

METODOLOGIJA I REZULTATI MAPIRANJA RIZIKA OD BUJIČNIH POPLAVA NA PRIMJERU POTOKA JELOVAC, GRAD BANJA LUKA

Radislav TOŠIĆ¹⁾ Vujadin BLAGOJEVIĆ²⁾ Milica TRIFKOVIĆ²⁾, Tamara SUDAR²⁾, Slavoljub DRAGIĆEVIĆ³⁾,
Novica LOVRIC¹⁾, Žana TOPALOVIC⁴⁾

¹⁾ Univerzitet u Banja Luci – Prirodno matematički fakultet, ²⁾ Zavod za vodoprivredu, Bijeljina,

³⁾ Univerzitet u Beogradu – Geografski fakultet, ⁴⁾ Univerzitet u Banja Luci –
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet

REZIME

Povećanje intenzivnih kiša kratkog trajanja u Republici Srpskoj i Federaciji BiH, ali i u regionu i svijetu generalno poslednjih godina, prepoznaje se kao posljedica klimatskih promjena i predstavlja okidač brojnim bujičnim poplavama koje generišu enormne materijalne štete i gubitke ljudskih života.

Osnovni fokus Studije baziran je na razvoj novog metodološkog pristupa kartiranja rizika od bujičnih poplava, koji se potencijalno može primijeniti i na drugim bujičnim tokovima u Bosni i Hercegovini. Studija kao takva predstavlja svojevrsni pionirski poduhvat analize i razumijevanja bujičnih poplava na urbanim - gradskim područjima, imajući u vidu da slične studije ili analize, barem kada je u pitanju sveobuhvatni, sistemski i integrisani pristup, prilagođen našem podneblju tj. regionu, do sada nisu rađene.

Geodetskim snimanjima poprečnih presjeka u koritu i riječnoj dolini, te uz korišćenje postojećeg digitalnog modela terena, kreiran je hibridni digitalni model terena kao osnova za hidrauličko modeliranje u softveru HEC RAS. Hidrološkim modeliranjem određene su vrijednosti velikih voda povratnog perioda 1/20, 1/100 i 1/500 godina.

Hidrauličkim modeliranjem određene su dubine, brzine i obuhvat plavljenja za različite povratne periode velikih voda, vrijednosti erozije i akumulacije nanosa, te vrijednosti tangencijalnih napona duž analiziranih dionica - ukupno šest bujičnih tokova urbanih i prigradskih zona Grada Banja Luka i Grada Tuzla, dok se u ovom radu prikazuje primjena metodologije i rezultati mapiranja na primjeru potoka Jelovac, Grad Banja Luka.

Prilikom izrade mapa opasnosti predložena je nova formula kojom su određene vrijednosti opasnosti od bujičnih poplava.

Predložena metodologija izrade karte opasnosti i karte rizika od bujičnih poplava dala je prema rezultatima validacije prihvatljive rezultate, ali i dobru osnovu za brojne studije i projekte iz oblasti upravljanja poplavnim rizikom, zaštite životne sredine, prostornog planiranja, te drugih oblasti ljudskog djelovanja.

Nakon definisanja mapa opasnosti i rizika od bujičnih poplava studijom su analizirane moguće mjere adaptacije na klimatske promjene u cilju umanjavanja štetnih posljedica, a sve kroz primjenu adaptacionih rješenja i mjera inspirisanih prirodom.

Ključne riječi: prirodne nepogode, bujične poplave, karte opasnosti, karte rizika, sliv Jelovca.

UVOD

Prirodne nepogode se ne mogu spriječiti, ali bolje razumijevanje procesa i jasno definisane metodologije mogu pomoći u ublažavanju njihovih uticaja. Direktiva o poplavama 2007/60/EC, ukazala je na potrebu pripreme karte opasnosti od poplava i karte rizika od poplava na nivou riječnog sliva. Međutim, sve aktivnosti izrade navedenih karata odnosile su se samo na veće (aluvijalne) riječne tokove, dok su bujični tokovi i njihovi slivovi potpuno izostavljeni. Obzirom da su bujične poplave u Bosni i Hercegovini jedne od najčešćih prirodnih nepogoda, razvoj metodologije kartiranja rizika od bujičnih poplava od posebnog je naučnog, ali i stručnog interesa. Razvoj sistema za upravljanje rizicima od nepogoda podrazumijeva i izradu studija procjene rizika kao jedne od preventivnih

mjera u tom upravljanju. Nepostojanje jasnog i provjerenog pristupa u oblasti tih istraživanja podstaklo je potrebu izrade metodologija za procjenu rizika od bujičnih poplava. Za sada je sve na nivou preporuka, sa težnjom da se metodologija standardizuje u najširem smislu, uključiv u to i jasno definisanje vrste i obima prikupljanja podataka za određene nivoe detaljnosti.

Osnovni cilj ovog istraživanja bio je razvoj metodologije kartiranja rizika od bujičnih poplava koje se ubrajaju u red najčešćih prirodnih nepogoda u Bosni i Hercegovini. U cilju što bezbjednijeg života na takvim prostorima, te smanjenja potencijalnih šteta, potrebno je izdvojiti (kartirati) prostore sa najvećim rizikom i u skladu sa tim rezultatima što racionalnije se ponašati i upravljati prostorom.

METODOLOGIJA MAPIRANJA RIZIKA OD BUJIČNIH POPLAVA

Bujični vodotoci se odlikuju velikim varijacijama vodostaja i proticaja, permanentnim procesima morfoloških promjena, dok je hidraulički režim vodotoka izrazito turbulentan sa izraženom prostornom neravnomjernošću strujanja.



Slika 1. Položaj razmatranih urbanih područja – Grad Banja Luka i Grad Tuzla

Specifične hidrauličke karakteristike uslovljene su velikim uzdužnim nagibom vodotoka i karakterističnom dinamikom bujičnog fenomena koja proizilazi iz dvofaznog karaktera toka, sa značajnim učešćem čvrste faze. Obzirom na dosadašnja istraživanja transporta

nanosa u bujičnim vodotocima u BiH, analiza transporta nanosa se može tretirati kao hidraulički fenomen (ne kao reološki fenomen), uvažavajući određene univerzalne zakonitosti koje važe za sve prirodne vodotoke, kao i specifične hidrauličke karakteristike bujičnih vodotoka. Pri ekstremnim hidrološkim događajima, kada dolazi do izlivanja vode iz glavnog korita vodotoka, mijenja se karakter tečenja duž riječnih dolina.

