (na stožcu se nahaja 368 točk), 200 m (na stožcu se nahaja 107 točk) in 400 m (na stožcu se nahaja 78 točk). Pri skeniranju je bil uporabljen laserski skener Riegl LMS-Q780, ki ima deklarirano natančnost posamezne skenirane točke 2 cm (www.riegl.com). Ob upoštevanju površine tarče, ki v tlorisu znaša π oz. približno 3,14 m², je bila gostota skeniranih točk posameznih višin snemanja približno 117, 34 in 24 točk/m² (slika 4).



Slika 4: Oblaki točk (modra *) in vrh (rdeč o) stožcev izračunan iz vseh točk na plašču: a) 100 m, b) 200 m in c) 400 m.

Postopek analize vpliva števila točk na izračun koordinat vrha stožca prikazujemo na sliki 5. V prvem koraku smo iz posameznega oblaka točk naključno poiskali od m = $6, \dots, p$ točk, kjer je p število točk v izvornem oblaku. Iz izbranih točk z izravnavo določimo parametre stožca, kjer naklon plašča stožca od osnovne ploskve obravnavamo kot neznano količino. Za posamezen stožec izvedemo p - 6 določitev, kjer v posamezni določitvi naključno poiščemo m točk. Rezultat posamezne določitve so koordinate vrha stožca in naklon plašča od osnovne ploskve ter natančnosti iskanih količin. Ker za izračun parametrov stožca uporabimo postopek naključnega izbora točk, v več ponovitvah z istim številom točk dobimo različne rezultate. Postopek celotnega izračuna parametrov stožcev za vse tri oblake točk za vseh p - 6 določitev zato ponovimo 50-krat. Končni rezultat določimo kot povprečno vrednost odstopanj 50-krat določenih koordinat vrha stožca od prave vrednosti, ki jo predstavljajo koordinate vrha stožca pri izravnavi z vsemi točkami na stožcu. Ponovljivost rezultatov ocenimo z izračunom standardnih odklonov odstopanj koordinat od prave vrednosti iz večkratnih ponovitev. Iz velikosti standardnih odklonov bomo lahko sklepali o vplivu samega števila točk na izračun koordinat vrha stožca in morebitnem vplivu razporeditve točk na plašču.



Slika 5: Shematski prikaz določitve minimalnega števila točk na stožcu za uporabo v postopkih ALS

Na sliki 6 prikazujemo rezultate opravljenih izračunov. Izrisane so povprečne vrednosti odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti. Ker so pri višini leta 100 m in množicah z več kot 150 točkami povprečna odstopanja na plašču stožca tako za Δ_e kot za Δ_n in Δ_H zelo majhne vrednosti, prikazujemo le rezultate za primere izračunov z do 150 točkami.

S slike 6 vidimo, da za množice z več kot 20 točkami pri večkratnih izračunih parametrov stožcev z naključnim izborom istega števila točk dobimo približno enake rezultate. Razpršenost vrednosti odstopanj koordinat je najmanjša za rezultate obdelav oblaka točk pri višini leta 100 m in največja za rezultate obdelav oblaka točk višine leta 400 m. Sklepamo lahko, da je razlog v natančnosti položajev skeniranih točk na plašču stožca, ki se na stožčastih površinah zmanjšuje z višino leta. Izrisani grafi kažejo na to, da so ne glede na število točk na stožcu vse tri komponente enako kakovostno določene. Največja razdalja med povprečjem izračunanih koordinat vrha stožca in pravo vrednostjo je v najslabšem primeru 3,6 cm (za oblak točk višine leta 400 m in 8 točk na plašču stožca).

Minimalno potrebno število točk na plašču lahko določimo le na osnovi izračunanih odstopanj koordinat, ki jih prikazujemo na sliki 6. Ker pri večkratnih ponovitvah ne dobimo enakih naključno izbranih točk, ponovljivost rezultatov izračuna koordinat vrha



stožca preverimo z izračunom standardnih odklonov iz odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti (slika 7).

Slika 6: Povprečne vrednosti odstopanj 50-krat izračunanih koordinat vrha stožca od prave vrednosti



Slika 7: Standardni odkloni koordinat vrha stožca za 50-krat ponovljene izračune

Izračunane vrednosti standardnih odklonov, ki jih predstavljamo na sliki 7, smo uporabili za določitev natančnosti 3D koordinat vrha stožca (σ_{3D}), določenih na osnovi 50ih ponovitev izračuna. Iz rezultatov obdelav oblakov točk posamezne višine leta smo določili število točk *m*, ko je σ_{3D} še manjši od 2 cm, kolikor znaša natančnost določitve koordinat za uporabljeni laserski skener (preglednica 1).

natanenostjo, visjo oa 2 em					
Višina leta [m]	100	200	400		
Min. št. točk	11	16	26		
σ_{3D} [mm]	18,4	18,7	19,3		

Preglednica 1: Minimalno število točk na stožcu za določitev koordinat vrha stožca z natančnostio, višio od 2 cm

Minimalno potrebno število točk, ki zagotavlja želeno natančnost koordinat vrha stožca iz 50-krat določenih parametrov stožca z naključnim izborom točk na plašču stožca, se za obravnavane oblake točk razlikuje tudi za več kot dvakrat (preglednica 1). Vpliv višine leta na izračunane parametre stožcev jasno vidimo tudi na sliki 7, kjer so standardni odkloni pri obdelavi oblakov točk pri višini leta 100 m veliko manj razpršeni in zavzemajo najmajše vrednosti v primerjavi z rezultati obdelav oblakov točk pri višini leta 200 in 400 m. Glavni razlog za razlike je v natančnostih določitve koordinat skeniranih točk, ki so močno odvisne od površinske strukture znotraj odtisa laserskega žarka na stožcu. Uporabljeni laserski skener ima divergenco laserskega žarka 0,25 mrad, kar na višini leta 100 m predstavlja 2,5 cm in na višini 400 m 10 cm.

Natančnost določitve koordinat umetne tarče iz oblakov točk ALS z natančnostjo, višjo od 2 cm, je visoka zahteva. V primeru, da si izberemo mejo pri 5 cm, bi za višino leta 400 m na plašču stožca potrebovali 14 točk, za višino leta 100 m pa le 10.

Zaključek

V prispevku smo predstavili analizo določitve minimalnega potrebnega števila točk na plašču stožca, če želimo stožec uporabiti kot natančno umetno tarčo v postopkih ALS. Raziskava temelji na testnih podatkih, pridobljenih na višinah snemanja 100, 200 in 400 m. Potrebno število točk za izračun koordinat vrha stožca z želeno natančnostjo smo določili na osnovi 50-ih ponovitev določitve parametrov stožca in končni rezultat določili s povprečnimi vrednostmi odstopanj koordinat vrha stožca od pravih vrednosti.

Z grafičnimi prikazi predstavljamo povprečna odstopanja koordinat po posameznih koordinatnih komponentah in standardne odklone teh odstopanj. Razpršenost rezultatov je najmanjša za obdelave oblaka točk stožca pri višini leta 100 m in največja pri višini leta 400 m. Glede na lastnosti laserske svetlobe in odboja od stožčasnih oblik je rezultat pričakovan. Za velike množice točk, ki jih uporabimo pri določitvi parametrov stožca v več ponovitvah, dobimo podobne rezultate, kar potrjujejo milimetrske vrednosti standardnih odklonov, ki jih predstavljamo na sliki 7. Pri zelo majhnem številu točk (manj kot 10) lahko standardni odkloni odstopanj koordinat, ki so določeni na osnovi odstopanj 50-ih ponovitev izračuna po posameznih koordinatnih komponentah, dosegajo vrednosti tudi do 9 cm.

Izbran kriterij določitve minimalnega potrebnega števila točk za izračun koordinat vrha stožca predstavlja prostorska natančnost koordinat točk, določena na osnovi 50-ih ponovitev določitev parametrov stožca na osnovi naključno izbranih točk, ki mora biti manjša od 2 cm. Ugotovili smo, da za obravnavane primere dobimo različne rezultate

(preglednica 1). V najslabšem primeru, to je za oblak, pridobljen pri višini leta 400 m, ta pogoj izpolnjuje 26 točk. Če se zadovoljimo z natančnostjo določitve koordinat vrha stožca 5 cm, bi potrebovali 14 točk. Pri praktični uporabi stožcev ALS bi za doseganje natančnosti koordinat vrha stožca 5 cm za višine leta pod 200 m morali načrtovati gostoto skeniranja vsaj 5 točk/m², za lete nad 400 m pa vsaj 8 točk/m².

Literatura in viri

- Artese, G., Achilli, V., Salemi, G., Trecroci, A. (2004). Automatic Orientation and merging of laser scanner acquisitions through volumetric targets: procedure description and test results. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. XXXV, PARTB5, Commission V: 210–215.
- Barbarella, M., Fiani, M. (2013). Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing. European Journal of Remote Rensing, 46:1, 126–151.
- Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Kavulya, G., Calis, G. (2011). Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. Automation in Construction, 20, 5: 649–658.
- Bienert, A., Maas, H.G. (2009). Methods for the automatic geometric registration of terrestrial laser scanner point cloud in forest stands. ISPRS Archives – Volume XXXVIII-3/W8, Paris, France: str. 93–98.
- Csanyi, N., Toth, C. K. (2007). Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73, 4: 385–396.
- Csanyi, N., Toth, C. K., Grejner-Brzezinska, D., Ray, J. (2005). Improving LiDAR Data Accuracy Using LiDAR Specific Ground Targets ASPRS 2005 Annual Conference Baltimore, Maryland, March 7-11, 2005: 11 p.
- Friess, P. (2007). Requirements for generating a geometrically Correct Point Cloud. Theory and Application of Laser Scanning, ISPRS summer school, July 1-7, 2007, Ljubljana.
- Hebel, M., Stilla, U. (2012). Simultaneous Calibration of ALS System and Alignment of Multiview LIDAR Scans of Urban Areas. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 50, 6: 2364–2379.
- Höhle, J., Pedersen, C.Ø. (2010). A new method for checking the planimetric accuracy of digital elevation models data derived by airborne laser scanning. Proceedings of the 9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, University of Leicester, Leicester, 253–256.
- Kager, H. (2004). Discrepancies between overlapping laser scanner strips simultaneous fitting of laser scanner strips. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXV, B3: 6 p.
- Kregar, K., Grigillo, D., Kogoj, D. (2013). High precision target determination from a point cloud. V: ISPRS Workshop Laser Scanning 2013, Antalya, Turkey, 11–13.
- Kuwano, Y. (2008). LiDAR System overview and instrument calibration. International School on LiDAR Technology, Kanpur, India, 74 p.
- Pesci, A., Teza, G. (2008). Terrestrial laser scanner and retroreflective targets: An experiment for anomalous effects investigation. International Journal of Remote Sensing, 29, 19: 5749–5765.
- Toth, C., Paska, E., Brzezinska, D. (2008). Quality assessment of lidar data by using pavement markings. Presented at ASPRS Annual Conference, Portland, Oregon, ZDA: 10 p.
- Urbančič, T. (2017). Ocenejvanje geometrične podobnosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja. Doktorska disertacija, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana
- Urbančič T., Vrečko A., Kregar K. (2016). The reliability of RANSAC method when estimating the parameters of geometric object. Geodetski vestnik, 60, 1: 69–97.
- van der Sande, C., Soudarissanane, S., Khoshelham, K. (2010). Assessment of relative accuracy of AHN-2 laser scanning data using planar features. Sensors, 2010, 10: 8198–8214.

- Vosselman, G., Maas, H.-G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, CRC Press: 318 p.
- Witzgall, C., Cheok, G.S. Kearsley, A.J. (2006). Recovering Spheres from 3D Point Data. In Proceedings of the 35th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR '06). IEEE Computer Society, Washington, ZDA, 6 p.
- Wotruba, L., Morsdorf, F., Meier, E., Nüesch, D. (2005). Assessment of sensors characteristics of an airborne laser scanner using geometric reference targets. ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, Netherlands, 6 p.

