

POMEN GEODETSKIH PODATKOV PRI ANALIZAH POPLAV

THE IMPORTANCE OF GEODETIC DATA IN FLOOD ANALYSES

Lidija Globevnik, Dunja Zupan Vrenko

UDK: 528:627:51

IZVLEČEK

Poplavno vodo matematično modeliramo z uporabo Saint Venantovih enačb, pri čemer je ključen podatek o višini terena in vode. Za dober rezultat potrebujemo dobre in natančne podatke o terenu in višini zabeležene poplavne vode, za katero poznamo pretočne količine. Metode daljinskega zaznavanja dajejo uporabne podatke o terenu in višini poplavne vode. Pazljivost je potrebna pri geolociranju posnetkov in njihovi interpretaciji. Infrardeči (IR) posnetki poplav iz leta 2010 so se izkazali za dobre in uporabne. V članku so prikazani rezultati interpretacije vseh posnetkov.

KLJUČNE BESEDE

poplava, hidravlično modeliranje, infrardeča kamera, LiDAR, geodetski podatek

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.08

ABSTRACT

Floodwater is mathematically modelled with the use of St Venant's equations. The key data is the elevation of water. For better results, accurate information about the terrain and flood water heights recorded with known flow rates is needed. Remote sensing methods provide very useful information for terrain and flood water heights. Care should be taken with geo-referencing and image interpretation. Infrared (IR) images of floods in 2010 have proven to be good and useful for flood management. This article presents the results of interpretation of all the IR images taken.

KEY WORDS

flood, hydraulics modelling, infrared camera, LiDAR, geodata

1 UVOD

Popisi in raziskave poplavnih dogodkov, njihovo statistično in verjetnostno opredeljevanje ter napovedovanje najbolj verjetnega tveganja ob morebitnem vnovičnem pojavu so nujni za uspešno in verodostojno upravljanje vodne infrastrukture, vodnih in priobalnih zemljišč ter za načrtovanje rabe prostora. Geodetski podatki so podlaga za vsako strokovno in znanstvenoanalitično delo na tem področju. Tako največji obseg poplav na nekem območju prikazujemo na topografskih digitalnih ali analognih kartah različnih redov natančnosti oziroma meril. Na kartah vizualiziramo tudi globine poplavne vode in hitrosti. Ob dogodkih meritev ne moremo izvajati, lahko pa na podlagi dobrega popisa in označenih sledi poplavne vode pozneje določimo položaj oznake in izmerimo višino poplavne vode. Z razvojem matematičnega modeliranja vodnih tokov, geografskih informacijskih sistemov, digitalnih modelov terena in novih tehnologij za množični zajem podatkov o terenu uporabljamo tudi matematične modele poplav, katerih rezultati so tudi »karte« poplavne nevarnosti. Karte z ustrezno dogovorjenimi simboli prikazujejo območja

z različno globino in hitrostjo poplavne vode ter največji mogoč obseg poplave ob različno verjetnih dogodkih.

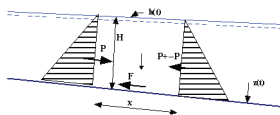
Na podlagi kart se odločamo o varovalnih in izravnalnih ukrepih za zmanjševanje ogroženosti zdravja ljudi, gospodarskih in stanovanjskih objektov ter okolja. Problematiko ogroženosti zaradi poplav rešujemo na veliko načinov. Dosedanji koncept je bil odpraviti poplave v naseljih in na kmetijskih površinah (povečati poplavno varnost). Zaradi negativnih vplivov takega pristopa pa se je doktrina prevesila v zmanjševanje poplavne ogroženosti (odklon od odpravljanja poplav »pri sebi«). To pomeni, da se poplavam »izmikamo« in preprečujemo škodo. Zavestno torej sprejemamo nekatera tveganja in se nanje pripravimo. Karte poplavne nevarnosti so sredstvo, ki ga uporabljamo za sporazumevanje glede ogroženosti in tveganj. Poplave računsko modeliramo z uporabo hidravličnih enačb toka vode v strugi ali ravnini. Za ta namen je treba imeti ne le dobre podatke o terenu, strugi in poraščenosti, temveč tudi dobre podatke o nastalih poplavah, s katerimi model umerjamo. V članku predstavljamo teoretične podlage za modeliranje ter primere zajema in popisa poplav.

2 TEORIJA MODELIRANJA POPLAV

2.1 Hidravlično modeliranje

Tok plitke vode s prosto gladino opišemo s Saint Venantovima enačbama, in sicer enačbo ohranitve momentov in enačbo ohranitve mase.

Enačba ohranitve momentov ponazarja fizikalno zakonitost, da je neto povečanje momentov (ΔM) v nekem času (Δt) enako skupnemu neto prilivu (fluksu) v kontrolno prostornino tekočine (M_p) in vsoti zunanjih sil, ki na tekočino delujejo v tem času (slika 1). Zunanje sile so hidrostatični pritisk (F_p , $F_p + F_p$) na zunanji strani kontrolne prostornine (odvisna od višine vodnega stolpca H), sila trenja (F_f) in sila gravitacije (F_g), ki ponazarja prispevek zemeljskega pospeška po vzdolžni razdalji kontrolne prostornine struge (x). Matematični izraz enačbe ohranitve momenta prikazuje enačba 1, posamezne komponente enačbe 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 in 1.5. Enačba za ohranitev momenta se numerično rešuje z izpeljano enačbo s parametri, ki jih lahko merimo (pretok, višina vode, prečni prerez profila). Koefficient C izraža vpliv trenja in izgub energije zaradi različne oblike profilov v vzdolžni smeri toka vode.



Slika 1: Koncept enačbe ohranitve momenta (povzeto po DHI Software, 1D Dynamic Modeling, 2012)

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{\Delta(M * v)}{\Delta x} + \frac{\Delta F_p}{\Delta x} - \frac{\Delta F_f}{\Delta x} + \frac{\Delta F_g}{\Delta x} \quad \dots \text{ enačba 1}$$

$$M = \rho * H * b * v \quad \dots \text{ enačba 1.1 (moment)}$$

$$M_f = \rho * H * b * v * v$$

... enačba 1.2 (neto priliv)

$$F_p = \frac{1}{2} * \rho * b * H^2$$

... enačba 1.3 (hidrostatični pritisk)

$$F_f = \Delta x * b * \frac{\rho * g * v^2}{c^2}$$

... enačba 1.4 (sila trenja)

$$F_g = \rho * g * A * S_0$$

... enačba 1.5 (sila gravitacije)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{g * Q^2}{C^2 * A * R} = 0$$

... enačba 2 (ohranitev momenta)

Kjer je:

ρ ... gostota vode

h ... višina vode

b ... širina vodne gladine

v ... hitrost vode

x ... dolžina kontrolnega prereza

g ... gravitacijski pospešek

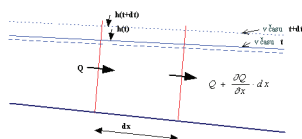
c ... koeficient trenja

A ... površina prečnega prereza

S_0 ... višinska razlika dna struge (padec)

R ... hidravlični radij (razmerje med površino prečnega profila, ki je napolnjen z vodo, in omejenim obodom profila)

Po zakonu ohranitve mase je neto povečanje mase vode v izbranem časovnem obdobju v kontrolni prostornini enako neto masnemu prilivu v kontrolno prostornino iz masnega odliva iz kontrolne prostornine. Matematični izraz za zakon ohranitve mase pri toku vode v reki je podan v enačbi 3, pomen izrazov pa na sliki 2, ki prikazuje koncept ohranitve mase (povzeto po DHI Software, 1D Dynamic Modeling, 2012).



Slika 2: Koncept enačbe ohranitve mase (povzeto po DHI Software, 1D Dynamic Modeling, 2012).

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

... enačba 3 (enačba ohranitve mase)

Predpostavke pri uporabi enačb so:

- tok je enodimenzionalen (prevladuje tok v vzdolžni smeri struge, prečno strujanje je majhno);
- velja zakon hidrostatične porazdelitve pritiskov po vertikali;
- vodna gladina prečno na profil je horizontalna;
- vzdolžna ukrivljenost struge je majhna;
- padec dna struge je majhen ($S_0 < 0.18$ ali $\theta \leq 10^\circ$; θ : kot med horizontalno referenčno ravnino in vzdolžno povprečno linijo višin struge na odseku (French, 2004));
- vpliv upora je izražen z Manningovo enačbo;
- tekočina je nestisljiva in homogena.

Z numeričnimi metodami reševanja sistema zgoraj opisanih parcialnih enačb simuliramo višine vodne gladine v strugi reke ob izbranem pretoku, podanih topografskih podatkih struge in predpostavljenih koeficientih trenja. Za modeliranje toka vode v strugi reke torej uporabimo enačbo ohranitve momenta in enačbo ohranitve mase. Modeliranje je enodimenzionalno (1D). Ko voda ob določenem pretoku doseže zgornji rob struge, se začne preplavljanje priobrežnih površin. Ob velikih pretokih se začne obsežno prelivanje, poplavljeni so večje površine. Pri modeliranju toka vode po poplavnih površinah se uporablja enačba ohranitve mase, preračunavanje pa poteka v obeh horizontalnih smereh. Modeliranje je dvodimenzionalno (2D). Pri tem modeliranju je najbolj pomembno dobro poznati višinsko topografijo terena, ki med poplavami pomeni »dno plitkih jezer«, pri čemer voda struja v smeri dominantnih energijskih padcev.

2.2 Vhodni podatki in vpliv njihove kakovosti na rezultate modeliranja

Za modeliranje poplavnih voda je treba imeti topografske in hidravlične podatke. Topografski podatki so horizontalna pozicija struge, višinske pozicije struge in vodnih ter drugih objektov v strugi ali na njenih brežinah. Enako pomembni so podatki o topografiji poplavnih površin. Vsi morajo biti vezani na isto višinsko referenco. Hidravlični podatki so podatki o velikosti pretokov, višini vodnih gladin ob določenih pretokih ter znan odnos med višino vode v strugi in pretoki (pretočne krivulje). Pri modeliranju večinoma izračunamo višino vode ob nekem pretoku, ob velikih pretokih pa tudi območja poplav, globine vode, ki nastopajo na njih, in hitrosti toka vode. Poleg vseh topografskih podatkov je glavni vhodni podatek za račun neki pretok, višine vode in hitrosti vode ob njem pa so rezultat. Za dober rezultat pri določanju poplavnih površin potrebujemo ne le dobre topografske podatke, temveč predvsem dobre podatke o višinah vode ob znanih pretokih, ki jih uporabimo za kalibracijo in verifikacijo modela. Žal je podatkov o izmerjenih višinah vode ob poplavah malo, negotovosti pa je veliko tudi pri določanju bistvenih pretokov ob takih dogodkih.

V Sloveniji lahko modelist brez večjih težav pridobi natančne horizontalne pozicije struge in poplavnega terena, saj so na voljo enotno referirani digitalni zapisi. Dodajanje specifičnih

elementov (pozicij vodnih objektov ali drugih objektov) ni problematično, saj je vzpostavljen samodejni enotni referenčni sistem. Težave se pojavijo pri višinskih pozicijah strug in vodnih gladin pri poplavah. Iz enačbe 2 in 3 sledi, da so predvsem višine vode (H) ena izmed najpomembnejših komponent. Iz razlike v višinah vode in znanih velikosti omočenih (aktivnih) prerezov (A) na kontrolnem odseku lahko določimo pretoke (Q), umerjamo in verificiramo model ter izračunamo prostornino (maso) vode, ki se je razlivala na poplavne površine.

Sledi poplavne vode, ki jo pozneje uporabimo za umirjanje ali verifikacijo modela, določitve prostornine in višin poplavne vode na neki površini, lahko določimo na dva načina. Prvi je terenski ogled, pri katerem poiščemo ter jasno in nedvoumno označimo razpoznavno sled najvišje vode na stabilnih objektih. Pozneje sledi tudi višinsko opredelimo in izrišemo karte. Drug način je terenska daljinska zaznava dogodka z ustreznimi kamerami in zapisi odbojev ali slik poplav. Problematika natančnosti določitve višinskih pozicij na terenu označenih sledi poplav na Ljubljanskem barju leta 2010 je predstavljena v članku Koler in drugi (2012). Uporaba produktov daljinsko zaznanega dogodka je analizirana v nadaljevanju.

3 DALJINSKO ZAZNAVANJE

Zračno lasersko skeniranje ali LiDAR (angl. Light Detection and Ranging) je tehnologija daljinskega zaznavanja zemeljskega površja in objektov na njem, ki se je razvila v začetku 80. let. Predvsem za potrebe izdelave geodetskih načrtov pa je z razvojem sistemov pozicioniranja (GPS in IMU – sistem za pozicioniranje letala) postala ena od temeljnih metod za pridobivanje in obdelavo podatkov o zemeljskem površju. LiDAR je instrument, ki pošilja impulze na zemeljsko površje ter z merjenjem razdalje na podlagi potovanja impulza do zemeljskega površja in nazaj do sprejemnika pridobiva podatke o položaju opazovanih predmetov. LiDAR nam poleg podatka o razdalji daje še podatke o kotu, času in intenziteti odboja. Senzor LiDAR-ja deluje v vidnem ali infrardečem delu spektra, valovna dolžina zaznavanja pa je približno od 800 do 1100 nm, kjer je odbojnost rastlinstva največja, nevarnost za človekov vid pa najmanjša. Vzporedno z laserskim zajemom lahko poteka fotografsko snemanje (v vidnem in infrardečem delu spektra), saj tako lahko dobimo več vzporednih izdelkov.

LiDAR in aerofotogrametrija omogočata pridobitev velike množice podatkov v izredno kratkem času in neodvisno od vremena. Po ustrezni obdelavi lahko dobimo več izdelkov: digitalni model reliefa (DMR), ortofoto (v vidnem delu spektra, v barvah ali infrardečem delu spektra), geodetski načrt in druge načine predstavitve površja.

4 MATERIALI IN METODA DELA

Poplavni dogodek v jeseni 2010 je bil zabeležen z infrardečo kamero in zračnim laserskim skeniranjem. Snemanje je izvedlo podjetje GEOIN Maribor. Zajeli smo poplavne linije, ki jih lahko razberemo z infrardečih posnetkov. Tako smo želeli dopolniti obstoječe opozorilne karte poplav (Atlas okolja, vir podatkov IzVRS). Opis zanesljivosti zajetega podatka omogoča zanesljivejšo interpretacijo in določitev poplavnih območij. Snemanje je bilo izvedeno na desetih območjih: Cerčno, Grosuplje, Krka, Ljubljansko barje, Logatec, Mirna, Ribnica, Sava, Temenica in Videm (Geoin, 2012).

Postopek obdelave podatkov je razdeljen na tri faze. V **prvi fazi** so se zajemale poplavne linije in izdelovali poplavni poligoni za območja Mirne, Save, Cerknega, Krke, Logatca, Ribnice in Temenice. Digitalizacija poplavnih linij z IR-posnetkov se je izvajala v koordinatnem sistemu D48 v programskem paketu »Global Mapper 13«, ki omogoča hitro obdelavo. Pri zajemu poplavnih linij je bil posamezni liniji dodan atribut zanesljivosti (glej opis atributa v nadaljevanju). Poplavne linije so bile nato izvožene v linijski sloj v obliko »shape«. Izdelava poplavnih poligonov, ki so jim bili dodani atributi, je nato potekala v okolju ArcGIS na podlagi zajetih poplavnih linij, ki so bile topološko urejene.

V **drugi fazi** so se dopolnjevale poplavne linije in poplavni poligoni za območja Ljubljanskega barja, Grosupljega in Vidma. Izvajali so se tudi prvi popravki za območje Mirne, Temenice in Grosupljega.

Za obnovo opozorilne karte poplav je bila predlagana analiza zanesljivosti zajetih podatkov poplavnih poligonov (prva in druga faza) glede na plastnice. Menimo, da vektorski sloj plastnic GKB25 ni ustrezen za uporabo pri kontroli poplavnih poligonov zaradi težave manjše natančnosti podatkov o višinah (razmik plastnic znaša 5,0 metra, kar je preveč). Kontrolo višin smo zato izvedli na podlagi rastrskega sloja plastnic TTN5/10, ki so bolj natančne (razmik 2,5 metra). Ugotavljamo, da na posameznih območjih zaradi sprememb v prostoru in neizvedene obnove listov TTN5/10 tudi ta kontrola ni zanesljiva. Kontrole zanesljivosti po višinski natančnosti zato nismo izvedli, jo pa predlagamo glede na izbrano metodo v prihodnje. To bi bila **tretja faza**. V njej je treba obnoviti topologijo popravljenega poligonskega sloja.

5 REZULTATI IN RAZPRAVA

5.1 Težave zajema podatkov

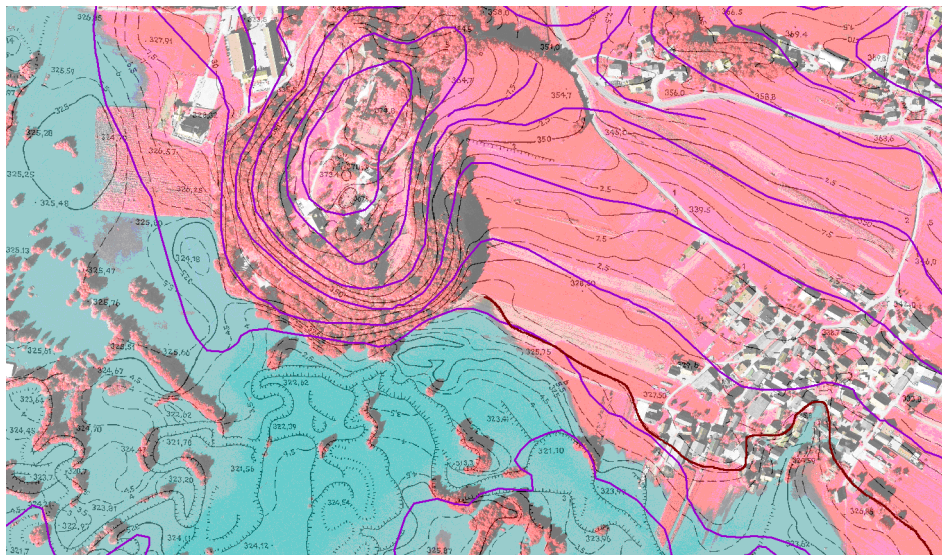
INTERPRETACIJA podatkov je otežena na območjih gozda ter nizke oblačnosti in meglic, kjer ni jasno viden potek poplavne linije, ali na območjih tako imenovanih »hot spotov«, kjer je posnetek preveč osvetljen (»prežgan«). Interpretacija posnetkov je otežena tudi na koruznih poljih, kjer zaradi visokega rastlinja ni videti, ali so tla prekrita z vodo. Nekateri posnetki so bili narejeni tudi po tem, ko je voda z nekaterih območij že odtekla, zato je pri interpretaciji treba upoštevati tudi to možnost.

NAPAČNA GEOLOKACIJA POSNETKOV: IR-posnetki za območje Ribnice (slika 3) so bili napačno geolocirani, zato umestitev poplavnega območja v prostor zahteva dodatno delo.



Slika 3: Napačna geolokacija IR-posnetkov za območje Ribnice ($dx \approx 368$ m, $dy \approx 95,4$ m) glede na sloj kataster stavb

Poleg navedenega se je v tretji fazi pojavila težava vira plastnic. Izkazalo se je, da vektorski sloj plastnic GKB25 zaradi manjše natančnosti ni ustrezen za uporabo pri kontroli poplavnih poligonov. Rastrski sloj plastnic TTN5/10 je bolj ustrezen, vendar na posameznih območjih odstopa zaradi sprememb v prostoru in neizvedene obnove listov TTN5/10.



Slika 4: Linijski sloj plastnic GKB25 (vijolična linija), rastrski sloj plastnic TTN5, označena kota plastnice 327 metrov (rjava linija)

Kontrola glede na sloj plastnic še ni bila opravljena na celotnem območju, izvedeni so bili le posamezni pregledi na območju Logatca in delno na območju Grosupljeja.

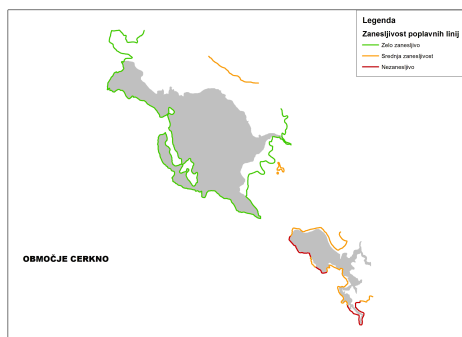
Na sliki 12 so prikazani IR-posnetki in obseg poplav na območju Ribnice (kota severnega dela 535 metrov nadmorske višine, kota južnega dela 466 metrov, velikost območja poplav 12,7 km² površine).

Poplave ob Savi (slika 13) so se razprostirale na 43,44 km² veliki površini, linije so bile zajete z veliko zanesljivostjo.

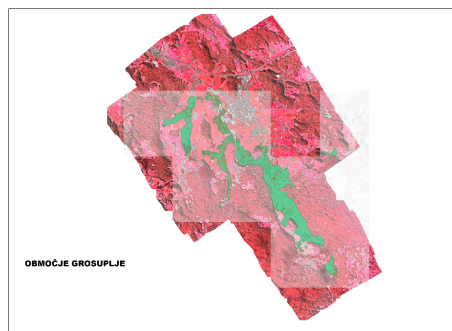
Na sliki 14 je prikazan obseg poplav na območju Temenice (4,97 km² površine, srednja do zanesljiva poplavna linija).

Poplave na območju Vidma (slika 15) so segale od 450 do 425 metrov nadmorske višine in pokrile 9,43 km² površine. Severovzhodno in jugozahodno območje poplav je bilo zaradi gozdnega območja zajeto s srednjo oziroma ponekod tudi manjšo zanesljivostjo. Poplavne linije drugih predelov so bile zajete z veliko zanesljivostjo.

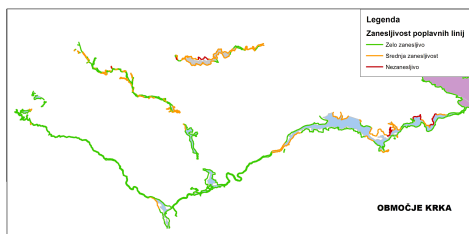
Skupna velikost poplavljenih območij (velikost površin, ki jih določajo poplavne linije na slikah od 6 do 15) je 242,93 km².



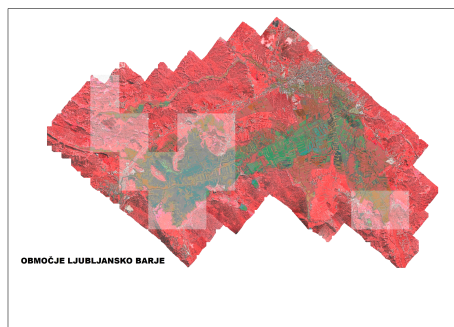
Slika 6: Območje Cerknega



Slika 7: Območje Grosupljega



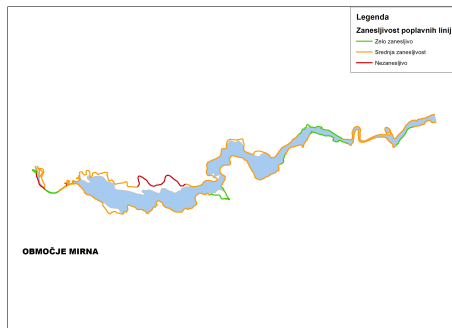
Slika 8: Območje Krke



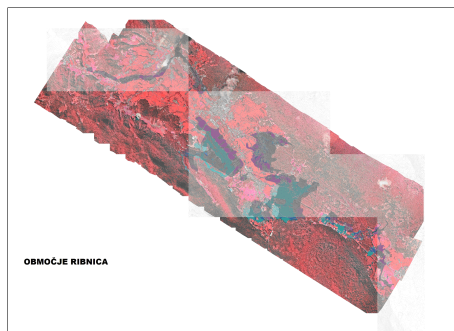
Slika 9: Območje Ljubljanskega barja



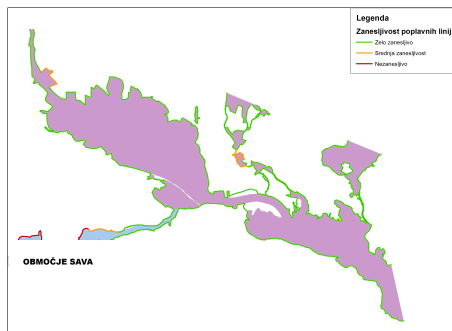
Slika 10: Območje Logatca



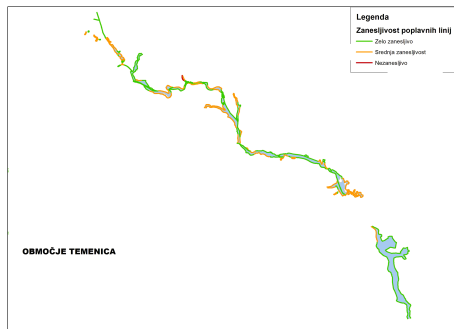
Slika 11: Območje Mirne



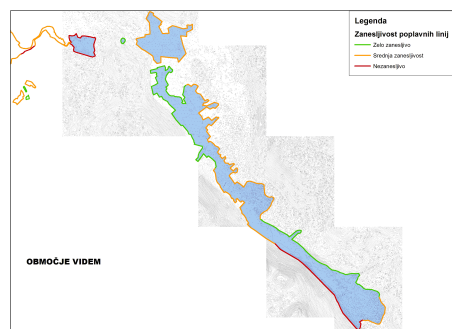
Slika 12: Območje Ribnice



Slika 13: Območje Save



Slika 14: Območje Temenice



Slika 15: Območje Vidma

Zaradi napake pri geolokaciji IR-posnetkov za območje Ribnice je treba preveriti vzroke za napačno geolokacijo posnetkov in izvesti ponovno lociranje. Za potrebe opozorilne karte poplav se izvaja kontrola poligonskega sloja poplav glede na plastnice TTN5/10 in kontrola poplavnih linij na terenu (opisano v članku Koler in drugi, 2012).

Na Ljubljanskem barju je bila prva določitev višin vode na robovih narejena že novembra 2010. Uporabili smo karto DTK5 in obstoječe terenske podatke velike natančnosti (lidarske podatke). Na nekaterih površinah smo s terenskim ogledom določili geodetske oslonilne točke za poznejšo geodetsko izmero višin (Koler in drugi, 2012). Izračunali smo površine in prostornine poplav. Tako smo že konec leta 2010 izračunali, da je bilo dne 20. 9. 2010 poplavljenih 76,8 km² površin s prostornino vode 34 milijonov m³ (Globevnik in Vidmar, 2010). Glede na podatke o padavinah, ki jih je kot izohipse prikazal ARSO takoj po dogodku, je bilo določeno, da je pri količini padavin od 280 mm do 220 mm (med 17. 9. in 19. 9. 2010), ki so padle na prispevno območje Ljubljanskega barja, koeficient odtoka znašal 0,65. Območje poplav, ki je bilo zaznано z IR-kamero, je skoraj enako območju poplav, ki imajo na Atlasu okolja oznako »katastrofalno«. To označuje dogodek s povratno dobo nad 50 let. Glede na podatke o padavinah, površinah in prostorninah ter tako izračunane koeficiente odtoka ugotovimo, da je verjetnost za nastop poplave znašala 1 %, kar je ugotovila tudi Kobolt (2011).

6 SKLEP

Podatke (lidarske podatke, TTN5/10) smo uporabili za določitev površin, prostornin in orientacijskih višin poplavne vode. Napake, ki jih je še treba odpraviti, so nekatere geolokacije IR-posnetkov (na primer za območje Ribnice). Treba jih je preveriti in izvesti ponovno lociranje. Za potrebe opozorilne karte poplav izvajamo še kontrolo poligonskega sloja poplav glede na plastnice TTN5/10 in kontrolo poplavnih linij na terenu (opisano v članku Koler in drugi, 2012).

Analiza poplav iz leta 2010 z IR-posnetki je izrednega pomena za politiko obvladovanja poplavne ogroženosti. Posnetki iz septembra 2010 so bili večinoma narejeni na višku poplav oziroma dan zatem. Kjer se je voda že umaknila, so se njene sledi še vedno prepoznale in omogočale digitalizacijo poplavnih linij. Tako zajete podatke je treba: a) dopolniti z drugimi informacijami iz daljinskega zaznavanja (poraščena, stereofotointerpretacijavišin iz letalskih posnetkov); b) povezati s podatki s terena (kontrola območja poplav v naseljih, ob cestah, na koruznih njivah, gozdu ...), z barvnimi sledovi določiti dominantne smeri toka in c) dobljene rezultate primerjati z matematičnim modeliranjem.

Literatura in viri:

DHI Software (2012). Mathematical Background MIKE. 1D Dynamic Modeling.

French, R. H. (1999). Hydraulic of open channel flow. Hydraulic design handbook. L. Mays (ur.). McGraw-Hill.

Geoin, 2012. <http://poplave.geoin.si/> Poplave 2010.

Globevnik, L., in Vidmar, A. (2010). Poplave na Ljubljanskem barju v septembru 2010. Mišičev vodarski dan, 24–29.

Kobolt, M. (2011). Primerljivost poplave septembra 2010 z zabeleženimi zgodovinskimi poplavnimi dogodki. Comparison of Floods in September 2010 with Registered Historic Flood Event. Ujma, 25, 48–56.

Koler, B., Urbančič, T., Vidmar, A., Globevnik, L. (2012). Analiza višin poplavne vode v Ljubljani in na Ljubljanskem barju. Geodezija pri upravljanju z vodami. 41. geodetski dan. 19.–20. oktober 2012.

Prispelo za objavo: 21. oktober 2012

Sprejeto: 21. november 2012

dr. Lidija Globevnik, univ. dipl. inž. grad.

Inštitut za vode Republike Slovenije,

Hajdrihova 28c, 1000 Ljubljana

e-pošta: lidija.globevnik@guest.arnes.si

Dunja Zupan Vrenko, univ. dipl. inž. geod.

Inštitut za vode Republike Slovenije,

Hajdrihova 28c, 1000 Ljubljana

e-pošta: dunja.vrenko@izvrs.si