UDK/*UDC*: 004.414.23:627.132(282.2)(497.4) Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper* Prejeto/*Received:* 23.02.2018 Sprejeto/*Accepted:* 11.06.2018

MODELIRANJE POPLAVLJANJA URBANIH OBMOČIJ

FLOOD MODELLING IN URBAN AREAS

Gašper Rak^{1,*}, Sara Grobljar², Franci Steinman¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, 1000 Ljubljana
² Wagmann ingenieure GmbH, Fürstenzell, Passauer Str. 2, Nemčija

Izvleček

Posledice poplav so bistveno večje v urbanih kot v ruralnih območjih, saj so izpostavljenost in vrednost premoženja ter verjetnost ogrožanja človeških življenj večji. Zato je potreba po hidravličnih modelih, ki predvidijo smeri in obseg poplavljanja, velika. Objekti predstavljajo ovire v vodnem toku in bistveno vplivajo na njegov potek, zato jih je treba upoštevati v hidravličnih modelih. V študiji smo primerjali dva načina upoštevanja objektov v hidravličnih matematičnih modelih, in sicer s povečanjem vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti oziroma z zvišanjem navideznega terena na mestih objektov nad nivo poplavljenosti. Analizirali smo tudi občutljivost rezultatov modeliranja glede na velikost celice računske mreže, ki lahko bistveno vpliva na rezultate hidravličnega modela. Hidravlično analizo smo izvedli s polnim 2D hidravličnim modelom za območje Gornje Radgone, ki bi ga Mura poplavila v primeru porušitve dela betonskega zidu, ki mesto ščiti pred visokimi vodami. Kazalniki za analizo velikosti vpliva različnih načinov upoštevanja objektov in velikosti računskih celic na odtočne razmere ter poplavno nevarnost znotraj obravnavanega območja so bili med drugim globina in hitrost vodnega toka, obseg poplavljenosti ter prostorska porazdelitev razredov poplavne nevarnosti. Preverili smo tudi časovne spremembe potovanja poplavnih voda preko urbanega območja.

Ključne besede: hidravlično modeliranje, urbane površine, modeliranje objektov, poplavna nevarnost.

Abstract

The impact of flooding is significantly greater in urban areas than in rural environments, as the exposure and value of property and the likelihood of endangering human lives is higher. There is therefore a great need for hydraulic models, which can predict the direction and extent of flooding. Buildings pose obstacles to water flow, considerably affecting its course, wherefore buildings should be taken into account in hydraulic models. This study compared two different ways of taking account of buildings in mathematical hydraulic models. The first approach models buildings by increasing the value of the hydraulic roughness coefficient for building footprints, while the second approach includes buildings in a digital terrain model at their locations. We also analysed the sensitivity of modelling results in respect of the cell size of the computational mesh, which can significantly affect the results of hydraulic model. Hydraulic analysis was carried out with 2D model for area of Gornja Radgona, which would be the flood of the Mura River in the event a part of flood protection wall

^{*} Stik / Correspondence: gasper.rak@fgg.uni-lj.si

[©] Rak G. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji <u>licence Creative Commons Priznanje avtorstva –</u> <u>Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.</u>

[©] Rak G. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the <u>Creative Commons Attribution – Non Commercial –</u> <u>ShareAlike 4.0 Licence</u>.

https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2018.02

collapsed. The impact of cell size and the approach of modelling buildings on the run-off regime and flood hazard within the analysed area was checked by indicators, such as water depth, velocity of the water current, extent of flooded areas, spatial distribution of flood hazard classes, etc. Changes in the duration of flood propagation along the urban area were also analysed.

Keywords: hydraulic modelling, urban areas, buildings modelling, flood hazard.

1. Uvod

Danes gradnjo na poplavnih območjih omejujemo, preverjanje vpliva novih objektov na tok vode pa je sestavni del postopka za pridobivanje gradbenega dovoljenja. Z vidika hidravličnega modeliranja lahko objekti (npr. hiše, zidovi) predstavljajo majhen del poplavnega območja, vendar imajo potencialno velik vpliv na količino, smer in hitrost poplavnih voda. Namen hidravličnih analiz je opisati razmere v naravi in ustvariti model, ki bo dovolj natančno opisal bistvene lastnosti modeliranih pojavov. Za modeliranje hidravličnih razmer na poplavnih območjih so bili z razvojem računalniške tehnologije razviti različni numerični modeli, najpogosteje pa se v praksi uporabljajo kombinirani 1D-2D in polni 2D modeli (Šantl in Rak, 2010). Kombinirani, dinamično povezani 1D-2D modeli so učinkovito orodje za simuliranje poplavnih scenarijev na širših območjih, kjer je glavni cilj analiza glavnih smeri toka po poplavnih površinah, globine in hitrosti vode ter obseg poplavljanja (Weisgerber et al., 2010; Rak et al., 2016). Ko pa so predmet hidravličnih analiz tokovne detajlnejše razmere izrazitih dvodimenzionalnih pojavov toka vode (obtekanje objektov, hipne zožitve ali razširitve pretočnega prereza, prenos gibalne količine vodnega toka s struge na poplavno območje itd.) in je lastnosti toka še vedno mogoče po globini »povprečiti«, je tokovne razmere v prečni smeri mogoče učinkovito zajeti le s polnim 2D hidravličnim modeliranjem (Santl in Rak, 2010). Pri analizah tokovnih razmer na gosteje poseljenih urbanih območjih se zaradi obtekanja objektov pojavlja kompleksen vodni tok in je natančno modeliranje poplavnih tokov zahtevnejše. Na sliki 1 je prikazano obtekanje objektov, ko voda iz struge na urbano območje doteka skozi odprtino v protipoplavnem zidu, objekti (zgradbe, ograje ipd.) pa so v numerični mreži zajeti z navideznim dvigom terena.



Slika 1: Simuliranje tokovnih razmer na urbanem območju z 2D modelom.

Figure 1: Simulating water flow in urban areas with a 2D model.

Pri izdelavi numeričnih hidravličnih modelov se vedno pojavi vprašanje o ustrezni izbiri velikosti numerične celice in načina upoštevanja ovir v vodnemu toku. Običajno se v numeričnih celicah, ki opisujejo geometrijo objektov, razmere simulirajo z lokalno povečano hidravlično hrapavostjo ali pa z izločanjem teh numeričnih celic iz računskega območja. Danes, ko so natančni podatki o višini terena iz laserskega skeniranja LIDAR in druge strokovne podlage (npr. kataster stavb, raba prostora) javno dostopni, se zdi uporaba digitalnega opisa prostora z veliko ločljivostjo primeren način za izločanje prostora objektov iz vodnega toka. Tako se izognemo problemu upoštevanja objektov s pomočjo posrednih parametrov, ki jih je treba šele umeriti.

V tej študiji je prikazana analiza vpliva dveh načinov upoštevanja objektov v naselju na rezultate hidravličnega modeliranja. Pri prvem pristopu je bil upoštevan vpliv objektov z umerjenim koeficientom hidravlične hrapavosti, pri drugem pa z nadvišanjem terena v digitalnem modelu terena na območju zgradb. Ob poplavah naseljenih območij se lahko pojavi tudi poplavljanje zgradb ali tokovi skozi odprtine v zgradbah. Tedaj je pri obravnavanju prostornin pristop s povečano vrednostjo koeficienta hidravlične hrapavosti v takšnih celicah morda bolj primeren. Običajno pa poteke tokovnic na urbanih območjih natančneje opiše modeliranje, ki upošteva zunanje stene objektov kot vodotesne ploskve.

Znano je, da se z uporabo gostejše numerične mreže oz. manjših dimenzij numeričnih celic natančnost izračunov veča, a je treba zaradi numerične stabilnosti ob tem ustrezno zmanjšati časovni korak, kar poveča čas izračuna. Tako je treba pri izdelavi vsakega numeričnega hidravličnega modela izbrati ustrezno gostoto numerične mreže, ki bo dajala dovolj natančne rezultate ob še sprejemljivo dolgem računskem času.

Z uporabo kazalnikov, kot so obseg površine poplavljenih območij, povprečna globina in hitrost ter potovalni čas poplavnega vala, so bili v študiji analizirani vplivi velikosti računskih celic, način upoštevanja objektov, značilnosti numerične mreže in vpliv numerične hrapavosti urbanih površin.

2. Hidravlični model

Za simulacijo razmer na poplavnih površinah je bil uporabljen brezplačen in javno dostopen numerični model HEC-RAS, ki z zadnjo različico 5.0, poleg enodimenzionalnega, omogoča tudi polno dvodimenzionalno in kombinirano, 1D–2D, modeliranje nestalnega toka.

Programsko orodje numerično rešuje Reynoldsove povprečene Navier-Stokesove enačbe dvodimenzijskega plitvega toka (angl. shallow water equations). Obravnava primere, ko je vpliv težnosti in trenja na ostenju dominanten v dinamični enačbi, vpliv viskoznosti in advekcije pa lahko zanemarimo. S kombinacijo takšne dinamične enačbe z enačbo za ohranitev mase dobimo poenostavljeno globinsko povprečeno enačbo potovanja (poplavnega) vala (angl. diffusion wave approximation). Za numerične izračune ie uporabljena diskretizacija obravnavanega prostora, s kombinacijo metode končnih volumnov in metode končnih razlik, da upoštevamo poenostavitve pri ortogonalnih mrežah (Brunner, 2016).

Za skrajšanje časa računanja program zajame podrobnejši potek terena znotraj numerične celice z uporabo t. i. podmrežne batimetrije (angl. sub-grid bathymetry). Ta pristop omogoča uporabo relativno velikih celic računske mreže, a z dodatnimi podrobnimi informacijami o topografiji znotraj posamezne celice. Slednje so upoštevane kot parametri, ki jih izrazimo kot volumske integrale in površine mejnih ploskev med celicami. Transport vodne mase torej upošteva podrobno topografijo posamezne diskretne celice, kar vpliva na razmere znotraj celice, kot vidimo na sliki 2. Razmere v celici so izračunane le z enačbami za ohranitev mase in se kasneje lahko uporabi v enačbi gibalne količine.



Slika 2: Prikaz večjih (nestrukturiranih) celic računske mreže s podrobnim opisom topografije pod njimi (Brunner, 2016; str. 8, slika 1).

Figure 2: Unstructured computational mesh with detailed sub-grid terrain data (Brunner, 2016; p. 8, Fig. 1).

V uporabljenem programu HEC-RAS je, z uporabo podmrežne batimetrije, kontinuitetna enačba izražena v obliki, ki jo dobimo, če integriramo po horizontalni ravnini z normalnim vektorjem \vec{n} in z uporabo Gaussovega teorema:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_{S} V \cdot \vec{n} \cdot dS + Q = 0, \tag{1}$$

pri tem so: t čas, V obravnavani volumen, Ω končni volumen posamezne celice, integrali pa so izračunani s pomočjo informacij o podrobni topografiji pod celico. Vsi dotoki oz. iztoki skozi zgornjo ali spodnjo ploskev volumna Ω (npr. izhlapevanje ali padavine) so zajeti s količino Q. Volumen vode v celici lahko zapišemo kot funkcijo vodne gladine (*H*), drugi člen enačbe (1) pa kot vsoto pretakanja preko vertikalnih meja obravnavane celice. Tako dobimo enačbo za ohranitev mase, izraženo v obliki za podmrežno batimetrijo.

$$\frac{\mathfrak{Q}(H^{n+1})-\mathfrak{Q}(H^n)}{\Delta t} + \vec{V}_k \cdot \vec{n}_k \cdot A_k(H) + Q = 0, \qquad (2)$$

kjer so: H časovno spremenljiva kota gladin vode, nindeksi, ki označujejo časovne korake, Δt časovni korak, \vec{V}_k povprečna hitrost, \vec{n}_k enotski normalni vektor mejne ploskve k in $A_k(H)$ površina k-te mejne ploskve v odvisnosti od višine gladine vode H.

Vidimo, da za izračun enačbe (2) potrebujemo podrobnejše podatke o podmrežni batimetriji, o obliki volumna celice $\Omega(H)$ in podatek o površini mejnih celic $A_k(H)$ v odvisnosti od višine gladine vode (slika 2). Kadar slednja informacija (še) ni na razpolago, se izračuna iskani volumen z uporabo preproste enačbe za prostornino škatle, $\Omega(H) = P * h$, kjer je P površina celice in h = H-z, kot globina vode (tj. kota gladine vode minus kota terena). Za površino k-te mejne ploskve uporabimo enačbo $A_{\kappa}(H) = l_k * h$, kjer je l_k dolžina roba k mnogokotne numerične celice. Pri tem sta P in l_k lastnosti numerične celice in torej neodvisna od H.

Kadar bi bila površina numerične celice suha, je $A_k(H)$ enak nič in bi v sistemu enačb manjkal tudi člen \vec{V}_k , torej bo sistem enačb nedefiniran. Ker pa tedaj dinamični enačbi pri suhih celicah data rezultat $\vec{V}_k = 0$, takšne vrednosti omogočajo nemoten izračun razmer pri omočenju in osuševanju numeričnih celic.

Programsko orodje omogoča, da je numerična mreža lahko sestavljena iz največ osmih ogliščnih poligonov, ki so lahko nepravilnih oblik in poljubnih velikosti, vendar pa to lahko pomembno vpliva na stabilnost in natančnost izračuna. Rezultat izračuna je namreč v veliki meri odvisen od velikosti, orientacije in geometrijskih značilnosti mrežnih elementov. Mejne površine med celicami so upoštevane kot natančen prečni prerez, odvisen od topografije pod njimi. Za vsako stranico računske celice program že v naprej izračuna hidravlične lastnosti: krivulji odvisnosti površine in omočenega oboda pretočnega (vertikalnega) prereza od višine vode in pripadajočo hrapavost. Spreminjanje volumna vode v celici od višine vode v njej pa se izračuna za (vsako) celotno celico.

3. Izračuni poplavljanja Gornje Radgone, če Mura poruši del varovalnega zidu

Gornja Radgona je pred visokimi vodami Mure varovana s protipoplavnimi nasipi in z betonskim zidom, sestavljenim iz 80 m dolgih segmentov. Za nadaljnje analize smo predpostavili dogodek, da bi se en segment betonskega zidu pri visoki vodi Mure porušil in bi voda Mure vdrla v naselje.

3.1. Umerjanje modela in robni pogoji

Hidravlični model je bil najprej za odsek Mure vzdolž Gornje Radgone umerjen za visoke vode na podlagi uradne pretočne krivulje vodomerne postaje Gornja Radgona I in najvišjega zabeleženega vodostaja dne 22. 8. 2005, ko je bil največji pretok Q =1350 m³/s. Z izračuni je bila za 723 m dolgi odsek Mure določena vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti $n_g = 0.028$. Ob dogodku leta 2005 je na odseku Mure mimo Gornje Radgone Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) z Dopplerjevim merilnikom izvedla tudi meritve hitrosti vodnega toka (Balažic, 2005). Ta vrsta meritev je razmeroma redka in smo jo uporabili kot pomemben dodatni podatek pri umerjanju in verifikaciji numeričnega modela. Meritve ARSO so pri prvem nizu meritev pokazale, da je bil pretok v mejah med 1200 in 1350 m3/s in hitrosti vode med 2,8 in 3,2 m/s. Pri drugem nizu meritev pa je bil pretok med 1300 in 1500 m3/s in hitrosti vode med 2,5 in 3,0 m/s (Kobold, 2006).

Pri umerjanju smo dosegli dobro ujemanje po globini povprečenih hitrosti, ujemanje gladin pa je bilo znotraj intervala \pm 5 cm. Umerjanje modela glede na izračunani obseg poplavnega območja je bilo izvedeno s primerjavo porazdelitve globin in obsegom poplavljanja, določenih v sklopu projekta Dra-Mur-CI s programom MIKE Flood (Müller et al., 2011) (slika 3).



Slika 3: Poplavni karti: iz projekta Dra-Mur-CI (MIKE Flood) (levo), iz te študije (HEC-RAS 5.0) (desno). Figure 3: Flood hazard maps: from Dra-Mur-CI project (MIKE Flood) (left), from this study (HEC-RAS 5.0) (right).

Hidravlična analiza nestalnega toka je upoštevala časovni potek hidrograma Mure iz leta 2010 izmerjenega na VP Mureck, a s takšnim povečanjem pretokov, da je vrednost konice vala dosegla $Q_{100,VV}$ Mure. Spodnji robni pogoj je bil v modelu upoštevan kot pretočna krivulja v dolvodnem prerezu Mure, ki je bila izračunana v hidravličnem modelu reke Mure v sklopu projekta Dra-Mur-CI (www.dramurci.eu).

3.2. Načini upoštevanja objektov na urbanem območju v numerični mreži

Raziskali smo občutljivost rezultatov modeliranja na spreminjanje štirih parametrov, in sicer smo analizirali vpliv različno izbranih velikosti numeričnih celic, pomembnost podrobnejše razporeditve celic na mestih ob objektih, vpliv dveh načinov upoštevanja objektov v modelu in določili vpliv na vrednosti koeficientov hidravlične hrapavosti za urbano področje, kadar zgradbe sploh ne bi bile zajete v numerični mreži. Pregled spremenljivk v opravljenih izračunih je podan v preglednici 1. Skupno je bilo analiziranih 14 kombinacij spremenljivk.

Preglednica 1: Nabor spremenljivk, uporabljenih za analizo občutljivosti.

Table 1:	A set	of variab	les us	sed for	sensitivity	,
analysis.						

Vhodni parametri	Osnovna vrednost	Varianta 1	Varianta 2
Osnovna velikost celic	6 × 6 m	10 × 10 m	20 × 20 m
Razporeditev mreže	natančna, zgoščena ob vseh objektih	preprosta, a zgoščena mreža ob porušenem zidu ob Muri	preprosta
Upoštevanje objektov	zvišanje višine v DMT	n _g = 1	/
n _g (urbane površine)	0,04	0,03	0,05

Pri preprostih mrežah so celice enakomerno velike, njihove stranice pa se ne prilagajajo topografiji terena ali objektov. Pri natančnih mrežah stranice računskih celic potekajo po robovih objektov, objekte pa se upošteva z zvišanjem terena na območju objekta nad koto poplavne vode.

3.3. Kazalniki vpliva načina upoštevanja objektov v numerični mreži

Za celovito presojo vpliva načina modeliranja poseljenih območij na rezultate hidravličnega modeliranja so bili izbrani kazalniki, ki merljivo odražajo vpliv na izhodne razmere in so pomembni za določanje stopnje poplavne nevarnosti na območju. Vpliv znotraj obravnavanega območja smo analizirali z dosegom poplavnih voda, s prostornino vodne mase na poplavljenem območju, s povprečno globino in hitrostjo vode ter s sledenjem sprememb porazdelitve razredov poplavne nevarnosti (po predpisu Slovenije, skladnem s poplavno direktivo EU). Za vsak parameter smo analizirali spremembe izhodnih parametrov glede na izbrano izhodišče - tj. referenčno stanje, ki so rezultati modela z velikostjo celice 6 × 6 m, z računsko mrežo, zgoščeno ob stranicah zgradb, z upoštevanjem vpliva zgradb z zvišanjem terena na tlorisni površini zgradb in z vrednostjo koeficienta hidravlične hrapavosti $n_g = 0.04$ za urbane površine med zgradbami. Analizo smo izdelali samo znotraj poplavnega območja v Gornji Radgoni in zanemarili majhne spremembe na odseku Mure, kjer je prostornina visokovodnega vala veliko večja kot količina vode, ki je zalila poplavno območje v Gornji Radgoni.

Analizo vpliva upoštevanih spremenljivk smo izdelali samo za maksimalne vrednosti hitrosti in globin, saj bi težko primerjali vse časovno spremenljive veličine. Ker na ta način ne dobimo informacij o širjenju poplavnega vala v naselju, smo analizo časovnih sprememb vala znotraj urbanega območja izvedli s spremljanjem časovne dinamike globine in hitrosti vode v štirih izbranih lokacijah (slika 4). Rezultati analize pokažejo, kdaj in kje pride do zakasnitve širjenja poplavnega vala pri različnih računskih primerih. Z izbiro lokacij smo želeli zajeti razmere predvsem na mestih z večjimi hitrostmi vode in lokacije z večjimi razlikami v vrednostih. Skupne poplavljene površine urbanega območja so pri različnih izračunih znašale od 3×10^5 do 5×10^5 m².



Slika 4: Lokacije štirih točk, kjer smo analizirali spremembe časovne dinamike globin in hitrosti vodnega toka.

Figure 4: The location of points where changes in the temporal depth and velocity dynamics of water flow were analysed.

Kazalniki so bili izraženi v odstotkih po enačbi:

$$\Delta = \frac{V_i - V_{os}}{V_{os}} \cdot 100,\tag{3}$$

kjer so Δ sprememba posameznega kazalnika [%], V_i vrednost kazalnika pri izbranem primeru in V_{os} vrednost kazalnika pri referenčnem primeru.

4. Rezultati in diskusija

4.1 Vpliv velikosti računske mreže

V hidravličnem modelu je uporabljena podmrežna batimetrija, zato se podrobnejše informacije o razgibanosti terena v numeričnih celicah ne izgubijo. Prednost tega pristopa je, da je vpliv velikosti računskih celic manjši kot pri pristopih, ko se za posamezno celico uporablja le informacija o povprečni višini terena znotraj celice. Pri variantah s preprosto računsko mrežo je povprečna velikost celice dejansko blizu izbrani osnovni velikosti, le vzdolž zidu ob Muri je nekoliko spremenjena zaradi preseka celic in zidu ter manjših dimenzij, da se bolje zajamejo dotočne razmere vzdolž odprtine v porušenem delu zidu (slika 5).



Slika 5: Preprosti računski mreži: z velikostjo celic 20×20 m (levo) in 6×6 m (desno). *Figure 5:* Simple computational meshes: with cell size 20×20 m (left) and 6×6 m (right).



Slika 6: Razlika med zgoščenima računskima mrežama: z velikostjo celice $20 \times 20 m$ (*levo*) in $6 \times 6 m$ (*desno*). *Figure 6: Difference between dense computational meshes: with cell size* $20 \times 20 m$ (*left*) and $6 \times 6 m$ (*right*).

Z lokalnim zgoščevanjem in izdelavo natančnejše mreže manjših celic okoli objektov v vodnem toku imajo slednje bistveno manjšo povprečno površino celice. Ker lahko ustvarimo celice poljubnih oblik (z do 8 oglišči), lahko njihove stranice potekajo tudi vzdolž meja manjših objektov (slika 6). S tem pa vnašamo v izračune tokovnih razmer mnogo lokalnih posebnosti, zato so za ugotavljanje vpliva velikosti računskih celic primernejši modeli s preprosto mrežo celic.

Spreminjanje celotnega obsega poplavljenosti glede na velikost računske mreže lahko torej bolje ugotavljamo pri preprostih mrežah. Analiza je pokazala, da je obseg poplavljanja največji pri največjih celicah, z manjšanjem velikosti celic pa se obseg manjša. Največja razlika skupne površine poplavljenosti med modeloma s celico 20×20 m in 6×6 m, z enakim načinom upoštevanja objektov in oblike celic, je bila v našem primeru 11,9 %. Tudi pri natančnejših mrežah, kjer stranice računskih celic potekajo po robovih objektov, objekte pa se upošteva z zvišanjem terena, se obseg poplavljenih območij prav tako zmanjšuje z manjšanjem računske celice.

Enak trend se pokaže tudi pri hitrostih vodnega toka. Hitrejše poplavljanje območja in večji obseg poplav pri večjih velikostih celic se smiselno ujema z ugotovitvami preteklih raziskav (Yu and Lane, 2006a, Yu and Lane, 2006b). Maksimalna sprememba hitrosti glede na naš referenčni primer pri celicah z velikostjo 20×20 m znaša 30,9 %, pri velikosti 10×10 m je 11,8 %, pri izbranih najmanjših dimenzijah celic pa je razlika manjša od 2,6 %. Tudi razpršenost rezultatov povprečnih hitrosti se manjša z velikostjo celic. Iz tega lahko sklepamo, da so rezultati hitrosti natančnejši pri numeričnih mrežah z manjšimi računskimi celicami, kjer so izračunane manjše hitrosti. Razlogov za takšen odziv modela je več. Prvi razlog je v hitrostih, ki so izračunane na podlagi predhodno izračunanih podatkov o lastnostih podmreže batimetrije v vsaki celici (hidravlični radij, pretočna krivulja preko posamezne strani) iz povprečnih lastnosti celice, torej je vpliv posamičnih ovir v celicah manjši. Pri preprostih mrežah posploševanje topografskih lastnosti celice spremeni tudi smer toka, kar nadalje vpliva še na izračune močenja in sušenja celic. Drugi razlog je vpliv širjenja vode na dotlej nepoplavljene celice, ki upočasnjuje vodni tok, vendar je vpliv hitrosti odvisen od velikosti celice. Pri velikih računskih celicah na robu poplavljenega območja pri mirnem toku ni strmega čela vala na suhi podlagi, hkrati pa so manjše razlike v hitrostih in gladinah vode med sosednjimi celicami. Zato je vpliv opisanih poenostavitev večji, na drugi strani pa pri večjih celicah pride do hitrejšega numeričnega »premika« vode na sosednjo celico.

Pri iskanju primernih kazalnikov smo ugotovili, da se lahko vpliv velikosti računske celice najbolje prikaže s prikazom prostorskih sprememb in deležev razmerij posameznih razredov poplavne nevarnosti na obravnavanem območju. Na sliki 7 je porazdelitev treh razredov prikazana skladno s predpisom (Pravilnik, Ur. list RS št. 60/2007).

S primerjavo deležev površin posameznega razreda poplavne nevarnosti v veliki meri odpravimo vpliv spremembe celotne površine poplavljanja pri uporabi različno velikih celic, saj smo opazovali le spremembo relativnih deležev površin posameznih razredov.

Na obravnavanem območju se z večanjem velikosti celic večajo površine z globino poplavljenosti nad 1,5 m na račun drugih dveh razredov. Sprememba znaša do 12,3 %, kar predstavlja pomembno razliko v karti poplavnih nevarnosti, ki je podlaga za omejevanje posegov v prostor. Območje z največjimi spremembami je najbolj oddaljeno od mesta prelivanja vode iz struge na poplavno območje, kar je skladno z zgornjo ugotovitvijo o hitrosti širjenja poplavljanja. Ker so pri večjih računskih celicah izračunane večje povprečne hitrosti v celicah, se hitreje poplavlja urbano območje in numerično vanj doteka tudi večja količina vodne mase ob nastopu konice VV-vala v Muri, zato se v naselju pojavijo večje globine. V preglednici 2 je za različno velikost računske celice podana primerjava deležev površin posameznega razreda glede na skupno površino poplavljenega območja za različne velikosti računske celice.



Slika 7: Porazdelitev razredov poplavne nevarnosti glede na kriterij globin pri različni velikosti celice računske mreže.

Figure 7: Distribution of flood hazard classes according to the criterion at different cell size of computational mesh.

Preglednica 2: Deleži površin posameznega razreda znotraj poplavljenega območja, podani v %.

Table 2: Size proportion of a particular class within the flooded area, given in %.

	Velikost	t elementov mreže		
Stopnja nevarnosti	6 × 6 m	10 × 10 m	2 × 20 m	Maksimalna sprememba
Majhna nevarnost	35,0 %	33,8 %	30,3 %	-4,7 %
Srednja nevarnost	47,4 %	42,2 %	39,9 %	-7,5 %
Velika nevarnost	17,6 %	24,1 %	29,9 %	+12,3%
Skupna površina	100,0 %	100,0 %	100,0 %	

4.2 Upoštevanje zgradb s povišano vrednostjo koeficienta hidravlične hrapavosti oziroma z zvišanjem območja zgradb nad nivo poplavljanja

Izračuni za obravnavano območje pokažejo, da se pri upoštevanju območja pod zgradbami s povišano vrednostjo koeficienta hidravlične hrapavosti pojavi večji obseg poplavljanja kot v primeru, ko so meje zgradb upoštevane z vertikalno steno numerično nadvišanega terena v DMT. V prvem primeru se namreč voda lahko pretaka preko območja zgradb, v drugem primeru pa so celice izločene iz vodnega toka. Primerjave glede na izbrani referenčni model pokažejo, da se površina poplavljenosti poveča za 12 % oziroma za 3 %, če površino objektov odštejemo od skupne poplavljene površine. Ob upoštevanju dejanske gostote poselitve in porazdelitve zgradb v obravnavanem primeru je mogoče ugotoviti, da pri modelih z večjimi celicami odstotek hiš predstavlja manjši delež celotnega obsega poplavljanja in torej povečanje obsega poplavljenosti ni odvisno samo od deleža upoštevanih površin zgradb v modelu.

Rezultati tudi pokažejo, da je od načina upoštevanja zgradb bolj odvisno hitrostno polje kot pa obseg poplavljenosti. Najbolj nazorno to opazimo na območju vtoka vode iz Mure v urbano okolje, kjer so hitrosti vodnega toka najvišje in so zato razlike bolj opazne. Tukaj razlike v hitrostih dosežejo tudi preko 30 % glede na referenčni model. Iz slike 8 je razvidno, da se pri modelih z zvišanim terenom v DMT potek hitrosti pričakovano spremeni, saj vodni tok lahko teče le med objekti. V primerih, ko voda ne teče skozi zgradbe (npr. preko poslovnih prostorov), je torej hitrostno polje natančneje simulirano, če zgradbe upoštevamo z zvišanjem terena v DMT.

Povečana hidravlična hrapavost

Zvišanje terena v DMT



Slika 8: Maksimalne hitrosti toka, ko so zgradbe upoštevane s povečano hidravlično hrapavostjo (levo) oziroma z zvišanjem terena v DMT (desno).

Figure 8: Maximum flow velocities, where the buildings are taken into account with increased hydraulic roughness (left) and with increased DTM elevation (right).

Z manjšanjem računske celice je vpliv načina upoštevanja objektov manj opazen, saj se tudi pri modelih, ki upoštevajo objekte s povečano hidravlično hrapavostjo, razpored hitrosti približa rezultatom modela, ki v DMT upošteva višino hiš. Lokacije največjih hitrosti so zato pri modelih z dovolj majhnimi celicami natančneje opisane tudi, ko objekte upoštevamo samo s povečano vrednostjo hidravlične hrapavosti, katerih vrednosti pa je treba z umerjanjem šele določiti.

4.3 Vpliv porazdelitve in oblike celic numerične mreže

Razporejenost mreže, s katero zajamemo prostor obravnave, najbolj vpliva na tokovno sliko na zožanjih pretočnih prerezov zaradi zgradb v vodnem toku in mestih največjih hitrosti (slika 9), oblikovanje mreže na takšnih območjih pa pomembno vpliva tudi na stabilnost računa nestalnega toka.



Slika 9: Računska mreža modela, kjer rob celice vsebuje dvignjen teren na višino objekta (levo) in primernejša izbira računskih celic, ki ločeno obravnavata območje z zgradbo oz. sosednji teren (desno).

Figure 9: Computational mesh of the model where the cell at the overflow contains the elevated terrain of the building (left), and an example where the computational cell is divided along the building into two parts (right).

Vpliv porazdelitve celic na porazdelitev vodnih tokov je lahko znaten, če ovira vodnemu toku (npr. del protipoplavnega zidu ali stavbe) le delno leži znotraj večje računske celice. Predvsem na ožjih delih lahko takšno oblikovanje numerične mreže dodatno vpliva na zmanjšano pretočno sposobnost, s tem pa zajezi oz. upočasni vodni tok in zmanjša obseg poplavljenosti. Pri obravnavanih scenarijih so takšni detajli pri izbiri poenostavljene numerične mreže pokazali do 23 % zmanjšanje povprečne globine na poplavljenem urbanem območju oziroma celo do 35 % zmanjšanje prostornine skupne vodne mase na poplavnem območju.

Pri primerjavah hitrostnih polj z različnim oblikovanjem celic so bile ugotovljene le manjše razlike med izračuni s preprosto in natančno računsko mrežo, ko smo uporabljali najmanjšo velikost računske celice (6×6 m). Pri večjih računskih celicah pa je vpliv velikosti celic bistveno večji od vpliva oblikovanja numerične mreže.

4.4 Vpliv vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti na urbanih površinah med zgradbami

Iz Manningove semiempirične enačbe, ki podaja odvisnost med pretokom, hitrostjo in globino vode, vidimo, da se pri enakem pretoku in pretočnem prerezu z manjšanjem hidravlične hrapavosti povečuje hitrost vode in posledično zmanjšuje njena globina. Na območjih poplavnih površin je ta enačba tudi upoštevana, torej je pričakovano, da bo pri zmanjšanju vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti prišlo do večjih hitrosti in manjših globin, pri zmanjševanju pa obratno. Čeprav se je vrednosti koeficienta hidravlične velikost hrapavosti spreminjala za 55,7 % (tj. od 0,03 do 0,05), je bil njegov vpliv na obseg poplavljanja najmanjši med vplivi obravnavanih parametrov. Na obseg skupne površine poplavljenih območij je vplival v obsegu manj kot 5 %, nekoliko več pa na prerazporeditev deležev površin razredov poplavne nevarnosti. Pri tem je treba upoštevati še, da je v tem vplivu vključen tudi vpliv topografskih lastnosti obravnavanega urbanega območja.

Pomembnejši vpliv različnih vrednosti hidravlične hrapavosti pa se izkaže pri hitrostnem polju, kjer prihaja do razlik velikosti 15–20 %. Grafično so razlike zaradi vrednosti koeficientov hidravlične hrapavosti vidne na prikazih hitrostnih polj in obsega poplavljenosti na sliki 10. Torej bi npr. gostejša zarast v naselju lahko bistveno zmanjšala lokalne hitrosti (erozijo) in upočasnila hitrost poplavljanja.



Slika 10: Primerjava polj hitrosti pri različnih hidravličnih hrapavostih, upoštevanih na urbanih površinah med zgradbami.

Figure 10: Comparison of the velocity fields for different hydraulic roughness for urban areas between the buildings.

4.5 Vpliv načina modeliranja urbanih površin na dinamiko poplavljanja

Različno upoštevanje dejanskih razmer v naselju pomembno vpliva tudi na izračunano dinamiko poplavljanja. Tokovne razmere v naselju pomembno vplivajo na dinamiko in količino dotoka Mure skozi odprtino v betonskem zidu, zato se lahko že pretočne količine na urbanem območju med seboj zelo razlikujejo. Primerjava dinamike širjenja vodnega vala v urbanem območju med varianto s preprosto mrežo in velikostjo celice 20×20 m ter varianto z upoštevanjem objektov s povečano vrednostjo koeficienta hidravlične hrapavosti izkazuje, da se časi pojava konice vala v opazovanih točkah lahko razlikujejo tudi za trikratno vrednost. Pojasnilo takšnih razlik izhaja iz analize vpliva velikosti celic, kjer je bilo ugotovljeno, da se pri izračunih z večjimi celicami v njih pojavljajo višje hitrosti, medtem ko so gladinska stanja zelo podobna. Iz kontinuitetne enačbe zato izhaja, da pri večjih celicah v naselje doteka več vode. Pri prej primerjanih variantah izračun pokaže, da naj bi se pri modeliranju z velikostjo celice 20 × 20 m v naselje izlilo kar dvakrat več vode - to pa zahteva umerjanje tudi dinamike poplavljanja.

Da je vpliv hitrosti vodnega toka prevladujoč, kaže tudi primerjava dinamike toka v opazovanih točkah v naselju. Potovanje poplavnih tokov je najhitrejše pri uporabi velikih računskih celic, najpočasnejše pa v primeru z zvišano hidravlično hrapavostjo urbanih površin, ki neposredno vpliva na hitrost vodnega toka. V primeru Gornje Radgone se je, kljub razmeroma majhnim dimenzijam poplavnega območja, v najbolj oddaljeni točki, ki leži približno 500 m od mesta izlivanja vode Mure v naselje, pojavila tudi do 10-urna razlika v potovalnem času konice, tj. do pojava najvišjega vodostaja v opazovani točki.

V tem naši rezultati potrjujejo ugotovitve drugih (Yu and Lane, 2006a), da je pri upoštevanju podmrežne topografije občutljivost izračunov na spremenljivo vrednost koeficienta hidravlične hrapavosti površin med zgradbami večja kot pri izračunih, ko se za celice uporablja zgolj podatek o povprečni višini terena in enoten koeficient hrapavosti znotraj celice. V našem primeru smo namreč s spremembo vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti za površine med zgradbami za 25 % dobili tudi do 30 % razliko potovalnega časa. Delno gre razlog za veliko občutljivost pripisati tudi topografiji in porazdelitvi zgradb na obravnavanem območju.

Za umerjanje dinamike poplavljanja se za ožji pas ob strugi lahko uporabljajo izmerjeni hidrogrami na vodotoku, sicer pa je treba razpolagati s hidrogrami v točkah na poplavljenem prostoru. Pri umeščanju HE na spodnji Savi so bile v ta namen uporabljene meritve v točkah na poplavnem prostoru, opravljene na fizičnem hidravličnem modelu (Rak et al., 2012). Tudi drugi avtorji v takšnih primerih ugotavljajo, da odtočnih razmer ni mogoče zajeti zgolj s spreminjanjem vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti, zato sta Yu in Lane (2006a in 2006b) predlagala, da naj se za posebnosti na območju obravnave uporabi tudi prilagajanje velikosti celic. V primeru Gornje Radgone se je občutljivost na vrednost koeficienta hidravlične hrapavosti, upoštevanega za urbane površine, pokazala kot dovolj velika in smo lahko s tem parametrom v zadostnem obsegu vplivali na časovno dinamiko poplavljanja urbanega območja. Če pa časovne dinamike širjenja poplavljenosti ne bi bilo mogoče umeriti oziroma doseči ustrezne dinamike zgolj s spreminjanjem vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti, bi lahko (npr. izmerjeno) povečanje hitrosti propagacije poplavnega vala dosegli še z uporabo večje računske celice.

5. Zaključek

Modeliranje širjenja poplavljanja v urbanih območjih je zahtevnejše kot pri ruralnih območjih, saj imajo zgradbe v naselju pomemben in raznolik vpliv na potovanje poplavnega vala, podatkov o dinamiki v naseljih, potrebnih za umerjanje modelov, pa običajno ni veliko. Podane so ugotovitve o vplivu načina upoštevanja zgradb na poplavljenem območju, o vplivu izbrane velikosti in oblike računskih celic ter o vplivu načina, ko ločeno upoštevamo zgradbe in različne hidravlične hrapavosti na urbanih površinah med zgradbami.

Opravljene raziskave dajejo nekatere širše veljavne ugotovitve in posebne ugotovitve, vezane na lastnosti poplavljenega dela Gornje Radgone:

- Z večanjem računske celice numerične mreže se povečujejo povprečne hitrosti in globine vodnega toka, kar se odraža v večjem končnem obsegu poplavljanja in hitrejšem širjenju poplavljanja preko obravnavanega območja.
- Pri večjih celicah in dani pozidavi je bil relativni vpliv objektov na hitrosti in smeri toka manjši kot pri manjših celicah. Prav tako je bilo omočenje celic pri uporabi večjih celic hitrejše, kar je dodatno pospešilo proces poplavljanja površin.

- Vpliv podrobnejšega oblikovanja celic, ko njihove stranice sledijo stenam zgradb, je največji na mestih zožitev pretočnega prereza in na mestih večjih hitrosti vodnega toka.
- Upoštevanje zgradb z nadvišanjem terena v DMT je pomembno izboljšalo izračune lokalnih posebnosti hitrostnega polja, pri tem pa se je obseg poplavljenih območij zmanjšal.
- Upoštevanje zgradb s povišano hidravlično hrapavostjo na območju njihove tlorisne površine ni ustrezno simuliralo hitrostnega polja, pri tem pa se je obseg poplavljenosti povečal.
- Z zmanjšanjem računske celice se je vpliv obravnavanih načinov upoštevanja objektov na obseg poplavljenosti zmanjševal. Vendar pa je umerjanje na dinamiko poplavljanja pokazalo, da bi lahko kdaj bilo potrebno tudi povečevanje celic.

Rezultati raziskav kažejo, da je mogoče izračunati obseg in dinamiko poplavljanja urbanih površin, le zahtevnost je večja, tako glede pridobivanja podatkov (za umerjanje) kot glede poznavanja lokalno pogojenih vodnih tokov (npr. ob stavbi, skozi stavbo).

Viri

Balažic, S. (2005). Poplava na reki Muri avgusta 2005.ObčinaBeltinci.Dostopnona:http://www.shrani.si/f/3r/Xi/2b3FOJtN/poplava-na-muri-2005.pdf

Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, 2D Hydraulic reference manual, Version 5.0. Institute for water resources, Hydrological engineering center, 538 p.

Kobold, M. (2006). Visoke vode in poplave med 20. in 23. avgustom 2005. *Ujma* **20**, 48–55.

Müller, M., Steinman, F., Novak, G. (2011). Hidravlični modeli za prekomejno usklajevanje protipoplavnih ureditev v Gornji Radgoni. 22. *Mišičev vodarski dan:* 185–192.

Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, Ur. list RS št. 60/2007: 3216. Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. (2012). Uporaba hibridnih hidravličnih modelov v postopku načrtovanja hidroelektrarn na Spodnji Savi. *Acta hydrotechnica* **25(42)**, 59–70.

Rak, G., Kozelj, D., Steinman, F. (2016). The impact of floodplain land use on flood wave propagation. *Natural hazards* **83(1)**, 425–443. <u>https://doi.org/10.1007/s11069-016-2322-0</u>.

Šantl, S., Rak, G. (2010). Analiza poplavne nevarnosti in odtočnega režima – uporaba različnih tipov hidravličnih modelov. *Gradbeni vestnik* **59(6)**, 147–156.

Weisgerber, A., Gutierrez-Andres, J., Wilson, G., Marias, F., Karanxha, A., Clarke, R., Millington, R. (2010). Physical-computational modelling comparison in Ireland. *International Symposium on Hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Kitajska, Nanjing*: 192–198.

Yu, D., Lane, S. N. (2006a). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, Part 1: mesh resolution effects. *Hydrological Processes* **20(7)**, 1541–1565. https://doi.org/10.1002/hyp.5935.

Yu, D., Lane, S. N. (2006b). Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, Part 2: development of a sub-grid-scale treatment. *Hydrological Processes* **20**(7), 1567–1583. https://doi.org/10.1002/hyp.5936.