Ledeniki na kartah vojaške izmere avstro-ogrske monarhije

Mihaela Triglav Čekada*

Povzetek

Karte druge in tretje vojaške izmere avstro-ogrske monarhije prikazujejo tudi stanje ledenikov na slovenskih tleh in v njeni bližnji okolici med letoma 1818 in 1887. S pomočjo spletne karte Mapire, kjer so te karte predstavljene, digitalizirane in transformirane v koordinatni sistem WGS84, smo izmerili površino ledenikov. Na kartah druge vojaške izmere najdemo: Triglavski ledenik in snežišče pod Travnikom vzhodno od Jalovca ter, tik za današnjo slovensko mejo, tri Kaninske ledenike (Vzhodni in Zahodni Kaninski ledenik ter Vršiški ledenik). Na karti tretje vojaške izmere pa so prikazani Triglavski ledenik in trije Kaninski ledeniki. Površino Triglavskega ledenika in Kaninskih ledenikov smo primerjali s kasnejšo izmero ledenikov, ki smo jo večinoma izvedli s pomočjo interaktivne metode orientacije starih fotografij na osnovi novejših digitalnih modelov reliefa. Izdelali smo še vizualizacijo zmanjševanja Triglavskega ledenika od leta 1829 (obdobje 1829–1835 v katerem je bila izvedena druga vojaška izmera) do leta 2016.

Ključne besede: karte druge in tretje vojaške izmere Avstro-Ogrske, ledeniki, snežišča, Triglav, Kanin, Travnik

Key words: maps of the second and third Habsburg military survey, glaciers, snowfields, Triglav, Kanin, Travnik

Uvod

Majhni ledeniki in trajna snežišča v Sloveniji in njeni bližnji okolici so nastali v mali ledeni dobi, ki je trajala med letoma 1550 in 1850. Mala ledena doba je bila večinoma posledica zmanjšane Sončeve aktivnosti v Maunderjevem (1650-1710) in Daltonovem (1800–1830) minimumu ter večjega števila stratosferskih izbruhov vulkanov v ekvatorialnem pasu (Benn in Evans, 2013). Skokovito napredovanje največjih ledenikov v Alpah po letu 1600, kot so Bosson ter Mer de Glace v Franciji in Unterer (Spodnji) Grindelwald v Švici, se časovno ujema z največjimi vulkanskimi izbruhi tistega časa (Lüthi, 2014). Kot zadnji sunek male ledene dobe lahko štejemo obdobje med letoma 1810 in 1820, ko sta k ohladitvi močno prispevala še izbruha neznanega vulkana iz leta 1809 in vulkana Tambora v Indoneziji iz aprila 1815. V osrednji Evropi so imeli mrzla poletja in obilo padavin ter pozne zmrzali, kar je uničilo več zaporednih letin pridelkov. Zato je leto 1816 imenovano tudi »leto brez poletja«, v Nemčiji »leto berača« ter v Švici »leto lakote« (Wood, 2014). Huda lakota iz tistega časa, zaradi katere so ljudje umirali tudi pri nas, je izpričana tudi v slovenskem ustnem izročilu s Solčavskega (Triglav Čekada, 2015). Zadnji sunek male ledene dobe in posledična prehranska kriza pa sta bila po svoje vsaj deloma tudi vzrok za pričetek vzpostavljanja pravičnejšega zemljiškega katastra v Avstro-Ogrski, to je Franciscejskega katastra, ki je temeljil na izmerjeni velikosti parcel. Tako so v »letu brez poletja«/leta 1816 sprejeli predlog dvorne komisije o načinu katastrske izmere, ki se je navezoval na enoten koordinatni sistem, ki so ga vzpostavljali v okviru vojaške triangulacije za namene vojaško-topografske izmere (Lisec in Ferlan, 2017).

Odločili smo se, da pogledamo omenjene stare karte treh vojaško-topografskih izmer Avstro-Ogrske, natančneje katere ledeniške zaplate v Sloveniji in njeni neposredni okolici so na njih izrisane. Karte treh vojaških izmer Avsto-Ogrske so izdelali med letoma 1763 in

^{*}Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana.

1887 in so prosto dostopne na spletni karti Mapire (2014). Na kartah prve vojaške izmere (nastale med letoma 1763–1787) ni nobenih ledenikov, tudi ne večjih ledenikov z območja današnje avstrijske Koroške (npr. Pastirica/Pasterze ter ledeniki Visokih Tur), zato lahko sklepamo, da ledenikov takrat niso kartirali. Ledeniki se nahajajo le na kartah druge in tretje vojaške izmere, ki jih bomo opisali v nadaljevanju.

Če primerjamo karte vojaške izmere z novodobnimi kartami, se moramo zavedati, da na prvih, vsaj v visokogorju, nekatere podrobnosti niso pravilno izrisane. Na kartah vojaške izmere je ponekod izpuščen kakšen vrh ali del stene, potek vrhov je napačen... Zato lahko karte vojaških izmer uporabimo na dva načina: da verjamemo vsebini in izmerimo površine/črte direktno iz transformiranih kart ali pa da skušamo prepoznati enako vsebino in površino izmerimo iz novejših kart glede na prikaz vsebine na vojaških kartah. Kot bomo videli v nadaljevanju na primeru Triglavskega ledenika, so vrednosti površin, ki jih dobimo po teh dveh poteh, lahko različne.

Metodologija

V članku bomo predstavili le površine, ki smo jih izmerili sami. Najprej bomo opisali kako smo izmerili površine ledenikov iz spletnih zemljevidov Mapire (2014), na katerem so predstavljene in georeferencirane karte treh vojaških izmer avstro-ogrske monarhije. Površine ledenikov smo izmerili v orodju za izračun površine, ki ga ponuja spletni zemljevid. Obod Triglavskega ledenika iz 2. vojaške izmere smo še enkrat izmerili s podobnostno transformacijo vsebine, pridobljene s spletnega zemljevida, na današnje stanje podobe analitičnega senčenja (PAS) laserskega skeniranja Slovenije. Podobnostna transformacija je 4-parametrična transformacija, kjer se spremenijo orientacija, položaj in merilo (Berk, 2001). Nato smo vsebinsko, torej s primerjavo podrobnosti na stanju stare karte in novem PAS, digitalizirali obod ledenika.

