

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

Polona Pavlovčič Prešeren¹, Marjeta Korošec², Dejan Grigillo³

Povzetek

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

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

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

Uvod

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

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

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

² študentka 1. letnika MA Geodezija in geoinformatika, FGG

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

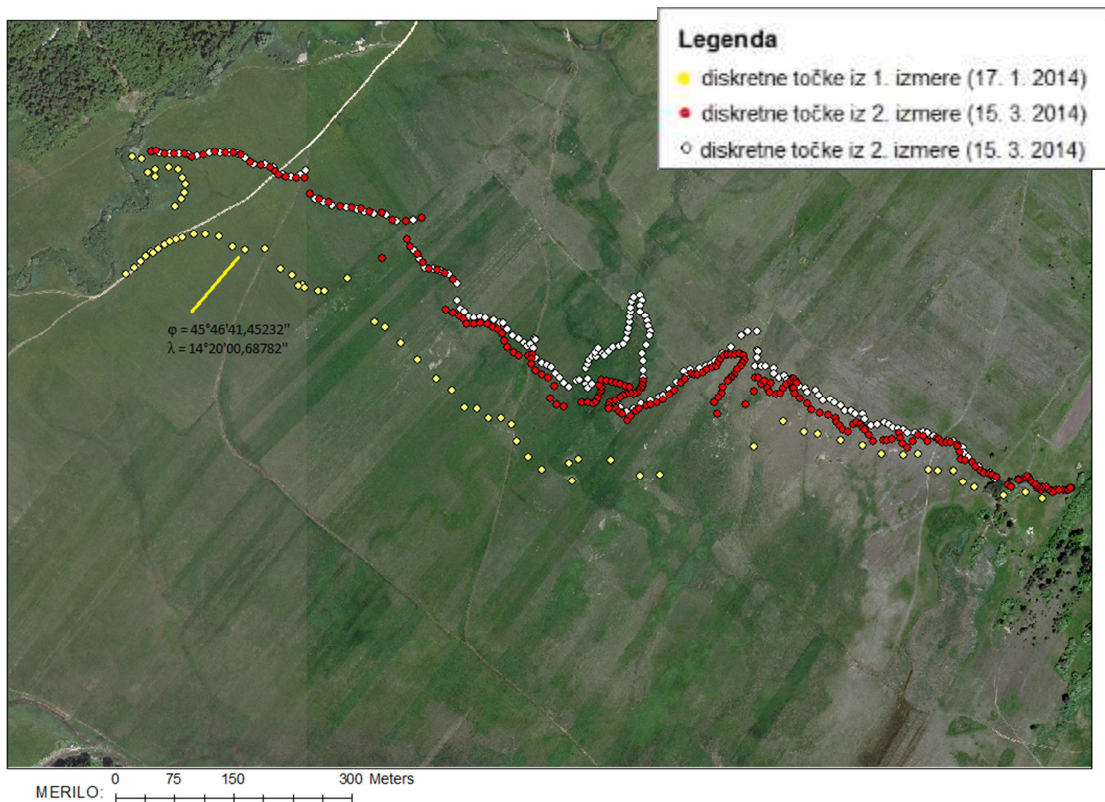
vodostaja jezera, izdelano s presekom DMV 5 in ravnine, ki je imela nadmorsko višino enako izmerjeni višini roba jezera. Rezultate terenskih meritev roba jezera in simulacije vodostaja smo upodobili na državnem ortofotu s prostorsko ločljivostjo 0,5 m (DOF050) v državnem koordinatnem sistemu D96/TM.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

Izmera GNSS na danem območju

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

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

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



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

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

Analiza kakovosti DMR

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

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

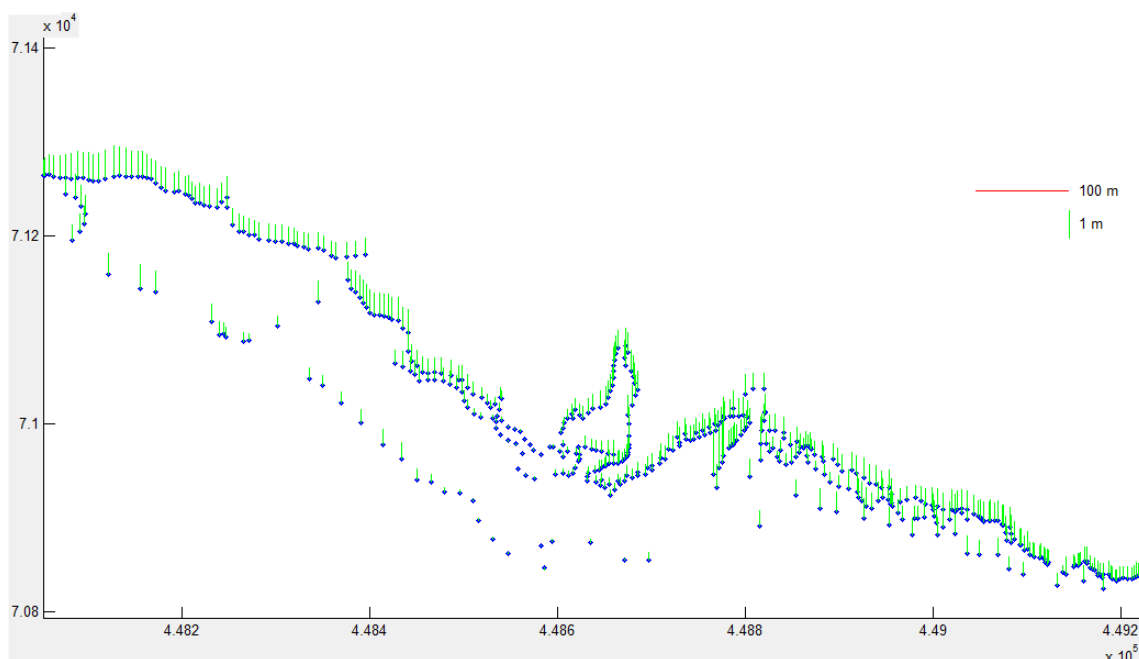
$$\Delta h = h_{\text{DMV5}} - h_{\text{GNSS}} \quad (1)$$

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

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

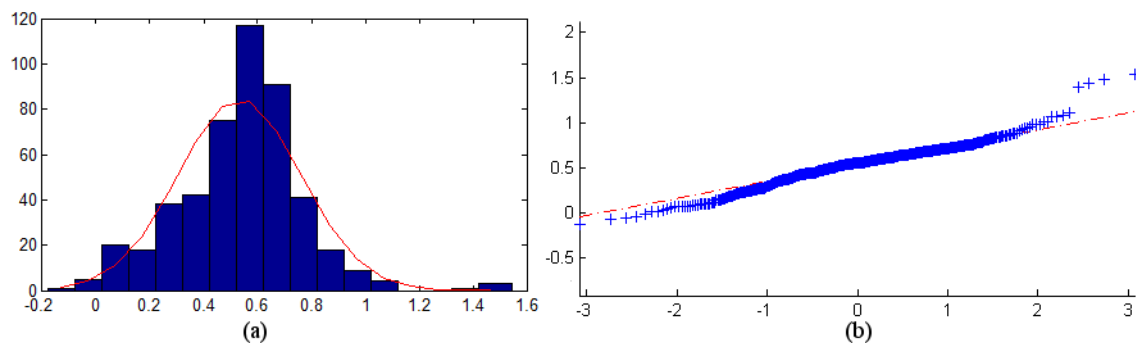
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \mu)^2} = 0,229 \text{ m} \quad (4)$$

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

Simulacija vodostaja na osnovi DMV 5

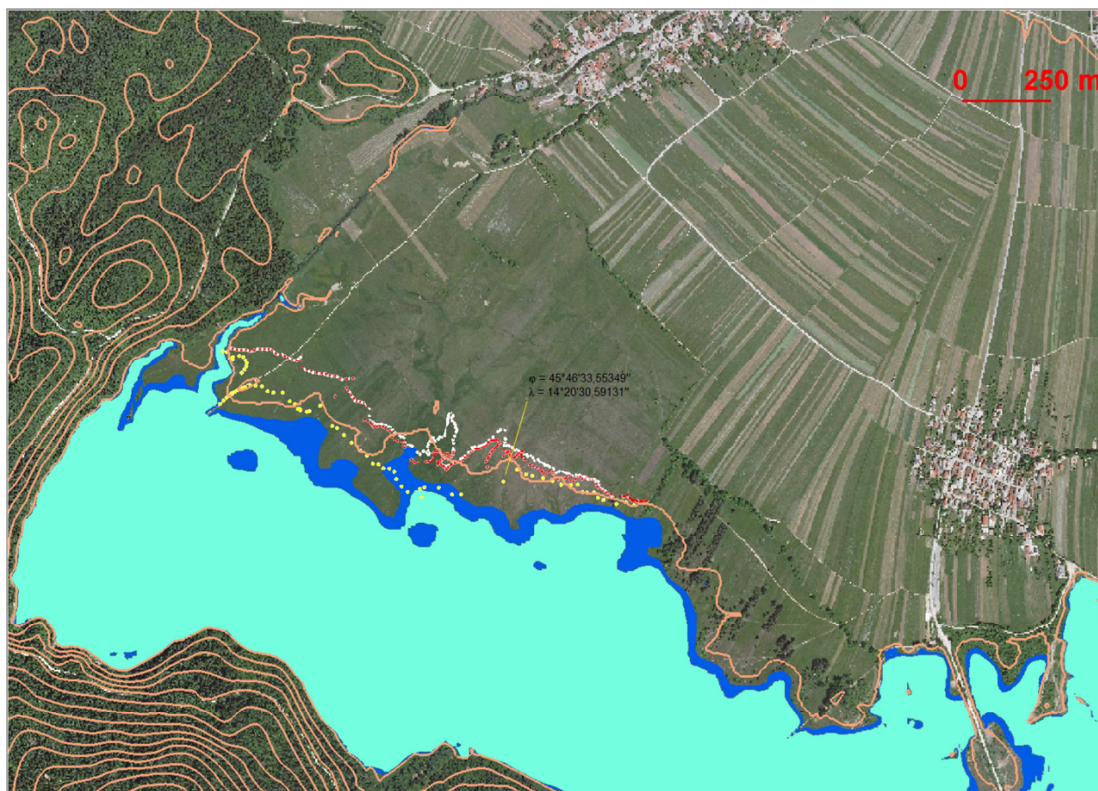
Grafično smo gladino jezera predstavili s presekom DMV 5 z ravnino, ki je imela višino enako nadmorski višini gladine jezera. Nadmorsko višino gladine jezera smo pridobili s terenskimi meritvami, nadalje pa smo izračunali srednjo vrednost nadmorskih višin, ki smo jih pridobili z diskretno izmerjenimi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



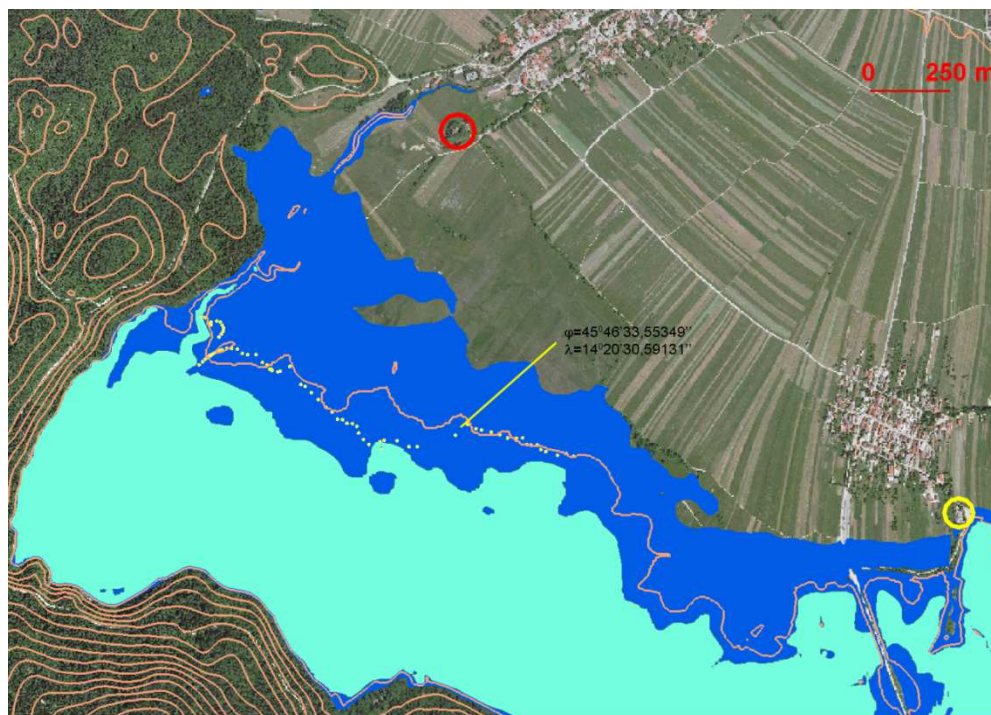
Slika 4: Prikaz srednje nadmorske višine gladine jezera dne 15.3.2014 (DOF050 v novem koordinatnem sistemu D96/TM, DMV 5).

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

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



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



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

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

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

Zaključek

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

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

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

Zahvala

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

Literatura

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