

# ANALIZA POPLAV Z UPORABO SATELITSKIH POSNETKOV – PRIMER HUDOURNIŠKE POPLAVE V SELŠKI DOLINI LETA 2007

ANALYSIS OF FLOODS USING SATELLITE IMAGES – CASE STUDY OF THE 2007  
TORRENTIAL FLOOD IN THE SELŠKA VALLEY

*Peter Lamovec, Matjaž Mikoš*

UDK: 556.166(497.4 Selška dolina)

## IZVLEČEK

V Geodetskem vestniku št. 54/2010-4 je bil predstavljen postopek strojnega učenja za določitev poplavljenih območij ob poplavah v Železnikih leta 2007 na podlagi satelitskih posnetkov SPOT. V tokratnem prispevku je analizirana uporabnost teh poplavljenih površin, prepoznanih na podlagi satelitskih posnetkov, za nadaljnjo hidravlično analizo. Na šestih izbranih merilnih mestih v strugi Selške Sore so bile določene hitrosti in pretoki reke. Raziskava je pokazala, da natančnost določitve poplavljenih območij na podlagi satelitskih posnetkov omogoča nadaljnje določanje hidravličnih parametrov. Za njihovo natančno določitev pa je potrebna tudi zadostna natančnost preostalih podatkovnih slojev. V našem primeru je bil uporabljen model DMV ločljivosti 12,5 metra, ki na razgibanem terenu s hitro spreminjajočimi se višinami ne omogoča dovolj natančnega izračuna hidravličnih parametrov. Velikost celic  $12,5\text{ m} \times 12,5\text{ m}$  namreč ne omogoča določitve površin pretočnega prereza, omočenega oboda in naklona z zadostno natančnostjo. Zaradi tega izračunani hidravlični parametri (pretočni prerez, omočeni obod, hidravlični radiji, nakloni dna, hitrosti in pretoki) odstopajo od pričakovanih vrednosti.

V prvem delu prispevka je podanih nekaj osnovnih informacij o daljinskem zaznavanju in različnih tehnikah njegove uporabe. Bralec se seznani tudi z nekaj praktičnimi primeri uporabe daljinskega zaznavanja (zlasti satelitskega) za opazovanje naravnih nesreč.

## KLJUČNE BESEDE

hudourniške poplave, satelitski posnetki, DMV, hidravlični parametri, pretok

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

## ABSTRACT

An application of data mining for the determination of flooded areas was published in the Journal Geodetski vestnik (no. 54/2010-4). This paper analyses the usefulness of these results for further analyses of hydraulic parameters. The velocity and discharges were computed for six locations. The study showed that the flooded areas determined by satellite images can be used for further analyses. Nevertheless, other layers have to be sufficiently precise, especially the digital terrain model (DTM). DTM 12.5 was used. The study showed that DTM 12.5 is not precise enough. The observed area is very rough and the hydraulic parameters (cross sectional area of flow, wetted perimeter, hydraulic radius, river-bottom slope, flow velocity, discharge) cannot be detected with sufficient precision. Consequently, the calculated hydraulic radiuses, velocities and discharges are out of expectations.

In the first part of the article, some basic information about remote sensing and its techniques is presented. Some practical examples of their usage (especially satellite images) for the observation of natural disasters are also given.

## KEY WORDS

flash floods, satellite images, DTM, hydraulic parameters, discharge

## 1 UVOD

Opazovanje in napovedovanje naravnih nesreč se je s pojavom satelitskega opazovanja Zemlje močno spremenilo in postaja vse bolj povezano s sateliti v vesolju. Za enega od ključnih trenutkov, ko sta postala opazovanje naravnih nesreč in satelitska tehnologija neločljivo povezana, lahko štejemo ustanovitev mednarodnega raziskovalnega programa Vesolje in velike nesreče leta 2000 (<http://disasterscharter.org/home>). Program je uradno začel delovati 1. novembra 2000 in je bil prvič praktično uporabljen ob drobirskem toku v Logu pod Mangartom leta 2000 (Oštir in sod., 2003). V prvem letu je bil program aktiviran enajstkrat, nato pa se je njegova izkoriščenost povečevala in oktobra 2010 je dosegla že 39 aktivacij. Med zadnjimi nesrečami, ki so bile opazovane s tem programom, so bile poplave v Sloveniji septembra 2010.

Satelitsko opazovanje zemeljskega površja dobiva torej vse pomembnejšo vlogo pri zagotavljanju varovanja pred naravnimi nesrečami. K razvoju satelitskega zaznavanja v zadnjih letih vse več prispeva tudi Slovenija, ki ni več le pasivna uporabnica satelitskih posnetkov ob naravnih nesrečah, ampak dejavno sodeluje na tehnološkem področju, na področju obdelave satelitskih posnetkov in pri razvoju aplikacij. V začetku leta 2010 je pridobila status sodelujoče države v evropski vesoljski agenciji ESA (European Space Agency). Leta 2010 je začel delovati tudi center odličnosti Space.si, ki bo zmanjšal razkorak med tehnološko močno razvitimi državami Evrope in Slovenijo, ki se po vlaganjih na področju vesoljskih raziskav uvršča zelo nizko celo med novimi članicami EU.

In zakaj so podatki, pridobljeni s satelitskim opazovanjem, sploh tako zelo uporabni za opazovanje različnih procesov na zemeljskem površju? Tovrstni podatki predstavljajo količino elektromagnetnega valovanja (energije), ki se odbije od zemeljskega površja. Vpadna energija se ob stiku s površjem absorbira, torej prodre skozi snov (transmisija), ali se od njega odbije. Razmerje med temi načini sodelovanja elektromagnetnega valovanja s površjem je odvisno od valovne dolžine svetlobe ter lastnosti (na primer razgibanost terena) in stanja (na primer vlažnost zemljine) površja (Oštir, 2006). To pa omogoča prepoznavanje pojavov na zemlji, ki so povezani z gibanjem zemeljskega površja (potresi, plazovi), vodami (poplave, cunamiji, neurja) ali ognjem (požari).

V prispevku je obravnavan primer hudourniških poplav v Železnikih septembra 2007. Železniki ležijo na jugovzhodnem robu spodnjih bohinjskih gora. Zaradi naravne izoblikovanosti terena (strma pobočja) območje močno ogrožajo hudourniške poplave in plazenje tal. Za oba pojava je značilno, da ju običajno povzroči isti dejavnik (tj. močno deževje), zato pogosto nastopita skoraj hkrati. Gorata območja z značilno izoblikovanostjo površja so poseben izziv za obdelavo satelitskih posnetkov. Strma pobočja in neraven teren otežujejo zlasti uporabo radarskih posnetkov, ki so se pokazali za manj uporabne od optičnih posnetkov tako pri drobirskem toku v Logu pod Mangartom (Oštir in sod., 2003) kot pri hudourniških poplavah v Železnikih (Kokalj in sod., 2008). Obakrat so se za optimalne izkazali optični posnetki SPOT, ki so bili uporabljeni tudi za določanje zemeljskih plazov v okolici Železnikov septembra 2007 (Jemec in Mikoš, 2008). Kljub temu je treba biti tudi pri interpretaciji optičnih posnetkov pozoren na sence zaradi nizkega položaja sonca v novembru, sneg na višjih višinah in oblake (Oštir in sod., 2003).

Številni primeri uporabe satelitskih posnetkov (Yonghua in sod., 2007; Wang in sod., 1995; Liu in sod., 2002; Frappart in sod., 2006) potrjujejo njihovo učinkovitost za prepoznavanje poplavljenih območij. Namen tega prispevka je prikazati uporabnost satelitskih posnetkov tudi za nadaljnje analize, zlasti za določitev hidravličnih parametrov, kot so višina poplavnih voda, pretok in hitrost poplavnega rečnega toka. Njihovo hitro poznavanje omogoča načrtovanje kakovostnih poplavnih sanacijskih ukrepov, ki temeljijo tudi na terenskem določanju posledic poplav. Pomembna je prav kombinacija uporabe satelitskih posnetkov ter terenskega prepoznavanja delovanja in posledic poplav.

## 2 OPAZOVANJE NARAVNIH NESREČ Z DALJINSKIM ZAZNAVANJEM

Tehnike daljinskega zaznavanja nam omogočajo opazovanje zemeljskega površja na daljavo, torej ne da bi prišli v neposreden stik z njim. Pri tem lahko opazujemo s tal (z oddaljenega stojišča), zraka ali vesolja. To je še posebej ugodno, ko je gibanje po opazovanem območju nevarno (naravne nesreče) ali ko se opazujejo težko dostopna območja (gore, puščave). Daljinsko zaznavanje je zelo učinkovito zaradi hitrosti in velikosti območja, ki ga je mogoče opazovati. V zelo kratkem času lahko namreč izvedemo opazovanja velikosti več 10 km<sup>2</sup>.

Naravne nesreče, kot so potresi, požari, poplave, hudourniški izbruhi, zemeljski plazovi, drobirske tokovi, skalni podori, snežni plazovi in podobno, so zelo pogoste. V takšnih primerih je izjemno pomembno hitro in učinkovito reševanje. Prizadeta območja so zaradi poškodovane infrastrukture običajno težko dostopna ali pa bi njihov obhod zahteval veliko časa. Opazovanja iz zraka so zato v takšnih primerih najhitrejša in pogosto edina možnost za določitev prizadetih območij. Pri tem ločimo med klasičnimi zračnimi opazovanji (aerofotogrametrija), zračnim laserskim skeniranjem in satelitskim opazovanjem iz vesolja.

Praktična uporabnost aerofotogrametrije se je pokazala že pri plazu Stože in drobirskem toku v Logu pod Mangartom, kjer je bilo najprej izvedeno interventno fotogrametrično snemanje plazišča Stože iz helikopterja, nato pa še letalsko snemanje širšega območja (Kosmatin Fras, 2001).

Poleg zračnih posnetkov je pri ugotavljanju posledic naravnih nesreč že povsem uveljavljena tudi uporaba satelitskih posnetkov. V uvodu smo že omenili nekaj avtorjev, ki so uspešno uporabili satelitske posnetke za prepoznavanje poplavljenih površin. V praksi so se tovrstni posnetki izkazali za koristne tudi pri prepoznavanju plazov (Singhroy in sod., 1998; Nichol in sod., 2006; Yamaguchi in sod., 2003; Komac, 2005). V obravnavanem primeru analize hudourniške poplave v Železnikih septembra 2007 določitev poplavljenih površin temelji na satelitskem posnetku ločljivosti 2,5 metra, ki v kombinaciji z digitalnim modelom višin omogoča določitev višine poplavnih voda.

Vse pogosteje se za prepoznavanje različnih lastnosti na zemeljskem površju uporablja tudi zračno lasersko skeniranje ali LiDAR (angl. light detection and ranging). Njegovo uporabnost za ugotavljanje nevarnosti naravnih nesreč na območju Alp so natančno opisali Podobnikar in sod. (2010). Zračno lasersko skeniranje omogoča prepoznavanje premikov gmot, erozije in podobnih pojavov z vertikalno natančnostjo 10 centimetrov. Čeprav je uporaba zračnega

laserskega skeniranja na področju naravnih nesreč še precej neuveljavljena tehnika, pa se je že pokazala njena učinkovitost. Z vizualno interpretacijo in numeričnimi analizami na podatkih LiDAR je mogoče prepoznavanje labilnih območij in območij aktivnega plazenja tal. Prednost laserskega skeniranja pred drugimi tehnikami (na primer InSAR) je zlasti dobro prepoznavanje lokalnih topografskih sprememb (Glenn in sod., 2006).

### 3 PRIMERI UPORABE SATELITSKIH POSNETKOV ZA PREPOZNAVANJE POPLAV IN ZEMELJSKIH PLAZOV

Med najbolj pogostimi naravnimi nesrečami v Sloveniji so zemeljski plazovi in poplave (Mikoš in sod., 2004). Zaradi razgibanega površja, geološke sestave in podnebnih razmer v večjem delu Slovenije obstaja vsaj manjša verjetnost za pojav plazov. Podobno velja za verjetnost poplav. V nadaljevanju si bomo zato ogledali nekaj primerov uporabe satelitskih posnetkov za prepoznavanje poplavljenih površin in zemeljskih plazov.

#### 3.1 Poplave

Med nedavnimi poplavami v Sloveniji se je izkazalo, da veliko poseljenih površin stoji na poplavno nevarnih območjih. Pri tem se je pokazala potreba po podrobni karti poplavne nevarnosti, ki je za območje Slovenije še nimamo. Eden od virov podatkov pri njeni izdelavi bi bili tudi satelitski posnetki, ki so bili zelo uporaben vir informacij že med hudourniški poplavami v Železnikih leta 2007 (Kokalj in sod., 2008).

Poplave prizadenejo več ljudi kot katera koli druga naravna nesreča, z izjemo suše. Ker je najbolj učinkovit način zmanjšanja škode in žrtev zaradi poplav razvoj sistemov za opozarjanje, potekajo na tem področju številna raziskovanja. Opazovanje padavin je pri tem ključnega pomena in pomemben vir teh podatkov so podatki daljinskega zaznavanja. Marchi in sod. (2009) so pri analizi poplav v Železnikih septembra 2007 uporabili radarska opazovanja padavin (vremenski radar na Lisci), terenska opazovanja in pričevanja očitvidcev. Pri opazovanjih na terenu je pomembna njihova čim hitrejša izvedba, da ne bi posledice poplav izginile zaradi že pričelih obnovitvenih del in morebitnih novih poplav. Kokalj in sod. (2008) so za analizo istih poplav pridobili posnetke različnih satelitskih sistemov. Posnetki so se med sabo razlikovali po času in območju elektromagnetnega spektra, v katerem posamezen satelitski sistem snema površje. Tako je bilo mogoče prepoznati dobre in slabe lastnosti posameznih satelitskih sistemov ter zagotoviti kakovostnejšo določitev poplavljenih območij.

Za opazovanje poplav se sicer pogosteje uporabljajo radarski posnetki. Vodne površine povzročajo značilen odboj radarskega valovanja, ki se razlikuje od odboja od preostalih površin. Poleg tega je radarsko valovanje neodvisno od dnevne svetlobe (lahko opazujemo tudi ponoči) in prodira skozi oblake (lahko opazujemo, tudi če je oblačno), ki sicer veljajo za največjo oviro pri optičnih posnetkih. Vidni in bližnji infrardeči del elektromagnetnega spektra, ki ga uporabljajo optični satelitski sistemi, namreč skozi oblake ne prodre, zato so v oblačnem vremenu neuporabni.

Radarski podatki so bili uporabljeni za opazovanje poplav na Nizozemskem leta 1995 (Wang in sod., 1995) in na območju reke Nenjiang leta 1998 (Liu in sod., 2002). Na Kitajskem so

satelitski posnetki Radarsat omogočili hitro in natančno dinamično določanje gibanja poplav na območju, velikem  $278 \text{ km} \times 221 \text{ km}$ . V kombinaciji z optičnimi posnetki Landsat TM je bila določena tudi pokrovnost tal in nastala škoda. Opazovanje poplav na Nizozemskem pa je temeljilo na primerjavi posnetkov iz različnih časovnih obdobj (pred poplavami in po njih). Radarska opazovanja po poplavah so primerjali s posnetki pred njimi. S kombiniranjem različnih kanalov posnetka Landsat TM in posnetkov SAR ter s tehnikami izboljšanja podob (filtriranje, različni barvni prikazi, izboljšanje kontrasta) so dosegli jasno razlikovanje med različnim tipi površja (vode, kmetijske površine, poplavljene kmetijske površine itd.).

Iz zgornjih primerov lahko ugotovimo, da se učinkovitost daljinskega zaznavanja močno poveča z analizo večsenzorskih posnetkov in analizo posnetkov iz časovno različnih obdobj (pred nesrečo in po njej). Posnetki SAR so izrednega pomena zaradi zmožnosti opazovanja skozi oblake, ki so ob poplavah pogosto prisotni. S kombiniranjem posnetkov SAR ter posnetkov vidnega in IR-spektra pa lahko še povečamo učinkovitost daljinskega zaznavanja za opazovanje naravnih nesreč.

### 3.2 Zemeljski plazovi

Za območje celotne Slovenije je bila izdelana karta verjetnosti pojavljanja plazov (Komac in Ribičič, 2006). Iz nje je razvidno, katera območja so še posebej ogrožena zaradi plazov. Pri izdelavi karte in med posredovanjem ob enem najhujših plazov v Sloveniji, to je plazu Stože nad Logom pod Mangartom leta 2000, so bili med drugimi podatki uporabljeni tudi satelitski posnetki. Pri tem so se zelo izkazali zlasti optični posnetki.

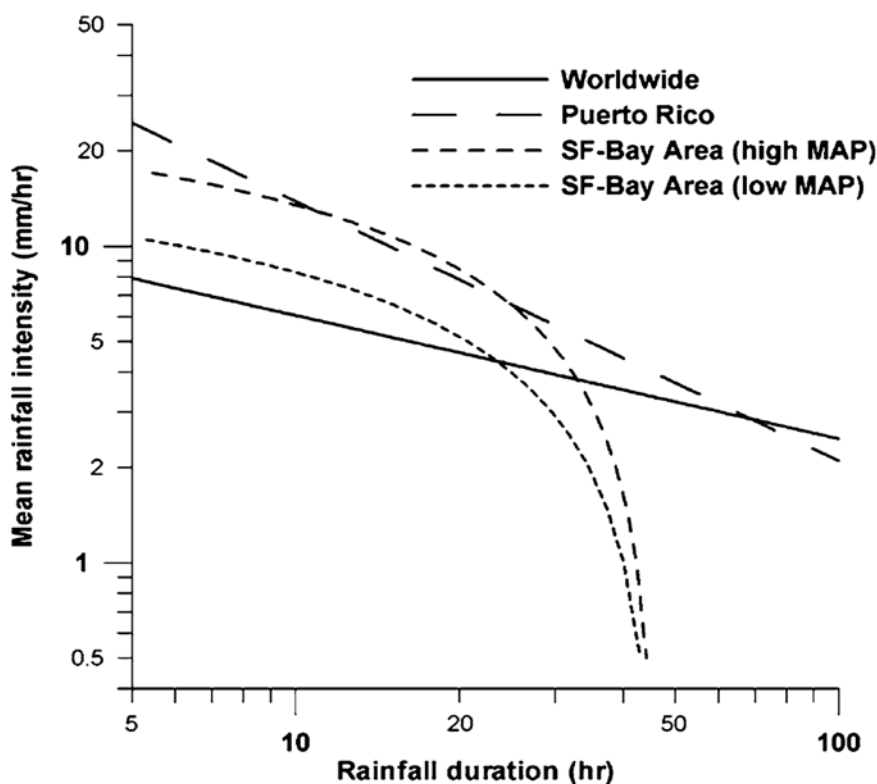
Zanimivo metodologijo določanja verjetnosti pojavljanja plazov z nadzorovano in nenadzorovano klasifikacijo iz satelitskih posnetkov sta uporabila Jemec in Mikoš (2008). Cilj njune raziskave je bil prikazati razliko v verjetnosti pojavljanja plazov na območju poplav v Železnikih (2007) pred ujmo in po njej. Vrednost njune raziskave se skriva zlasti v združevanju velike količine različnih vrst podatkov - od karte poplavnih linij, karte erozije in poškodb, nastalih ob neurju, geološke karte, satelitskih posnetkov do informacijskih slojev, izpeljanih iz digitalnega modela višin DMV 12,5.

Pri opazovanju zemeljskih plazov se je za zelo učinkovito izkazala tudi tehnika InSAR (angl. interferometric synthetic aperture radar). To je radarska tehnika, pri kateri se za določanje sprememb na površju Zemlje in sprememb v višini uporabljata dva ali več posnetkov SAR. Tehnika temelji na fazni razliki odbitega elektromagnetnega valovanja, ki se vrne k satelitu ali letalu. Z njo je mogoče zaznavati spremembe reda velikosti centimeter in se zato uporablja za prepoznavanje sprememb na površju, ki nastajajo v časovnih razmikih od nekaj dni pa do več let. Zaradi natančnosti je tehnika izredno uporabna za geofizično opazovanje naravnih nesreč (na primer vulkani in plazovi) in v gradbeništvu (opazovanje posedanja in stabilnosti).

Singhroy in sod. (1998) so za opazovanje plazov uporabili optične in radarske posnetke. Posnetki InSAR so se izkazali za najuporabnejše pri prepoznavanju lastnosti plazov, spremembah višin in naklonov. Radarski posnetki z večjim vpadnim kotom (od 40 do 60 stopinj) so najbolj uporabni za prepoznavanje značilnosti plazov na gorskih območjih. Za določitev lastnosti plazov na rečnih nanosih pa so uporabili kombinacijo optičnih in SAR-posnetkov. Tekoči plazovi na občutljivi

morski ilovici so bili določeni z letalskimi posnetki SAR. Tako so dokazali, da več vrst podatkov daljinskega zaznavanja zagotavlja več različnih lastnosti plazov, kar izboljša oceno tveganja.

Pri plitvejših plazovih na slabo utrjenih tleh je treba posebno pozornost posvetiti naklonu površja in prepojenosti tal z vodo (Iverson, 2000). Uporabna ocena padavinskih razmer, ki lahko privedejo do plazov, se običajno nanaša na empirično korelacijo intenzitete padavin in njihovega trajanja. Na sliki 1 (Hong in sod., 2007) so prikazani pragovi padavin, ki morajo biti doseženi za sproženje plazov na izbranih območjih. Empirični odnos med intenziteto in trajanjem padavin je regionalno specifičen, vendar se navadno potrdi pravilo, da se plazovi ob šibkejših padavinah prožijo, če so te dolgotrajne (večdnevne), po drugi strani pa se lahko sprožijo že ob kratkotrajnih močnih nalivih (tako je na primer na sliki 1 razvidna meja  $\sim 100$  mm v 24 urah ali  $\sim 60$  mm v 10 urah).



Slika 1: Primerjava pragov intenzitete padavin in trajanja padavin za območja Puerto Rico, San Francisco Bay Area in ves svet. Krivulji pragov za San Francisco Bay Area sta normalizirani na podlagi povprečnih letnih padavin (prevzeto iz Hong in sod., 2007).

Satelitsko opazovanje je omogočilo tudi razvoj številnih produktov, ki omogočajo skoraj hkratno posredovanje informacij. Primer je projekt TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, NASA), ki se uporablja za napovedovanje poplav in plazov. Ogrožena območja so določena na podlagi podatkov o padavinah s prostorsko ločljivostjo  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  in časovno ločljivostjo 3 ure (Hong in sod., 2007). Takšen sistem mora biti celovit. Vključevati mora podatke o padavinah in

podatke o značilnostih površja, kot so višina reliefa, geološka sestava tal in vrsta vegetacije. Šele upoštevanje vseh teh dejavnikov omogoča določitev območij, ki jim grozi nevarnost. Projekt je dosegljiv prek spleta na naslovu <http://trmm.gsfc.nasa.gov>.

## 4 ŠTUDIJA UPORABNOSTI SATELITSKIH POSNETKOV ZA DOLOČITEV HIDRAVLIČNIH PARAMETROV OB POPLAVAH

### 4.1 Študijsko območje in uporabljeni podatki

Obravnavano območje je zgornji del Selške doline, in sicer naselja Železniki, Selca in Dolenja vas. V prvi fazi je bila izvedena določitev poplavljenega območja, ki je slonela na kombinaciji različnih podatkov in njihovih atributov (preglednica 1). Podatki so bili določeni za izbrano število vzorčnih točk (učni vzorec). Na podlagi učnega vzorca smo s tehnikami strojnega učenja določili model, ki vsako celico uvrsti v razred poplavljenih oziroma nepoplavljenih površin. Izmed vseh atributov učne množice vzorcev so se za odločilne pri določitvi poplavljenih območij izkazali kanali B1, B3 in B4 satelitskega posnetka SPOT, indeks NDVI, ki je prav tako izračunan na podlagi satelitskega posnetka SPOT, oddaljenost od vodotokov in naklon. Celoten postopek določitve poplavljenih površin je podrobno opisan v prispevku Uporaba strojnega učenja za določitev poplavljenih območij – primer poplav v Selški dolini leta 2007 (Lamovec in Oštir, 2010).

Podatek	Atributi
satelitski posnetek SPOT	kanali B1, B2, B3, B4; indeks NDVI
DMV 12,5	višina, naklon, ukrivljenost
vektorski sloj HIDROGRAFIJA (GKB 25)	oddaljenost od vodotokov

*Preglednica 1: Atributi učne množice vzorcev, uporabljene pri strojnem učenju.*

Drugi del študije je bil namenjen določitvi hidroloških parametrov. Ti so bili za 22 merilnih mest vzdolž celotne Selške doline določeni že pri izvajanju projekta HYDRATE (Marchi in sod., 2009). V njihovi raziskavi je določitev hidravličnih parametrov slonela na terenskih meritvah. Opazovanja na več mestih pa so jim omogočila oceno natančnosti določitve konice poplavnega vala in reprezentativnosti posameznega merilnega mesta za izbrani del struge Selške Sore. V našem primeru je bilo izbranih šest merilnih mest (slika 2), osredotočenih na obravnavano območje naselij Železniki, Selca in Dolenja vas. Na njih nismo izvedli terenskih opazovanj, temveč so bili parametri za izračun pretoka pridobljeni s karte poplavljenih območij in digitalnega modela višin (DMV 12,5). Ta digitalni model višin (DMV 12,5) smo recimo uporabili že za modeliranje topografije površja pri dvodimenzijskem matematičnem modeliranju možnih drobirskih tokov na izbranih hudourniških vršajih v dolini Save Dolinke (Sodnik in sod., 2009).



Slika2: Prepoznana poplavljenjena območja v zgornjem delu Selške doline (temneje obarvana) in šest merilnih mest, na katerih so bili določeni pretoki (oštevilčena z vrednostmi od 1 do 6).

#### 4.2 Določitev hidravličnih parametrov

Glavni cilj je bil določiti pretok Selške Sore na šestih mestih v trenutku, ko je bila raven poplavne vode 18. septembra 2007 najvišja. Za oceno hitrosti vodnega toka v m/s smo uporabili Manningovo enačbo:

$$V=1/n \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)}.$$

V enačbi nastopajo naslednji parametri: površina pretočnega prereza ( $A$ , v  $m^2$ ), omočeni obod pretočnega prereza ( $P$ , v  $m$ ), hidravlični radij  $R=A/P$  (v  $m$ ), naklon struge ( $S$ ) in Manningov koeficient hrapavosti ( $n$ , v  $m^{-1/3}s$ ). Najprej smo v tlorisu (na posnetku) v izbranem prečnem prerezu določili višino točk na robu poplavljenega območja, za kar je bilo treba poplavljenno območje še nekoliko generalizirati (glajenje robov, odpravljanje nepoplavljenih otokov znotraj poplavljenega območja). Robnim točkam smo določili višine, da bi tako ocenili višino poplavnih vod in površine prečnih prerezov ( $A$ ), vendar se je pri tem izkazalo, da je natančnost digitalnega modela višin DMV 12,5 za izvedbo tovrstnih nalog premajhna. To se kaže v zlitju višine struge z višino površja v okolici (struga na DMV 12,5 tako rekoč ni vidna) in posameznih odstopanjih v višini poplavnih voda na obeh straneh rečne struge.

Težave zaradi nezadostne natančnosti digitalnega modela višin so se pokazale tudi pri določitvi naklona. Na podlagi njegove vrednosti je mogoče sklepati o velikih spremembah v naklonu dna struge, kar pa ne more biti pravilno, saj se naklon dna struge ne more bistveno razlikovati od naklona doline Selške Sore. Podobno velja za hidravlični radij, katerega vrednosti se precej razlikujejo med posameznimi merilnimi mesti in so pogosto prenizke glede na izkušnje ob poplavnih dogodkih (v širokih pretočnih prerezih je hidravlični radij približno enak povprečni pretočni globini vode). Tako so odstopanja vidna tudi pri pretočnih hitrostih, ki so relativno nizke. Na podlagi slednjega lahko trdimo, da model DMV 12,5 žal ne omogoča določitve hidravličnih



parametrov za oceno pretoka poplavnih voda z zadovoljivo natančnostjo. Natančnejšo informacijo o višini terena bi lahko pridobili z uporabo lidarskih podatkov (Mason in sod., 2010).

Za izračun hitrosti pretoka je nujno treba poznati tudi vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti  $n$ . Ta pomembno vpliva na pretok na izbranih mestih, zato je zelo pomembna pravilna izbira njegove vrednosti. Pri strmih rekah nanjo vpliva več parametrov, predvsem velikost plavin v strugi (hrapavostni upor), geometrija struge (oblikovni upor), globina vodnega toka (vpliv relativne hrapavosti) in prisotnost vegetacije (Mikoš, 1989; 1996). Marchi in sod. (2009) so terensko določili okvirne vrednosti Manningovega koeficienta  $n$  glede na vrsto vegetacije v strugi Selške Sore oziroma na bregovih ter glede na širino struge. V našem primeru smo uporabili tri različne vrednosti Manningovega koeficienta. Pri tem smo predvideli, da so lastnosti struge Selške Sore podobne na vseh izbranih merilnih mestih. Razlike se pojavljajo v »hrapavosti« poplavljenih površine zaradi različnih morfoloških lastnosti terena in različne pokrovnosti tal, pri ugotavljanju katere si lahko pomagamo tudi s satelitskimi posnetki (Kokalj in Oštir, 2007). Glede na predvidevano stopnjo »hrapavosti« smo izbrali tri različne vrednosti Manningovega koeficienta, ki smo jih smiselno dodelili posameznim merilnim mestom (preglednica 2).

V preglednici 2 so predstavljene ocenjene vrednosti hidravličnih parametrov. Parametri  $A$ ,  $P$  in  $S$  so bili določeni na podlagi modela DMV 12,5. Koeficient hrapavosti je izbran izkustveno glede na terenske razmere in ne na podlagi meritev (na primer pretočnih hitrosti). Drugi parametri, to je  $R$ ,  $v$  in  $Q$ , so izračunani po veljavnih enačbah. Če prikazane vrednosti pretoka primerjamo z ocenjeno konico poplavnega vala v Železnikih (približno  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Rusjan in sod., 2009), so tukaj predstavljene vrednosti pretokov prenizke. Vzrok za to je lahko prenizko ocenjena pretočna hitrost  $v$  (premajhen naklon dna struge  $S$  od dejanskega oziroma prevelika hrapavost  $n$ ) ali premajhen pretočni prerez  $A$ . Ker so v preglednici 2 prikazane vrednosti koeficienta hrapavosti nizke (razen v prerezih MM2 in MM3), razlike v naklonu dna struge Selške Sore v posameznih prerezih pa tudi zelo velike, se zdi primerna ocena, da je nujno izboljšati kakovost podatkov o terenu, kar bi ob uporabi satelitskih posnetkov za prepoznavanje poplavljenih območij omogočilo tudi kakovostno oceno hidravličnih parametrov poplave.

	Enota	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6
A (površina pretočnega prereza)	$\text{m}^2$	177	144	99	100	146	69
P (omočeni obod)	m	116	88	93	194	137	80
S (naklon dna struge)	/	0,001	0,009	0,012	0,018	0,004	0,011
$n$ (koeficient hrapavosti)	$\text{m}^{-1/3}\text{s}$	0,03	0,07	0,043	0,03	0,03	0,03
R (hidravlični radij)	m	1,5	1,6	1,1	0,5	1,1	0,9
$v$ (povprečna hitrost v prerezu)	$\text{m/s}$	1,2	1,9	2,6	2,9	2,1	3,1
Q (pretok)	$\text{m}^3/\text{s}$	205	273	258	285	302	217

Preglednica 2: Vrednosti hidravličnih parametrov na izbranih šestih mestih v strugi Selške Sore

Postopek določitve poplavljenih območij na podlagi satelitskih posnetkov (Lamovec in Oštir, 2010) in predstavljeni postopek izračuna hidravličnih parametrov omogočata relativno

uspešno analiziranje poplavnega dogodka. Z uporabo satelitskih posnetkov za prepoznavanje poplavljenih površin in kakovostnega digitalnega modela višin ustrezne natančnosti (na primer pridobljenega iz lidarskih podatkov; glej recimo tudi Mason in sod., 2007) se zmanjšuje tudi količina potrebnega dela na terenu in časa za izvedbo analize. To pa lahko pripomore k bolj doslednemu izvajanju poplavnih analiz v prihodnje. Poplave se namreč lahko pojavijo kjer koli in kadar koli. Za zmanjševanje škode, ki bi jo lahko povzročili podobni dogodki, je zato nujno hitro analiziranje in izvedba potrebnih ukrepov. Bistvenega pomena pa je tudi izmenjava znanj med različnimi strokovnjaki in sodelovanje z ljudmi, ki imajo s tovrstnimi dogodki neposredne izkušnje. Rezultate analiz je zato treba posredovati naprej in predstaviti širši zainteresirani javnosti. Evropska poplavna direktiva predvideva tri korake za zmanjšanje hudih posledic poplav: (1) predhodno oceno poplavnega tveganja, (2) karte poplavnega tveganja, (3) načrte upravljanja poplavnega tveganja (Mikoš, 2007). Rezultati kakovostnih analiz poplavnih dogodkov, kakršna je predstavljena na primeru poplav v Železnikih, so koristni za izdelavo kart poplavnega tveganja. Zaradi sledenja evropskim smernicam, predvsem pa zaradi želje po večji varnosti slovenskega prebivalstva pred poplavami, je bila že pred leti dana pobuda za vzpostavitev interdisciplinarne platforme, sestavljene iz pristojnih državnih organov (na primer Uprave RS za zaščito in reševanje (MO), Agencije RS za okolje (MOP), Inštituta za vode RS, drugih resornih ministrstev) in raziskovalno-strokovnih ustanov (univerz, raziskovalnih inštitutov, SAZU, IAS) (Mikoš, 2007). Zamisel o vzpostavitvi takšnega okolja je še vedno zelo prisotna, saj bi njena uresničitev omogočila povezovanje stroke znotraj slovenskega prostora in izmenjavo znanj v mednarodnem prostoru.

## 5 SKLEP

Na podlagi meteoroloških in hidroloških podatkov je mogoče dobiti veliko kvantitativnih informacij o količini padavin, pretokih rek ipd., kar lahko močno olajša prepoznavanje vzrokov za nastanek poplav. Razumevanje hidrološkega odziva nekega območja na intenziteto, porazdelitev in količino padavin je namreč pomembno za uspešno napovedovanje poplav in pravočasno opozarjanje prebivalstva pred njimi. Prostorsko in časovno dinamiko poplav so z združevanjem meteoroloških in hidroloških podatkov poskušali določiti že Rusjan in sod. (2009). Njihova študija je potrdila, da bi morale biti poplavalne analize osredotočene tudi na pretok ter hidrološki odziv poplavljenega območja in ne zgolj na poenostavljene statistične analize padavin.

Takšno analizo smo predstavili na primeru poplav v Železnikih leta 2007. V prispevku je predstavljen relativno učinkovit način določitve hidravličnih parametrov, ki v povezavi s postopkom določitve poplavljenih območij iz satelitskih posnetkov (Lamovec in Oštir, 2010) pomeni zaključeno celoto določitve poplavljenega območja in hidravlične analize.

V študiji se je sicer pokazalo, da je model DMV 12,5 premalo natančen za potrebe hidravličnega modeliranja, a je težavo z uporabo natančnejših podatkov o višinah mogoče odpraviti. Zanimiva bi bila tudi primerjava eno- in dvodimenzijskega hidravličnega računa na podlagi kakovostnih podatkov o terenu.

**Literatura in viri:**

- Frappart, F., Do Minh, K., L'Hermitte, J., Cazenave, A., Ramillien, G., Le Toan, T., Mognard-Campbell, N. (2006). Water volume change in the lower Mekong from satellite altimetry and imagery data. *Geophysical Journal International*, 167(2), 570–584.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Glenn, D. T., Dorsch, S. J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2), 131–148.
- Hong, Y., Adler, R., Negri, A. J., Huffman, G. (2007). Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall products. *Natural Hazards*, 43, 285–294.
- International Charter Space and Major Disasters. Pridobljeno 4. 4. 2011 s spletne strani: <http://www.disasterscharter.org/home>.
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, vol. 36, 1897–1910.
- Jemec, M., Mikoš, M. (2008). Pobočni masni premiki na satelitskih posnetkih SPOT: Primer območja Železnikov po vodni ujmi septembra 2007 (Slope mass movements on SPOT satellite images: A case of the Železniki area (W Slovenia) after flash floods in September 2007). *Geologija*, 51(2), 235–243.
- Kokalj, Ž., Oštir, K. (2007). Land cover mapping using Landsat satellite image classification in the Classical Karst - Kras region = Ugotavljanje pokrovnosti krasa s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. *Acta carsol.*, 36(3), 433–440.
- Kokalj, Ž., Marsetič, A., Pehani, P., Oštir, K. (2008). Observation of torrential rains devastation in Slovenia. V: M. Oluić (ur.), *Proceedings of the 1st International Conference on Remote Sensing Techniques in Disaster Management and Emergency Response in the Mediterranean Region*. Zagreb: Croatian Academy of Sciences and Arts, HAZU, 181–190.
- Komac, M. (2005). *Napoved verjetnosti pojavljanja plazov z analizo satelitskih in drugih prostorskih podatkov*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije.
- Komac, M., Ribičič, M. (2006). Karta verjetnosti pojavljanja plazov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000 (Landslide susceptibility map of Slovenia at scale 1 : 250,000). *Geologija* 49/2, 295–310.
- Kosmatin Fras, M. (2001). Vloga fotogrametrije in prostorskih podatkov pri dokumentiranju naravnih katastrof – primer plazov pod Mangartom. *Geodetski vestnik*, 45(1-2), 62–71.
- Lamovec, P., Oštir, K. (2010). Uporaba strojnega učenja za določitev poplavljenih območij – primer poplav v Selški dolini leta 2007. *Geodetski vestnik*, 54(4), 673–687.
- Liu, Z., Huang, F., Li, L., Wan, E. (2002). Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3669–3679.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Sangati, M., Gaume, E., Bain, V., Delrieu, G., Bonnifait, L., Pogačnik, N. (2009). Comprehensive post-event survey of a flash flood in Western Slovenia: observation strategy and lessons learned. *Hydrological Processes*, 23(26), 3761–3770.
- Mason, D. C., Horritt, M. S., Dall'Amico, J. T., Scott, T. R., Bates, P. D. (2007). Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 45(12), 3932–3943.
- Mason, D. C., et al. (2010). Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(2), 882–894.
- Mikoš, M. (1989). Metode vrednotenja srednjih pretočnih hitrosti vode v naravnih vodotokih. *Gradbeni vestnik*, 38, 16–23.
- Mikoš, M. (1996). Vrednotenje pretočnih hitrosti voda v strmih hudourniških strugah. *Gradbeni vestnik*, 45, 85–90.
- Mikoš, M., Brilly, M., Ribičič, M. (2004). Poplave in zemeljski plazovi v Sloveniji = Floods and Landslides in Slovenia. *Acta hydrotechnica*, 22/34, 113–133.
- Mikoš, M. (2007). Upravljanje tveganj in nova Evropska direktiva o poplavnih tveganjih (Risk management and the new European Directive on flood risks). *Gradbeni vestnik*, 56, 278–285.
- Nichol, J., Wong, M. S., Shaker, A. (2006). Application of high-resolution satellite images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology*, 76(1-2), 68–75.
- Oštir, K., Veljanovski, T., Podobnikar, T., Stančič, Z. (2003). Application of satellite remote sensing in natural hazard

management: the Mount Mangart landslide case study. *International Journal of Remote Sensing*, 24(20), 3983–4002.

Oštir, K. (2006). *Daljinsko zaznavanje*, Ljubljana: Založba ZRC.

Podobnikar, T., Szekeley, B., Hollaus, M., Roncat, A., Dorninger, P., Briese, C., Melzer, T., Pathe, C., Hofle, B., Pfeifer, N. (2010). Vsestranska uporaba aero-laserskega skeniranja za ugotavljanje nevarnosti zaradi naravnih nesreč na območju Alp. V: M. Zorn, B. Komac, P. Pavšek, P. Pagon (ur.), *Naravne nesreče 1: Od razumevanja do upravljanja*. Ljubljana: Založba ZRC.

Rusjan, S., Kobold, M., Mikoš, M. (2009). Characteristics of the extreme rainfall event and consequent flash floods in W Slovenia in September 2007. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9 (3), 947–956.

Singhroy, V., Mattar, K. E., Gray, A. L. (1998). Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, 21, 465–476.

Sodnik, J., Petje, U., Mikoš, M. (2009). Topografija površja in modeliranje gibanja drobirskih tokov. *Geodetski vestnik*, 53(2), 291–304.

Wang, Y., Koopmans, B. N., Pohl, C. (1995). The 1995 Flood in the Netherlands Monitored from Space – a Multisensor Approach. *International Journal of Remote Sensing*, 16(15), 2735–2739.

Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Kamai, T., Tsuchida S. (2003). Detection of a landslide movement as geometric misregistration in image matching of SPOT - HRV – data of two different dates. *International Journal of Remote Sensing*, 24(18), 3523–3534.

Yonghua, S., Xiaojuan, L., Huili, G., Wenji, Z., Zhaoning, G. (2007). A study on optical and SAR data fusion for extracting flooded area. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE International*. 3086–3089.

**Prispelo v objavo: 6. januar 2011**

**Sprejeto: 27. marec 2011**

**Lamovec Peter, univ. dipl. inž. geodezije**

Inštitut za antropološke in prostorske študije, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
IAPŠ ZRC SAZU

Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: plamovec@zrc-sazu.si

**Red. prof. dr. Matjaž Mikoš**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za okoljsko gradbeništvo

Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si