Ostale omenjene, kasnejše površine Triglavskega ledenika in Kaninskih ledenikov (preglednici 2 in 3), so povzete po naših predhodnih raziskavah (Triglav in Gabrovec, 2013; Triglav Čekada in sod., 2014) in so bile izmerjene na dva načina. V prvi način sodijo vse natančne geodetske metode izmere ledenika od tahimetrične izmere, GNSS-izmere do fotogrametrične metode izmere ali laserskega skeniranja. V drugi način sodi približna metoda izmere na osnovi interaktivne metode orientacije arhivskih fotografij s pomočjo uporabe novejšega digitalnega modela reliefa. Uporabili smo ali digitalni model reliefa izdelan v postopku ročnega fotogrametričnega 3D-stereo zajema iz velikoformatnih aerofotografij (del obdelave Triglavskega ledenika) ali samodejno izdelan digitalni model reliefa iz oblaka laserskih točk (Triglavski ledenik in Kaninski ledeniki). V postopku interaktivne metode orientacije dobimo kot končni rezultat samo obod ledenika v 3D-vektorskem zapisu (shp-format datoteke).

Geodetske metode izmere so bile večinoma uporabljene za izmero Triglavskega ledenika konec talilne dobe ali kakšen mesec pred koncem talilne dobe (večinoma stanje konec avgusta).

Arhivske fotografije lahko prikazujejo ledenike konec talilne dobe ali pa ob neznanem času. Za večino najstarejših arhivskih fotografij, narejenih pred letom 1950, ne vemo, kdaj so bile posnete, vendar lahko sklepamo, da je večina najverjetneje posneta poleti, ko so se avtorji fotografij vzpenjali na Triglav ali Kanin. Najbolj natančno poznamo čas snemanja za arhivske fotografije Triglavskega ledenika, narejene s panoramskim fotoaparatom Horizont, s pomočjo katerega so ledenik fotografirali enkrat mesečno vse od leta 1976 naprej. Horizontove fotografije, ki smo jih uporabili, kažejo ledenik konec talilne dobe, saj smo orientirali le fotografije narejene v avgustu, septembru ali oktobru, odvisno od tega,

katera je bila kakovostnejša (vremenske razmere, jasnost slike, najmanjša površina ledenika).

Ker bomo v članku podali in prikazali le površine ledenikov, ki smo jih sami izračunali s pomočjo interaktivne metode orientacije ali izmerili, se površine Triglavskega ledenika lahko razlikujejo od površin objavljenih v Gabrovec in sod. (2014).

Ledeniki na kartah vojaških izmer avstro-ogrske monarhije

Karte prve, druge in tretje vojaške izmere avstro-ogrske monarhije so bile za upodobitev na spletnem zemljevidu Mapire transformirane v WGS84 s položajno natančnostjo med 150–200 m. Karte prve in druge vojaške izmere so bile originalno izdelane v današnjem merilu 1:28 800 (Timár et al., 2006). Karte tretje vojaške izmere so bile izmerjene med leti 1869–1887, izdelane so bile v dveh merilih 1:25 000 in 1:75 000. Na spletnem zemljevidu Mapire so bile v času pisanja članka prikazane le pregledne karte izdelane v merilu 1:75 000 (Molnár in Timár, 2009).

Kot smo omenili že zgoraj, na kartah prve vojaške izmere ni ledenikov.

Triglavski ledenik je kartografsko označen s kartografskim prikazom na kartah druge in tretje vojaške izmere (sliki 1 in 2). V bistvu sta prikazana skupaj Triglavski ledenik in snežišče nad Triglavskim ledenikom. Ledenika pod Skuto ni ne na drugi ne na tretji vojaški izmeri (slika 3). Na sliki 2 sicer vidimo belo zaplato vzhodno od vrha Skute, vendar ta predstavlja rob izmere in kartografije province in ne ledenika pod Skuto, saj bi se ta moral nahajati na severni strani Skute. Belino, ki predstavlja rob karte, vidimo še čisto na desnem delu slike 3 in dvakrat na sliki 6. Te beline so ostale zaradi neujemanja mej provinc (črtkane črte) na različnih transformiranih listih kart, saj so bili posamezni listi kart iz različnih provinc ločeno transformirani v WGS84. Pri transformaciji pa so uporabili tudi različne transformacijske parametre (Timár et al., 2006), zato se vsebina na robovih ne ujema popolnoma.

Vzhodni in zahodni Kaninski ledenik ter Vršiški ledenik, ki so danes tik za slovenskoitalijansko mejo, so označeni na kartah druge in tretje vojaške izmere. Ti trije ledeniki so bili nekoč združeni, zato jih Colucci in Guglielmin (2015) obravnavata kot izvorno enoten Kaninski ledenik in površine vseh treh v analizah seštevata. Vršiški ledenik je od Kaninskih ledenikov ločen z grebenom in obdan z obširnim meliščem (sliki 4 in 5). Ker vemo, da so ti ledeniki tudi danes podvrženi intenzivnemu zasipavanju z gruščem iz okoliških vrhov, lahko sklepamo, da je bil Vršiški ledenik večji, vendar je na kartah vsaj del ledenika označen s topografskim znakom za melišče. Na kartah ni Prestreljeniškega ledenika, ki bi moral biti pod vrhom Prestreljenika na današnji italijanski strani, saj je bil v času izmere vojaških kart tudi ta najverjetneje obilno zasut z gruščem in je zato lahko prikazan oz. skrit v topografskem znaku za melišče. Na sliki 4 vidimo tudi na južni, danes slovenski strani Kanina, dva ledenika oz. snežišči. Snežišči se na karti tretje vojaške izmere ne pojavita več (slika 5).



Slika 1: Prikaz Triglavskega ledenika na karti druge vojaške izmere 1:28 800 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).



Slika 2: Prikaz Triglavskega ledenika na karti tretje vojaške izmere 1:75 000 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).



Slika 3: Skuta na karti druge vojaške izmere 1:28 800 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).

Na karti druge vojaške izmere najdemo še snežišče pod Travnikom (slika 6), ki ga ni na tretji vojaški izmeri. Povežemo ga lahko s snežiščem med Lopami in Kumljahi pod severno steno Travnika, ki ga omenja Gams (1961). Zanimivo je, da na karti druge vojaške izmere pod Jalovcem ni izrisanih drugih snežišč, ki jih omenja Gams (1961) in ki naj bi v šestdesetih letih 20. stoletja še obstajala, sočasno s snežiščem pod Travnikom. To so bila trajno snežišče v Jalovčevem ozebniku ter občasna snežišča v Severni grapi in na melišču v Velikem kotu.

Gams (1961) omenja med pomembnejšimi snežišči Julijskih Alp še snežišče v Skednju ali Prisojnikov ledenik, ki pa ni prikazan niti na karti druge in niti tretje vojaške izmere.

V Kamniško-Savinjskih Alpah ni na kartah druge in tretje vojaške izmere izrisan ne ledenik pod Skuto, niti druga snežišča, ki jih omenjena Šifrer (1961). Obstoj ledenika pod Skuto sicer omenja že Frischauf v opisu ture iz leta 1874 (Šifrer, 1961).

Karte druge vojaške izmere so bile za provinco Ilirijo, kamor sta spadala tako ledenik pod Triglavom in Skuto ter snežišče pod Travnikom (slike 1, 3 in 6), izmerjene med letoma 1829 in 1835. Karte za provinco Lombardije, Benetke, Parme in Modene, na čigar meji so ledeniki na severni strani Kanina (slika 4), so bile izmerjene med letoma 1818 in 1829, torej pred izmero Ilirije. Snežišči na južni strani Kanina sta spadali v provinco Primorska in sta bili izmerjeni in kartirani med letoma 1821 in 1824 (Timár et al., 2006). Povsem različne barve, ki predstavljajo enako visokogorsko topografijo na vsaki strani meje provinc na primeru Kaninskih ledenikov potrjujejo to dejstvo.



Slika 4: Od leve proti desni si sledijo Zahodni in Vzhodni Kaninski ledenik ter Vršiški ledenik na karti druge vojaške izmere 1:28 800 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).



Slika 5: Od leve proti desni si sledijo Zahodni in Vzhodni Kaninski ledenik ter Vršiški ledenik na karti tretje vojaške izmere 1:75 000 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv).



Slika 6: Prikaz snežišča pod Travnikom na karti druge vojaške izmere 1:28 800 (vir: Mapire in Avstrijski državni arhiv). Rumena črta predstavlja mejo med dvema provincama, za katere se je izmera in kartografija izvajala ločeno. Na levi strani in spodaj desno vidimo neujemanje meja provinc (dve črtkani črtni črti predstavljata isto mejo iz dveh kart, bela območja pa območje izven obsega ene karte).

Na kartah tretje vojaške izmere, izdelanih med letoma 1869 in 1887, so prikazani samo Triglavski ledenik, Zahodni in Vzhodni Kaninski ledenik ter Vršiški ledenik (sliki 2 in 3), ledenikov pod Skuto in Prestreljenikom ter snežišča pod Travnikom v bližini Jalovca pa ni.

Ledenik ali snežišče	karta 2. vojaške izmere (1829–1835) Merilo: 1:28 800	karta 3. vojaške izmere (1869–1887) Merilo: 1:75 000
Triglavski ledenik	31 ha	30 ha
Snežišče nad Triglavskim ledenikom	2 ha	prekrito z napisom
Ledenik pod Skuto	ni prikazan	ni prikazan
Zahodni Kaninski ledenik	34 ha (1818–1829)	21 ha
Vzhodni Kaninski ledenik	15 ha (1818–1829)	17 ha
Vršiški ledenik	2 ha (1818–1829)	2 ha
Prestreljeniški ledenik	ni prikazan	ni prikazan
Snežišče pod Travnikom	29 ha	ni prikazano

Preglednica 1: Ledeniki v Sloveniji in njeni neposredni okolici na kartah avstro-ogrske monarhije. Površine so izmerjene z orodjem za izmero površin v spletnem zemljevidu Mapire, kjer so karte Avstro-Ogrske transformirane v koordinatni sistem WGS84. Površine v preglednici 1 so izmerjene s pomočjo orodja za izračun površin v spletnem zemljevidu Mapire. Površine so digitalizirane z natančnostjo ± 1 ha na kartah druge vojaške izmere, kjer se vidijo robovi ledenikov zelo lepo (slika 1). Na kartah tretje vojaške izmere, kjer so ledeniki večinoma in vsaj deloma zakriti z napisom ter je merilo karte slabše (1:75 000), je natančnost digitalizacije še slabša, velikostnega razreda nekaj hektarjev (slika 2).

Izrez karte Triglavskega ledenika iz druge vojaške izmere smo s podobnostno transformacijo transformirali še na stanje podobe analitičnega senčenja (PAS) laserskega skeniranja iz leta 2014 (Triglav Čekada in Bric, 2015). Izmero smo ponovili tako, da smo rob Triglavskega ledenika vsebinsko identificirali na trenutnem stanju topografije (npr. vsebinsko ledenik sega do roba Triglavske stene; če zemljevid samo transformiramo temu ni tako) in dobili še nekaj hektarjev večjo površino, t. j. 34 ha. Zato ocenjujemo, da so na spletnih zemljevidih Mapire izmerjene površine nekoliko podcenjene. Tako digitaliziran obod smo uporabili tudi za izris površine Triglavskega ledenika za stanje 1829–1835 na sliki 10.

Zaradi preslabega merila karte tretje vojaške izmere, ponovne izmere s predhodno transformacijo na PAS na tej karti nismo izvedli. Tudi površina Triglavskega ledenika izmerjena iz merila 1:75 000 je zelo majhna, saj naj bi na karti tretje vojaške izmere v merilu 1:25 000 iz leta 1877 le-ta meril 40 ha (Gabrovec in sod., 2014, 31). Žal v času pisanja tega članka, merilo 1:25 000 na spletni strani Mapire ni bilo dostopno.

Površina Triglavskega ledenika iz obdobja 1829–1835 je primerljiva s površinami, izmerjenimi iz starih razglednic z začetka 20. stoletja (preglednica 2). Površine Kaninskih ledenikov iz obdobja 1818–1829 so podobne Marinellijevi fotogrametrično izmerjeni površini iz leta 1908, ko je Zahodni Kaninski ledenik meril 30,1 ha, Vzhodni pa 12,9 ha (preglednica 3). Na karti tretje vojaške izmere iz obdobja 1869–1887 je največji Zahodni Kaninski ledenik meri le 21 ha, kar je bolj primerljivo s stanjem po letu 1934 (Triglav in sod., 2014), oziroma je njuna skupna površina primerljiva s stanjem iz leta 1948 (Colucci in Guglielmin, 2015).

Površina Triglavskega ledenika skozi čas

Triglavski ledenik se je od konca male ledene dobe leta 1850 do leta 1930 počasi zmanjševal in je segal ponekod skoraj do roba Triglavske severne stene. Pokrival je okoli 30 ha. Med leti 1930 in 1950 se je pospešeno zmanjševal in je leta 1950 obsegal že manj kot 13 ha. Med leti 1950 in 1983 se je njegovo zmanjševanje močno upočasnilo, saj je v posameznih letih celo napredoval, zato je meril leta 1983 še vedno 10 ha. To leto je prelomno, saj se je takrat pričel pospešeno zmanjševati in je leta 1999, ko smo ga sodelavci Geodetskega inštituta Slovenije prvič izmerili, meril le še nekaj več kot 1 ha. Ta površina sovpada z lego ledenika v kotanji, ki je pred soncem tretjino leta v celoti zaščitena z ostenjem med Malim Triglavom in vrhom Triglava kar omogoča njegov obstoj. Svoj minimum je dosegel leta 2007 z 0,6 ha in se mu vnovič približal s površino 0,7 ha v letu 2017 (Pavšek, 2017). V zadnjem desetletju mu pri ohranjanju pomagajo večinoma ugodne snežne razmere z veliko količino snega v redilni dobi.

Leto	Površina	Metoda izmere	Vir
	[ha]		
1829-1835	34	karta merila 1:28 800 transfromirana s	Mapire in Avstrijski državni arhiv
		podobnostno transformacijo na PAS	
1869–1887	30	površina digitalizirana z orodjem v Mapire iz	Mapire in Avstrijski državni arhiv
		karte merila 1:75 000	
1897	22	interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
1934	27,6	interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
1956	14,4	interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
1958	13,7	interaktivna orientacija stare fotografije	Triglav Čekada in sod. (2014)
1962	21,5	interaktivna orientacija stare fotografije	Triglav Čekada in sod. (2014)
1976	18	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1979	24,1	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1980	15	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1982	11	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1985	10,8	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1986	8,9	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1987	8	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1989	6,8	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1991	6,7	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1992	4,3	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1993	4,7	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1995	3,8	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Geodetski inštitut Slovenije
1997	2,9	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
1999	1,1	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2002	1,2	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
2003	0,7	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
2005	0,9	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
2006	0,7	interaktivna orientacija fotografije Horizont	Triglav Čekada in Gabrovec (2013)
2007	0,6	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2008	1,1	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2009	0,6	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2010	2,5	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2011	2,4	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2012	0,6	GNSS izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2013	2,5	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2014	3,6	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2015	1,7	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2016	1	tahimetrična in fotogrametrična izmera	Geodetski inštitut Slovenije
2017	0,7	tahimetrična izmera	Geografski inštitut Antona Melika
			ZRC SAZU (Pavšek, 2017)

Preglednica 2: Kolebanje površine Triglavskega ledenika v zadnjih 180 letih.

Površine Kaninskih ledenikov skozi čas

V preglednici 3 so povzete površine Kaninskih ledenikov, ki smo jih izmerili na enak način oziroma z interaktivno metodo orientacije starih posnetkov s pomočjo novejšega digitalnega modela reliefa. Podatki od 1893 do 2011 so povzeti po Triglav Čekada in sod. (2014). Dodani sta površini izmerjeni v spletnem zemljevidu Mapire s pomočjo orodja za izračun površine. Colucci in Guhlielmin (2014) pri preučevanju vpliva različnih vremenskih dejavnikov na Kaninske ledenike, seštejeta površini Vzhodnega in Zahodnega Kaninskega ledenika v enotno površino. Tudi sami smo napravi enako in v tem primeru sta se Kaninska ledenika iz začetnih 49 ha v obdobju 1818–1829 zmanjšala na 38 ha v obdobju 1869–1887 ter ostala približno enaka z 41 ha v letu 1893 in 43 ha v letu 1908. V približno 70 letih sta se oba ledenika skupaj zmanjšala za približno 10 ha, zato ne preseneča trditev Marinellija iz leta 1909, ki je te ledenike redno meril, da bodo ledeniki prav kmalu izginili, saj se zelo pospešeno zmanjšujejo (Marinelli, 1910).

Leto	Površina [ha]		Metoda izmere	Vir
	Zahodni	Vzhodni		
	Kaninski ledenik			
1818-1829	34	15	površina digitalizirana z orodjem v	Mapire in
			Mapire iz karte v merilu 1:28 800	Avstrijski državni arhiv
1869–1887	21	17	površina digitalizirana z orodjem v	Mapire in
			Mapire iz karte v merilu 1:75 000	Avstrijski državni arhiv
1893	28	13	interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
1908	30,1	12,9	georeferenciran načrt Marinellija	Triglav Čekada in sod. (2014)
1957	7,6		interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
1970–1980	10,1	5,5	interaktivna orientacija stare razglednice	Triglav Čekada in sod. (2014)
2000	5,9	2,7	ortofoto Cikličnega aerofotografiranja	Triglav Čekada in sod. (2014)
			Slovenije (CAS)	
18.8.2011	14,6	6,4	ortofoto CAS	Triglav Čekada in sod. (2014)
29.9.2011	8,8	4,7	posebno aerolasersko skeniranje	Triglav Čekada in sod. (2014)

Preglednica 3: Kolebanje površine Vzhodnega in Zahodnega Kaninskega ledenika v zadnjih 200 letih.

Poleg izmere površin predstavljenih v preglednici 3 Colucci in Guhlielmin (2014) omenjata, da sta bila oba Kaninska ledenika skupaj leta 1948 velika 38 ha. Torej se površina od leta 1908 do 1948 ni bistveno zmanjšala. Izostanek podatkov o površini za vmesno obdobje sta zapolnila z redno izmero umikanja čela ledenika od stalnih kontrolnih točk (merjenje razdalj z ročnim metrom), ki jo na Kaninskih ledenikih redno izvajajo že vse od leta 1920 dalje. Ta kaže na trend splošnega zmanjševanje ledenika med letoma 1920 in 1946 ter na trend povečevanja ledenika med letoma 1946 in 1981. Oddaljenost od kontrolnih točk tudi kaže, da sta se od leta 1986 dalje ledenika samo še zmanjševala. To se nadaljuje vse do leta 2008, ko se je trend ponovno nekoliko obrnil. Leta 1971 in 1975 naj bi ledenika merila 16 ha, leta 1986 pa 25 ha. Leta 2003 so izmerili najmanjšo površino obeh ledenikov skupaj in sicer 5 ha.

Iz opisanega vidimo, da se Kaninski ledeniki in Triglavski ledenik odzivajo na enake dolgoročne podnebne trende, ki so primerljivi z dolgoročnimi trendi, ki so jih ugotovili tudi pri drugih ledenikih v Alpah (Zemp in sod., 2015). Prepoznamo lahko naslednja obdobja:

- od 1850 do 1930 obdobje počasnega krčenja ledenikov,
- med letoma 1930 in 1950 se ledeniki pospešeno krčijo,
- med letoma 1950 in 1983 ledeniki stagnirajo ali celo rastejo in
- od 1983 naprej se pospešeno krčijo,
- od leta 2008 dalje se njihov upad upočasni, saj so od takrat pa vse do 2016 ob koncu poletij (talilne dobe) občasno in to kar nekaj poletij zapored, prekriti s snegom preteklih snežnih sezon (redilne dobe).

Tako Triglavski ledenik kot tudi Kaninski ledeniki so najverjetneje doživeli svoj minimum okoli leta 2005, zdaj pa jih najverjetneje ohranja predvsem topografija, saj so vsi na severni (osojni) strani vrhov, kjer se večino leta uspešno skrivajo pred soncem. K ohranjanju jim v zadnjem desetletju pomagajo tudi dokaj ugodne snežne razmere z veliko količino snega v redilni dobi, ki jih ohranja pri življenju (Triglav Čekada in sod., 2014; Colucci in Guhlielmin, 2014).

Prikaz zmanjševanja Triglavskega ledenika in razprava

Nekatere obode Triglavskega ledenika smo uporabili za izdelavo 3D-prikaza površine ledenika v programu za prikaz 3D-podatkov (ArcScene v ArcGIS), kjer smo na digitalnem modelu reliefa s pomočjo TIN-mreže povezali 3D-točke oboda v ploskev površja Triglavskega ledenika. Kot podlogo smo uporabili digitalni model reliefa izdelan iz podatkov posebnega aerolaserskega skeniranja Triglavskega ledenika iz septembra 2012 (Triglav Čekada in sod., 2013b). Zaradi lepšega prikaza smo uporabili digitalni model reliefa z velikostjo celice 5 m × 5 m, ki smo ga izdelali iz laserskega digitalnega modela reliefa z velikostjo celice 1 m × 1 m. Za bolj izrazito predstavitev zmanjševanja in rasti ledenika digitalnega modela reliefa, ki prikazuje ostenje Triglava, nismo obarvali z ortofotom. Tako izdelane slike stanja ledenika iz posameznih let (slika 10) smo uporabili tudi za prikaz zmanjševanja Triglavskega ledenika v dveh televizijskih oddajah, ki sta to temo obravnavali poleti 2017:

- oddaja Ugriznimo znanost na RTV Slovenija (<u>http://4d.rtvslo.si/arhiv/ugriznimo-znanost/174470676</u> glej minuto 9:50) in
- oddaja Fokus na POP TV (<u>http://www.24ur.com/novice/slovenija/triglavski-ledenik-lepota-ki-izginja.html</u> glej minuto 4:48).
 1829-1835
 1897
 1928
 1934



Slika 7: Mozaik zmanjševanja Triglavskega ledenika

Na sliki 7 najprej opazimo, da smo iz starejših posnetkov izmerili tudi obode snežišča nad Triglavskim ledenikom, na Horizontovih posnetkih od leta 1976 dalje pa ne. Snežišče je seveda še obstajalo kar nekaj časa po letu 1976, ker pa ga v naših začetnih analizah (Triglav Čekada in Gabrovec, 2013a) nismo šteli k Triglavskemu ledeniku, ga tudi nismo merili. Za snežišče nad Triglavskim ledenikom Gams (1961) omenja, da je bilo v preteklosti povezano z Triglavskim ledenikom, kar lahko vidimo tudi na karti druge vojaške izmere Avstro-Ogrske (slika 1).

Prav tako smo na Horizontovih posnetkih merili samo osrednji del Triglavskega ledenika, ne pa tudi njegovih manjših ostankov, ki so ostali ločeni od osrednjega dela ledenika. V prihodnosti je smiselno razmisliti o ponovni analizi in izmeri obodov tudi manjših delov ledenika poleg osrednjega dela. Colucci in Guglielmin (2015) namreč seštevata površini obeh Kaninskih ledenikov v enotno površino in v analizah predstavljata skupno večjo površino, kljub temu, da sta ledenika že nekaj časa ločena. Če se bomo za to odločili, bo potrebno vnovič izmeriti manjše ostanke Triglavskega ledenika oz. nekdanja snežišča severozahodno od Glave in tudi površino snežišča nad Triglavskim ledenikom, da bomo dobili primerljivo časovno vrsto tudi za vsa manjša sneženo-ledena telesa.

Druga pomembna značilnost, ki jo opazimo na sliki 7 je, da prične Triglavski ledenik po letu 2006 »rasti«. Ker za nastanek novega ledu v teh robnih razmerah potrebujemo tudi do več desetletij (Benn in Evans, 2013), je »povečanje« ledenika od leta 2006 do 2011 v resnici le ponazoritev večanja snežišča, ki prekriva ostanke ledenika. Ledenik je vnovič dosegel svoj minimum v letu 2012, potem pa je sledilo nekaj ugodnih zim in poletij, ko je konec redilne dobe snežišče ob rednih meritvah še vedno prekrivalo ledenik vse do leta 2017, ko je bil ta vnovič skoraj v celoti razgaljen (Pavšek, 2017). Zato je ostanek pravega ledenika, ki je večinoma pokrit s obsežnejšim snežiščem, v resnici velik le še 0,4 ha že celotno zadnje desetletje (Del Gobbo in sod., 2016).

Resne primerjave med Kaninskimi ledeniki in Triglavskim ledenikom le na osnovi površin ne moremo narediti, ker imamo za Kaninski ledenik preredko časovno vrsto.

Zahvala

Delo je bilo delno financirano v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2–8176 Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Dolgoletne izmere Triglavskega ledenika je finančno omogočil Geografski inštitut Antona Melika (GIAM) ZRC SAZU. Sodelavcem GIAM se zahvaljujem za možnost dolgoletnega sodelovanja z njimi pri preučevanju slovenskih ledenikov.

Literatura

- Benn, D.I., Evans, D.J.A. (2013). Glaciers & Glaciation. Routlege, Taylor & Francis Group, London, New York.
- Berk, S. (2001). Možnosti transformacije katastrskih načrtov grafične izmere v državni koordinatni system. Geodetski vestnik, 45 (1&2), 91-105.
- Del Gobbo, C., Colluci, R.R., Forte, E., Triglav Čekada, M., Zorn, M. (2016). The Triglav glacier (South-Eastern Alps, Slovenia): Volume extimation, internal characterization and 2000–2013 temporal evolution by means of ground penetrationg radar measurements, Pure Appl. Geophys., 173:6, 1847-2244.

- Colucci, R.R., Guglielmin, M. (2015). Precipitation temperature changes and evolution of small glaciers in the southeastern European Alps during the last 90 years. International Journal of Climatology, 35, 2783-2797.
- Gabrovec, M., Hrvatin, M., Komac, B., Ortar, J., Pavšek, M., Topole, M., Triglav Čekada, M., Zorn, M. (2014). Triglavski ledenik. Geografija Slovenije 30. Založba ZRC, Ljubljana.
- Gams, I. (1961). Snežišča v Julijskih Alpah. Geografski zbornik, 6, 241-269.
- Lisec, A., Ferlan, M. (2017): 200 let od začetka parcelno orientiranega katastra na Slovenskem. Geodetski vestnik, 61:1, 76-90.
- Lüthi, P. 2014: Little Ice Age climate reconstruction from ensemble reanalysis of Alpine glacier fluctuations, The Cryosphere, 8, 639-650.
- Mapire (2014). Spletni portal historičnih kart, <u>http://mapire.eu/en/</u>, Österreichisches Staatsarchiv in Arcanum Adatbázis Kft (dostopano 3. 10. 2017).
- Marinelli, O. (1910). I ghiacciai delle Alpi Venete. Memorie geografiche, 4 (11).
- Molnár, G., Timár, G. (2009). Mosaicking of the 1:75000 sheets of the third military survey of the Habsburg Empire, Acta Geod. Geoph. Hung., 44 (1), 115–120.
- Pavšek, M. (2017). Triglavski ledenik. DEDI digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem, <u>http://www.dedi.si/dediscina/449-triglavski-ledenik</u> (dostopano 5. 1. 2018).
- Šifrer, M. (1961). Snežišča v Kamniških Alpah. Geografski zbornik, 6, 271-286.
- Wood, G.D. (2014). Tambora: the eruption that changed the world. Woodstock.
- Timár, G., Molnár, G., Székely, B., Biszak, S., Varga, J., Jankó, A. (2006). Digitized maps of the Habsburg Empire The map sheets of the second military survey and their georeferenced version. Arcanum, Budimpešta, 59 p.
- Triglav Čekada, M., Bric, V. (2015): Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. Geodetski vestnik, 59 (3), 586-592.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M. Colucci, R.R. (2014). Površina Kaninskih in Triglavskega ledenika od leta 1893, določena na podlagi arhivskih posnetkov ter aerolaserskih podatkov. Geodetski vestnik, 58 (2), 274-313.
- Triglav Čekada, M. in Gabrovec, M. (2013a). Documentation of Triglav glacier, Slovenia, using non-metric panoramic images. Annals of Glaciology, 54 (62), 80-86.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Klanjšček, M., Pavšek, M. (2013b). Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012: zbornik predavanj, 18. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 29. januar 2013. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 85-93.
- Zemp, M. in 39 drugih (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. Journal of Glaciology, 61:288, 745-762.

Optimizacija algoritmov radarske detekcije toče za območje Slovenije

Gregor Stržinar^{*}, Gregor Skok^{*}

Povzetek

Toča so ledeni delci dimenzije nad 5 mm, ki nastajajo v nevihtnih oblakih in na tleh pogosto povzročijo škodo na kmetijskih površinah, objektih ali vozilih. Pojav toče v Sloveniji opazujejo in beležijo meteorološki opazovalci na okoli 200 postajah. Hkrati pa je pojav toče možno posredno, vsaj približno, določiti tudi iz meritev z meteorološkim radarjem. V okviru analize so se uporabili štirje pogosto uporabljeni algoritmi za radarsko detekcijo toče. Namen je bil ugotoviti kateri od algoritmov so boljši od drugih in jih po možnosti tudi optimizirati (spreminjati njihove parametre z namenom da bodo čim bolj uspešni). Analiza je bila narejena na radarskih podatkih za obdobje Maj-Avgust 2002-2010 pri čemer so se rezultati algoritmov primerjali z opazovanji toče pri tleh na postajah. Za najboljša sta se izkazala algoritma Waldvogel in Severe Hail Index. Algoritmi so bili bolj uspešni ob dnevih ko so bila huda neurja s točo. Izdelana je bila tudi klimatološka karta pogostosti toče, ki bazira na radarskih meritvah. Ta kaže, da v Sloveniji obstaja precejšna variabilnost pojavnosti toče. Toča se pojavlja od skoraj 0 do 1.7-krat letno, s povprečno vrednostjo okoli 0.7-krat letno.

Ključne besede: toča, detekcija toče, meteorološki radar

Keywords: hail, hail detection, meteorological radar

^{*} Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani.