

MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA PRIMJENE NUMERIČKIH MODELA U PRAKTIČNIM PRIMJERIMA ZAŠTITE OD POPLAVA U BIH

NERMA LAZOVIĆ¹, AJLA MULAOMEROVIĆ-ŠETA¹

¹ Univerzitet u Sarajevu – Građevinski fakultet, Bosna i Hercegovina

Sažetak

Cilj ovog rada je kritički analizirati mogućnosti i ograničenja primjene numeričkog hidrauličkog modeliranja u praktičnim primjerima zaštite od poplava u Bosni i Hercegovini. U tu svrhu, istraženi su dva kontrastna case study-a: aluvijalni vodotok rijeke Sanice, za koji je razvijen i kalibrisan dvodimenzionalni (2D) HEC-RAS model s izrađenim linijama dopiranja i kartama opasnosti od poplava, te bujični tok rijeke Neretvice tokom ekstremnog poplavnog događaja u oktobru 2024.godine, analiziran kako bi se sagledala ograničenja modela u uslovima nestacionarnog i morfodinamički aktivnog tečenja.

Rezultati pokazuju da 2D modeli pružaju pouzdanu prostornu simulaciju poplavnih procesa u aluvijalnim riječnim dolinama, omogućavajući precizno određivanje inundacionih područja i podršku planiranju mjera zaštite. S druge strane, u bujičnim tokovima modeli pokazuju povećanu osjetljivost na ulazne podatke i numeričke pretpostavke, što ograničava kvantitativnu pouzdanost rezultata.

Zaključuje se da numeričko hidrauličko modeliranje predstavlja efikasan alat za podršku odlučivanju u zaštiti od poplava, ali njegova primjena zahtijeva pažljivu interpretaciju i kombinaciju s inženjerskom procjenom, posebno u ekstremnim i bujičnim događajima. Ovi nalazi pružaju smjernice za unapređenje modeliranja i implementaciju mjera zaštite od poplava u Bosni i Hercegovini.

Ključne riječi

numeričko hidrauličko modeliranje, zaštita od poplava, bujice, HEC-RAS 2D, linije dopiranja, mape opasnosti, Bosna i Hercegovina.

1 Uvod

Poplave predstavljaju jednu od najčešćih i najrazornijih prirodnih nepogoda kako u svijetu tako i u Bosni i Hercegovini (BIH), sa značajnim socio-ekonomskim posljedicama i dugoročnim utjecajem na sigurnost stanovništva i razvoj zajednica. Geografske i klimatske specifičnosti zemlje, institucionalna složenost i fragmentiranost u upravljanju vodama te ograničena ulaganja u preventivne mjere doprinose povećanoj ranjivosti naseljenih područja u BIH. Poplave 2014. godine, koje se smatraju jednim od najdestruktivnijih poplava koje su pogodile BIH i region (Plavšić et al., 2014) (Stadtherr et al., 2016), su jasno pokazale potrebu za boljim planiranjem, koordinacijom i tehničkim alatima za praćenje hidroloških pojava. Ove poplave su potakle nadležne Agencije za upravljanje vodama da poduzmu niz aktivnosti od kojih su najznačajnije: i. modernizacija mreže hidroloških stanica, ii. razvoj informacionog sistema za upravljanje vodama, iii. izrada preliminarne procjene rizika i karata opasnosti od poplava kao dio procesa usklađivanja s EU Direktivom o poplavama (2007/60/EC) (Smith, 2015), iv. izrada planova upravljanja rizikom od poplava, v. uspostava sistema za prognozu i upozorenje te vi. regionalna saradnja u okviru Savske komisije.

Primjena numeričkog hidrauličkog modeliranja predstavlja osnovu za efikasno planiranje i operativno upravljanje rizicima od poplava, jer omogućava kvantitativnu analizu interakcije vodotoka, terena i

hidrauličkih procesa tokom ekstremnih hidroloških događaja (Kumar et al., 2023). Savremeni modeli obuhvataju različite pristupe i nivoe složenosti, od jednodimenzionalnih (1D) i kombinovanih 1D/2D, do potpuno dvodimenzionalnih (2D) modela koji omogućavaju detaljan prikaz horizontalnog kretanja vode preko složenog terena (Gharbi et al., 2016), (Villazón et al., 2013), (Vashist and Singh, 2023a).

Ipak, mogućnosti numeričkih modela moraju se sagledati zajedno s njihovim ograničenjima. Ograničenja primjene numeričkih modela najčešće su vezana za pouzdanost podloga, teorijska ograničenja riječne hidraulike i niz pretpostavki koje se uzimaju prilikom matematskog opisa tečenja u rijeci, te ograničenja raspoloživih alata (Jovanović, 2023).

U aluvijalnim rijekama sa stabilnim koritom i jasno definisanim inundacionim područjima, 2D modeli precizno simuliraju prostornu raspodjelu dubina i brzina, omogućavajući izradu detaljnih karata opasnosti i podršku planiranju mjera zaštite. Suprotno tome, u bujičnim tokovima i tokom ekstremnih poplava modeli su osjetljivi na kvalitet ulaznih podataka i ne uzimaju u obzir dinamične promjene korita i transport krupnog nanosa, što povećava neizvjesnost rezultata. U takvim uslovima modeli ne predstavljaju kvantitativnu rekonstrukciju stvarnog stanja, već indikativnu procjenu procesa, dok inženjerska procjena i terensko iskustvo ostaju ključni za donošenje odluka.

Cilj ovog rada je kritički analizirati mogućnosti i ograničenja primjene numeričkih hidrauličkih modela u praktičnim primjerima zaštite od poplava u Bosni i Hercegovini, kroz dva kontrastna studijska slučaja:

(i) aluvijalni vodotok rijeke Sanice, za koji je razvijen i kalibrisan dvodimenzionalni (2D) HEC-RAS model i izrađene karte opasnosti od poplava, i

(ii) bujični tok rijeke Neretvice, analiziran tokom ekstremnog poplavnog događaja u oktobru, s ciljem sagledavanja pouzdanosti i ograničenja hidrauličke analize u uslovima izrazito nestacionarnog i morfodinamički aktivnog tečenja.

2 Metode

2.1 HEC-RAS 2D model

Za hidrauličke analize tečenja i provedbu numeričkih simulacija u oba praktična primjera (rijeka Sanica i rijeka Neretvica) korišten je HEC-RAS 2D verzija 6.3.1, komercijalni softverski paket razvijen od strane Centra Inženjerskog korpusa američke vojske. Modeliranje je obuhvatilo simulaciju dvodimenzionalnog nestacionarnog tečenja s ciljem procjene prostorne raspodjele dubina i brzina vode tokom razmatranih poplavnih događaja.

Hidraulički proračuni u HEC-RAS 2D zasnovani su na 2D jednačinama plitke vode (Saint-Venantove jednačine), koje opisuju očuvanje mase i impulsa za protok slobodne površine (Echeverribar et al., 2019). Ove jednačine se široko koriste za primjenu modeliranja poplava zbog svoje pogodnosti za simuliranje neujednačenih, nestabilnih i brzo promjenjivih tokova (Rangari et al., 2019), (Kumar et al., 2020).

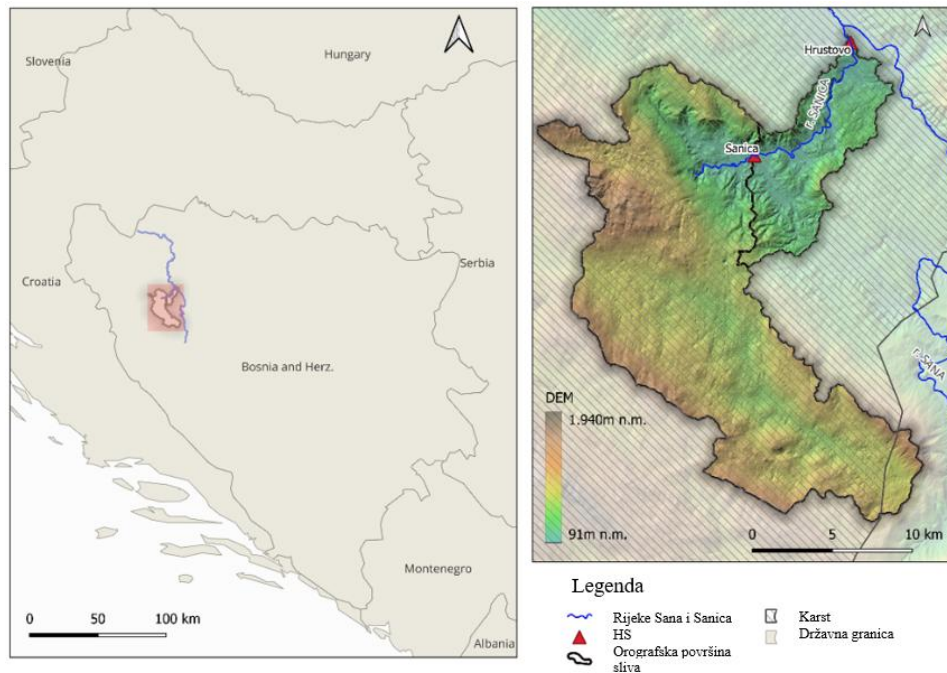
Numerička shema korištena u HEC-RAS 2D oslanja se na metodu konačnih volumena s implicitnim pristupom rješenja, omogućavajući stabilne proračune čak i pod vrlo promjenjivim uvjetima protoka. Detaljni ispis jednačina i postupak njihovog numeričkog rješavanja nalazi se u literaturi (Brunner, 2016).

2.2 Podaci i metodologija modeliranja – rijeka Sanica

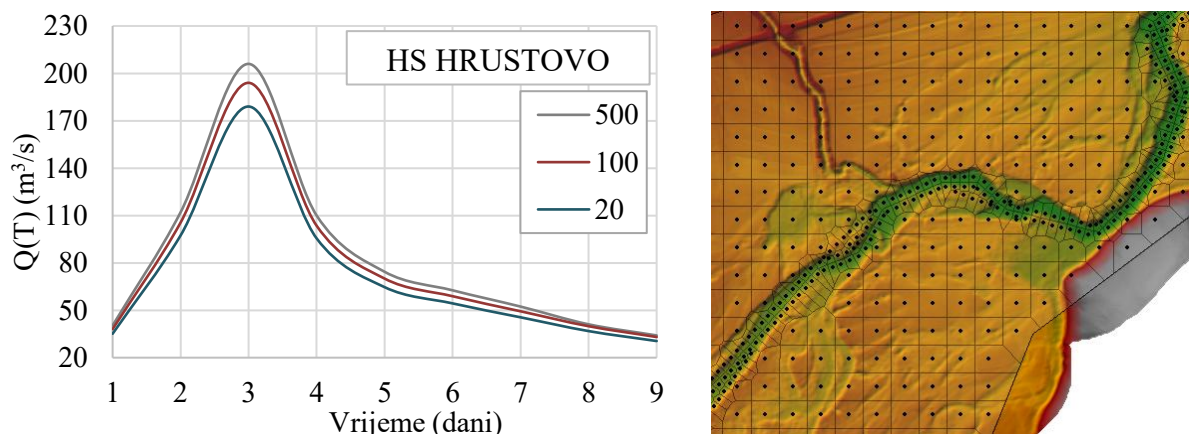
Opis područja. Rijeka Sanica se nalazi u zapadnom dijelu BIH, pritoka je rijeke Sane i pripada Crnomorskom slivnom području (slika 1). Dužina rijeke Sanice je oko 22 km, a površina slivnog područja iznosi 211 km².

Rijeka Sanica izvire u podnožju planine Grmeč na 225 m n.m. ($44^{\circ}17'49''$ N, $16^{\circ}8'11''$ E), a ušće u rijeku Sanu je na 177 m n.m.

Hidrološki podaci o velikim vodama preuzeti sa hidroloških stanica HS Hrustovo i HS Sanica. Hidrološka stanica Hrustovo počela je s radom 1966. godine i do 1990. godine podaci su se prikupljali jednom dnevno. Automatska stanica je instalirana 2005. godine, s vremenskom rezolucijom od satnog koraka. Podaci od 1990. do 2005. godine nedostaju, jer stanica nije bila u funkciji. Ukupna dužina snimanja je 44 godine. Za procjenu kvantila poplava korištena je statistička analiza godišnjih maksimalnih serija (GMS). Podaci o proticaju na HS Sanica mjere se od 2018. godine i stoga nisu pogodni za statističku analizu GMS. Kvantili poplava na HS Sanica određeni su linearnom regresijom s HS Hrustovo, detaljnije u literaturi (Lazović and Mulaomerović-Šeta, 2026).



Slika 1. Prikaz orografske granice sliva i krša u širem području hidroloških stanica na rijeci Sanici (lijevo) i elevacija terena (desno).



Slika 2. Hidrogrami velikih voda povratnog period 20, 100 i 500 godina na HS Hrustovo (lijevo) i računski mreža 2D hidrauličkog modela rijeke Sanice (desno).

Postavka modela. Hidraulički model rijeke Sanice pokriva cijelu njenu dužinu, od izvora do ušća u rijeku Sanu. Ulazni podaci potrebni za postavljanje hidrauličkog modela uključivali su:

- Geometrijske podatke o koritu i području plavljenja.
- Hidrološke podatke o karakterističnim hidrogramima poplava (Slika 2 lijevo).
- Hidrološke podatke o poplavnim valovima iz decembra 2022. i maja 2023. godine, snimljene na mjernim stanicama HS Hrustovo, korištene za kalibraciju i verifikaciju modela.

Geodetska podloga sastojala se od LiDAR-izvedenog DTM-a sa prostornom tačnošću od 1 m, dopunjenog digitalnim ortofoto kartama i fotografskom dokumentacijom poplavnih događaja iz decembra 2022. i maja 2023. godine.

Računska mreža je definirana unutar unaprijed odabranog 2D poligona područja protoka. Za hidraulički model rijeke Sanice, računski mreža se sastoji od 8336 ćelija. Odabrana veličina ćelije u području plavljenja je 30×30 m, dok je u području korita rijeke 10×10 m (slika 2 desno).

Nakon definiranja računski mreže, posebna pažnja posvećena je odabiru Manningovih koeficijenata hrapavosti, jednom od najznačajnijih parametara u hidrodinamičkim simulacijama poplava, čija vrijednost zavisi od tipa korita, zemljišta i vegetacije te se u HEC-RAS-u može prostorno diferencirati putem odgovarajućih slojeva.

Generirano je sedam scenarija s različitim vrijednostima Manningovog koeficijenta, od pojedinačnih procjena zasnovanih na literaturi do vrijednosti izvedenih za svaki piksel na osnovu analize digitalnih ortofoto mapa i satelitskih snimaka (npr. CORINE Land Cover, Google Earth). Svi generirani scenariji zasnovani su na istim geodetskim i hidrološkim ulaznim podacima, dok je jedina promjenjiva u postavkama modela bila vrijednost Manningovog koeficijenta hrapavosti, čime je omogućena direktna analiza njegovog uticaja na rezultate hidrodinamičke simulacije.

Prostorni domen 2D modela klasificiran je u različite kategorije korištenja zemljišta, pri čemu je svakoj kategoriji dodijeljen odgovarajući Manningov koeficijent na osnovu izvora iz literature. Konačne vrijednosti Manningovih koeficijenata određene su kalibracijom modela.

Kalibracija i verifikacija modela. Za kalibraciju 2D hidrauličkog modela korišteni su podaci o poplavnom valu iz decembra 2022. godine, dok je verifikacija provedena na osnovu podataka iz maja 2023. godine sa HS Hrustovo. Kalibracija je izvršena simulacijom velikih voda na rijeci Sanici i poređenjem simuliranih i izmjerenih vodostaja na HS Hrustovo (slika 3 lijevo), pri čemu su testirane različite vrijednosti Manningovog koeficijenta (Tablica 1). Usvojeni su parametri modela s najmanjim odstupanjem od mjerenih podataka. Razmatrani su modeli s uniformnim koeficijentom hrapavosti (M1–M3) i modeli s prostorno distribuiranim vrijednostima prema tipu pokrova zemljišta (M4–M7). Ocjena uspješnosti izvršena je primjenom pokazatelja slaganja u programskom okruženju R (paket hydroGOF), a kao najpouzdaniji odabran je model M6 (tablica 2). Njegova verifikacija na poplavnom valu iz maja 2023. pokazala je blago smanjenje pokazatelja slaganja, ali je ukupna uspješnost modela ostala na zadovoljavajućem nivou i bolja u odnosu na ostale testirane varijante (slika 3 desno).

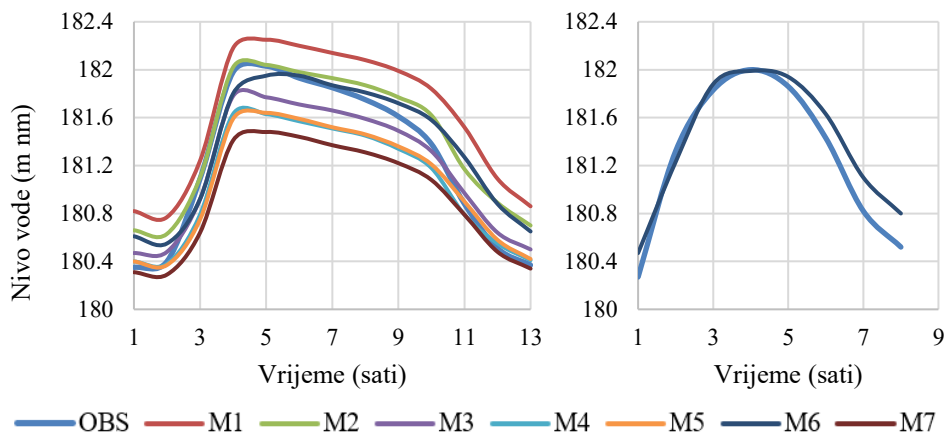
Tablica 1. Kalibracija modela – vrijednosti Manningovog koeficijenta otpora za sedam scenarija (modeli M1-M7)

Tip zemljišta	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Riječno korito	0,06	0,05	0,04	0,035	0,035	0,045	0,03
Šuma	0,06	0,05	0,04	0,12	0,25	0,30	0,30
Trava	0,06	0,05	0,04	0,045	0,06	0,10	0,10
Cesta	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04

Tablica 2. Mjere slaganja dobijene u procesu kalibracije i verifikacije na HS Hrustovo

Mjere	Kalibracija							Verifikacija M6
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	
Nash-Sutcliffeova efikasnost	-3,058	0,588	-0,889	-4,620	-4,495	0,550	-10,748	0,890
Srednja apsolutna greška	0,282	0,077	0,192	0,337	0,332	0,078	0,487	0,150
Srednja kvadratna greška	0,288	0,092	0,197	0,339	0,335	0,092	0,491	0,180

Boldirane vrijednosti predstavljaju najbolje slaganje.

**Slika 3.** Kalibracija modela M1-M7 (lijevo) i verifikacija modela M6 (desno) na HS Hrustovo

Mape opasnosti od poplava. U izradi karata opasnosti od poplava najčešće se primjenjuje formula zasnovana na kombinaciji dubine vode (h) i brzine protoka (v), koja se često koristi kako u EU praksi tako i u BIH:

$$O = h \times (v + 0,5) \quad (1)$$

gdje je O indeks opasnosti, h dubina (m), a v brzina protoka (m/s). Na osnovu izračunate vrijednosti razlikuju se četiri kategorije opasnosti: niska ($\leq 0,75$), umjerena ($0,75-1,5$), visoka ($1,5-2,5$) i ekstremna ($>2,5$).

Mape opasnosti od poplava su izrađene u QGIS-u korištenjem rasterskih podataka o dubinama i brzinama dobijenih 2D modeliranjem u HEC-RAS-u, uz primjenu navedene jednačine (1). Prostorna rezolucija karata iznosi 10×10 m (vertikalna tačnost do 10 cm), dok numerička mreža modela iznosi 30×30 m. Iako karta ima finiju rezoluciju radi vizualizacije i planiranja, suštinska tačnost rezultata ograničena je rezolucijom hidrauličkog modela.

2.3 Podaci i metodologija hidrauličke analize bujičnog toka – rijeka Neretvica

Opis područja. Rijeka Neretvica je planinski vodotok jadranskog sliva, sa izraženim uzdužnim padom i bujičnim režimom tečenja. Izvire blizu vrha Vitreuš na 1510 m n.m. i ulijeva se u Jablaničko jezero u naselju Buturović polje (slika 5). Ukupna površina sliva iznosi 129,7 km² (sa udjelom krša od 41 posto), a visina sliva kreće se od 285 do 1913 m n.m.

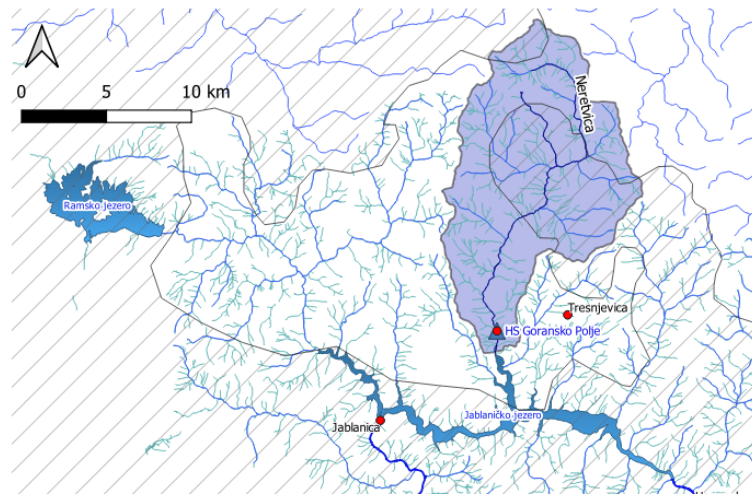
Sliv karakteriše brza koncentracija oticanja i kratko vrijeme reakcije na intenzivne padavine, što rezultira naglim porastom proticaja i visokim hidrauličkim opterećenjima tokom ekstremnih događaja.

U gornjem toku dominira usko i strmo korito sa kaskadnim morfološkim tipom, velikim brzinama i značajnim tangencijalnim naponima, uz aktivan transport krupnozrnog nanosa. Srednji tok pokazuje djelimičnu stabilizaciju korita, ali zadržava izraženu morfodinamičku dinamiku, naročito pri velikim vodama kada dolazi do erozije obala i redistribucije materijala. U donjem toku smanjuje se nagib i javlja se uticaj nizvodnog graničnog uslova, posebno pri visokim vodostajima.

Poplavni događaj iz oktobra 2024. godine. U noći između 3. i 4. oktobra 2024. godine područje Jablanice i Konjica pogođeno je ekstremnim padavinskim događajem koji je rezultirao naglim porastom vodostaja rijeke Neretve i njenih pritoka, uključujući bujične tokove planinskog karaktera. Padavine su prema meteorološkim mjernim stanicama u Jablanici prelazile 300 l/m^2 u toku 24 sata, dok je na meteorološkoj stanici Goransko polje zabilježena visina padavina $425,5 \text{ l/m}^2$ za 11 sati.

Ove katastrofalne poplave imale su nesagledive posljedice, uključujući ljudske gubitke, rušenje stambenih i infrastrukturnih objekata, te prekid cestovne i željezničke komunikacije na više lokacija.

Bujični tok rijeke Neretvice i klizišta koja su nastala uslijed obilnih padavina uzrokovali su velika oštećenja regionalnog puta R-437 (slika 6).



Slika 4. Orografska granica sliva rijeke Neretvice



Slika 5. Oštećenja regionalnog puta R-437 uslijed bujične poplave rijeke Neretvice iz oktobra 2024.g.

Hidraulička analiza. U cilju simulacije poplavnog događaja iz oktobra 2024. godine na dionici rijeke Neretvice od mosta u Parsovićima do mosta Košpina luka, urađena je hidraulička analiza tečenja za prethodno opisani poplavni događaj. Hidraulička analiza je provedena u HEC-RAS softveru za slučaj dvodimenzionalnog 2D nestacionarnog tečenja. Podloge koje su korištene su: i. Digitalni model terena rezolucije 5m (snimljen prije poplava); ii. Hidrološke podloge – podaci o velikim vodama za poplavni događaj iz oktobra 2024. godine, iii. literaturni podaci o Manningovom koeficijentu otpora.

Računska mreža definisana unutar 2D poligona se sastoji od ukupno 166 520 ćelija, veličine ćelija $5 \times 5 \text{ m}$. Prema hidrološkim analizama padavina koje su zabilježene na obližnjim meteorološkim stanicama procjenjeno je da je maksimalni proticaj iznosio $518 \text{ m}^3/\text{s}$, detaljnije u literaturi (Mulaomerović-Šeta et al., 2025).

Za procjenu hidrauličkog otpora kanala korišten je Manningov koeficijent $n=0.06$. Ova vrijednost odgovara izrazito hrapavim prirodnim kanalima sa velikim kamenom i neravnim koritom, karakterističnim za planinsku rijeku poput Neretvice. Pri izboru vrijednosti n uzeta je u obzir velika nepravilnost korita i relativno snažna turbulencija u toku poplavnog događaja.

Modeliranje bujičnih tokova zahtijeva pažljiv izbor prostorne i vremenske diskretizacije, posebno u strmim sektorima gdje dominiraju superkritični režimi tečenja i intenzivne turbulentne fluktuacije, pa je tome posvećena posebna pažnja.

Ključni kriterij za postizanje numeričke stabilnosti i računске efikasnosti u hidrodinamičkim simulacijama predstavlja kontrola Courantovog broja (C ili CFL-Courant–Friedrichs–Lewy). Courantov broj predstavlja bezdimenzionalni parametar koji povezuje brzinu prostiranja informacije u sistemu, prostornu diskretizaciju i vremenski korak numeričkog modela (Ovadia et al., 2021):

$$C = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

gdje je: v – brzina propagacije (brzina vode) (m/s); Δt – vremenski korak (s); Δx – prostorni korak (dužina računске ćelije) (m).

Ako je vrijednost $C < 1$, numeričko rješenje se smatra stabilnim (neophodan uvjet, ali ne uvijek dovoljan). Suprotno tome, ako je vrijednost $C > 1$, rješenje se smatra numerički nestabilnim i može uticati na pojavu greške kod volumena i nivoa vode u matematičkom modeliranju.

U hidrauličkim 1D i 2D modelima otvorenih tokova karakteristična brzina uključuje i brzinu talasa $c = \sqrt{gh}$ (gdje je g – gravitaciono ubrzanje (m/s), a h – dubina vode (m)) pa se stabilnost procjenjuje prema izrazu:

$$C = \frac{(v + \sqrt{gh}) \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3)$$

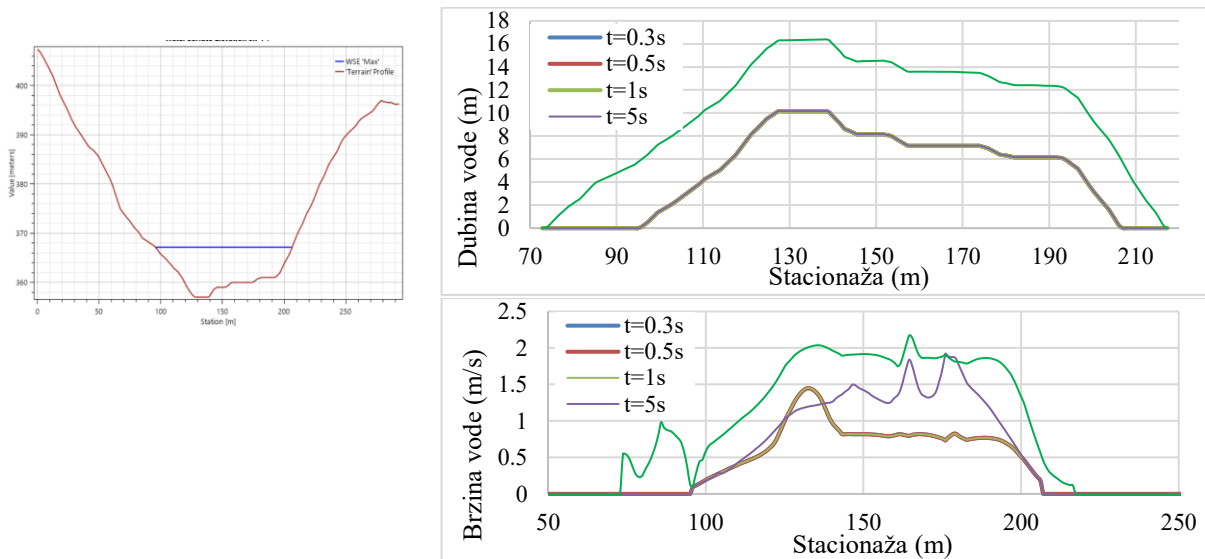
Pravilan izbor vremenskog koraka je od presudne važnosti, posebno u strmim i bujičnim tokovima gdje su brzine i dubine promjenljive u vremenu. Prevelik Δt može generisati nerealne oscilacije, negativne dubine ili „eksploziju“ rješenja, dok pretjerano mali Δt značajno povećava računsko vrijeme bez proporcionalnog dobitka u tačnosti.

Za razmatranu dionicu rijeke Neretvice ukupne dužine 3,5 km i za maksimalni proticaj $Q=518 \text{ m}^3/\text{s}$ prvo je urađena hidraulička analiza tečenja pomoću HEC-RAS 1D modela pri stacionarnim uslovima. Rezultati su dali srednje vrijednosti dubina vode i srednje brzine na računskim profilima za mjerodavni proticaj, što je poslužilo da se okvirno sagledaju vrijednosti ovih hidrauličkih parametara.

Nakon toga, urađena je hidraulička analiza tečenja na razmatranoj dionici rijeke Neretvice primjenom HEC-RAS 2D modela za slučaj nestacionarnog tečenja za poplavni val iz oktobra 2024.godine. Podaci o srednjim dubinama i brzinama iz HEC-RAS 1D modela su iskorišteni za definiranje vremenskog koraka Δt . Za srednju brzinu vode $v=8,5 \text{ m/s}$ i dubinu vode $h=2 \text{ m}$, uvažavajući kriterij da je $C=0,3-0,8$ slijedi da je $\Delta t = 0,3 \text{ s}$. Prema literaturnim podacima za bujične tokove, preporučena vrijednost Δt za veličinu računске ćelije od 5m iznosi 0,5-1 s.

Kako bi se utvrdila zavisnost rezultata hidrauličkog modeliranja od odabira vremenskog koraka Δt , urađena je analiza pet scenarija i to: $\Delta t = 0,3\text{s}, 0,5\text{s}, 1\text{s}, 5\text{s}$ i 10s (slika 6).

Analiza je pokazala da nema promjena u rezultatima modela za vremenske korake $\Delta t = 0,3s, 0,5s$ i $1s$, dok se izrazita nestabilnost modela uočava za vrijednosti vremenskog koraka $\Delta t = 5s$ i $10s$.



Slika 6. Prikaz oscilacije dubine i brzine vode za različite vrijednosti Δt na proizvoljno odabranom profilu rijeke Neretvice za poplavni događaj iz oktobra 2024. godine.

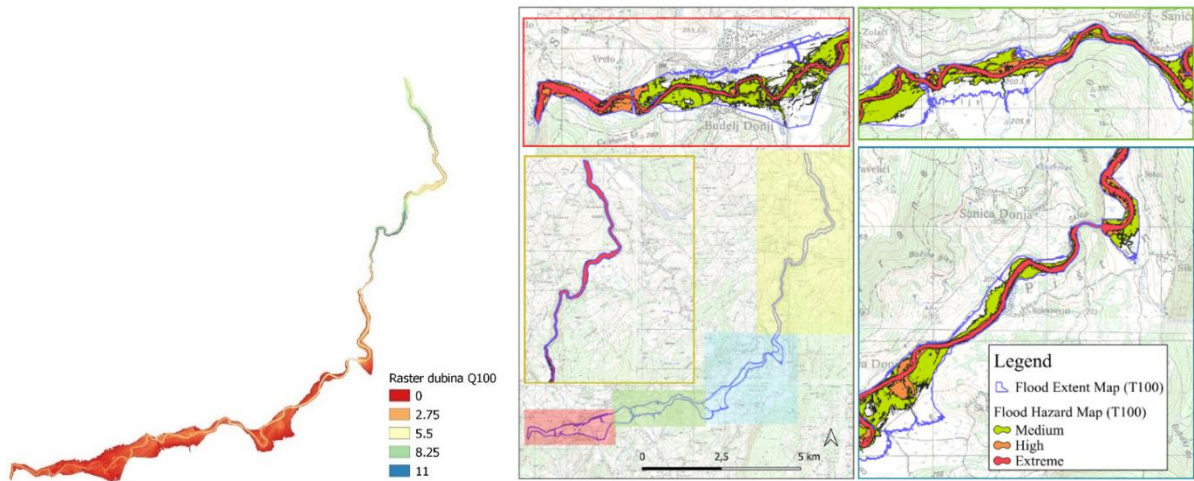
3 Rezultati

Rezultati 2D hidrauličkog modeliranja rijeke Sanice predstavljaju prostornu i vremenski raspodjelu dubina vode (slika 7 lijevo), brzina tečenja, tangencijalnih napona kao i linije dopiranja velikih voda, što je omogućilo izradu karata opasnosti od poplava s visokom prostornom rezolucijom (slika 7 desno).

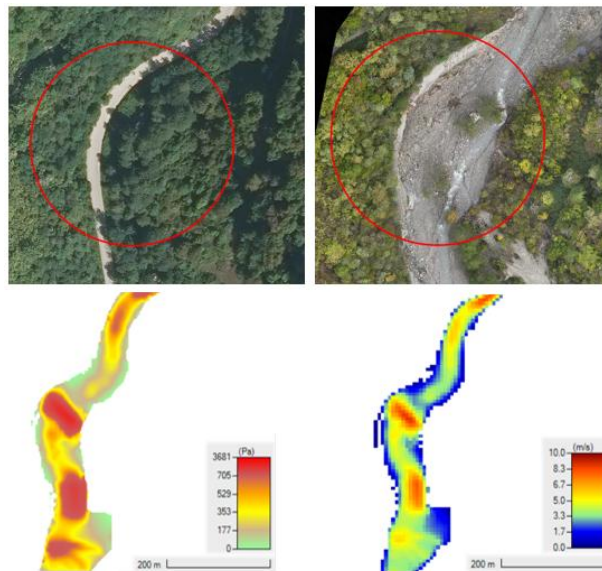
Numeričkom simulacijom poplavnog događaja iz oktobra 2024. godine također je dobijena detaljna prostorno-vremenska raspodjela dubine vode (h), srednje brzine tečenja (v) i tangencijalnog napona na dnu (τ). Dobijeni rezultati 2D modeliranja bujičnog toka Neretvice potvrđuju izrazito dinamičan i hidraulički agresivan karakter analiziranog poplavnog događaja. Prostorna distribucija maksimalnih brzina i tangencijalnih napona jasno ukazuje na koncentraciju energije toka unutar glavnog korita i u zonama lokalnih suženja, što je tipično za bujične vodotoke sa izraženim uzdužnim padom i morfološkim diskontinuitetima.

Na slikama 8 i 9 prikazan je dio regionalne ceste uz rijeku Neretvicu prije i poslije poplavnog događaja. U gornjem dijelu prikazano je stanje prije (lijevo) i nakon poplava (desno), sa vidljivim oštećenjima terena i infrastrukture. U donjem dijelu prikazani su rezultati modeliranja: raster tangencijalnih napona (lijevo) i raster maksimalnih brzina toka (desno).

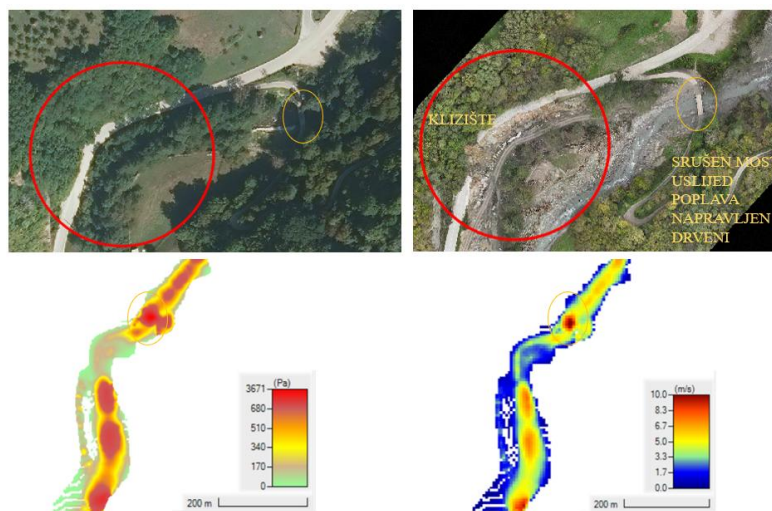
Poređenje rezultata numeričkog modeliranja velikih voda za dvije analizirane rijeke pokazuje značajne razlike u hidrauličkom ponašanju toka, koje su prvenstveno posljedica morfologije korita, uzdužnog pada i karaktera vodotoka.



Slika 7. Rezultati numeričkog modeliranja rijeke Sanice – raster dubina za povratni period 100 godina (lijevo), mapa linija dopiranja i mapa opasnosti od poplava za rijeku Sanicu (T100) (desno).



Slika 8. Prikaz dijela regionalne ceste prije (gore lijevo) i poslije poplava rijeke Neretvice (gore desno), te rezultata modeliranja: raster tangencijalnih napona (dole lijevo) i raster maksimalnih brzina (dole desno).



Slika 9. Prikaz dijela regionalne ceste i mosta prije (gore lijevo) i poslije poplava rijeke Neretvice (gore desno), te rezultata modeliranja: raster tangencijalnih napona (dole lijevo) i raster maksimalnih brzina (dole desno).

Analizirana dionica rijeke Sanice znatno je duža i iznosi oko 22 km, dok je za rijeku Neretvicu modelirana kraća dionica od približno 3,5 km. Razlike su prisutne i u prostornoj diskretizaciji modela. Za rijeku Sanicu korištena je računaska mreža sa ukupno 8336 ćelija, pri čemu su u inundacionim područjima primijenjene ćelije dimenzija 30×30 m, a u koritu 10×10 m. Nasuprot tome, za rijeku Neretvicu primijenjena je znatno finija mreža sa 166 520 ćelija dimenzija 5×5 m, što omogućava detaljniji prikaz hidrodinamičkih procesa karakterističnih za bujične tokove. Sličan pristup primjene 2D HEC-RAS modela za izradu karata plavljenja i analizu poplavnih procesa primijenjen je i u drugim istraživanjima (Vashist i Singh, 2023), (Adane i Abate, 2022).

Za rijeku Sanicu, pri stogodišnjem proticaju, maksimalne dubine vode kreću se u rasponu od 0,5 do 9,23 m, dok maksimalne brzine dostižu 7,49 m/s. Kod rijeke Neretvice zabilježene su znatno veće brzine, koje na pojedinim lokacijama dostižu i do 10 m/s, uz tangencijalne napone na dnu korita veće od 2000 Pa, što potvrđuje znatno intenzivniji bujični karakter toka i erozioni potencijal.

Morfološke razlike između vodotoka dodatno objašnjavaju ovakve rezultate. Prosječni pad dna korita rijeke Sanice iznosi oko 0,2 %, što pogoduje razvoju poplavnih ravnica i pojavi izlivanja vode u ravničarskim dijelovima toka. S druge strane, rijeku Neretvicu karakteriše izrazito strm uzdužni pad, veći od 6 %, što uslovljava bujični karakter toka, velike brzine i izražen erozioni potencijal.

4 Zaključak

Ovaj rad je imao za cilj da, kroz dva karakteristična primjera iz Bosne i Hercegovine – aluvijalni tok rijeke Sanice i bujični tok dionice Neretvice – analizira mogućnosti i ograničenja primjene numeričkih 2D modela u praktičnim zadacima zaštite od poplava. U oba slučaja primijenjen je integrisani GIS–HEC-RAS 2D pristup, čime je omogućena prostorna analiza hidrauličkih parametara, izrada tematskih karata i povezivanje rezultata modela sa konkretnim prostorno-planskim i infrastrukturnim odlukama. Za rijeku Sanicu numeričko modeliranje pokazalo se kao pouzdan alat za izradu mapa linija dopiranja i mapa opasnosti od poplava. Dobijeni rezultati omogućili su definisanje zona različitog stepena, koje se, u skladu sa važećom zakonskom regulativom, mogu koristiti kao nestrukturna mjera zaštite – prije svega kroz uslove građenja, planiranje namjene prostora i ograničavanje izgradnje u poplavnim područjima. U relativno uređenim aluvijalnim uslovima, uz kvalitetan digitalni model terena i adekvatno definisane granične uslove, 2D model je dao stabilne i konzistentne rezultate, potvrđujući visoku upotrebljivost ovakvog pristupa u praksi. Analiza bujičnog toka rijeke Neretvice tokom poplave iz oktobra 2024. godine ukazala je na specifične izazove u modeliranju. Zbog velikih brzina, strmih padova i izraženih erozionih procesa, model je bio osjetljiv na izbor vremenskog koraka, pri čemu je bilo potrebno zadovoljiti Courantov kriterij radi osiguranja numeričke stabilnosti. Smanjenje vremenskog koraka dovelo je do stabilnijih i realnijih rezultata, ali uz veće računске zahtjeve. Na dvije analizirane lokacije sa evidentnim oštećenjima ceste i rušenjem mosta, model je pokazao visoke brzine i tangencijalne napone, što potvrđuje njegovu sposobnost identifikacije zona intenzivnih hidrauličkih opterećenja. Međutim, rezultati modeliranja bujičnih tokova moraju se interpretirati s posebnim oprezom. Tokom velikih voda dolazi do izraženih trodimenzionalnih efekata, lokalnih vrtložnih struktura, transporta krupnog nanosa i brze promjene geometrije korita, što 2D modeli, u svojoj standardnoj formi, mogu samo djelimično obuhvatiti. Stoga je njihova primjena ograničena kvalitetom i preciznošću ulaznih podataka (DMT, hrapavost, hidrogrami), kao i obimom terenske kalibracije i verifikacije.

Zaključno, numerički 2D modeli predstavljaju izuzetno snažan i praktično primjenjiv alat u sistemu zaštite od poplava u BiH, posebno za potrebe prostornog planiranja, procjene opasnosti i analize scenarija. Ipak, njihova pouzdanost direktno zavisi od kvaliteta ulaznih podataka, pažljive kalibracije na više lokaliteta i kritičke interpretacije rezultata, naročito u uslovima bujičnih i morfološki nestabilnih tokova. Integracija modeliranja, terenskih istraživanja i analize stvarnih posljedica poplava predstavlja ključ za unapređenje metodologije i donošenje održivih mjera zaštite od poplava u budućnosti.

Zahvala

Autori se zahvaljuju Federalnom ministarstvu obrazovanja i nauke na podršci u realizaciji ovog istraživanja.

Literatura

- Adane, A., Abate, B., 2022. River modeling for flood inundation map predictions using 2D-HEC-RAS hydraulic modeling with integration of GIS. *ASEAN Engineering Journal* 12, 9–15. <https://doi.org/10.11113/aej.v12.16483>
- Brunner, G.W. (2016) 'HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic reference manual', USACE version:5.0. US Army Corps of Engineers, CPD-68.
- Gharbi M., Soualmia A., Dartus D. and Masbernat L. (2016) 'Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia', *Journal of Materials and Environmental Science*, 7: 3017-3026.
- Jovanović, M. (2023) 'Jedan pogled na regulaciju naših reka u sadašnjosti i budućnosti', *Vodoprivreda* Vol. 55 No. 321-322 pp. 1–11.
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., Lal, D. (2020) 'Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India', *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 397–405. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>.
- Kumar, V., Sharma, K., Caloiero, T., Mehta, D., Singh, K. (2023) 'Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances', *Hydrology* 10, 141. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>.
- Lazović, N., Mulaomerović-Šeta, A. (2026) 'Integrated Flood Hazard Assessment using GIS and 2D Hydraulic Modelling: A Case Study of Sanica River, Bosnia and Herzegovina', *European Journal of Computational Mechanics* Vol. 34_3 & 4, 1–26. <https://doi.org/doi:10.13052/ejcm2642-2085.34345>.
- Mulaomerović-Šeta, A., Lazović, N., Hakalović-Bubalo, E., Petroselli, A. (2025) 'Defining Flood Quantiles on the Neretvica River and Return Period of the October 2024 Event', *Proceedings of the International Conference ECCOMAS MSF 2025 On Multi-Scale Computational Methods for Solids and Fluids*. Split.
- Ovadia, O., Kahana, A., Turkel, E., Dekel, S. (2021) 'Beyond the Courant-Friedrichs-Lewy condition: Numerical methods for the wave problem using deep learning', *Journal of Computational Physics* 442, 110493. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110493>.
- Plavsic, J., Vladiković, D., Despotovic, J. (2014) 'FLOODS IN THE SAVA RIVER BASIN IN MAY 2014', *Proceedings of the Mediterranean Meeting on "Monitoring, Modelling and Early Warning of Extreme events Triggered by Heavy Rainfalls"*, Cosenza (Italy).
- Rangari, V.A., Umamahesh, N.V., Bhatt, C.M. (2019) 'Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D', *Model. Earth Syst. Environ.* 5, 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>.
- Smith, R. (2015) 'Directive 2008/94/EC of the European Parliament and of the Council of 22 October 2008', *Core EU Legislation*. Macmillan Education UK, London, pp. 423–426. https://doi.org/10.1007/978-1-137-54482-7_44.
- Stadtherr, L., Coumou, D., Petoukhov, V., Petri, S., Rahmstorf, S. (2016) 'Record Balkan floods of 2014 linked to planetary wave resonance', *Science Advances* 2, e1501428. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501428>.
- Vashist, K., Singh, K.K. (2023) 'HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: a case study of the Krishna River Basin', *Water Practice and Technology* 18, 831–844. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048>.
- Villazón, M., Timbe, L., Willems, P. (2013) 'Comparative analysis of 1-D river flow models applied in a quasi 2-D approach for floodplain inundation prediction', *Maskana* 4, 107–126. <https://doi.org/10.18537/mskn.04.01.08>.