

## ANALIZA EFEKATA PRIRODOM INSPIRISANIH REŠENJA NA UGROŽENOST GRADA KRUPNJA OD POPLAVA

Jovana VIĆANOVIĆ, Andrijana TODOROVIĆ, Nikola ROSIĆ, Jasna PLAVŠIĆ  
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

### REZIME

U ovom radu se razmatra primena prirodom inspirisanih rešenja na slivu reke Likodre uzvodno od Krupnja radi ublažavanja ugroženosti od bujičnih poplava i erozije na slivu. Razmatrane mere uključuju čeone retenzije, bujične pregrade, konzervaciju zemljišta, pošumljavanje sliva i melioraciju postojećih šuma. Uticaj navedenih mera je ispitan kroz hidrološki model sliva formiran pomoću programa HEC-HMS. Poređenje rezultata dobijenih sa merama i bez njih pokazalo je da svaka od mera ima pozitivne efekte na smanjenje ugroženosti od poplava i erozije na slivu, pri čemu su najefikasnije čeone retenzije i melioracija šuma.

**Ključne reči:** prirodom inspirisana rešenja, bujične poplave, erozija, hidrološki model, HEC-HMS

### 1. UVOD

Bujične poplave se često javljaju u rečnim slivovima širom sveta i za sobom ostavljaju ozbiljne ekonomske i ekološke posledice. Karakteriše ih brza koncentracija oticaja i brza propagacija duž vodotoka. Bujične poplave najčešće dovode do intenziviranja erozionih procesa na slivu i degradacije zemljišta, a koji, po principu pozitivne povratne sprege, dovode do povećanja površinskog oticaja i dodatno intenziviraju bujične poplave. Erodირani materijal sa uzvodnih delova sliva se pronosi kroz hidrografsku mrežu do nizvodnih deonica, gde se deponuje i smanjuje kapacitet vodotoka, odnosno povećava mogućnost izlivanja vode iz glavnog korita. Kako su procesi generisanja velikih voda i

erozije na slivu povezani, neophodno je njihovo integralno sagledavanje, što zahteva interdisciplinarni pristup.

Kao jedan od mogućih pristupa rešavanju problema velikih voda i erozije na bujičnim slivovima nameću se tzv. prirodom inspirisana rešenja (engl. *nature-based solutions*). Ova rešenja su inspirisana i podržana prirodom, i ona, pored osnovne uloge u smanjenju rizika od prirodnih nepogoda, donose broje ekološke, društvene i ekonomske koristi [19]. Na primer, ova rešenja mogu da imaju pozitivne uticaje na javno zdravlje i blagostanje ljudi, kao što je pružanje novih mogućnosti za sport i rekreaciju, ili na biodiverzitet (proširivanje ili povezivanje prirodnih staništa akvatičnih i/ili terestrijalnih vrsta). Stoga su ova rešenja od izuzetne važnosti u suočavanju sa izazovima održivog razvoja, kao što su degradacija prirodnih resursa ili narušavanje ekosistema usled klimatskih i promena namene zemljišta usled npr. urbanizacije [5].

Nasuprot prirodom inspirisanim rešenjima stoji tradicionalna („siva“) infrastruktura, poput nasipa. „Siva“ infrastruktura je obično vrlo specijalizovana, odnosno osmišljena isključivo za rešavanje jednog konkretnog problema (npr. zaštita od velikih voda). Sa druge strane, potrebe savremenog društva i dinamika prirodnih procesa zahtevaju primenu multifunkcionalnih i fleksibilnih rešenja, što je usmerilo pažnju na prirodom inspirisana rešenja. Iako ova rešenja uz svoje osnovne funkcije pružaju i mnoge druge koristi, ona još uvek nisu široko rasprostranjena. Smatra se da prirodom inspirisana rešenja ne mogu u potpunosti zameniti tradicionalnu hidrotehničku infrastrukturu u slučajevima u kojima se zahteva visok stepen zaštite, pa se njihova primena često kombinuje sa tradicionalnim sivim merama u tzv. hibridnu zaštitnu infrastrukturu [5].

Kako bi se sveobuhvatno sagledala primenljivost prirodom inspirisanih rešenja za smanjenje rizika od bujičnih poplava i erozije, u ovom radu se prikazuju rezultati iz

---

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 3.5.2023.

Ispravljen: 23.5.2023.

Prihvaćen: 30.5.2023.

Kontakt: atodorovic@grf.bg.ac.rs

projekta RECONNECT<sup>1</sup> vezani za analizu efekata različitih prirodom inspirisanih rešenja za slivno područje uzvodno od grada Krupnja, koji je trpi velike posledice usled čestih poplava. Poplave u Krupnju se javljaju kako zbog izrazito nepovoljnih karakteristika sliva koje pogoduju formiranju bujičnih poplava, tako i zbog brojnih prepreka primeni bilo kakvih mera za zaštitu od poplava. Kako bi se procenili efekti razmatranog skupa mera, razvijen je lanac modela, koji se sastoji iz hidrološkog modela i modela erozije .

U narednom poglavlju je detaljno prikazano razmatrano slivno područje, razmatrana prirodom inspirisana rešenja i razvijen model. Efekti mera su prikazani i analizirani u poglavlju 3, dok zaključno poglavlje daje kritički osvrt na dobijene rezultate i smernice za dalji razvoj i primenu prirodom inspirisanih rešenja na drugim slivovima.

## 2. OPIS PODRUČJA I METODOLOGIJA

### 2.1 Opis sliva i ugroženost grada Krupnja od poplava

Opština Krupanj se nalazi u zapadnom delu Republike Srbije u Mačvanskom okrugu. Površina opštine iznosi 342 km<sup>2</sup>, ali većina stanovništva i privredna aktivnost su koncentrisane u Krupnju. Ovo dolinsko naselje na 280 m.n.m. je okruženo planinama Boranja, Jagodnja i Sokolskim planinama, gde izvire brojni (bujični) vodotoci [1]. Krupanj je poznat kao „grad na pet reka“, jer se na njegovoj teritoriji spajaju četiri bujična toka: Bogoštica, Kržava, Čađavica i Brštica, koji čine reku Likodru, levu pritoku reke Jadar. Vode ova četiri bujična vodotoka se spajaju na malom prostoru površine oko 1.5 km<sup>2</sup> [1, 2]. Njihove slivne površine iznose: Čađavica bez Brštice oko 24.4 km<sup>2</sup>, Kržava oko 13.6 km<sup>2</sup>, Bogoštica oko 34.5 km<sup>2</sup>, i Brštica oko 8.7 km<sup>2</sup> – ukupno 81.2 km<sup>2</sup> do Krupnja.

Reljef sliva uzvodno od Krupnja je dominantno brdsko-planinski. Nagibi padina su u proseku oko 25%, s tim što na uzvodnim delovima sliva nagibi idu i do 50%, a na mestimično čak do 90% [1].

Geološki i pedološki sastav zemljišta na ovom slivu je takav da tlo lako podleže raspadanju, pri čemu nastaje trošan materijal slabe vezivne moći. Takav materijal je veoma erodibilan i brzo se spira ukoliko nije pokriven dobro razvijenom vegetacijom. Prema SCS-CN klasifikaciji zemljišta, na ovom slivu najzastupljenija je hidro-

loška grupa tla B, sa manjim prisustvom grupa C i D na slivovima Bogoštica i Likodre. Iako zemljišta koja pripadaju klasi B dobro upijaju vodu [3], zbog male dubine zemljišta kapacitet sliva za zadržavanje vode je mali [1].

Prema CORINE kartama zemljišnog pokrivača iz 2018. godine, na slivu uzvodno od Krupnja dominiraju listopadne šume (oko 60% površine), dok je udeo četinarskih šuma zanemarljiv (ima ih samo na malom delu sliva Kržave). Preko 65% površine slivova Čađavice i Kržave je pokriveno šumom, dok je pokrivenost šumom slivova Brštice i Bogoštica nešto manja od 50%. Agrošumski mozaik je druga najzastupljeniji tip pokrivača, naročito u slivu Brštice (oko 50% površine ovog sliva). Detaljni pregled satelitskih i ortofoto snimaka pokazao je da se približno polovina površina koje se prema CORINE kartama klasifikuju kao agrošumski mozaik zapravo nalazi pod šumama. Pašnjaci i šibljac se javljaju samo na slivu Bogoštica, gde je koncentrisan i najveći udeo ukupnih obradivih površina na celom slivu (13%). Urbane površine su prisutne samo u centralnoj zoni Krupnja.

Klima ovog regiona je umereno-kontinentalna sa slabo izraženim godišnjim amplitudama temperature, jer su leta umereno topla, a zime umereno hladne. Godišnje padne oko 1000 mm padavina, a prosečna godišnja temperatura iznosi oko 11°C [1]. Najveće količine padavina se javljaju krajem proleća i početkom leta (maj-jun), a oktobar i februar su meseci sa najmanje padavina [3].

Lepezast oblik zajedničkog slivnog područja Brštice, Čađavice, Kržave i Bogoštica sa izrazito strmim nagibima u gornjim delovima pogoduje formiranju bujičnih velikih voda, pa su poplavni talasi sa sva četiri vodotoka veoma brzi i istovremeno stižu do grada. Ljudska delovanja, kao što su nelegalna, nekontrolisana i prekomerna seča šuma, česte promene u gazdovanju zemljištem ili neplanska gradnja dodatno pogoršavaju nepovoljan hidrološki režim i produkciju nanosa na slivu. U dolinama ovih vodotoka (posebno Čađavice i Kržave) kuće i drugi objekti izgrađeni su uz same vodotoke, na obe obale. Neplanska gradnja dovodi do ogromnih šteta od poplava s obzirom da je plavljenje i oštećenje ovih objekata tokom poplava praktično neminovno [1]. Štete postoje čak i pri poplavama kraćeg povratnog perioda. Najveće posledice u poslednjoj deceniji ostavile su poplave u maju 2014. godine i u junu 2019. godine [1, 2].

<sup>1</sup> RECONNECT (2018-2024) je projekat 776866 iz programa Horizon 2020.

## 2.2 Raspoloživi podaci

Na čitavom slivu reke Jadar postoje samo dve vodomerne stanice, Lešnica i Zavlaka, od kojih nijedna nije u slivu reke Likodre [2]. Činjenica da je razmatrani sliv uzvodno od Krupnja hidrološki neizučen predstavlja poseban izazov u proceni rizika od poplava, kao i u određivanju mera za njegovo ublažavanje. Na ovom slivu takođe ne postoji nijedna klimatološka stanica, što je, uz činjenicu da je sliv hidrološki neizučen, diktiralo i izbor strukture hidrološkog modela (poglavlje 2.5).

Podaci koji su korišćeni za razvoj modela i analize efekata prirodom inspirisanih rešenja obuhvataju:

- Digitalni model terena sa rezolucijom 25 x 25 m.
- Računske kiše (zavisnosti HTP) za glavnu meteorološku stanicu (GMS) Loznica [13], koja je zbog svoje geografske blizine usvojena kao merodavna za razmatrani sliv.
- Procene računskih velikih voda na izučenim slivovima u Srbiji I na razmatranom slivu preuzete su iz literature [4] i iz prethodnih studija [2].
- Granulometrijske krive su preuzete iz rezultata obrade uzoraka zemljišta sa šest lokacija na slivu Likodre do Krupnja, koja je sprovedena u referentnoj laboratoriji Instituta za zemljište u Beogradu 2015. godine. U nedostatku granulometrijskih krivih za nanos iz korita vodotoka na ovom slivu korišćene su krive za najuzvodnije deonice reke Korenite, koja je susedna leva pritoka reke Jadar.

## 2.3 Prirodom inspirisana rešenja

U ovom radu razmatrano je nekoliko prirodom inspirisanih rešenja koja se mogu klasifikovati kao tehničke, biotehničke i biološke mere uređenja sliva [14]. Izbor mera se zasnivao na prethodnoj dokumentaciji [1,2] kao i na katalogu mera iz projekta RECONNECT [20] iz kog su mere preliminarno odabrane na osnovu ekspertskog mišljenja. Uz konsultacije sa relevantnim lokalnim interesnim grupama o njihovim prioritetima kroz konstruktivni dijalog (engl. *co-creation*), mere su rangirane kroz višekriterijumsku analizu koja je uzela u obzir potencijalne efekte mera i preference zainteresovanih strana [15].

Izabrane mere obuhvataju retenzije i bujične pregrade kao tehničke mere, primenu konturne i konturno-pojasne obrade zemljišta radi njegove konzervacije kao biotehničke mere, i pošumljavanje i melioraciju postojećih šuma kao biološke mere.

### 2.3.1 Tehničke mere

Čeone retenzije su objekti za aktivnu zaštitu od poplava koji utiču na velike vode delimičnim ili potpunim prihvatanjem poplavnog talasa. Njihov uticaj na velike vode nizvodno od pregradnog objekta zavisi od režima ispuštanja vode iz retenzije, odnosno od tipa evakuacionog organa (npr. slobodni preliv ili preliv sa ustavama) [6]. Retenzije takođe utiču i na režim nanosa, jer se jedan deo retencionog prostora vremenom zasipa taloženjem nanosa produkovanog na slivu uzvodno od pregradnog objekta. Time se povećava eroziona moć vodotoka nizvodno od retenzije, pa dolazi do erodiranja korita [7]. Osim smanjenja poplavnog talasa, retenzije imaju i druge pozitivne efekte, kao što je formiranje staništa za akvatične vrste i poboljšanje biodiverziteta, ili pružanje dodatnih mogućnosti za rekreaciju stanovništva.



Slika 1. Bujična pregrada

Bujične pregrade su niski poprečni objekti na vodotocima (korisne visine najčešće između 2 m i 5 m) čija je primarna funkcija zadržavanje erodiranog materijala i sprečavanje trajnog gubitka zemljišta sa sliva (slika 1). Može se reći da je ušteda zemljišta dodatna korist od bujičnih pregrada s obzirom da zadržano zemljište ima određenu novčanu vrednost jer se može iskoristiti kao građevinski materijal ili u poljoprivredi. Erodirano zemljište se istaložava u zoni zaplave koja se formira uzvodno od pregrade. Iskustva pokazuju da se zaplave formiraju već posle nekoliko velikih voda, tako da bujične pregrade praktično ne obezbeđuju retencioni prostor za prihvatanje velikih voda. Zaplave smanjuju nagib dna korita uzvodno od pregrade, dok nizvodno dolazi do povećanja eroziona moći vodotoka, što može izazvati promene oblika poprečnog preseka ili nagiba korita, kao i krupnoće materijala korita [8]. Primena bujičnih pre-

grada je vezana za efemerne vodotoke sa izrazito nestabilnim hidrološkim i morfološkim režimom, što u velikoj meri otežava precizno sagledavanje njihovog uticaja na uslove tečenja vode i pronosa nanosa [8]. Ipak, bujične pregrade se često primenjuju u praksi zbog svoje jednostavne konstrukcije, koju čine telo pregrade i preliv, i relativno niskih troškova izgradnje.

### 2.3.2 Biotehničke mere

Konturna obrada zemljišta spada u mere konzervacije tla čija primena se vezuje isključivo za poljoprivredne površine (slika 2). Ova mera podrazumeva da pravac obrade zemljišta prati izohipse terena [9]. S obzirom da ne zahteva značajna finansijska ulaganja, a dovodi do smanjenja ili sprečavanja površinske erozije obradivog zemljišta, konturna obrada je uobičajena na strmim terenima. Analiza satelitskih snimaka i obilazak terena pokazuju da je ova mera primenjena i na slivu uzvodno od Krupnja.



Slika 2. Konturna obrada zemljišta

Konturno-pojasna obrada zemljišta je mera konzervacije koja podrazumeva obradu i sistematičnu sadnju useva upravno na prirodni nagib terena (slika 3), pri čemu se smenjuju pojasevi sa vegetacionim pokrivačem koji je otporniji na eroziju (trave, mahunarke) i pojasevi sa usevima (npr. kukuruz). Na ovaj način se usporava površinski oticaj, a pojasevi sa vegetacionim pokrivačem zadržavaju čestice erodiranog zemljišta sa pojaseva sa usevima. Stepenn zaštite zemljišta zavisi od primenjenog vegetacionog pokrivača: gušći pokrivač podrazumeva veće smanjenje transporta čestica zemljišta kroz taj pojas [10]. Pored zadržavanja zemljišta, vegetacioni pojasevi (posebno travnati) zadržavaju znatno više ugljenika u zemljištu u odnosu na konvencionalne useve (tzv. sekvestracija ugljenika), što je značajno u borbi protiv globalnog zagrevanja i adaptaciji na klimatske promene.



Slika 3. Konturno-pojasna obrada zemljišta

### 2.3.3 Biološke mere

Pošumljavanje podrazumeva sadnju drveća na površinama sa drugačijom namenom (slika 4). Efekti pošumljavanja zavise od vrste šume, prostornog rasporeda stabala, površine lista, dubine korenovog sistema, itd. Posebno treba naglasiti stepen razvoja (starost) stabala jer se pun efekat može očekivati tek nakon 15 do 20 godina od sadnje [5]. Šume smanjuju površinski oticaj zadržavanjem dela padavina na krošnjama (intercepcija) i povećavanjem kapaciteta zemljišta za upijanje vode tako što korenov sistem stvara mrežu dobro povezanih sitnih kanala i povećava poroznost tla. Šume povećavaju evapotranspiraciju između kišnih epizoda, a time i kapacitet tla za upijanje vode (početni gubitak) na početku naredne kišne epizode [5]. Šume podrazumevaju i veću hidrauličku hrapavost koja dodatno usporava oticaj.



Slika 4. Deo sliva pre (slika levo) i nakon pošumljavanja (slika desno)

Pošumljavanjem se ostvaruje i niz drugih pozitivnih uticaja na slivno područje. Organski biljni ostaci koji padaju na tlo i razgrađuju se pomažu zemljištu da održi

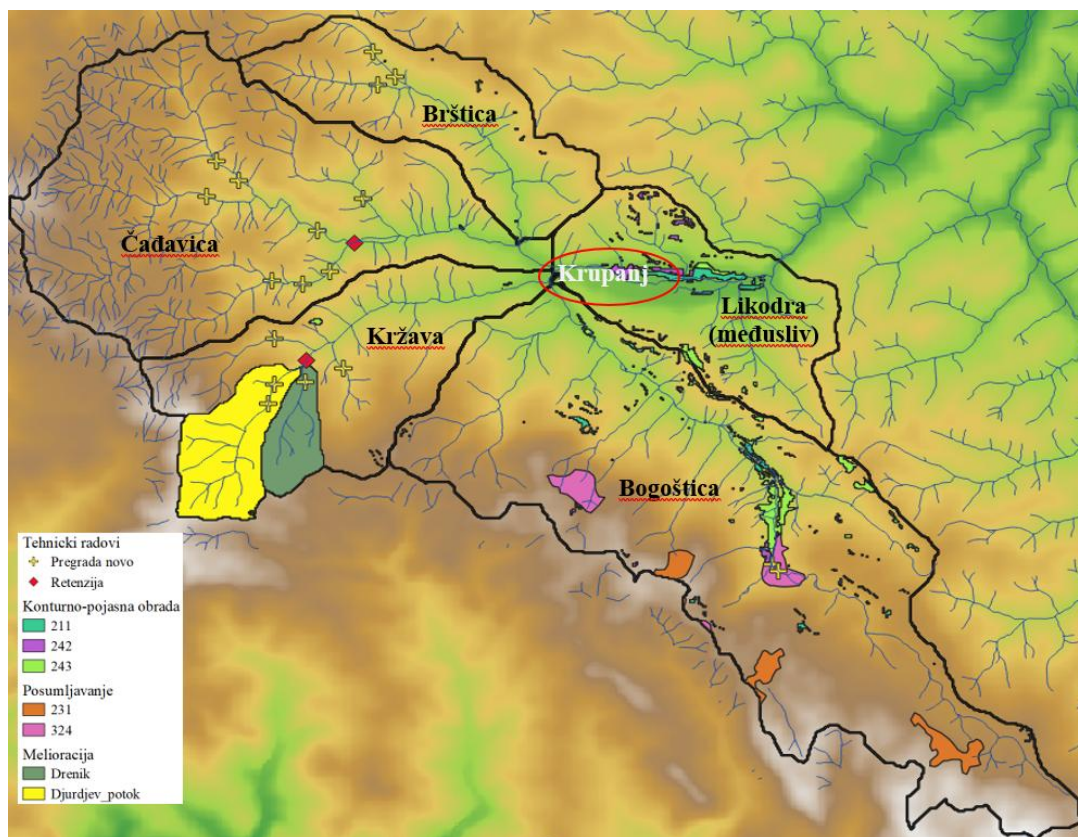
integritet i bude manje podložno eroziji. Povećanjem otpornosti zemljišta na eroziju ostvaruje se i manja produkcija nanosa na nivou sliva, što je povoljno sa stanovišta propusne moći vodotoka. Produkcija nanosa se, osim na račun povećanja otpornosti zemljišta, smanjuje i usled smanjenja i usporavanja površinskog oticaja [5]. Šume pozitivno utiču na biodiverzitet i kvalitet vazduha. Pošumljavanjem se stvara biomasa kao važan resurs. U novije vreme se posebno ističu efekti šuma u sekvestraciji ugljenika, odnosno skladištenju ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) u zemljištu.

Melioracija šuma, odnosno biološka obnova šuma, ima za cilj da vrati ili poboljša ekološku funkcionalnost šuma, da poboljša hidrološki režim na slivu i smanji degradaciju zemljišta. Kao i pošumljavanje, ova mera ima za cilj formiranje zdravog šumskog pokrivača koji može da obezbedi mnogobrojne pozitivne efekte. Obnova šuma se može izvršiti sa namerom, u smislu ciljanog integrisanja većeg broja vrsta u degradiran šumski pejzaž, ili se može dozvoliti prirodna

regeneracija prethodno prekomerno korišćenih i zagađenih šumskih sistema. Proces biološke obnove šuma može da uključuje: pripremu zemljišta za prirodno podmlađivanje, pošumljavanje neobraslog šumskog zemljišta sadnjom sadnica, zatim popunjavanje, negu i čišćenje šumskih kultura, prevođenje degradiranih šuma u viši uzgojni oblik (melioracija degradiranih šuma) i druge radove na podizanju, nezi i unapređenju stanja šuma [11].

#### 2.3.4 Dispozicija prirodom inspirisanih rešenja na slivu uzvodno od Krupnja

Dispozicija svih predloženih mera prikazana je na slici 5, koja prikazuje lokacije postojećih i 18 planiranih bujičnih pregrada, kao i lokacije dve planirane čeone retenzije na Kržavi i Čadavici. Lokacije ovih mera preuzete su iz prethodnih studija za ovaj sliv [2]. Konturna obrada zemljišta je pretpostavljena na svim poljoprivrednim površinama u sadašnjem stanju (poglavlje 2.3.2), pa ova mera nije prikazana.



Slika 5. Dispozicija planiranih prirodom inspirisanih rešenja na slivu uzvodno od Krupnja (bez postojeće konturne obrade zemljišta). Brojevi u legendi označavaju različite namene zemljišta prema CORINE tematskoj karti (2018).

Na slici 5 prikazane su lokacije za konturno-pojasnu obradu, koja je pretpostavljena na svim poljoprivrednim površinama na kojima se javlja intenzivna erozija (prema [3]) i koje imaju nagib manji od 25% (jer ova mera nema efekata na strmijim nagibima). Pošumljavanje je pretpostavljeno na svim površinama koje su pod šibljacima i na polovini površina koje su pod pašnjacima prema CORINE kartama, tako da se sve lokacije za pošumljavanje nalaze na slivu reke Bogoštica. Ove površine su najpogodnije za pošumljavanje u budućnosti jer su u postojećem stanju siromašne u pogledu vegetacije, dok nije realno očekivati promenu ostalih namena zemljišta. Lokacije za melioraciju šuma je veoma teško odrediti zato što kartirani podaci o stanju šuma (tj. lokacije degradiranih šuma) nisu dostupni. Imajući u vidu da melioracija šuma može iziskivati značajna ulaganja, u ovom radu je pretpostavljena samo melioracija šuma slivne površine retenzije Kržava, sa osnovnim ciljem da se umanjí zasipanje ove retenzije i pospeši njen efekat u ublažavanju poplavnih talasa sa ovog dela sliva.

## 2.4 Koncept razvoja modela

Kako bi se analizirali potencijalni efekti razmatranih prirodom inspirisanih rešenja u smanjenju ugroženosti Krupnja od poplava i smanjenju erozije, u programu HEC-HMS su formirana dva modela: jedan za simulacije referentnog (sadašnjeg) stanje na slivu sa postojećim merama, i drugi za simulacije budućeg stanja na slivu nakon primene svih predloženih mera. Oba modela se sastoje od lanca hidrološkog modela i modela erozije.

Imajući u vidu da se radi o analizi talasa velikih voda, formiran je model epizoda koji simulira pojedinačne talase sa zadatim računskim kišama. Kako bi se razmatrane mere uključile u model, razvijen je prostorno raspodeljen model u kome je slivno područje podeljeno na više podslivova. Podela na podslivove je ista u verzijama modela za sadašnje i buduće stanje. Kako je razmatrani sliv hidrološki neizučen, za proračune su usvojene metode čiji se parametri mogu oceniti bez kalibracije modela [12]: efektivne kiše su simulirane primenom SCS-CN metode, transformacija efektivne kiše u direktni oticaj simulirana je primenom sintetičkih jediničnih hidrograma, dok je propagacija poplavnih talasa u vodotocima modelirana pomoću metode Maskingam-Kanž. Količine erodiranog zemljišta sa sliva procenjene su pomoću Modifikovane univerzalne jednačina gubitaka zemljišta (eng. *Modified Universal Soil Loss Equation*), odnosno MUSLE metode, koja

jedna od retkih koja omogućava procenu produkcije nanosa usled pojedinačnih kišnih epizoda [16]. Iako razvoj svakog modela podrazumeva i neku vrstu formalnog testiranja (validacije), u slučaju sliva Likodre uzvodno od Krupnja to nije moguće zbog nedostatka podataka. Stoga je u ovom radu izvršena samo posredna validacija hidrološkog modela poređenjem dobijenih računskih protoka sa rezultatima regionalne hidrološke analize.

Naredna dva potpoglavlja detaljnije opisuju dve verzije razvijenog lanca modela.

## 2.5 Model za referentno stanje

### 2.5.1 Hidrološki model

Ključne komponente hidrološkog modela u HEC-HMS-u: (a) model sliva, koji definiše računsku strukturu sliva i odabir metoda za proračun hidroloških veličina, i (b) meteorološki model, koji definiše meteorološke ulazne veličine za hidrološke simulacije.

**Model sliva.** Slivno područje uzvodno od Krupnja je podeljeno na 29 podslivova i 13 rečnih deonica (slika 6). Delineacija podslivova je izvršena na osnovu digitalnog modela terena i lokacija predloženih mera (pre svega retenzija, i postojećih i planiranih bujičnih pregrada), kako bi ista struktura bila korišćena u obe verzije modela.



Slika 6. Računska struktura sliva uzvodno od Krupnja u programu HEC-HMS

Za proračun efektivne kiše metodom SCS, u GIS okruženju određena je zastupljenost svake vrste namene površina na svakom podslivu, dok su vrednosti hidrološkog broja CN za svaku namenu preuzete iz literature [12] za hidrološku grupu tla B. Prosečne vrednosti brojeva CN za svaki podsliv dobijen je kao ponderisana srednja vrednost za svaku namenu zemljišta prema njenoj zastupljenosti. Broj CN za šume je usvojen uz pretpostavku slabih prilika za upijanje, koje odgovaraju lošem stanju šuma na slivu [18]. Usvojeni su prosečni uslovi prethodne vlažnosti na slivu, što je podrazumevana opcija programa.

Za transformaciju efektivne kiše u direktni oticaj u modelu primenjena je metoda sintetičkog jediničnog hidrograma (SJH) po Jovanoviću i Brajkoviću [12]. Ordinate SJH su određene za svaki podsliv na osnovu njegovih fizičkih karakteristika i unete u program kao funkcionalne zavisnosti. Sintetički jedinični hidrogrami su definisani za kišu trajanja 1 h, dok je izabran računski korak od 15 minuta koji odgovara vremenu koncentracije najmanjih podslivova.

Propagacija talasa u rečnoj mreži se u modelu računa metodom Maskingam-Kanž koja je izabrana kao dovoljno složena metoda bez prevelikih zahteva za ulaznim podacima, a koja je jedna od dve metode u HEC-HMS-u koja omogućuje modeliranje pronosa nanosa u rečnoj mreži.

**Meteorološki model.** Kao ulaz u hidrološki model korišćene su računске kišne epizode, koje su određene na osnovu zavisnosti HTP za GMS Loznica. Primene su računске kiše neravnomernog intenziteta, pri čemu su računski hijetogrami formirani primenom metode naizmeničnih blokova. Hijetogrami su formirani za usvojeno trajanje kiše od 24 h, s tim da su pretpostavljeni konstantni intenziteti kiše tokom 4-časovnih intervala. Ovo „uglašavanje“ hijetograma tokom 4-časovnih intervala je usvojeno probanjem tako da se dobije što bolje slaganje računskih velikih voda iz simulacija modelom sa rezultatima regionalne analize. Proračuni su urađeni za šest povratnih perioda: 20, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina, uz pretpostavku da su povratni periodi računskih kiša i simuliranih vršnih protoka isti [12].

### 2.5.2 Model erozije

Model erozije omogućava simulaciju (a) produkcije nanosa na podslivovima i (b) pronosa nanosa duž rečne mreže. Ovaj model zahteva da se definišu granulome-

trijske krive za svaki podsliv i svaku rečnu deonicu. Za svaki podsliv usvojena je kriva koja odgovara geografski najbližoj lokaciji uzorkovanja. Za sve rečne deonice usvojena je granulometrijska kriva najuzvodnijih deonica reke Korenite.

**Erozija na podslivu.** Produkcija nanosa na podslivovima se računa metodom MUSLE prema formuli:

$$Y = a(Q_{pov} \cdot q_{max})^b \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

gde su:  $Y$  – gubitak zemljišta (produkcija nanosa) sa podsliva usled kišne epizode (u tonama);  $a$ ,  $b$  – koeficijenti lokacije;  $Q_{pov}$  – zapremina površinskog oticaja;  $q_{max}$  – maksimalni protok poplavnog talasa;  $K$  – faktor erodibilnosti zemljišta,  $LS$  – topografski faktor,  $C$  – faktor vegetacije,  $P$  – faktor konzervacionih mera. Vrednost oticaja program interno preuzima iz hidrološkog modela. Faktori  $K$ ,  $LS$  i  $C$  su dobijeni prostornim osrednjavanjem rasterskih vrednosti iz literature [3] za svaki podsliv, dok je faktor  $P$  sračunat za svaki podsliv. Vrednost ovog faktora je korigovana samo u podslivovima gde je zastupljena poljoprivreda, s obzirom da je u referentnom modelu pretpostavljena konturna obrada zemljišta. Korekcije ovog faktora vršene su prema zastupljenosti poljoprivrednih površina u ukupnoj površini podsliva (prema CORINE kartama) i prema prosečnom nagibu terena u poligonima koji predstavljaju poljoprivredne površine. Vrednosti ovog faktora za ove površine usvojene su iz literature [17], dok je za sve ostale površine pretpostavljena vrednost 1.

**Erozija u rečnoj deonici.** Za simulaciju pronosa nanosa u hidrografskoj mreži odabrana je metoda odnosa zapremina (eng. *Volume Ratio*). Prema ovoj metodi, u svakom vremenskom intervalu se prvo računa transportni kapacitet vodotoka za nanos na osnovu svojstava tečenja i karakteristika nanosa, a zatim se nanos koji je već u deonici dodaje količina koja pristiže sa uzvodnog elementa (podsliva ili deonice). Ako je transportni kapacitet deonice veći od priliva nanosa, dešava se erozija, a ako je manji, zasipanje rečnog dna. Zasipanje ili erozija se računaju kako bi se utvrdila količina nanosa koja izlazi iz deonice, i koja je proporcionalna protoku na izlazu iz deonice u istom vremenskom koraku.

## 2.6 Model za buduće stanje

Da bi se omogućila procena efekata razmatranih mera, modifikacijom referentnog modela formiran je model namenjen simulacijama za buduće stanje. U slučaju retenzija, modifikacije podrazumevaju unos novih ele-

menata u model sliva, a kod ostalih mera promenu vrednosti parametara hidrološkog modela (pošumljavanje i melioracija) ili modela erozije (konturno-pojasna obrada zemljišta). Čeone retenzije na Kržavi i Čađavici su unete kao novi elementi u računskoj strukturi sliva umesto običnih računskih čvorova verziji modela za referentno stanje. Svi parametri retenzija preuzeti su iz ekspertize [2], uključujući i temeljne ispuste kao evakuacione organe.

Pošumljavanje slivnog područja je modelirano kroz izmene u hidrološkom modelu sliva tako što je broj CN smanjen na podslivovima gde je ova mera predviđena. Za melioraciju šuma, odnosno poboljšanje stanja u postojećim šumama na slivu, takođe je promenjen broj CN i to na dva podsliva uzvodno od retenzije Kržava na kojima je predviđena primena ove mere. Na površinama koje odgovaraju šumama broj CN je smanjen sa 66 na 55, što odgovara prelasku sa loših na dobre uslove za upijanje.

Konturno-pojasna obrada se uključuje u model erozije kroz dodatno smanjenje faktora konzervacionih mera  $P$  u MUSLE metodi, pri čemu su umanjene vrednosti ovog faktora usvojene na osnovu zastupljenosti poljoprivrednih površina na podslivu, nagiba terena i preporuka u literaturi [17].

Treba istaći da bujične pregrade nisu mogle biti eksplicitno uključene u modele kako bi se kvantifikovao njihov efekat jer su zahtevale znatno finije modeliranje u uslovima nedostatka svih relevantnih podataka. U domaćoj i stranoj literaturi pristupi modeliraju uticaja ovih objekata su slabo dokumentovani. Pristupi u literaturi su obuhvatili modeliranje pregrada kao retenzija, što nije realističan pristup jer one nemaju retenzioni prostor, ili primenu sofisticiranih komercijalnih modela koji zahtevaju digitalne modele terena izuzetno fine rezolucije, a koji nisu ovde bili na raspolaganju. Nakon što su preliminarne analize pokazale da model sa usvojenom prostornom diskretizacijom ne prepoznaje ove mere (ni hidrološki ni model erozije), njihov efekat je procenjan posredno, kroz zapreminu zemljišta (prirodnog resursa) koja će se trajno zadržati na slivu.

## 2.7 Analiza efekata predloženih mera

Efekti predloženih mera na velike vode u slivu Likodre uzvodno od Krupnja analiziraju se poređenjem maksimalnih protoka u referentnom stanju  $Q_{ref}$  i nakon primene mera  $Q_{bud}$ . