

TOPOGRAFIJA POVRŠJA IN MODELIRANJE GIBANJA DROBIRSKIH TOKOV

TERRAIN TOPOGRAPHY AND DEBRIS-FLOW MODELLING

Jošt Sodnik, Urška Petje, Matjaž Mikoš

UDK:519.61/.64:528.93:556.535

POVZETEK

Presojanje nevarnosti in ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov ne temelji samo na domnevah o izvornih območjih in magnitudah možnih drobirskih tokov ter njihovih reoloških lastnostih, temveč tudi na napovedi njihovega dosega. Glede na zajem topografije površine pobočja, po katerem teče pobočni drobirski tok, ali zajem oblike hudourniške struge, po kateri se premika drobirski tok, predstavljamo rezultate dvodimenzijskega matematičnega modeliranja možnih drobirskih tokov na izbranih hudourniških vršajih v dolini Save Dolinke v odvisnosti od velikosti računske mreže (5 x 5 m in 15 x 15 m), generirane iz digitalnega modela višin 5 m (DMV 5). Z vidika numeričnega modeliranja drobirskih tokov smo pokazali, da je treba modelirati tudi zgradbe, ki jih DMV 5 ne obsega, saj imajo velik vpliv na tokovno polje v bližini. Pristop, pri katerem so se zgradbe v numerični računski mreži upoštevale z vpeljavo blokiranih (suhih) celic, se je pokazal kot boljša rešitev od večanja koeficienta hrapavosti v teh celicah, da bi upoštevali motnje v toku, ki jih povzročajo zgradbe. Preverili smo tudi uporabnost digitalnega modela reliefa DMV 12,5 in iz njega generirali numerično mrežo 12,5 x 12,5 m. Na primeru hudourniškega vršaja Trebiže smo ugotovili, da je DMV 12,5 lahko bolj geomorfološko reprezentativen kot DMV 5. Naslednji korak pri modeliranju naravnih nevarnosti, kot so drobirski tokovi, bo uporaba bolj natančne računske mreže (recimo 1 x 1 m), generirane iz lidarskih posnetkov površja.

KLJUČNE BESEDE

topografija, digitalni model višin, natančnost, modeliranje, numerična mreža, drobirski tokovi, prostorsko načrtovanje

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

ABSTRACT

Debris flow hazard and risk assessment is not only based on assumptions on source areas and magnitudes of possible debris flows and their rheological characteristics, but also on their runout predictions. With regard to topographic presentation of slope surface over which a slope debris flow runs or presentation of a torrential channel along which a debris flow runs, this paper reports on the results of two-dimensional modelling of possible debris flows on selected torrential fans in the Sava Dolinka valley as a function of the numerical square grid (5 x 5 m, and 15 x 15 m), generated from freely available digital elevation model DEM 5. From the aspect of debris-flow numerical modelling we showed that buildings that are not shown on DEMs should be modelled, because they have large influence on the flow field close to them. The approach to introduce buildings into the numerical grid model by simply defining them as blocked (dry) cells proved to be better solution than raising the roughness coefficient in these cells to account for flow obstruction by buildings. We also checked the applicability of the digital elevation model DEM 12.5 and generated from it a numerical grid 12.5 x 12.5 m. In the case of the Trebiža torrential fan it can be concluded that DEM 12.5 can be more geomorphologically representative than DEM 5. The next step in modelling natural hazards such as debris flows will eventually be the application of even more precise numerical grid, generated from LIDAR surveys of relief.

KEY WORDS

topography, digital elevation model, precision, modelling, numerical grid, debris flows, physical planning

1 UVOD

Pri prostorskem načrtovanju v evropskih Alpah imajo naravna tveganja pomembno vlogo. Tako je pomembno, da upoštevamo različne vrste alpskih naravnih tveganj, kot so hudourniške poplave, zemeljski plazovi ali drobirski tokovi, kadar uporabimo orodja prostorskega načrtovanja kot preventivo pred naravnimi tveganji (Mikoš, 1997). Dandanes zakonodaja v večini sosednjih alpskih držav določa, da se dovoljenja za gradnjo nove infrastrukture ali zgradb podelijo le, če to dovoljujejo ustrezne karte ogroženosti (Đurovič in Mikoš, 2004). Za izdelavo kart ogroženosti moramo najprej pripraviti karte nevarnosti in se na tako določenih območjih visoke nevarnosti izogniti novim elementom tveganja (škodnemu potencialu) (Zakon, 2002). O tem modernem pristopu na področju obvladovanja tveganj stalno poročajo in ga spodbujajo v literaturi, tudi v Sloveniji (glej Đurovič in Mikoš, 2006, za izrazoslovje; glej Mikoš et al., 2007, za prvo karto ogroženosti pred drobirskimi tokovi v Logu pod Mangartom, ki je bila povzeta v posebni vladni uredbi (Uredba, 2004)). Kmalu lahko pričakujemo nadaljnji napredek v tej smeri na področju poplavnih kart nevarnosti in ogroženosti (Mikoš, 2007).

Drobirski tokovi kot hitro tekoče mešanice zemljinskega materiala (drobirja), vode in ponekod tudi lesnega drobirja (npr. v Logu pod Mangartom) so newtonske tekočine, fizikalno opisane z nelinearnimi enačbami za dvofazne tokove (FLO, 2006a). Taki tokovi se lahko sprožijo na pobočju ali v strmih hudourniških strugah med močnimi (toda kratkotrajnimi) padavinami ali pa jih sprožijo močni potresi (Mikoš, 2000/2001) in jih lahko razvrstimo v skupino pobočnih premikanj (Skaberne, 2001). Njihovo napredovanje vzdolž pobočja ali hudourniške struge in končno po vršaju proti dolinskemu dnu je zato precej kompleksno in ga ni lahko napovedovati. Če želimo uporabiti orodja prostorskega planiranja, moramo biti zmožni oceniti magnitude (Sodnik in Mikoš, 2006) in napovedati doseg prihodnjih (možnih) drobirskih tokov. Da bi ugotovili gibanje prihodnjih drobirskih tokov, lahko v postopku presojanja nevarnosti uporabimo številne metode napovedovanja dosega, kot so empirične, analitične, preproste metode potovanja toka in različne numerične tehnike (Hürlimann et al., 2008). Od naštetih metod samo uporaba numeričnih modelov zagotavlja izdelavo »dokončnih kart nevarnosti«, saj lahko ti modeli upoštevajo različne magnitude dogodkov in zagotovijo izhodne vrednosti za račun intenzitete dogodkov. Nasprotno pa empirične enačbe in algoritme potovanja toka, ali njihovo kombiniranje, lahko uporabimo le za izdelavo »časnih kart nevarnosti«. Natančnost takih kart nevarnosti je precej odvisna od parametrov, kot so magnituda možnega drobirskega toka, reološke značilnosti mešanice vode in drobirja, značilnosti hrapavosti površja in naklon pobočja (Sodnik in Mikoš, poslano v objavo).

Topografske površine lahko ustvarimo na različne načine, na primer iz zračnega laserskega snemanja (LiDAR), zemeljskih diferenčnih GPS-meritev (DGPS) ali iz digitalnih podatkov o višinah (DMV) (Rayburg et al., 2009). Švicarska študija, ki je uporabila tri generično različne digitalne modele višin (DMV) z ločljivostjo 25, 4 in 1 m, je pokazala, da DMV 25 lahko zagotovi približno presojo potencialnega območja nevarnosti, preostala dva digitalna modela višin z večjo natančnostjo pa omejeta simulirani drobirski tok v obstoječe struge in rezultati so bili skladni z opazovanji preteklih drobirskih dogodkov (Stolz in Huggel, 2008). Pomemben vpliv na numerično modeliranje takšnih tokovnih pojavov ima tudi infrastruktura (ceste, mostovi, hiše), kakor je

pokazal primer hipotetične porušitve nasipov ob reki Ren blizu kraja Widnau v Švici (VAW, 2003). Če vemo, da je topografija eden od glavnih dejavnikov pri analizi nevarnosti zaradi plazenja tal (van Westen et al., 2008), je pomembno, da presodimo vpliv različne predstavitve topografije na numerično modeliranje drobirskih tokov. Ta članek prikazuje možnosti za uporabo javno dostopnih (razpoložljivih) digitalnih podatkov o višinah v Sloveniji za presojo ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov in se ne ukvarja z drugimi razpoložljivimi tehnikami za oblikovanje topografskih površin.

V okviru ciljnega raziskovalnega projekta z naslovom Ocena ogroženosti z drobirskimi tokovi v Sloveniji (CRP, 2009) smo kot testno območje izbrali alpsko dolino reke Save Dolinke. Tam smo izbrali štiri hudourniška območja: Trebiža, Suhelj, Presušnik in Koroška Bela; nekatere rezultate za dva hudourniška vršaja (Koroška Bela, Trebiža) prikazujemo v tem članku. Pomemben del numeričnega modeliranja je bil način, kako smo upoštevali reološke lastnosti (geomehanske lastnosti mešanice sedimentov in vode, ki tvori drobirski tok). Pri tem smo namenoma uporabili izkušnje, ki smo jih pridobili pri modeliranju primerov dejanskih drobirskih tokov v Sloveniji v bližnji preteklosti (veliki drobirski tok v Logu pod Mangartom leta 2000 in številni manjši drobirski tokovi v Koseču nad Kobaridom leta 2002).

2 TOPOGRAFSKI PODATKI

Za dvodimenzijsko modeliranje drobirskega toka potrebujemo topografske podatke v obliki numerične mreže, ki jo preprosto izdelamo iz digitalnih modelov višin (DMV). Zgodnji razvoj digitalnih modelov višin v Sloveniji do natančnosti DMV 25 na podlagi InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) je prikazan v Oštir et al. (2000) in Podobnikar (2003). Digitalni model višin 12,5, izdelan leta 2005 kot kompozitni model celega niza razpoložljivih podatkov, je prikazan v Podobnikar in Mlinar (2006). Takšen kompozitni digitalni model višin se je izkazal kot model z visoko geomorfološko kakovostjo, vendar ga žal nismo mogli neposredno uporabiti za dvodimenzijsko modeliranje padajočega kamenja in skalovja (Petje et al., 2005a). Zato smo pri podorih Berebica in Osojnik v dolini Trente namesto DMV 12,5 uporabili na terenu izmerjeni dvodimenzijski računski profil (Petje et al., 2005b). Najnovejši prikaz razvoja digitalnih modelov višin v Sloveniji je zbran v Podobnikar (2008).

Guzzetti et al. (2004) so uspešno uporabili mrežo s 5-metrskimi celicami za opis topografije vzdolž prometnega koridorja v regiji Umbria v srednji Italiji za izdelavo presoje nevarnosti in ogroženosti zaradi padajočega kamenja. Po letu 2006 je v Sloveniji na voljo DMV 5, ki ga zagotavlja Geodetska uprava Republike Slovenije. Zato smo za opis topografije izbrali ta model in ga uporabili za modeliranje drobirskih tokov na izbranih hudourniških vršajih v dolini Save Dolinke kot najboljši digitalni model višin, ki ga zagotavlja država.

Zavedamo se, da »tradicionalni« DMV, ustvarjen z interpolacijo izohips, digitaliziranih iz topografskih kart na podlagi aerosposnetkov, nimajo zadostne natančnosti, zahtevane v študijah, ki se ne omejujejo le na določanje prispevnega območja ali naklona struge vodotoka (Snyder, 2009). Kljub temu smo v tej fazi razvoja in za namen preskušanja najboljšega opisa topografije, ki je na voljo za celotno območje Slovenije, zanemarili obetajoče se in že obstoječe možnosti z

večjo natančnostjo, kot je tehnologija LiDAR, za neposredno in podrobno izdelavo digitalnega modela višin (DMV). Ta nova tehnika se je že uspešno uporabila za številne namene, kot so analiza velikega drobirskega toka (Breien et al., 2008), prepoznavanje plazenja tal (Sato et al., 2007), splošno hidravlično modeliranje vodotokov (Rak et al., 2006) ali posebno dvodimenzijsko modeliranje poplavnih valov (Četina in Krzyk, 2007a; 2007b).

Glavni razlog za izbiro DMV 5 je bil tudi zelo praktičen, in sicer nam razpoložljive računalniške zmogljivosti omogočajo, da že z osebnim računalnikom dosežemo razmerje med trajanjem naravnega dogodka in računalniškim časom za njegovo simuliranje blizu 1 : 1. Kljub temu je vredno omeniti, da naj bi bil samodejno izdelan DMV 5 v Sloveniji na eni strani očiščen kakršnekoli infrastrukture, kot so ceste, mostovi ali zgradbe, in na drugi strani, da ni povsem zmožen prikazati rečnih strug. V tem članku bo prikazana kakovost DMV 5 v Sloveniji za modeliranje naravnih pojavov, kot je drobirski tok.

Razlike med dvema računskima numeričnima mrežama, izdelanima iz DMV 5, za hudourniški vršaj Koroške Bele, so prikazane na sliki 1. Mreža 15 x 15 m je bila narejena v programu Flo-2D z uporabo vgrajenih zmožnosti za interpolacijo naklonov celic mreže (FLO, 2006b). Naklon celice mreže 15 x 15 m je bil izračunan z interpolacijo vseh točk DMV 5 v krogu s polmerom 15 m in središčem v sredini celice. Uporabnik lahko določi način filtriranja višinskih točk, kjer program ponuja naslednje možnosti: brez filtriranja, upoštevanje največje razlike med višinskimi točkami ali standardne deviacije vseh višinskih točk. Sami smo izbrali postopek interpolacije višinskih točk brez filtriranja. Z uporabo ekstremnih padavin in hidrološkega modela HEC-HMS (HEC, 2000) smo določili računski hidrogram za vsak hudourniški vršaj (glej podrobnosti v preglednici 1).

Hudourniški vršaj	Hudourniška poplava: konični pretok in trajanje	Suhi drobirski tok: magnituda	Mokri drobirski tok: magnituda	št. celic za mrežo 5 x 5 m	št. celic za mrežo 15 x 15 m
Trebiža	39,0 m ³ /s & 20 ur	407.150 m ³	294.776 m ³	31.953	3717
Koroška Bela	50,7 m ³ /s & 20 ur	479.390 m ³	236.024 m ³	21.708	2385
Suhelj	21,9 m ³ /s & 20 ur	182.050 m ³	131.804 m ³	25.050	8687
Presušnik	38,7 m ³ /s & 20 ur	387.770 m ³	347.078 m ³	11.264	998

Preglednica 1. Glavni geometrijski in hidrološki parametri na izbranih hudourniških vršajih v dolini Save Dolinke, SZ Slovenija (magnituda smo izračunali ob domnevni prostorninski koncentraciji sedimentov $C_v = 0,5$ za računski suhi drobirski tok in $C_v = 0,42$ za računski mokri drobirski tok).



Slika 1: Računska numerična mreža 5 x 5 m (levo) in 15 x 15 m (desno) na hudourniškem vršaju Koroške Bele.

3 REZULTATI MODELIRANJA DROBIRSKIH TOKOV IN RAZPRAVA

Za matematično modeliranje drobirskega toka smo izbrali komercialno razpoložljivi dvodimenzijski model FLO-2D (O'Brien, 2006), ki so ga že uspešno uporabili v Sloveniji, na primer za analizo po dogodku v Logu pod Mangartom (Četina et al., 2006), za presojo nevarnosti pred drobirskimi tokovi v Koseču nad Kobaridom (Mikoš et al., 2006) in presojo nevarnosti pred možnimi drobirskimi tokovi iz hudourniškega območja Hrenovec nad Kropo (Sodnik in Mikoš, poslano za objavo).

Program Flo-2D smo uporabili za izračun hudourniških poplav in drobirskih tokov (drobirski tok je mešanica vode in sedimentov v različnih razmerjih). Analiza občutljivosti računalniškega modela na velikost računske mreže (5 x 5 m in 15 x 15 m) in vpliv (Manningovega) koeficienta hrapavosti (izraža izgube energije) na globine toka, hitrosti toka in na preplavljeno površino smo izvedli za primere hudourniške poplave. Ko smo uporabili računalniški program za primer drobirskega toka, smo morali določiti dva reološka modelna parametra: kritično strižno trdnost, ki določa naklon, pri katerem se drobirski tok ustavi (v nasprotju s čisto vodo, ki teče pri vsakem naklonu), in Binghamovo viskoznost, ki jo je treba uporabiti, ker je drobirski tok viskozna tekočina (pri čisti vodi se viskoznost običajno lahko zanemari). Ker za potencialni (možni) drobirski dogodek v testnem območju nimamo na voljo podrobnih materialnih reoloških podatkov iz preteklih (nedavnih) drobirskih dogodkov, smo uporabili vrednosti za ta dva parametra, ki smo ju dobili z umerjanjem modela Flo-2D za druge nedavne drobirske dogodke v Sloveniji (Stožer nad Logom pod Mangartom in Koseč nad Kobaridom). Zato smo uporabili: kritično strižno trdnost 20 Pa in Binghamovo viskoznost 10 Pa.s za $C_v = 0,42$ (moker drobirski tok) in kritično strižno trdnost 2000 Pa in Binghamovo viskoznost 156 Pa.s za $C_v = 0,50$ (suh drobirski tok). Podrobnejši opis modela Flo-2D je podan drugje (Fazarinc et al., 2006; Flo, 2006; Sodnik in Mikoš, poslano v objavo).

Računski čas na namiznem računalniku (Intel Core2Duo procesor 3,0 GHz, 4 Gb RAM) je bil zelo odvisen od velikosti računske mreže. Ker na izbranih območjih nismo imeli na voljo zelo natančnih lidarskih podatkov o topografiji, smo se odločili uporabljati uradni DMV 5 kot podlago

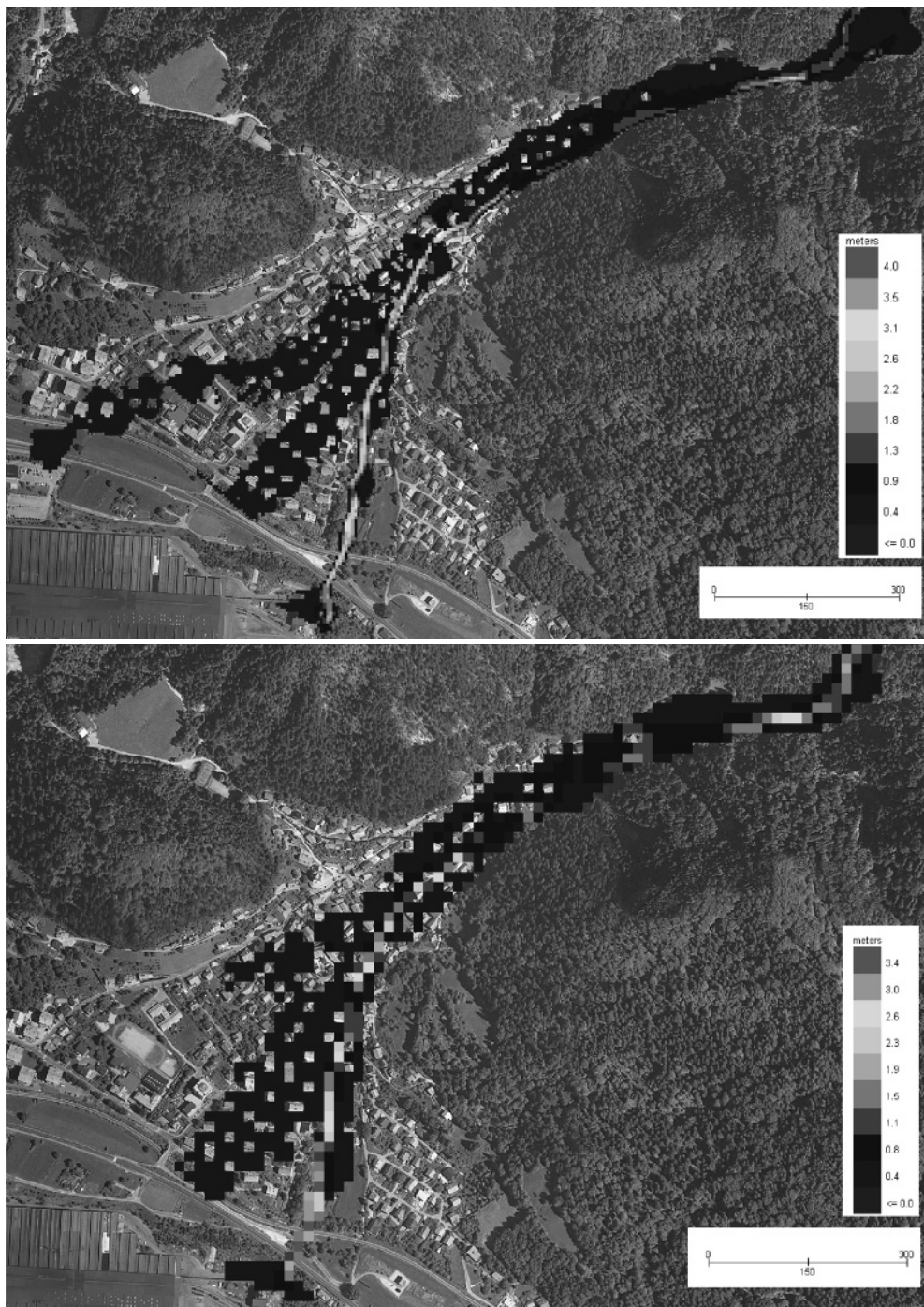
za numerično mrežo 5 x 5 m in smo bili sposobni tudi povečati v mrežo 15 x 15 m, da bi pospešili proces modeliranja. Za simulirani hidrogram trajanja 20 ur je bil čas računanja za mrežo 15 x 15 m približno pet minut (razmerje približno 240 : 1) in za mrežo 5 x 5 m je bil čas med 40 in 60 ur (razmerje med 1 : 2 in 1 : 3). Zato je bila analiza občutljivosti računalniškega modela na hrapavost površja v glavnem opravljena za mrežo 15 x 15 m, da bi pospešili računalniški proces.

5 x 5 m/15 x 15 m			
Računski primer	Celotna površina preplavitve (površina, prekrita z blokiranimi celicami) (ha)	Povprečna globina toka (m)	Povprečna hitrost toka (m/s)
Hudourniška poplava	9,455 / 13,300	0,45 / 0,32	1,10 / 0,90
Mokri	10,200 / 12,950 (2,250)	0,35 / 0,41	1,07 / 1,43
drobirski tok	11,115 / 16,200	0,47 / 0,37	1,10 / 1,00
Suhi	11,460 / 15,750 (2,800)	0,41 / 0,43	1,26 / 1,50
drobirski tok	12,780 / 19,150	0,48 / 0,46	0,96 / 0,95
	11,945 / 15,800 (3,250)	0,48 / 0,58	1,19 / 1,60

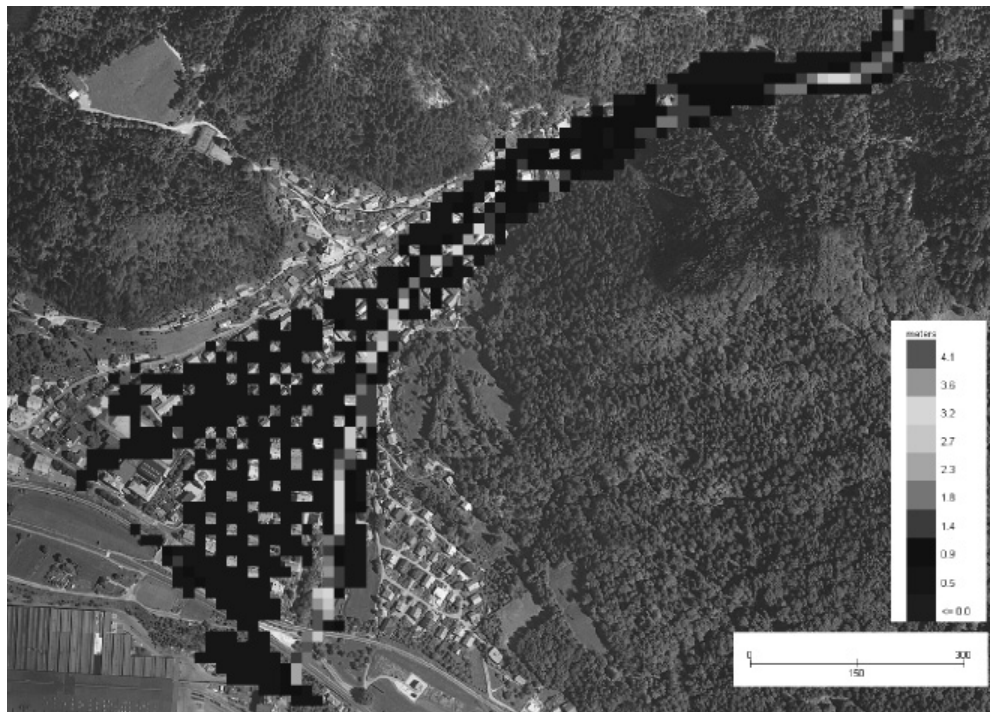
Preglednica 2. Glavni rezultati modeliranja za hudourniški vršaj Koroške Bele za numerično mrežo 5 x 5 m in 15 x 15 m (v prvi vrstici so podani rezultati za primer, ko smo zgradbe modelirali z višjimi koeficienti hrapavosti, in v drugi vrstici za primer, ko smo zgradbe modelirali z blokiranimi (suhimi) celicami).

Kadar nimamo na voljo terenskih podatkov o nedavnih drobirskih tokovih, lahko izbor ustreznega (Manningovega) koeficienta hrapavosti za določeno terensko študijo izvedemo le na podlagi pregleda literature in/ali lastnih izkušenj z modeliranjem drobirskih tokov. Koeficiente hrapavosti, ki smo jih uporabili pri numeričnem modeliranju, smo najprej izbrali iz obstoječe tehnične literature z zahtevo, da gre za tipične vrednosti za naše terenske razmere (Chow, 1959; Julien, 2002), ter iz navodil za uporabo programa Flo-2D (FLO, 2006a). Nato smo te vrednosti preskusili za primer toka čiste vode (hudourniške poplave) na vršaju Presušnika in za primer drobirskega toka na vršaju Koroške Bele, da bi njihove vrednosti tudi primerjali z vrednostmi, ki smo jih dobili, ko se je model Flo-2D umeril za primer drobirskega toka s Stož z merjenimi terenskimi podatki (Hojnik et al., 2001) in ko se je model Flo-2D uporabil za modeliranje drobirskih tokov v vasi Koseč (Hojnik, 2004; Rajar et al., 2004).

Vršaj Koroške Bele je gosto poseljen in tako smo uporabili naslednje (Manningove) koeficiente hrapavosti: $n_g(\text{gozd}) = 0,16 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{pašnik}) = 0,033 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{struga}) = 0,13 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{poselitev}) = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ in $n_g(\text{zgradbe}) = 0,2 \text{ sm}^{-1/3}$ za dve topografski situaciji: zgradbe so prikazane z uporabo višjih vrednosti koeficienta hrapavosti ($n_g(\text{zgradbe}) = 0,2 \text{ sm}^{-1/3}$) in zgradbe so prikazane z blokiranimi (suhimi) računskimi celicami (za območje okoli suhih celic smo uporabili vrednost $n_g(\text{poselitev}) = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$). V računskem modelu 15 x 15 m je bilo zaradi zgradb blokiranih 206 celic (od 2385 celic ali 8,64 % oziroma 46.350 m²) in v modelu 5 x 5 m je bilo blokiranih 1931 celic (od 21.798 celic ali 8,86 % oziroma 48.275 m²). Rezultati analize občutljivosti (tj.



Slika 2: Rezultati modela Flo-2D za primer čiste vode (hudourniška poplava) na vršaju Koroške Bele za numerično mrežo 5 x 5 m (zgoraj) in 15 x 15 m (spodaj) – vpliv zgradb je upoštevan z blokiranimi (suhi) celicami povsod, kjer smo prepoznali zgradbo na posnetku ortofoto. Sivi toni ustrezajo največji globini toka v metrih.



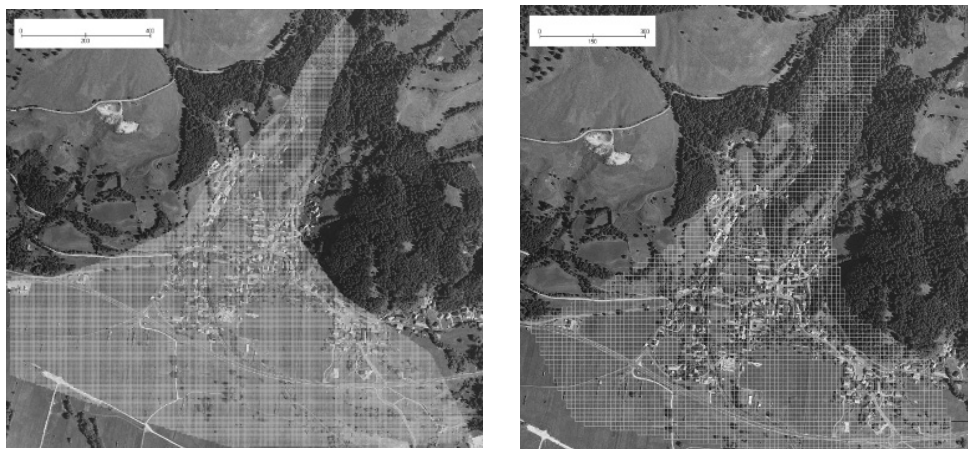
Slika 3: Rezultati modela Flo-2D za primer mokrega drobirskega toka ($C_v = 0,42$) na vršaju Koroške Bele za numerično mrežo 5×5 m (zgoraj) in 15×15 m (spodaj) – vpliv zgradb je upoštevan z blokiranimi (suhimi) celicami povsod, kjer smo zgradbo prepoznali na posnetku ortofoto. Sivi toni ustrezajo največji globini toka v metrih.

celotna površina preplavitve (ha), povprečna globina toka (m) in povprečna hitrost toka (m/s) za vršaj Koroške Bele so prikazani v preglednici 2.

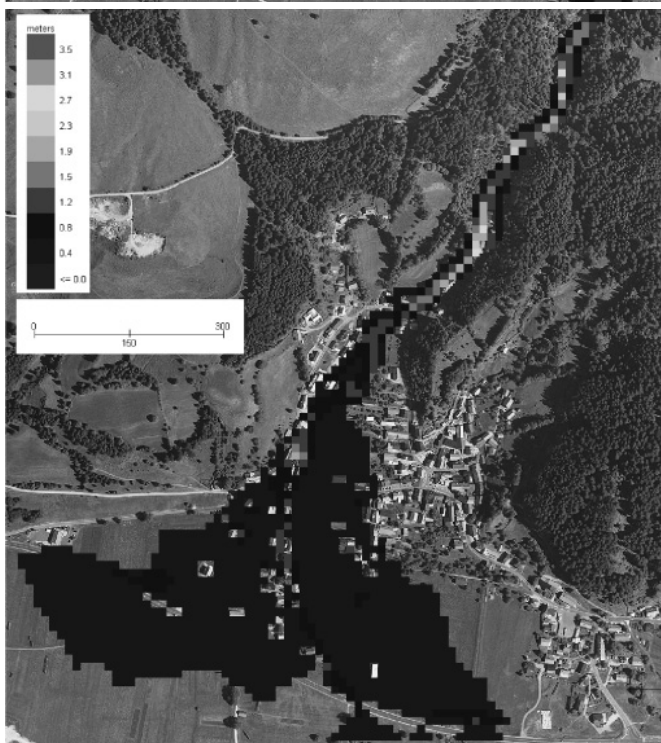
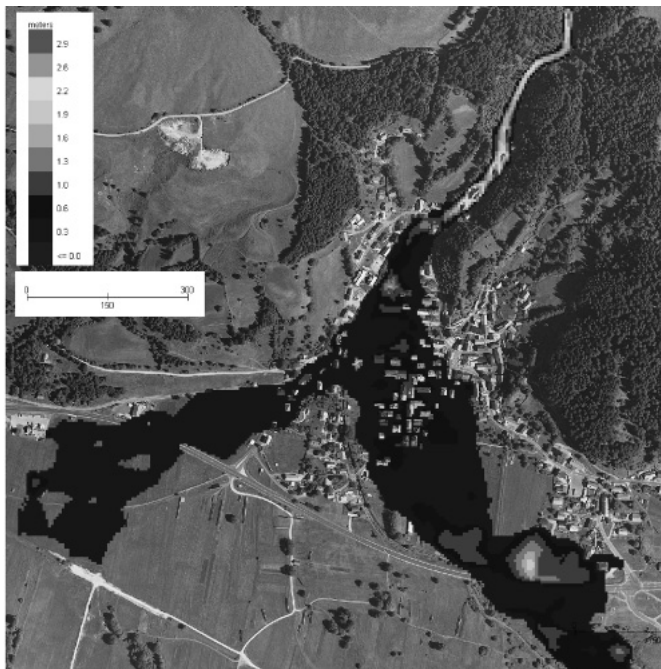
Uporaba mreže 15 x 15 m namesto 5 x 5 m da nižje vrednosti za povprečne globine toka in povprečne hitrosti toka, kadar zgradbe prikazujemo z višjimi vrednostmi (Manningovega) koeficienta hrapavosti, in višje vrednosti, kadar zgradbe modeliramo z blokiranimi (suhimi) celicami (preglednica 2). Razlika med mrežo 15 x 15 m in 5 x 5 m je še posebej izrazita za primer čiste vode (hudourniška poplava) in ob uporabi blokiranih celic. Uporaba mreže 15 x 15 m pokaže, da bi bilo od 206 blokiranih celic ob čisti vodi preplavljenih 100 celic (48,54 %), pri mokrem drobirskem toku 146 celic (70,87 %) in pri suhem drobirskem toku 125 celic (60,68 %). Ti rezultati kažejo, koliko obstoječih zgradb na hudourniškem vršaju Koroške Bele je ogroženih s hudourniško poplavo ali drobirskim dogodkom.

Modeliranje drobirskih dogodkov z numerično mrežo 5 x 5 m namesto 15 x 15 m da bolj podrobno karto nevarnosti z manjšo površino preplavitve in prikaže izraziti tok v glavni hudourniški strugi na vršaju (slika 3). Ta primer jasno pokaže na prednost uporabe DMV 5 pred DMV 15 za presojanje naravnih nevarnosti v gorskih območjih.

Nato smo uporabili numerično mrežo 5 x 5 m tudi na hudourniškem vršaju Trebiže (slika 4). Za vršaj Trebiže smo uporabili enake vrednosti za (Manningove) koeficiente hrapavosti kot na vršaju Koroške Bele: $n_g(\text{gozd}) = 0,16 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{pašnik}) = 0,033 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{struga}) = 0,13 \text{ sm}^{-1/3}$, $n_g(\text{poselitev}) = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ in $n_g(\text{zgradbe}) = 0,2 \text{ sm}^{-1/3}$ za dve topografski situaciji: zgradbe so prikazane z uporabo višjih vrednosti koeficienta hrapavosti ($n_g(\text{zgradbe}) = 0,2 \text{ sm}^{-1/3}$) in zgradbe so prikazane z blokiranimi (suhimi) računskimi celicami (za območje okoli suhih celic smo uporabili vrednost $n_g(\text{poselitev}) = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$). Tudi pri uporabi računske mreže 5 x 5 m in za primer čiste vode vodni tok »skoči« iz struge blizu vrha hudourniškega vršaja (verjetno zaradi cestnega mostu, ki je v DMV 5 interpretiran kot del površja) in teče po nagnjenem vršaju skozi poseljeno območje, ki leži nižje od hudourniške struge Trebiže (slika 5). Problem numerične mreže 5 x 5 m, ustvarjene iz DMV 5 na hudourniškem vršaju Trebiže, je lep primer, kako problematičen je



Slika 4: Računska numerična mreža za vršaj Trebiže, 5 x 5 m, ustvarjena iz DMV 5 (levo), in 12,5 x 12,5 m, ustvarjena iz DMV 12,5 (desno).



Slika 5: Rezultati modela Flo-2D za primer toka čiste vode po vršaju Trebiže z numerično mrežo 5 x 5 m (zgoraj) in 12,5 x 12,5 m (spodaj) – vpliv zgradb je upoštevan z blokiranimi (suhimi) celicami površ, kjer smo prepoznali zgradbo na posnetku ortofoto. Sivi toni ustrezajo največji globini toka v metrih.

lahko DMV 5 zaradi omejenih zmožnosti reprodukcije značilnosti strme hudourniške struge na vršaju. Ker je struga hudournika na začetku vršaja slabo reproducirana, čista voda in drobirski tok prestopita brežine in začeta preplavljati vršaj. Preverili smo to domnevo in uporabili bolj grobo numerično mrežo 12,5 x 12,5 m, ustvarjeno iz DMV 12,5 (slika 4). Pri tem smo uporabili iste vrednosti parametrov kot za numerično mrežo 5 x 5 m. Rezultati so prikazani na sliki 5.

Glede na način upoštevanja zgradb so podobne rezultate dosegli tudi za primer hipotetične porušitve nasipov ob reki Ren v bližini kraja Widnau v Švici (VAW, 2003). Tu daje primerjava med DMV 25 brez zgradb in digitalnim posnetkom ortofoto z upoštevanimi zgradbami v območju poselitve višje globine toka za primer z upoštevanjem zgradb. Podoben pristop je bil uporabljen za primer drobirskega toka v Logu pod Mangartom, kjer so bile zgradbe upoštene v numerični mreži 2 x 2 m in 4 x 4 m kot blokirane (suhe) celice (Fazarinc et al., 2006). Tak pristop se je pokazal kot uspešen tudi za modeliranje drobirskih tokov, opisano v tem članku. Glavna prednost, da obstoječe zgradbe nadomestimo z blokiranimi (suhimi) celicami, namesto da bi zvišali vrednost (Manningovega) koeficienta hrapavosti, je v bolj podrobnem opisu tokovnega polja okoli zgradb (suhih celic): hitrosti toka okoli suhih celic se zvišajo in kot posledica tega se zvišajo globine toka za suhimi celicami (fizikalno pravilno). Ta boljša ponazoritev tokovnega polja se računalniško izračuna hitreje le za primer toka čiste vode (za 10-15 %), v primeru drobirskega toka je računski čas večji za 20 do 25 % zaradi ostrejših razlik med tokovnim poljem okoli suhih celic in za njimi zaradi reoloških lastnosti v primerjavi s tokom čiste vode.

4 SKLEP

Na izbranih hudourniških vršajih v dolini Save Dolinke v SZ Sloveniji smo izvedli dvodimenzijsko modeliranje potencialnih drobirskih tokov in poročamo o rezultatih tega modeliranja v odvisnosti od numerične kvadratne mreže, ustvarjene iz javno dostopnega DMV 5. Če smo uporabili mrežo 5 x 5 m, je bil računski čas ob uporabi modernega namiznega računalnika istega reda velikosti, kot je trajanje računskega ekstremnega drobirskega dogodka (razmerje med 1 : 2 in 1 : 3), toda mreža 15 x 15 m je pospešila računanje za faktor večji od dveh magnitud (med 480- in 720-krat hitreje) in tako omogočila, da smo izvedli uspešno analizo občutljivosti modela v sprejemljivem časovnem okviru.

Kljub temu moramo za pripravo kart nevarnosti uporabljati samo DMV 5. Toda DMV 5, ki se uporablja pogosto in je zlahka dobavljiv, še ni tudi popoln model za vse namene. Kakor smo pokazali na primeru hudourniškega vršaja Trebiže, DMV 5 zaradi samodejne izdelave povzroči, da tok »skoči« iz struge na vršaj. Nasprotno pa DMV 12,5 daje mnogo bolj fizikalno realistične rezultate, saj je bil ustvarjen s kombiniranjem različnih podatkov ob uporabi inovativnega pristopa in z zagotavljanem visokih standardov kakovosti (Podobnikar, 2006) in naj bi se zato natančneje preskušal za podrobno numerično modeliranje npr. drobirskih tokov po površju.

Glede na omenjene negotovosti v DMV 5 v nekaterih terenskih razmerah potrebujemo bolj podrobno predstavitev topografije, kadar modeliramo hudourniške ali drobirske tokove. Naslednji korak v modeliranju naravnih nevarnosti, kot so drobirski tokovi, bo verjetno uporaba še bolj natančnih DMR, kot je DMV 1 na podlagi laserskega skeniranja (Podobnikar, 2008). Na podlagi lastnih izkušenj lahko to smer le močno podpremo.

Z vidika numeričnega modeliranja drobirskih tokov smo pokazali, da je treba zgradbe, ki jih ni v digitalnih modelih višin, modelirati, ker imajo velik vpliv na tokovno polje v bližini. Pristop, da zgradbe upoštevamo v numerični mreži kar tako, da jih opredelimo kot blokirane (suhe) celice, se je pokazal kot boljša rešitev od tiste, da višamo vrednosti (Manningovega) koeficienta hrpavosti v teh celicah in tako upoštevamo zgradbe kot ovire v toku.

Zahvala

Avtorji se za finančno pomoč v okviru dela na ciljnem raziskovalnem projektu M2-0144 Ocena ogroženosti zaradi drobirskih tokov zahvaljujejo Agenciji RS za raziskovalno dejavnost in Ministrstvu RS za obrambo. Prvi avtor je opravljal raziskovalno delo tudi v okviru podiplomskega študija na Univerzi v Ljubljani, Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Podatke sta posredovali Geodetska uprava RS in Agencija RS za okolje. Avtorji se zahvaljujejo recenzentoma Tomažu Podobnikarju in Matjažu Četini za pripombe, ki so bistveno izboljšale osnutek članka.

LITERATURA

- Breien, H., De Blasio, F. V., Elverhri, A., Hřeg, K. (2008). *Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway*. *Landslides* 5-3, str. 271–280.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Mc-Graw Hill, New York.
- CRP (2009). *Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Uprava RS za zaščito in reševanje, Ministrstvo za obrambo RS, Ljubljana*. Internet: http://www.sos112.si/slo/tdocs/naloga_76.pdf (6. 2. 2009)
- Četina, M., Krzyk, M. (2007a). *2D modeliranje poplavnih valov na območju HE Brežice*. UL FGG, 84 str. (report in Slovenian).
- Četina, M., Krzyk, M. (2007b). *2D modeliranje poplavnih valov na območju HE Mokrice*. UL FGG, 85 str. (report in Slovenian).
- Četina, M., Rajar, R., Hojnik, T., Zakrajšek, M., Krzyk, M., Mikoš, M. (2006). *Case study: Numerical simulations of debris flow below Stože, Slovenia*. *Journal of Hydraulic Engineering* 132-2, str. 121–130.
- Đurović, B., Mikoš, M. (2004). *Preventivno obvladovanje tveganj zaradi naravnih nevarnosti – postopki v alpskih državah in v Sloveniji (Preventive management of risks due to natural hazards – procedures in the Alpine countries and in Slovenia)*. *Acta hydrotechnica* 22-36, str. 17–35.
- Đurović, B., Mikoš, M. (2006). *Ali smo ogroženi, kadar tvegamo? Pojmi in izraze teorije tveganj zaradi naravnih nesreč, geološko pogojenih nevarnosti (Are we under threat when we risk? Notions and terminology of risk theory due to geological hazards)*. *Geologija* 49-1, str. 151–161.
- Fazarinc, R., Majes, B., Mikoš, M. (2006). *Using results of mathematical modeling of debris flows for optimization of a river channel form to convey debris flows and floods*. *International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow 2006, Lizbona, Portugalska*. Balkema.
- FLO (2006a). *FLO-2D, User's Manual, Version 2006.01*. Flo-2d Software, Inc.
- FLO (2006b). *FLO-2D, GDS Manual, Version 2006.01*. Flo-2d Software, Inc.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S. (2004). *Rockfall Hazard and Risk Assessment Along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy*. *Environmental Management* 34-2, str. 191–208.
- HEC (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual, March 2000*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California, ZDA. Internet: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/CPD-74B_2000Mar.pdf (6. 2. 2009)
- Hojnik, T. (2004). *Dvodimenzijski matematični model drobirskih tokov na območju Koseča z oceno ogroženosti naselja Koseč zaradi njihovega delovanja*. 15. Mišičev vodarski dan 2004, Maribor, str. 247–251.
- Hojnik, T., Četina, M., Krzyk, M., Rajar, R. (2001). *2D model drobirskega toka na območju Zgornjega in Spodnjega Loga*. 12. Mišičev vodarski dan 2001, Maribor, str. 84–91.

- Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., Bateman, A. (2008). Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology* 102, str. 152–163.
- Julien, P.Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Mikoš, M. (1997). Ocena ogroženosti alpskega sveta z naravnimi ujami (Natural hazard assessment of alpine habitats). *Gradbeni vestnik* 46-1/2/3, str. 2–7.
- Mikoš, M. (2000/2001). Značilnosti drobirskih tokov (Characteristics of debris flows). *Ujma* 14/15, str. 295–299.
- Mikoš, M. (2007). Upravljanje tveganj in nova evropska direktiva o poplavnih tveganjih (Risk management and the new European directive on flood risks). *Gradbeni vestnik* 56-11, str. 278–285.
- Mikoš, M., Majes, B., Fazarinc, R., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T., Četina, M. (2006). Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, W Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6-2, str. 261–270.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B. (2007). Določitev ogroženega območja v Logu pod Mangartom zaradi drobirskih tokov s plazu Stože (Delineation of risk area in Log pod Mangartom due to debris flows from the Stože landslide). *Acta geographica Slovenica* 47-2, str. 171–198.
- O'Brien, J. (2006). Users Manual FLO-2D, Version 2007.06, June 2007. Nutrioso, Arizona, ZDA. Internet: http://www.flo-2d.com/v2007/Documentation/Users Manual_2007.pdf (6. 2. 2009)
- Oštir, K. (2006). Daljinsko zaznavanje. Inštitut za antropološke in prostorske študije (Institute of Anthropological and Spatial Studies), ZRC SAZU (Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts), 250 str.
- Oštir, K., Podobnikar, T., Stančič, Z., Mlinar, J. (2000). Digitalni model višin Slovenije InSar25. *Geodetski vestnik* 44-4, str. 374–383.
- Petje, U., Ribičič, M., Mikoš, M. (2005a). Computer simulation of stone falls and rockfalls (Računalniško simuliranje skalnih odlomov in podorov). *Acta geographica Slovenica* 45-2, str. 93–120.
- Petje, U., Mikoš, M., Ribičič, M. (2005b). Ocena nevarnosti padajočega kamenja za odsek regionalne ceste v dolini Trente (Hazard assessment due to falling stones on a reach of the regional road in the Trenta valley, Slovenia). *Geologija* 48-2, str. 341–354.
- Podobnikar, T. (2003). Kronologija izdelave digitalnega modela reliefa Slovenije (Chronology of Digital Terrain Model production of Slovenia). *Geodetski vestnik* 47-1/2, str. 47–54.
- Podobnikar, T. (2006). Digitalni model reliefa iz različnih podatkov (Digital Terrain Model from different data). *Življenje in tehnika* 4, str. 20–27.
- Podobnikar, T. (2008). Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki (High-quality data for enhancement of the terrain model of Slovenia). *Geodetski vestnik* 52-4, str. 834–853.
- Podobnikar, T., Mlinar, J. (2006). Izdelava in vzdrževanje digitalnega modela reliefa Slovenije z integracijo obstoječih virov (Production and maintenance of Digital Elevation Model of Slovenia with data integration). *Geodetski vestnik* 50-3, str. 472–480.
- Rajar, R., Četina, M., Mikoš, M., Fazarinc, R. (2004). Enodimenzijske simulacije drobirskega toka in vodnih valov od vasi Koseč do Ladre. 15. Mišičev vodarski dan 2004, Maribor, str. 233–238.
- Rak, G., Gosar, L., Steinman, F. (2006). Uporaba LIDAR podatkov v povezavi GIS in hidravličnega modela. Zbornik 17. Mišičevega vodarskega dne, Maribor, str. 108–114.
- Rayburg, S., Thoms, M., Neave, M. (2009). A comparison of digital elevation models generated from different data sources. *Geomorphology* xx, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.11.007
- Sato, H. P., Yagi, H., Koarai, M., Iwashiji, J., Sekiguchi, T. (2007). Airborne LIDAR Data Measurement and Landform Classification Mapping in Tomari-no-tai Landslide Area, Shirakami Mountains, Japan. V: Sassa, K., Fukuoka, H., Wanf, F., Wang, G. (ur.): *Progress in Landslide Science*, Chapter 17, str. 237–249. Springer.
- Skaberne, D. (2001). Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj – pobočnega transporta (Proposal of the Slovene terminology on slope movements – slope transport). *Geologija* 44-1, str. 89–100.
- Snyder, N.P. (2009). Studying Stream Morphology With Airborne Laser Elevation data. *EOS Transactions* 90-6, str. 45–46.
- Sodnik, J., Mikoš, M. (2006). Ocena magnitud drobirskih tokov v izbranih hudourniških območjih v Sloveniji (Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia). *Acta geographica Slovenica*

46-1, str. 93–123.

Sodnik, J., Mikoš, M. (under review). Modeliranje drobirskega toka iz hudourniškega območja Hrenovec nad Kropo (Debris-flow modeling from the Hrenovec torrential watershed upstream of Kropa, Slovenia). Acta geographica Slovenica.

Stolz, A., Huggel, C. (2008). Debris flow in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results. Landslides 5, str. 311–319.

van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Engineering Geology 102, str. 112–131.

VAW (2003). Projekt Hochwasservorsorge. Teilbericht »Gefahrensituation: Überflutungsflächen, Belastungsintensitäten«. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 64 str.

Uredba (2004). Uredba o pogojih in omejitvah gradnje na območju Loga pod Mangartom, ogroženem zaradi pojava drobirskih tokov. Uradni list RS 87.

Zakon (2002). Zakon o vodah. Uradni list RS 67.

Prispelo v objavo: 20. marec 2009

Sprejeto: 29. maj 2009

Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad.

Vodnogospodarsko podjetje Kranj, Mirka Vadnova 5, SI-4000 Kranj

E-pošta: jošt.sodnik@vgp-kranj.si

mag. Urška Petje, univ. dipl. inž. grad.

VGP Projekt Kranj, Mirka Vadnova 5, SI-4000 Kranj

E-pošta: urska.petje@vgp-kranj.si

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.

UL FGG - Oddelek za gradbeništvo, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana

E-pošta: matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si