Analiza i mapiranje rizika od bujičnih poplava malih, gradskih i prigradskih vodotoka bujičnog karaktera u okviru ove Studije, a u skladu sa dostupnim podlogama, podacima i raspoloživim prethodnim istraživanjima, obuhvata pilot područja (slika 1):

- Grada Banja Luka - reprezentativni primjer urbanog područja sa solidnim fondom podataka i
- Grada Tuzla - reprezentativni primjer urbanog područja sa skromnim fondom podataka.

Kao početni korak u formiranju metodologije kvantifikovanja rizika od bujičnih poplava postavlja se izbor karakterističnih bujičnih slivova za prethodno navedena pilot područja.

Na području Grada Banja Luka zastupljeno je ukupno 49, a na području Grada Tuzla 24 bujična sliva, od kojih su za potrebe analiza i mapiranja rizika od bujičnih poplava izabrana po tri reprezentativna bujična sliva (Tabela 1).

Tabela 1 – Prikaz razmatranih slivova na području gradova Banja Luka i Tuzla

	GRAD BANJA LUKA	GRAD TUZLA
SLIV	Mali Ularac	Potok Kovačica
	Rebrovački potok	Potok Tušanj
	Potok Jelovac	Osojački potok

Osnovni kriterijumi za izbor navedenih slivova bili su:

- detaljnost podloga, • intenzitet erozije, • produkcija nanosa, namjena zemljišta, te • procjena prioriteta kvantifikovanja rizika od bujičnih poplava i • pružanje smjernica u vidu kataloga mjera u cilju svođenja rizika na prihvatljiv nivo.

Mape opasnosti i rizika nastaju kao rezultat niza sprovedenih metodologija koje su uzročno-posljedično povezane sa sljedećim hronološkim redoslijedom:

- 1) Metodologija izrade katastra/registra bujičnih tokova/slivova,

- 2) Metodologija izrade modela osjetljivosti na pojavu i razvoj bujičnih poplava,
- 3) Metodologija kartiranja intenziteta vodne erozije i
- 4) Metodologija mapiranja opasnosti i rizika od bujičnih poplava.

Prve tri navedene metodologije dio su jedinstvene cjeline koja predstavlja osnov i ulaz za definisanje četvrte - Metodologije mapiranja opasnosti i rizika od bujičnih poplava.

Osnovne odrednice prilikom definisanje metodologije mapiranja opasnosti i rizika od bujičnih poplava čine:

- hidrološke analize i podloge,
- geodetske podloge,
- hidrauličke analize za 2D modeliranja,
- način proračuna mapa opasnosti od bujičnih poplava i
- način proračuna mapa rizika od bujičnih poplava.

U ovom istraživanju korišćena je Karta erozije sliva rijeke Vrbasa, detaljan katastar bujičnih tokova sliva rijeke Vrbasa, kao i Model osjetljivosti na pojavu i razvoj bujičnih poplava u slivu rijeke Vrbasa. Navedene tematske kartografske podloge, predstavljale su jedan od ključnih ulaznih podataka ili bolje reći pretpostavku za hidrološko-hidraulička modeliranja i izradu karte opasnosti i karte rizika od bujičnih poplava odabranih bujičnih tokova [3,4].

Za razmatrane bujične slivove kreirani su digitalni modeli terena (DMT) rezolucije 0.5 m (EPSG:3908 MGI_1901_Balkans_Zone_6), koji su dodatno dopunjeni geodetskim snimanjima (GNSS) riječnog korita i doline, te podacima o strukturama u glavnom koritu (kaskade, brane, propusti, mostovi i dr). Pored postojećeg DMT snimljeni su i poprečni profili na lokalitetima svih struktura i na karakterističnim profilima duž glavnog toka. Na ovaj je način generisan hibridni model terena (HDTM) koji sadrži sve informacije o prostornom položaju i visinskoj predstavi saobraćajnica različitih kategorija, pruga, platoa i sl.

Postupak određivanja hidrograma velikih voda u ovom istraživanju podijeljen je u tri koraka: a) definisanje računskih kiša, b) transformacija bruto kiše u neto kišu - određivanje efektivne kiše i c) transformaciju kiše u oticaj. Obzirom da su na raspolaganju bile georeferencirane karte sa pripadajućim CN brojevima za prostore istraživanja, za određivanje efektivne kiše je odabrana SCS metoda (USDA, 1999) dok je za transformaciju kiše u oticaj odabrana jednostavna metoda kašnjenja sa vremenom kašnjenja određenim takođe po principu SCS metode [5].

Obzirom na složenu interakciju toka u glavnom koritu i duž plavnih zona, u hidrauličkim analizama bujičnih vodotoka potrebno je koristiti višedimenzionalne modele strujanja (ravanski ili prostorni model).

Hidraulički režim bujičnih vodotoka izrazito je turbulentan, sa izraženom prostornom neravnomjernošću strujanja. Specifične hidrauličke karakteristike uslovljene su velikim uzdužnim nagibom vodotoka i karakterističnom dinamikom bujičnog fenomena koja proizilazi iz dvofaznog karaktera toka, sa značajnim učešćem čvrste faze. Pri ekstremnim hidrološkim događajima, kada dolazi do izlivanja vode iz glavnog korita vodotoka, mijenja se karakter tečenja duž riječnih dolina. Obzirom na složenu interakciju toka u glavnom koritu i toka duž plavnih zona, u hidrauličkim analizama bujičnih vodotoka korišćen je višedimenzionalni model strujanja 2D (ravanski ili prostorni model). Značajno veći broj računskih operacija u odnosu na 1D modeliranje ima svoje opravdanje kada se u obzir uzme da procesi plavljenja kod bujičnih poplava nisu po pravilu u pravcu matice velike vode, nego dolazi i do bočnih preliivanja i čestih promjena smjera strujanja usljed prepreka na terenu (propusti nedovoljnih kapaciteta, saobraćajna infrastruktura, preliivanje preko nasipa i parapetnih zidova nedovoljne visine i sl). Primjenom ravnaskih modela, razmjena fluida između različitih dijelova složenog toka dobija se direktno kao rezultat numeričkih simulacija. Dakle, simulacija nestacionarnog tečenja predstavlja adekvatniji pristup proračunima iz razloga prostorne transformacije tj. retenzionog kapaciteta riječne doline prilikom prolaska poplavnog talasa. Kao uzvodni granični uslov se zadaje računski hidrogram povratnog perioda 1/20, 1/100 ili 1/500 godina, dok su na nizvodnom kraju razmatrane dionice zadaju računski nivoi glavnog recipijenta (gdje se uliva vodotok).

Hidraulički gubici u matematičkom modelu toka bujičnog vodotoka zavise od vrijednosti parametara modela, Manningovog koeficijenta i koeficijenta turbulentne viskoznosti. Obzirom da u ravanskom modelu, za razliku od linijskog, postoji član sa turbulentnim naponima, potrebno je usvojiti adekvatne vrijednosti Manningovog koeficijenta u odnosu na vrijednosti koje bi se usvajale u slučajevima upotrebe linijskog modela [6]. Vrijednost koeficijenta turbulentne viskoznosti (v_t) određuje se iz sljedećeg izraza:

$$v_t = D \cdot h \cdot u_* \quad (1)$$

gdje su: D - bezdimenzionalni koeficijent („koeficijent miješanja“) čije se vrijednosti usvajaju prema preporukama literature, uzimajući u obzir stepen nepravilnosti geometrije toka, u_* - smičuća brzina [7].

Smičuća brzina (u_*) se računa na osnovu vrijednosti hidrauličkog radijusa (R), brzine (V) i Manningovog koeficijenta (n) [7].

$$u_* = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} |V| \quad (2)$$

Transportna sposobnost za nanos se posredno ocjenjuje na osnovu poređenja odnosa izračunatih (modeliranih) tangencijalnih napona (τ) (na dnu glavnog korita i plavnih površina) za karakterističnu krupnoću vučenog nanosa na razmatranoj dionici analize bujičnog toka (prethodno je izvršena granulometrijska analiza vučenog nanosa na istraživanim bujičnim vodotocima). Sa porastom vrijednosti tangencijalnog napona poboljšavaju se uslovi za pokretanje čestica vučenog nanosa na dnu korita, kao i uslovi za kretanje sitnijih čestica u vidu suspendovanog nanosa. Tako se poređenjem vrijednosti tangencijalnih napona mogu izvoditi određeni zaključci koji se tiču pronosa vučenog i suspendovanog nanosa. Cilj je uspostaviti odnos između tangencijalnog napona na dnu (τ) i kritičnog tangencijalnog napona (τ_{cr}), čime se dolazi do procjene u apsolutnom smislu i definišu zone mogućeg pokretanja i taloženja nanosa. Vrijednost ovog odnosa $\tau/\tau_{cr} = 1$ je granična vrijednost pri kojoj dolazi do pokretanja nanosa na dnu korita. Za vrijednosti ovog odnosa < 1 može se očekivati da nema pokretanja zrna nanosa, dok vrijednosti > 1 odgovaraju dijelovima korita na kojima se očekuje kretanje zrna nanosa razmatrane krupnoće.

Tangencijalni napon (τ) se računa preko smičuće brzine (u_*) korišćenjem sljedećeg izraza [7]:

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (3)$$

dok se kritični tangencijalni napon (τ_{cr}) računa na osnovu usvojene vrijednosti bezdimenzionalnog kritičnog tangencijalnog napona, odnosno parametra pokretanja zrna nanosa ($\theta_{cr} = 0.047$) [7]:

$$\tau_{cr} = 0,047(\rho_s - \rho)gd \quad (4)$$

gdje su: ρ_s – gustina nanosa, d – krupnoća nanosa [7].

Proračun transporta nanosa modeliran je metodom Mayer Peter Muller-a, uz prethodno definisanje zone i jedinstvene cjeline granulometrijske građe bujičnog toka. Krajnji rezultat predstavlja karta maksimalnih tangencijalnih napona i mapa erozije riječnog korita i

akumulacije nanosa. Ravansko tečenje pri velikim vodama bujičnog toka u odabranim slivovima simulirano je primijenom numeričkog modela implementiranog u softverskom paketu HEC-RAS 6.0., a isti softver korišćen je i za ostale hidrauličke analize. Faza kalibracije modela je neophodna i predstavlja podešavanja Manningovih koeficijenata otpora tečenju, hidrauličkih otpora u zoni mostova, propusta i ostalih struktura nakon dobijanja inicijalnih hidrauličkih rezultata modeliranja. Posebna pažnja posvećena je kalibraciji hidrauličkog modela korišćenjem geomorfoloških dokaza prethodnih bujičnih događaja, tragovima visine velikih voda iz tih događaja, te površinama koje su bile poplavljene bujičnim poplavama iz 2014 i 2019. godine.

Mape opasnosti zasnivaju se na prethodno sprovedenim hidrološkim i hidro-dinamičkim proračunima i dobijenim rezultatima hidrološko-hidrauličkih modeliranja, koje definišu osnovni pokazatelji plavljenja. Metodologija izrade mapa opasnosti na aluvijalnim tokovima Bosne i Hercegovine bila je osnova za kreiranje novog metodološkog pristupa izrade karte opasnosti i rizika od bujičnih poplava. Imajući u vidu prirodu i različitost poplavnih događaja, kreirana je nova formula za proračun vrijednosti opasnosti (HR_t) od bujičnih poplava:

$$HR_t = h \times (v + 0,5) \times (3 + |e(a)|) \quad (5)$$

gdje su: h - dubina plavljenja (m), v - brzina plavljenja (m/s), $0,5$ - korekciona konstanta brzine, e - erozija (m), a - akumulacija (m) i 3 - korekciona konstanta uticaja erozije i akumulacije u formuli proračuna opasnosti od bujičnih poplava.

Ovim pristupom se definišu mape opasnosti od poplava na bujičnim vodotocima, dok se opasnost predstavlja u četiri klase kao i kod aluvijalnih vodotoka: niska, umjerena, visoka i ekstremna opasnost [8]. Rezolucija prikaza mapa opasnosti od plavljenja na nekom bujičnom slivu ima mnogo ograničenja i predstavlja dinamičku kategoriju. Međutim, ne treba zaboraviti da se kartiranje rizika od bujičnih poplava najčešće fokusira na kartiranje u razmjeri od 1:5000 do 1:10000. Posebna pažnja posvećena je validaciji dobijenih mapa opasnosti koje su urađene korišćenjem predložene formule za proračun vrijednosti opasnosti od bujičnih poplava. Prilikom validacije korišćeni su reprezentativni tragovi erozije korita i obala, tragovi akumulacije nanosa u koritu i izvan njega, nastali tokom prethodnih bujičnih događaja iz 2014 i 2019. godine, a koji se jasno mogu vidjeti na terenu i na istorijskim satelitskim

snimcima. Značaj dobijenog modela/karte opasnosti od bujičnih poplava, čiji je sastavni dio potencijalna erozija i akumulacija nanosa (dobijena iz hidrauličkog modeliranja), testiran je primijenom metode stepena podudaranja (Degree of fit), gdje je sagledavan stepen podudaranja lokacija (površina) sa jasnim tragovima erozije ili akumulacije nanosa sa određenim klasama dobijenog modela opasnosti (H_t) za različite povratne periode velikih voda (1/100 i 1/500). Nakon kartiranja, opasnost od bujičnih poplava na više bujičnih tokova u Bosni i Hercegovini definisana je korekciona konstanta uticaja erozije i akumulacije u formuli proračuna opasnosti od bujičnih poplava. Uvođenjem ove konstante uvećava se vrijednost opasnosti kod bujičnih poplava, koja je proporcionalna njenom stvarnom uticaju na ugrožene kategorije - stanovništvo i ekonomija.

Postupak definisanja sadržaja mapa rizika određen je EU direktivom (Direktiva 2007/60/EC), a shodno EU Direktivi o procjeni i upravljanju rizikom od poplava, definisane su sljedeće ugrožene kategorije: stanovništvo, ekonomija/privreda, zaštićena područja, kulturno-istorijski spomenici i IPPC postrojenja [9]. U odnosu na težinske faktore za proračun poplavnog rizika na aluvijalnim vodotocima, za bujične tokove izvršeno je usklađivanje vrijednosti težinskih koeficijenata kako bi se vrijednost proračunatog rizika svela u realne okvire imajući u vidu rezoluciju i opseg prikaza. Dakle, u ovom istraživanju je, nakon detaljne analize potencijalno ugroženih kategorija u plavnom području, predloženo korišćenje prilagođenih/izmijenjenih težinskih faktora za kategoriju stanovništvo i kategoriju ekonomija, dok ostale kategorije (zaštićena područja, kulturno-istorijski spomenici i IPPC postrojenja) nisu razmatrane, obzirom da one ne postoje unutar plavnog područja odabranih bujičnih slivova. Nakon definisanja težinskih faktora za određene kategorije ugroženosti/opasnosti računa se faktor rizika (FR) i definišu granične vrijednosti „pragova“ poplavnog rizika u zavisnosti od brojčane vrijednosti faktora rizika (FR) [8]. Faktor rizika (FR) određuje se prema sljedećem obrascu:

$$FR = \sum n \times TF \times HR_t \quad (5)$$

gdje su: FR - faktor rizika; n - broj tačaka, dužine linija (km) ili površina poligona (km²); TF - težinski faktor; H_t - koeficijent opasnosti.

Vrijednosti faktora rizika (FR) normalizuju se u klase poplavnog rizika u rasponu od 0 do 1,0, opisuje se karakter rizika, i to po izdvojenim kategorijama za kategoriju stanovništvo i kategoriju ekonomija [8].

Izrada karata rizika od bujičnih poplava nakon svih prethodnih operacija dobija se množenjem prostornih koeficijenata opasnosti od poplava (O) u rasterskom obliku (dobijeni iz mapa opasnosti od bujičnih poplava za različite računске povratne periode bujičnih poplava ($Q_{1/100}$ i $Q_{1/500}$) sa vrijednostima klasa osjetljivosti na rizik od bujičnih poplava za definisane kategorije ugroženosti (takođe, u rasterskom obliku).

Otpornost neke zajednice da se izbori i svede rizik od poplava na prihvatljiv nivo postiže se različitim djelovanjem i ponašanjem na nekom potencijalnom poplavnom poligonu. Konkretno, za bujične poplave, ta otpornost se može uzeti u obzir umanjivanjem sračunatog rizika od poplava za procenjen obim prethodno sprovedenih mjera predikcije i prevencije kada je u pitanju erozija zemljišta i pronos nanosa:

- mjere monitoringa,
- mjere kada je u pitanju adekvatan način gradnje objekata u plavnom području,
- biotehničke mjere,
- retenzije i pregrade za zaustavljanje nanosa,
- uređenja glavna korita (stabilizacija dna i kosina) i sl.

Predložena metodologija izrade karte opasnosti i karte rizika od bujičnih poplava, dala je prihvatljive rezultate, ali i dobru osnovu za brojne studije i projekte iz oblasti upravljanja poplavnim rizikom, zaštite životne sredine, prostornog planiranja, te drugih oblasti ljudskog djelovanja.

U cjelini gledano, primijenjeni metodološki pristup kartiranju rizika od bujičnih poplava mogao bi se svesti u nekoliko koraka: izrada karte erozije, izrada katastra bujičnih tokova, izrada modela osjetljivosti na pojavu i razvoj bujičnih poplava, izrada digitalnog modela terena sa dodatnim geodetskim snimanjima osovine toka, riječnih obala i poprečnih presjeka, izrada mapa tangencijalnih napona, izrada mapa erozije riječnog korita i akumulacije nanosa, izrada mapa opasnosti i izrada karte rizika od bujičnih poplava.

MAPE OPASNOSTI I RIZIKA OD BUJIČNIH POPLAVA

U okviru Studije, opisana je Metodologija kartiranja opasnosti i rizika od bujičnih poplava koja je testirana i primijenjena na šest karakterističnih bujičnih slivova (pilot područja: po 3 na teritoriji Grada Banja Luka i teritoriji Grada Tuzla). U nastavku se navode principi i rezultati primjene metodologije mapiranja opasnosti i

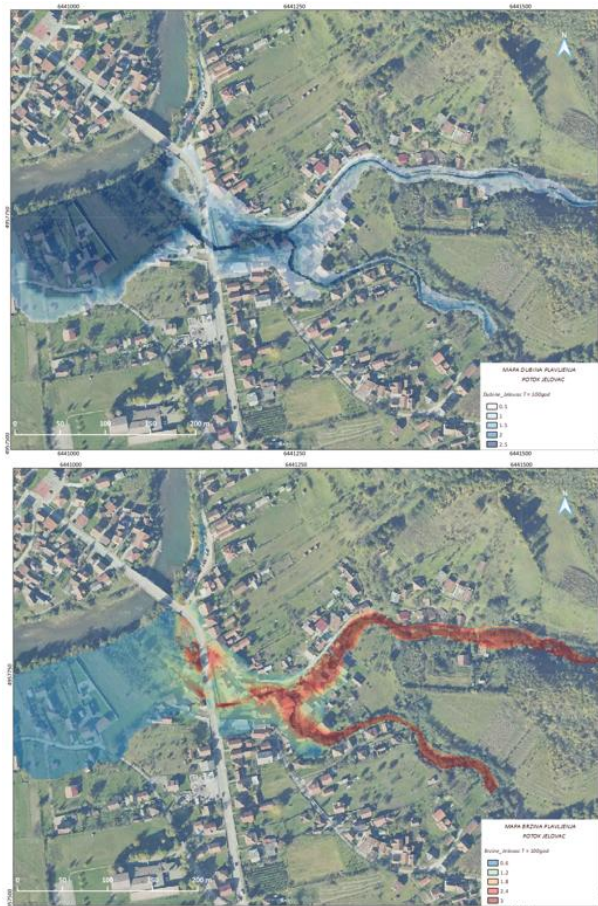
rizika na primjeru bujičnog potoka Jelovac, desne pritoke rijeke Vrbanje u Gradu Banja Luka.

Dobijene vrijednosti opasnosti pokazuju značajno učešće klasa visoke i ekstremne opasnosti (veće i do 10 puta od opasnosti na aluvijalnim vodotocima). Dobijene vrijednosti opasnosti od bujičnih poplava prema predloženoj formuli potvrđene su primijenom metode stepena podudaranja (Degre of fit). U okviru ovog postupka sagledavano je podudaranje lokacija sa najizraženijim tragovima erozije i akumulacije nanosa koji su zabilježeni tokom prethodnih bujičnih događaja iz 2014. i 2019. godine.

Karte rizika za različite povratne periode velikih voda bujičnih potoka pokazale su da se veći dio plavnog područja trenutno nalazi u zoni sa zanemarljivim i niskim rizikom, ali obzirom na postojeći trend širenja grada i izmiještanje privrednih aktivnosti iz centra ka periferiji, ovaj se odnos polako mijenja u korist klasa visokog i ekstremnog rizika. Iz toga se može izvući važan zaključak da će rizici biti manji ukoliko se urbanim planiranjem izbjegne razmiještanje onih sadržaja koji su osjetljivi na djelovanje bujičnih voda u tim zonama rizika. Takođe, u skladu sa tom činjenicom treba usloviti i način građenja, biranjem dispozicija, konstrukcijskih sistema i načina fundiranja, tako da se dobiju objekti sa visokim stepenom otpornosti na djelovanje bujičnih voda.

Rezultati navedenih analiza bujičnih poplava treba da se koriste prilikom izrade prostorno-planske dokumentacije Grada Banja Luka. Isti metodološki pristup primijenjen je i u sjeveroistočnom dijelu Bosne i Hercegovine, na području Grada Tuzla, gdje su urađene karte opasnosti i rizika od bujičnih poplava za tri bujična sliva (Osojački potok, Tušanjski potok i Kovačica).

Predodanom metodologijom određene su i vrijednosti mjerodavnih računskih hidrograma velikih voda različitog povratnog perioda za sve odabrane bujične vodotoke. Prema hidrološkim analizama vrijednosti velikih voda u slivu Jelovca kreću se od oko $70 \text{ m}^3/\text{s}$ za vode 1/100 godišnjeg povratnog perioda, do $130 \text{ m}^3/\text{s}$ za vode 1/500 godišnjeg povratnog perioda. Rezultati hidrauličkog modeliranja u odabranim bujičnim slivovima predstavljeni su preko prostornog rasporeda dubina i brzina plavljenja (slika 2).

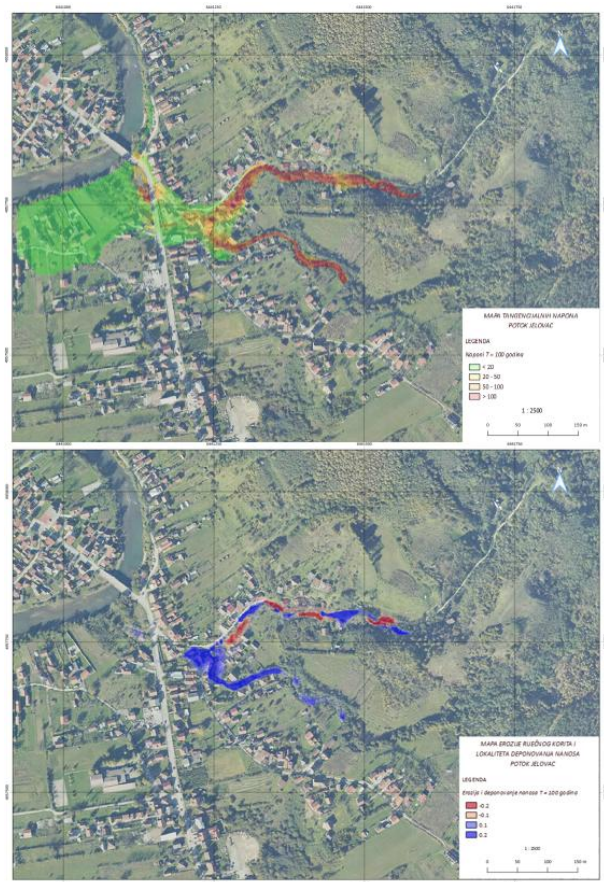


Slika 2. Hidraulički rezultati sprovedenih simulacija računskih scenarija za velike vode povratnog perioda 1/100 Jelovca: Mapa dubina plavljenja (gore) i Mapa brzina plavljenja (dole)

Dakle, moguće je konstatovati da se brzine kreću do 15 m/s za velike vode povratnog perioda 1/100, što pokazuje koliko je dinamika bujičnih tokova različita od aluvijalnih tokova na kojima su maksimalne brzine i nekoliko puta manje. Značajno povećan intenzitet brzina plavljenja kod bujičnih tokova uzrokovan je prisustvom čvrste faze u fluidu, odnosno razmatranjem nenjutnovskog (dvofaznog) fluida. Naime, u procesu nastanka i razvoja poplavnog događaja kod bujičnih tokova dolazi do porasta prisustva čestica lebdećeg i vučenog nanosa čime se gustina fluida/vode (sa 1000 kg/m^3) uvećava i do tri puta u zavisnosti od morfologije korita.

Za potrebe proračuna tangencijalnih napona, kao ulazni podatak definisane su granulometrijske krive koje su

rezultat zahvaćenih uzoraka prirodnog riječnog materijala sa dna korita ispitanog prema BAS EN standardima. Mapa tangencijalnih napona potoka Jelovac za velike vode povratnog perioda 1/100 godina ukazuje na vrijednosti koje se kreću do maksimalnih 1739 N/m^2 (slika 3). Značajno uvećane vrijednosti brzina plavljenja i pojave izrazito velikih tangencijalnih napona kod bujičnih tokova (i do 10 puta većih od onih u velikim riječnim tokovima) ogledaju se u dvofaznosti fluida (prisustvo čvrste faze u fluidu).

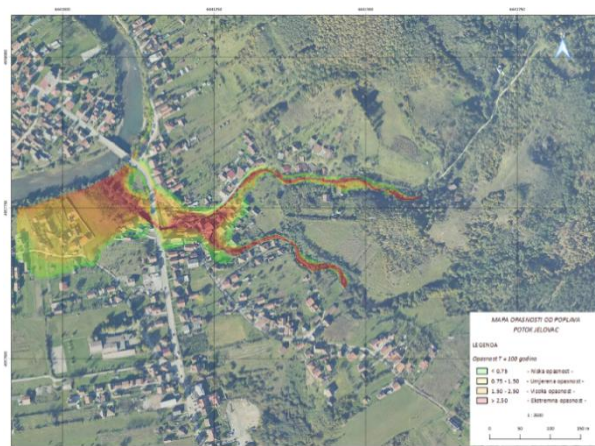


Slika 3. Vrijednosti tangencijalnih napona (gore) i mapa erozije riječnog korita i akumulacije nanosa (dole) za velike vode povratnog perioda T100 godina na primjeru potoka Jelovac u Gradu Banja Luka

Visoke vrijednosti tangencijalnih napona na pojedinim dionicama analiziranih bujičnih potoka u cjelini odgovaraju granulometrijskim karakteristikama nanosa u koritu, stanju korita, ali i tragovima vučenog nanosa koji je pri velikim vodama ranijih bujičnih talasa izbačen na riječne obale i čija se visina akumuliranog sloja kreće i preko 1 m. Obzirom na vrijednosti tangencijalnih napona koje se mijenjaju duž korita

bujičnog potoka, dionice sa većim vrijednostim tangencijalnih napona podudaraju se sa dionicama erozije riječnog korita, dok se manje vrijednosti tangencijalnih napona u koritu podudaraju sa mjestima akumulacije vučenog nanosa.

Mape erozije riječnog korita i lokaliteta akumulacije nanosa u koritu za velike vode povratnog perioda 1/100, urađene su na osnovu postavljenih graničnih uslova za proračun erozije i transport nanosa, definisanja metode proračuna nanosa, vrste materijala riječnog dna i vrijednosti granulometrije dna za svaku zonu transporta nanosa. Vrijednosti erozije izražene su sa predznakom „-“ i predstavljaju vrijednosti gubitka tj. vertikalnu eroziju, dok vrijednosti „+“ predstavljaju lokalitete akumulacije nanosa.



Slika 4. Mapa opasnosti od bujičnih poplava na primjeru potoka Jelovac, Grad Banja Luka, pri velikoj vodi povratnog perioda T100 godina

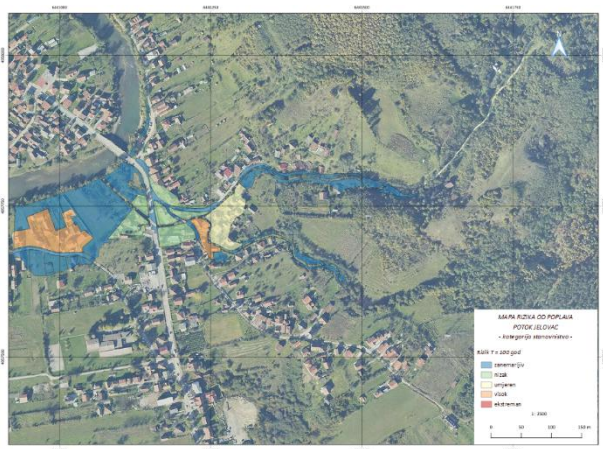
Maksimalne vrijednosti erozije odnose se na dionice korita u kojima su prisutne i maksimalne vrijednosti tangencijalnih napona, dok se maksimalne vrijednosti akumulacije nanosa vežu za lokacije propusta ili mjesta uspora, koji utiču na smanjenje vrijednosti brzina i tangencijalnih napona, te na intenziviranje procesa akumulacije nanosa. Ovakvim metodološkim pristupom koji se razlikuje od onog kod aluvijalnih tokova, jasno su prepoznate dionice koje je potrebno redovno održavati u smislu uklanjanja vučenog nanosa, osiguranja dna i kosina riječnog korita, ali i dionice na koje je potrebno usmjeriti posebnu pažnju pri nailasku bujičnog talasa jer su uz njih ugrožene kategorije najizloženije.

Karte opasnosti potoka Jelovac za velike vode povratnog perioda 1/100 godina, prikazana je sa svim

podacima o vrijednostima opasnosti za navedeno plavno područje (slika 4).

Maksimalne vrijednosti opasnosti i plavnih površina za odgovarajući povratni ukazuju da opasnost doseže izrazito veće vrijednosti od granične vrijednosti ekstremne opasnosti koja je prema klasifikaciji veća od 2,50.

Izrada mapa rizika od bujičnih poplava zahtijevala je prethodno prikupljanje podataka koji su predstavljeni detaljnim popisom materijalnih dobara izloženih riziku od bujičnih poplava. Podaci uključuju pojedinačne stambene jedinice, jedinice zajedničkog stanovanja, industrijska postrojenja, infrastrukturu, poljoprivredno zemljište i objekte, saobraćajnice i dr. Ulazni podaci za izradu karte rizik od poplava integrisani su u GIS bazu podataka i to kao slojevi različitog tipa podataka (tačkasti, linijski i poligoni). Iz poligona sa vrijednostima rizika, izdvojeni su pojasevi bujičnih korita, u kojima se ne sagledava rizik od poplava. Na analiziranim bujičnim slivovima prikupljeni su podaci o domaćinstvima i materijalnim dobrima koji se nalaze pod rizikom od poplava za povratne periode velikih voda 1/100



Slika 5. Mapa rizika od bujičnih poplava po kategoriji stanovništva na primjeru potoka Jelovac pri velikim vodama povratnog perioda 100 godina

Karte rizika za različite povratne periode velikih voda odabranih bujičnih vodotoka pokazale su da se veći dio plavnog područja trenutno nalazi u zoni sa zanemarljivim i niskim rizikom, ali obzirom na postojeći trend širenja grada i izmiještanje privrednih aktivnosti iz centra ka periferiji, ovaj se odnos polako mijenja u korist klasa visokog i ekstremnog rizika. Iz toga se može izvući važan zaključak da će rizici biti

manji ukoliko se urbanim planiranjem izbjegne razmiještanje onih sadržaja koji su osjetljivi na djelovanje bujičnih voda u tim zonama rizika. Takođe, u skladu sa tom činjenicom treba usloviti i način građenja, biranjem dispozicija, konstrukcijskih sistema i načina fundiranja, tako da se dobiju objekti sa visokim stepenom otpornosti na djelovanje bujičnih voda. Rezultati navedenih analiza rizika od bujičnih poplava trebalo bi da se koriste prilikom izrade prostorno-planske dokumentacije navedenih gradova. Predložena metodologija izrade karte opasnosti i karte rizika od bujičnih poplava, dala je prihvatljive rezultate, ali i dobru osnovu za brojne studije i projekte iz oblasti upravljanja poplavnim rizikom, zaštite životne sredine, prostornog planiranja, te drugih oblasti ljudskog djelovanja.

ZAKLJUČCI

Studija je pružila brojne zaključke i smjernice prilikom definisanja i razumijevanja prirodnih nepogoda poput bujičnih poplava:

- Izrada karte erozije, katastra bujičnih tokova i modela osjetljivosti na pojavu i razvoj bujičnih poplava, predstavlja jedan od najbitnijih ulaznih podataka za izradu mapa opasnosti i rizika od bujičnih poplava nekog sliva ili područja.
- Mape opasnosti i mape rizika izrađuju se prema predloženoj formuli (HR_t) i metodološkom postupku, uvažavajući sve morfološke i hidrauličke osobenosti režima tečenja velikih voda za bujične tokove, s tim što se u izradi mapa opasnosti uvodi parametar erozije bujičnih korita i lokaliteta akumulacije nanosa. Za dodatnu validaciju i provjeru korišćena je analiza mape tangencijalnih napona.
- Mapa tangencijalnih napona značajna je sa aspekta sagledavanja vučnih sila i transportne sposobnosti bujičnog toka za nanos (definiše lokalitete potencijalne erozije i akumulacije nanosnih formacija bujičnog toka). Ova mapa, pored mape maksimalnih brzina upućuje i na lokalitete gdje je očekivana pojava erozije riječnog korita tj. procesi obrušavanja obala, kao značajan faktor prilikom nailaska velikih voda – jer je materijal obrušenih obala značajna komponenta u svakom bujičnom događaju.
- Uzimajući u obzir i granulometrijsku građu korita, prilikom sprovođenja hidrauličkih analiza dobijaju se realni pokazatelji tangencijalnih napona u

bujičnom toku koje odlikuju često visoke vrijednosti, čime se uočavaju kritične tačke i dobija spoznaja o eventualnoj rušilačkoj moći bujičnog toka u periodima povodnja.

- Mape erozije bujičnih korita i lokaliteta akumulacije nanosa takođe su ključan podatak, jer one ukazuju na dionice bujičnog toka sklone eroziji dna i obala prilikom potencijalnih poplavnih događaja, što dovodi do gubitka zemljišta, ugrožavanja opšte stabilnosti objekata domaćinstava, privrede i infrastrukture sa mogućnošću totalnih šteta prilikom urušavanja. Lokaliteti akumulacije nanosnog materijala definišu zone gdje je, pored šteta nastalih plavljenjem bujičnim vodama, moguće umnožavanje šteta usljed deponovanja čvrste materije – nanosa.
- Za adekvatnu procjenu i definisanje rizika od bujičnih poplava na specifičnom području bujičnog sliva, potrebno je prije svega procijeniti stvarnu vrijednost materijalnih dobara u poplavnom području, kao i ugroženost infrastrukture, a zatim u zavisnosti od potencijalnih materijalnih gubitaka izvršiti prilagođavanje težinskih faktora. Težinske faktore za oblast infrastrukture potrebno je skalirati u odnosu na poplave iz većih vodotoka zbog prirode bujičnih poplava i stepena destrukcije infrastrukture.
- Prikazana metodologija predstavlja osnovu za izbor adekvatnih rješenja odbrane od bujičnih poplava i antierozionih mjera zaštite sliva, ali i osnovu za definisanje kataloga mjera adaptacije na štetne posljedice ovih prirodnih nepogoda kroz planiranje prirodom inspirisanih rješenja.
- U skladu sa najvažnijim postulatima planiranja da je „bolje spriječiti nego liječiti“, razvijena metodologija predstavlja izvanredan alat za sve planere koji odlučuju o razmještanju novih urbanih i drugih sadržaja u prostoru, da pri definisanju novih sadržaja na bujičnim slivovima, apriorno smanjuju na minimum povećanje tih rizika kombinacijom dvije mjere: (a) izbjegavanjem da se tu planira smještanje objekata koji su osjetljivi na nailazak bujičnih poplava; (b) propisivanjem uslova za projektovanje i građenje (visinski položaj objekta, dispozicija, način fundiranja, konstrukcijski sistem, itd.), kako bi se ti objekti učinili što otpornijim i manje ranjivim u slučaju nailazaka bujičnih voda čak i rjeđih pojava javljanja.

LITERATURA

- [1] Studija održivog razvoja irigacionih površina na području Republike Srpske (2007), Zavod za vodoprivredu d.o.o. Bijeljina
- [2] Strategija integralnog upravljanja vodama Republike Srpske 2015-2024.
- [3] Đorđević, B., Sudar, N. Hrkalović, U. i Knežević, B.: Strategija upravljanja vodama Republike Srpske, Vodoprivreda, 261-263 (2013/1-3), s.3-20
- [4] Zakon o vodama („Službeni glasnik Republike Srpske“, br. 50/06 i 92/09, 121/12 i 74/17)
- [5] Direktiva 2000/60/EU Evropskog parlamenta o procjeni upravljanja poplavnim rizicima,
- [6] Plan upravljanja oblasnim riječnim slivom – distriktom rijeke Save u Republici Srpskoj (2018-2022)
- [7] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd, ISBN 86-23-41056-4
- [8] Đorđević, B., Dašić, T. (2011a): Water storage reservoirs and their role in the development, utilization and protection of catchment, *Spatium – International Review*, 24, pp 9-15
- [9] Đorđević, B., Dašić, T. (2011b): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, *Vodoprivreda*, 252-254, str.151-164
- [10] Rehabilitacija i modernizacija sistema za navodnjavanje na području Novog Sela u opštini Bijeljina i Gojkova i Stakića polja u opštini Pelagićevo, (2011), Zavod za vodoprivredu d.o.o. Bijeljina
- [11] Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srpske – Jedinica za koordinaciju poljoprivrednih projekata APCU, Studije, Idejna rješenja, Glavni projekti i izvedeni radovi na izgradnji sistema navodnjavanja u Republici Srpskoj: opštine Bratunac, Bijeljina, Laktaši, Gradiška, Pelagićevo, Trebinje, Bileća, Ljubinja (2012-2020. godina)
- [12] Projekat izgradnje sistema navodnjavanja u opštinama Laktaši i Gradiška I i II Faza, Knjiga 3. Hidrološke podloge i analiza potreba za vodom (2016), Zavod za vodoprivredu d.o.o. Bijeljina
- [13] Razvoj irigacionog sistema u Trebinjskom polju sa vodozahvatom za Zubački plato Idejno rješenje i Glavni projekat (2016), Zavod za vodoprivredu Bijeljina

- [14] Idejna rješenja i Glavni projekti, izvedeni radovi na izgradnji sistema navodnjavanja u Popovom polju, Zubačkom platou i na području Istočne Hercegovine (2016-2020) Hidroelektrane na Trebišnjici ad.Trebinje, grad Trebinje i opština Bileća
- [15] Glavni projekat razvoja sistema navodnjavanja U Bratuncu (2016), Urbis Centar d.o.o, Banja Luka Bijeljina&Institut za hidrotehniku Građevinskog Fakulteta, Sarajevo & Ibis d.o.o., Banja Luka
- [16] Idejno rješenje i Glavni projekat razvoja irigacionog sistema voćnjaka u Potkozarju, opština Gradiška, (2018), Zavod za vodoprivredu Bijeljina&Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog Fakulteta u Beogradu
- [17] Idejno i Glavni projekat navodnjavanja površina u Semberiji, opština Bijeljina, (2018-2020), Zavod za vodoprivredu Bijeljina & Energoprojekt Hidroinženjering a.d., Beograd,
- [18] Plan upravljanj rizikom od polava za sliv rijeke Vrbas Republike Srpske (2018-2019), Zavod za vodoprivredu Bijeljina & Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog Fakulteta u Beogradu
- [19] Idejno rješenje i Glavni projekat razvoja navodnjavanja na području naselja Skelani, opština Srebrenica (2019), Zavod za vodoprivredu Bijeljina&Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo Građevinskog Fakulteta u Beogradu
- [20] Studija ekonomskog uticaja klimatskih promjena na Hidroenergetski sektor u Republici Srpskoj-Višenamjenski hidroenergetski sistem Trebišnjica, (2020), Zavod za vodoprivredu Bijeljina&Ienergoprojekt-Hidroinženjering a.d. Beograd

METHODOLOGY AND RESULTS OF MAPPING TORRENTIAL FLOOD RISKS FOR THE CASE STUDY OF THE JELOVAC STREAM, CITY OF BANJA LUKA

Radislav TOŠIĆ¹⁾ Vujadin BLAGOJEVIĆ²⁾ Milica TRIFKOVIĆ²⁾, Tamara SUDAR²⁾, Slavoljub DRAGIĆEVIĆ³⁾,
Novica LOVRIC¹⁾, Žana TOPALOVIC⁴⁾

¹⁾ University of Banja Luka – Faculty of Natural Sciences and Mathematics,

²⁾ Institute for Water Management, Bijeljina, ³⁾ University of Belgrade – Faculty of Geography,

⁴⁾ University of Banja Luka – Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

Summary

Recent increase in intense rainfall of short duration in the Republika Srpska and the Federation of B&H, and in the region and worldwide, is recognized as a consequence of climate change and represents a trigger for numerous torrential floods that generate enormous material damage and loss of human life.

The main focus of the Study is based on the development of a new methodological approach to mapping the risk of torrential floods that can potentially be applied to other torrential floods in Bosnia and Herzegovina. Given that similar studies and analyses have not been developed so far, at least when it comes to a comprehensive, systemic and integrated approach adapted to our region, this study represents a pioneering effort to analyse and understand torrential floods in urban areas.

A hybrid digital terrain model was developed using surveys of cross-sections in river beds and valleys and the existing digital terrain model, which was the basis for hydraulic modelling in the HEC RAS software. Hydrological modelling determined the flood flows of 20, 100 and 500-year return periods.

Hydraulic modelling determined the depths, velocities, and extent of flooding for flood flows of different return periods, levels of erosion and aggradation, and

tangential stresses along the analysed sections of a total of six torrential streams in the urban and suburban areas of the City of Banja Luka and the City of Tuzla. This paper shows the application of the methodology and the mapping results for the case study of the Jelovac stream in the City of Banja Luka.

During the development of hazard maps, a new formula was proposed to determine the hazard rating from torrential floods.

According to the validation results, the proposed methodology for developing torrential flood hazard and risk maps produced acceptable results. It also represents a good basis for numerous studies and projects in the field of flood risk management, environmental protection, spatial planning, and other areas of human activity.

After defining torrential flood hazard and risk maps, the study analysed possible adaptation measures to climate change with the aim of reducing adverse consequences, all through the application of adaptation and nature-based solutions.

Key words: natural disasters, torrential floods, hazard maps, risk maps, the Jelovac basin.