

PRIMERJAVA 1D-, 2D- IN KOMBINIRANEGA HIDRAVLICNEGA 1D/2D-MODELA NA IZBRANEM ODSEKU VODOTOKA S PROGRAMOM HEC-RAS

COMPARISON OF 1D, 2D AND COMBINED 1D/2D HYDRAULIC MODEL OF SELECTED RIVER SECTION USING HEC-RAS

Anja Črep, mag. inž. grad.

crep.anja@gmail.com

doc. dr. Janja Kramer Stajniko, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo,
janja.kramer@um.si

ZNANSTVENI ČLANEK

556.166:532.5(078.9)

Povzetek | Pri ugotavljanju poplavne varnosti vodotoka kot tudi načrtovanju ureditvenih ukrepov je treba izdelati hidrološko-hidravlično študijo, s katero se predvidi vpliv visokih voda na obravnavanem območju vodotoka. Za izdelavo hidravlične študije je danes na voljo mnogo programov, ki omogočajo preračune toka s prosto gladino za različne vrste in režime toka. V prispevku je prikazana uporaba programa HEC-RAS, ki je bil razvit pri ameriški vojski in omogoča preračune stalnega, nestalnega, enakomernega in neenakomernega toka, pri tem pa daje podporo tako 1D- kot tudi 2D- ter kombiniranim 1D/2D-modelom. V članku so za izbrani odsek vodotoka predstavljene štiri različne hidravlične analize, na podlagi njihovih rezultatov pa so ugotovljene prednosti in pomanjkljivosti posameznega modela.

Ključne besede: hidravlična analiza, HEC-RAS, tok s prosto gladino

Summary | When estimating the flood safety and regulation of a stream, the hydrologic-hydraulic analysis is necessary in order to predict the influences of high water in a selected area. There are many available computer programs that enable the hydraulic analysis of open channel flow for different flow types and regimes. In the present paper the program HEC-RAS is used, which was developed by American army and allows calculations for steady, unsteady, uniform and non-uniform flow, using 1D and 2D as well as a combination of 1D/2D models. The paper presents the results of four hydraulic analyses and a summary of main advantages and disadvantages of each model.

Key words: hydraulic analysis, HEC-RAS, free surface flow (open channel flow).

1 • UVOD

Za izdelavo hidrološko-hidravličnih študij so se v preteklosti največ uporabljali enodimenzionalni (1D) modeli, v zadnjih letih pa z razvojem vedno bolj zmogljivih računalnikov v ospredje prihajajo dvo- (2D) in tridimenzionalni (3D) modeli. Ti za razliko od 1D-modelov omogočajo natančnejše napovedovanje dogodkov ob nastopu visokih voda, saj se tok vode pri 2D-modelih računa v dveh oz. pri

3D-modelih v treh smereh, pri 1D-modelih pa je račun omejen zgolj na smer glavnega toka. Poleg izbire modela imamo na voljo tudi možnosti preračuna različnih vrst toka (stalni, nestalni, enakomerni, neenakomerni tok). Stalni in enakomerni tok se v naravi pojavljata le redko, najdemo ju zgolj v umetno narejenih kanalih s konstantnim prerezom. V naravnih vodotokih se praviloma pojavlja

nestalni neenakomerni tok, redkeje nestalni enakomerni tok.

V članku je predstavljen del hidravličnih analiz izbranega odseka vodotoka Lučnica s programom HEC-RAS, ki je bil podrobneje obravnavan v sklopu magistrske naloge (Črep, 2017). Predstavljene so analize za modele 1D stalnega toka, 1D nestalnega toka, 2D nestalnega toka in kombinirani model 1D/2D nestalnega toka. Na podlagi primerjave rezultatov analiz so povzete končne ugotovitve o primernosti posameznega modela kot tudi učinkovitosti z vidika porabe računskega časa za posamezno analizo.

2 • TEORETIČNE OSNOVE

Tok v naravnih vodotokih je tok s prosto gladino oziroma gravitacijski tok, katerega gonilna sila je gravitacija. Fizikalno gledano, je to tok realne tekočine, pri katerem lahko predpostavimo, da je voda nestisljiva, nima površinske napetosti, ne ustvarja pare, prav tako ne ponuja upora strižnim in nateznim silam, njen volumen pa ni odvisen od temperature (Steinman, 1999). Poznamo štiri možne kombinacije toka s prosto gladino:

- stalni (stacionarni) enakomerni tok,
- stalni neenakomerni tok,
- nestalni (nestacionarni) enakomerni tok,
- nestalni neenakomerni tok.

Pri vseh možnih kombinacijah se pojavljajo tudi različni režimi toka. Karakteristika toka v odprtih vodotokih je močno odvisna od razmerja med hitrostjo vode in hitrostjo potovanja vala. To razmerje opišemo z brezdimenzijskim Froudovim številom (Fr), ki ponazarja razmerje med vztrajnostnimi silami in gravi-

tacijsko silo. Za odprte vodotoke poznamo tri režime toka:

- mirni tok (tok vode s povprečno hitrostjo, ki je manjša od kritične hitrosti; $Fr < 1$);
- deroči tok (tok vode s povprečno hitrostjo, ki je večja od kritične hitrosti; $Fr > 1$);
- kritični oziroma mešani tok (nastaja takrat, ko so vzpostavljene pretočne razmere, pri katerih je za določeno specifično energijo pretok največji ali pri katerih je specifična energija za dani pretok najmanjša; $Fr = 1$). (Steinman, 1999)

Teorija toka s prosto gladino temelji na osnovnih zakonih fizike, in sicer zakona ohranitve mase (kontinuitetna enačba), zakona ohranitve energije in zakona ohranitve gibalne količine. Oblika uporabljenih enačb je odvisna od lastnosti toka in s tem povezanih predpostavk, ki jih privzamemo za obravnavani tok. Vse teoretične osnove matematičnega modela so podrobneje podane v priročniku programa

HEC-RAS (Brunner, 2016) in jih v tem prispevku opuščamo. Pri tem je treba omeniti, da je uporabljena verzija programa 5.0.3., ki poleg 1D-modelov daje podporo 2D- in kombiniranim 1D/2D-modelom. Dvodimenzionalni pretočni modeli predstavljajo območje modela, znotraj katerega je preračunan tok z algoritmom dvodimenzionalnega pretoka. Algoritem je bil razvit za uporabo strukturirane oz. nestrukturirane računske mreže, kar pomeni, da je lahko mreža sestavljena iz tri- do osemstranih celic. Najpogostejše uporabljene numerične metode so metoda končnih razlik, metoda končnih volumnov in hibridna diskretizacija. Metoda končnih razlik je najbolj ustrezna pri sistemih z ortogonalno mrežo, metoda končnih volumnov pa pride v poštev pri neortogonalnih sistemih in v primerih nastopa vrtnične viskoznosti. Ta implicitna metoda, v nasprotju z eksplicitnimi, dovoljuje uporabo večjih računskih korakov. Program pa največkrat uporabi kombinacijo vseh treh metod, saj velikokrat naletimo na tak sistem, kjer ena metoda sama po sebi ni dovolj učinkovita (Brunner, 2016).

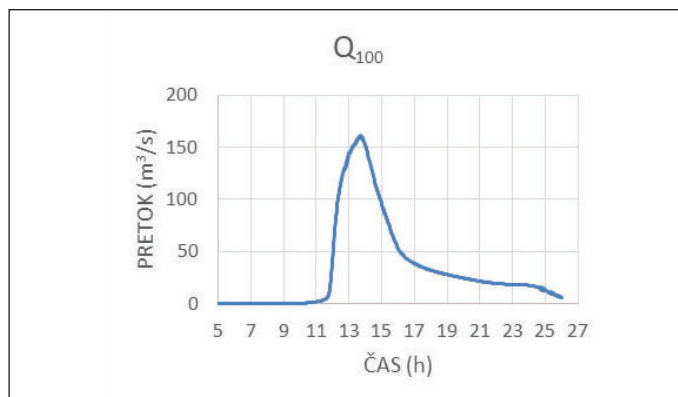
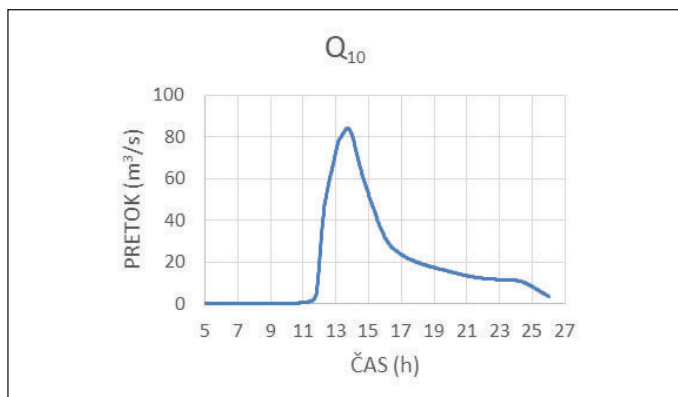
3 • MATEMATIČNI MODEL

Obravnavani vodotok predstavlja ca. 340 m dolg odsek vodotoka Lučnica v naselju Luče. Vodotok ima 0,7-% povprečni padec, leva brežina je poseljena, desna pa se dviga v visok teren (slika 1).

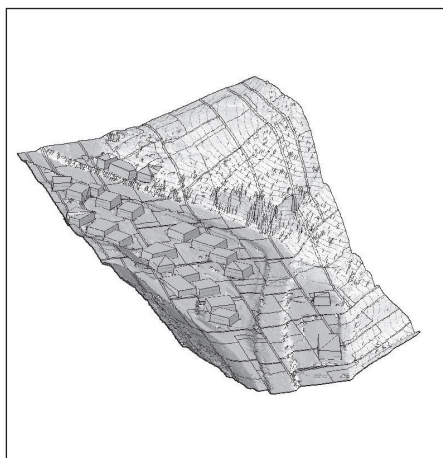
Matematično modeliranje je potekalo v dveh stopnjah. Najprej se je ustvaril hidrološki model, kjer se je natančno določilo celotno prispevno območje Lučnice. Na podlagi hidroloških podatkov o povratnih dobah (ARSO, 2013) sta se pridobila podatka o pretoku Q_{10} in Q_{100} za vodotok Lučnica, ki sta predstavljala maksimalen pretok obravnavanih valov in vel-



Slika 1 • Obravnavani odsek vodotoka Lučnica (ARSO, 2016).

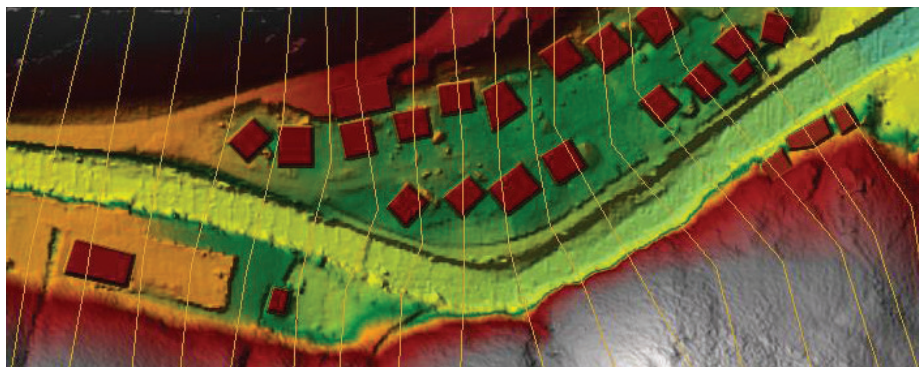


Slika 2 • Hidrograme valov na Lučnici s konicama Q_{10} in Q_{100} .

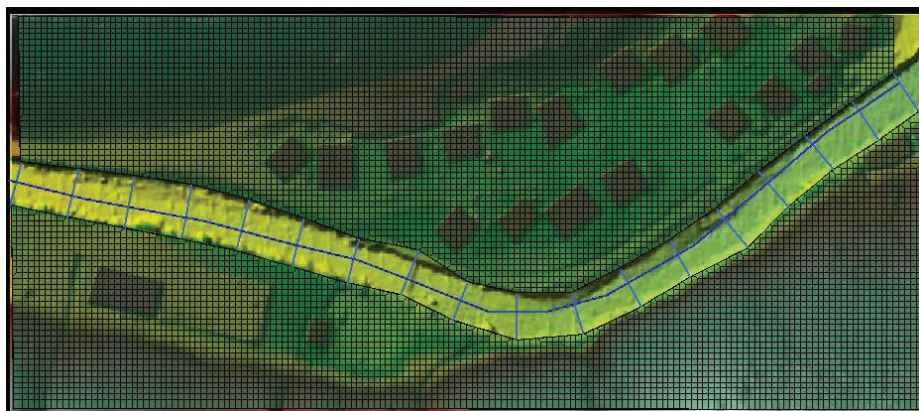


Slika 3 • 3D-model terena.

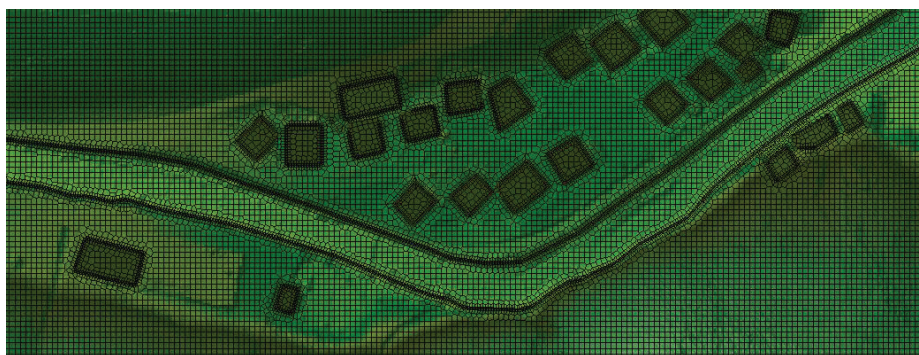
jala kot omejitvev za izdelavo karakterističnih pretokov. Nato so se s pomočjo programa Hydraflow, implementiranega znotraj programa AutoCAD Civil 3D, za vsako posamezno prispevno območje določili njegova velikost, povprečni padec terena, dolžina najbolj oddaljene točke od vodotoka in odtočni koeficient CN. Hidrološki podatki so se povzeli po analizi povratnih dob ekstremnih padavin (Povratne dobe, 2009) za merilno postajo Solčava, ki predstavlja najbližjo točko obravnavanemu območju. Vnesli so se podatki o času trajanja naliva 24 ur za povratno dobo deset in sto let. Na podlagi teh podatkov sta se ustvarila končna pretoka visokih voda, in sicer pretok Q_{10} , ki znaša $84,3 \text{ m}^3/\text{s}$, in Q_{100} , ki znaša $161 \text{ m}^3/\text{s}$, prikazana v grafih na sliki 2. Sledila je izdelava hidravličnega modela, kjer se je ustvaril 3D-teren območja s pomočjo DMR-podatkov, pridobljenih na spletni strani Atlasa okolja, ki vsebujejo le podatke o terenu, ročno pa so se na podlagi ortofoto posnetka (ARSO, 2016) dodali podatki o okoliških stanovanjskih zgradbah (slika 3).



Slika 4 • Geometrija 1D-modela.



Slika 5 • Geometrija 1D/2D-modela.



Slika 6 • Geometrija 2D-modela.

3.1 Vhodni podatki

Opravili smo štiri različne hidravlične analize (preračun 1D stalnega, 1D nestalnega, 2D nestalnega in kombinirani 1D/2D-model nestalnega toka) in pri vseh uporabili enak 3D-model terena, torej smo pri vseh analizah imeli enako geometrijo. Pri vsaki analizi smo uporabili enak Manningov koeficient hrapavosti in enak režim toka. Pri 1D-modelih smo geometrijo območja določili z 18 prečnimi profili na medsebojni razdalji 20 metrov (slika 4). Geometrija kombiniranega modela je enaka geometriji 1D-modela, le da so prečni profili primerno skrajšani in preko bočne konstrukcije povezani na 2D-območja (slika 5). Pri 2D-modelu smo celotno območje zamrežili (slika 6).

V preglednicah 1 do 4 so predstavljeni podrobni vhodni podatki za vsako posamezno analizo:

- 1D-analiza stalnega neenakomernega toka (Preglednica 1).

Pri preračunu stalnega toka se je upoštevala le maksimalna vrednost hidrogramov visokih voda, pri preračunu nestalnega toka pa se je vnesel celoten hidrogram. V ta namen robni pogoj pri stalnem toku predstavlja kritična globina, pri nestalnem toku pa je robni pogoj na gorvodnem koncu hidrogram pretoka, na dolvodnem pa normalna gladina. Časovni korak pri preračunu nestalnega toka je 0,1 s.

- 1D-analiza nestalnega neenakomernega toka (Preglednica 2).
- 2D-analiza nestalnega neenakomernega toka (Preglednica 3).

Pri 2D- in kombinirani analizi nestalnega toka se je uporabil časovni korak 2 s. Ta časovni korak se je izkazal za najustreznejšega, saj so rezultati pri manjši izbiri koraka ostali enaki, le čas računanja analize se je povečal.

- 1D/2D-kombinirana analiza nestalnega neenakomernega toka (Preglednica 4).

Q_{10}		84,3 m ³ /s
Q_{100}		161,0 m ³ /s
Režim toka		Mešan
Robni pogoji		Kritična globina
Koeficient hrapavosti n_g	Struga	0,04 s/m ^{1/3}
	Poplavne ravnice	0,08 s/m ^{1/3}

Preglednica 1 • Vhodni podatki 1D-analize stalnega neenakomernega toka.

Q_{10}		84,3 m ³ /s
Q_{100}		161,0 m ³ /s
Režim toka		Mešan
Robni pogoji		Gorvodno: hidrogram pretoka Dolvodno: normalna globina
Koeficient hrapavosti n_g	Struga	0,04 s/m ^{1/3}
	Poplavne ravnice	0,08 s/m ^{1/3}

Preglednica 2 • Vhodni podatki 1D-analize nestalnega neenakomernega toka.

Q_{10}		84,3 m ³ /s
Q_{100}		161,0 m ³ /s
Režim toka		Mešan
Robni pogoji		Gorvodno: hidrogram pretoka Dolvodno: normalna globina
Koeficient hrapavosti n_g	Struga	0,04 s/m ^{1/3}
	Brežini s poplavnima ravnica	0,08 s/m ^{1/3}
Velikost celic		2 m × 2 m
Število celic območja		11479

Preglednica 3 • Vhodni podatki 2D-analize nestalnega neenakomernega toka.

Q_{10}		84,3 m ³ /s
Q_{100}		161,0 m ³ /s
Režim toka		Mešan
Robni pogoji		Gorvodno: hidrogram pretoka Dolvodno: normalna globina
Koeficient hrapavosti n_g	Struga	0,04 s/m ^{1/3}
	Brežini s poplavnima ravnica	0,08 s/m ^{1/3}
Velikost celic		2 m × 2 m
Število celic	Leva ravnica	4940
	Desna ravnica	3965

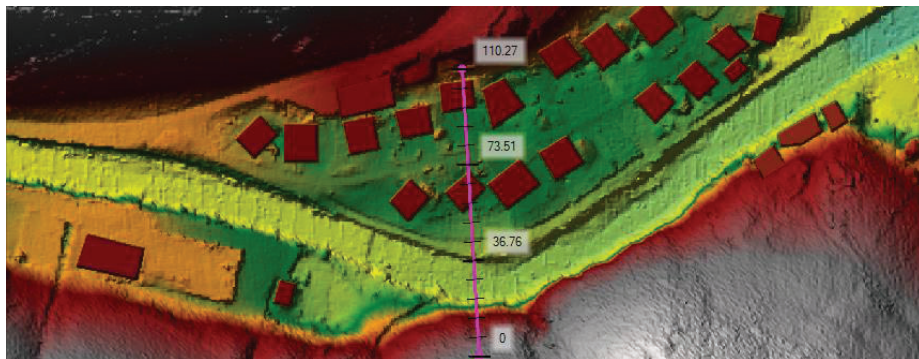
Preglednica 4 • Vhodni podatki 1D/2D-analize nestalnega neenakomernega toka.

4 • REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultati globlin in hitrosti vode so prikazani za en profil vodotoka Lučnica, prikazan na sliki 7. Graf na sliki 8 prikazuje prečni prerez profila. Rezultati so prikazani za desetletne (Q_{10}) in stoletne (Q_{100}) visoke vode.

Grafa na slikah 9 in 10 prikazujeta višino vode na obravnavanem profilu v primeru pojava Q_{10} in Q_{100} . Pri desetletnih vodah opazimo, da se največje vrednosti globine vode pojavijo pri 1D-hidraulični analizi stalnega toka. Sledita ji 1D- in kombinirana analiza nestalnega toka, najmanjše vrednosti daje 2D-analiza. Enaka situacija se pojavi pri pretoku Q_{100} , največje vrednosti nam daje 1D-analiza stalnega toka, najmanjše pa 2D-analiza nestalnega toka. Grafa na slikah 11 in 12 pa prikazujeta vrednosti hitrosti vode. Grafi hitrosti vode se ob upoštevanju Manningove enačbe odražajo obratno sorazmerno od grafov globlin vode. Tako se največje hitrosti pojavijo pri 2D-analizah nestalnega toka, najmanjše pa pri 1D-analizi stalnega toka.

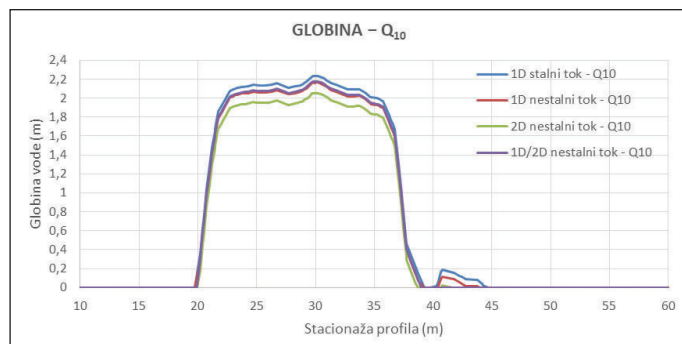
Preglednica 5 prikazuje maksimalne vrednosti globlin in hitrosti vode v obravnavanem profilu pri maksimalnem pretoku ($Q_{10} = 84,3 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{100} = 161 \text{ m}^3/\text{s}$). Z rdečo barvo so prikazane



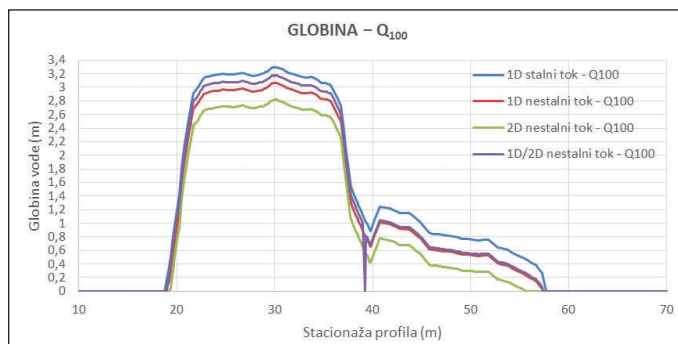
Slika 7 • Profil, za katerega so prikazani rezultati globline in hitrosti vode.



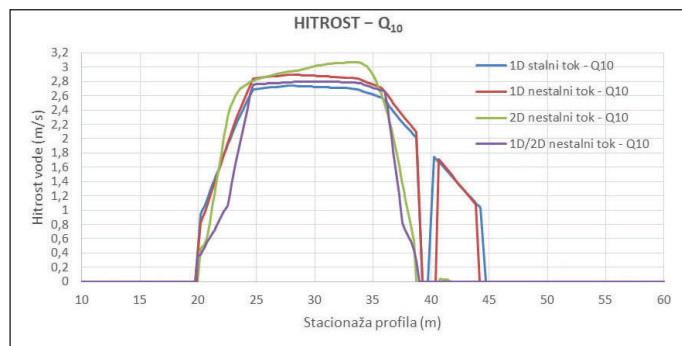
Slika 8 • Prečni prerez obravnavanega profila.



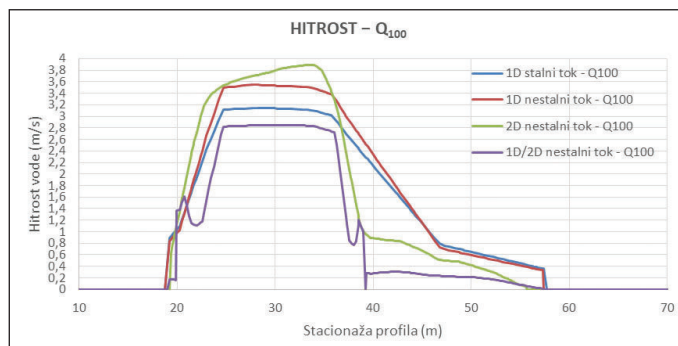
Slika 9 • Graf globline vode za Q_{10} .



Slika 10 • Graf globline vode za Q_{100} .



Slika 11 • Graf hitrosti vode za Q_{10} .



Slika 12 • Graf hitrosti za Q_{100} .

največje vrednosti, zelena barva pa ponazarja najmanjše vrednosti.

Iz rezultatov je razvidno, da najmanjše vrednosti globin sledijo iz 2D-modela nestalnega toka, sledi 1D-model nestalnega toka, največje vrednosti globin pa sledijo iz 1D-modela stalnega toka. Analiza kombiniranega sistema se glede na vrednosti izračunanih globin uvršča med 1D-analizo nestalnega toka in stalnega toka.

Rezultati, predstavljeni v preglednici 5, predstavljajo največje vrednosti, ki pa se seveda pojavljajo na lokaciji struge, kjer je najnižja obravnavana točka našega reliefa. Za izbiro najustreznejše analize moramo gledati celotno sliko analize, ne samo podatkov, pridobljenih na enem prečnem profilu. V ta namen so na slikah 13–16 prikazana celotna poplavna območja visokih voda, kjer je prikazano območje v primeru pojava Q_{100} .

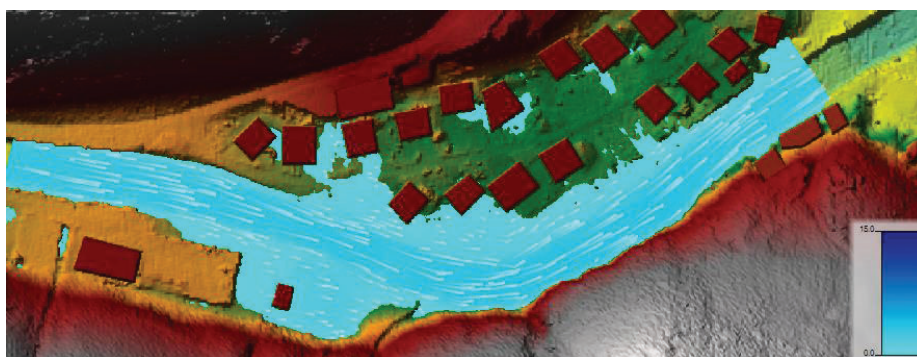
Največje poplavno območje se pojavi pri 1D-analizi stalnega toka, zmanjša se pri izbiri nestalnega toka. Na slikah 13 in 14 vidimo, da vodotok prestopi obe brežini, na levi poplavni ravnici pa opazimo manjše otočke vode. Ti otočki so odraz slabosti analiz 1D-sistemov. Na teh lokacijah je namreč kota reliefa manjša od okoliškega reliefa. Voda se je na teh lokacijah pojavila ob dovolj velikem pretoku in ni nikoli prepotovala poti od struge ter se tam zadržala. 1D-sistemi te nižje lokacije v vsakem primeru zapolnijo z vodo, čeprav se voda na teh lokacijah ne pojavi.

Manjša poplavna območja se pojavijo pri 2D- (slika 15) in kombinirani analizi (slika 16). 2D-analiza ima v nasprotju s kombinirano manjše poplavno območje. Vzrok je v velikosti računskih celic 2D-mreže. Čeprav so velikosti celic pri obeh analizah določene na $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, pri kombinirani analizi opazimo precej večje poplavno območje. Vzrok za to je razlika v geometrijskem definiranju struge. Pri 2D-analizi je celotna struga zamrežena s temi celicami, pri kombiniranem sistemu pa je definirana s prečnimi profili na medsebojni razdalji 20 m.

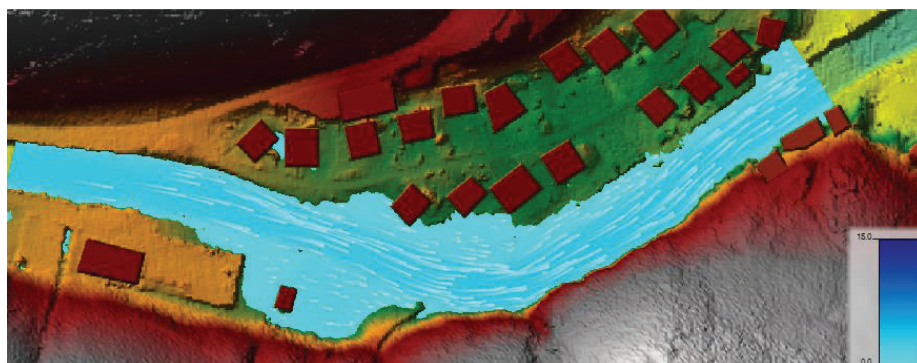
Glede na medsebojno primerjavo različnih modelov je razvidno, da najnižje vrednosti globin in najmanjše poplavno območje sledi iz 2D-modela, največje pa iz 1D-modela stalnega toka. Bistvena slabost 1D-modela je predvsem nenatančen opis geometrije poplavnih ravnin, saj je ta omejen na izbrano gostoto prečnih profilov. Rezultati jasno kažejo, da iz geometrijskega opisa izpuščena mesta podajo nerealno sliko poplavljenega območja, kar je treba pozneje smiselno interpretirati.

Analiza model/tok	Visoka voda	Profil	
		Globina (m)	Hitrost (m/s)
1D stalni tok	Q_{10}	2,233	2,740
	Q_{100}	3,294	3,148
1D nestalni tok	Q_{10}	2,163	2,895
	Q_{100}	3,061	3,545
2D nestalni tok	Q_{10}	2,053	3,072
	Q_{100}	2,816	3,895
1D/2D nestalni tok	Q_{10}	2,176	2,795
	Q_{100}	3,175	2,847

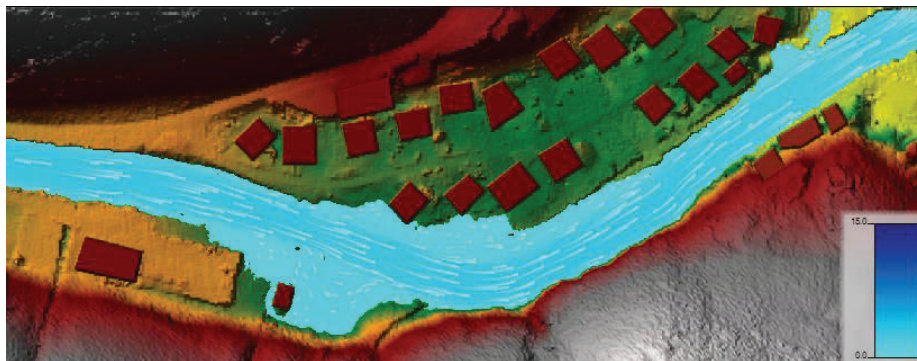
Preglednica 5 • Maksimalne vrednosti pri maksimalnem pretoku Q_{10} in Q_{100} .



Slika 13 • Poplavno območje 1D-analize stalnega toka – Q_{100} .

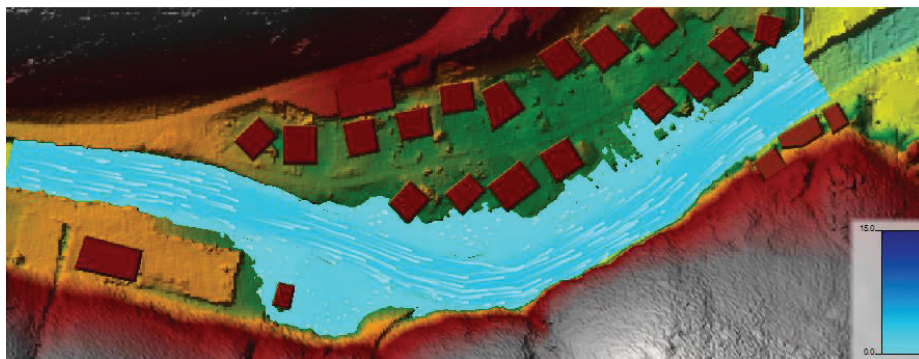


Slika 14 • Poplavno območje 1D-analize nestalnega toka – Q_{100} .



Slika 15 • Poplavno območje 2D-analize nestalnega toka – Q_{100} .

Zaradi relativno natančnega opisa geometrije poplavne ravnice pri 2D-modelu je slika poplavljenega območja bolj realna, vendar je ključna slabost te analize, da je z vidika porabe računskega časa zelo potratna, poleg tega je problematičen tudi opis geometrije struge, saj je potrebna natančna batimetrija. Kombinirani 1D/2D-model nestalnega toka je z vidika modeliranja in porabe računskega časa bolj optimalen, rezultati pa kažejo nekoliko višje vrednosti globin in poplavljenе površine kot 2D-model.



Slika 16 • Poplavno območje 1D/2D-analize nestalnega toka – Q_{100} .

5 • SKLEP

Glede na opravljene in zgoraj opisane hidravlične analize so končne ugotovitve naslednje:

- 1D-modeli so primerni za hidravlične preračune znotraj glavne struge za ravne rečne odseke in na mestih, kjer se v strugi pojavljajo objekti (mostovi, jezovi, prepusti ...).
- Analiza stalnega toka daje največje vrednosti globin vode in najmanjše vrednosti hitrosti vode.
- 1D-analize stalnega toka zahtevajo najmanj računskega časa, pri njih ne potrebujemo hidrograma poteka vala na vodotoku, ampak zgolj maksimalni pretok.
- Čeprav rezultati preračuna stalnega toka najbolj odstopajo, so te vrednosti na varni – pozitivni strani.
- Celotne 2D-analize so najbolj primerne za preračune poplavnih ravnin, z njimi ne moremo opraviti hidravličnih analiz, kjer se na strugi pojavljajo premostitveni objekti.
- Kombinirane analize so najbolj primerne za preračune na poplavnih ravninah in strugo, kjer se pojavljajo premostitveni objekti.

		Velikost celic računske mreže		
		10 m × 10 m	5 m × 5 m	2 m × 2 m
Število celic		455	1820	11479
Računski čas celotne simulacije				
Časovni korak simulacije	10 min	1 s	4 s	36 s
	1 min	4 s	13 s	1 min 24 s
	10 s	12 s	48 s	5 min 45 s
	5 s	18 s	1 min 20 s	9 min 16 s
	1 s	1 min 44 s	6 min	36 min 2 s
	0,5 s	3 min 35 s	12 min 10 s	180 min
	0,1 s	15 min 30 s	59 min 35 s	5 ur 50 min

- 2D-analize so zaradi zamrežitve celotnega območja z vidika porabe računskega časa najbolj časovno potratne.

Za konec dodajamo še preglednico 6, ki prikazuje razlike v računskem času 2D-hidravlične analize za različne velikosti celic računske mreže. Čas računanja se poveča s

povečanjem gostote mreže in zmanjšanjem časovnega koraka simulacije. Analize so bile opravljene na domačem prenosnem računalniku:

- Windows 7 Ultimate;
- Procesor i5-3210M, 2,50 GHz;
- 64-bitni operacijski sistem.

6 • LITERATURA

- ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Atlas okolja, http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso, 20. 6. Ljubljana, 2016.
- ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Povratne dobe velikih in malih pretokov za merilna mesta državnega hidrološkega monitoringa površinskih voda, <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/Povratne%20dobe%20Qvk%20CQnp.pdf>, Urad za hidrologijo in stanje okolja, Ljubljana, 2013.
- ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Povratne dobe za ekstremne padavine po Gumbelovi metodi, http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/precip-return-periods_2008.pdf, Ljubljana, 2009.
- Brunner, G. W., HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 5.0, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>, California, 2016.
- Črep, A., Hidrološko-hidravlična študija odseka vodotoka Lučnica v naselju Luče s programom HEC-RAS 2D, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, magistrsko delo, <https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=65501&lang=slv>, Maribor, 2017.
- Steinman, F., Hidravlika, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1999.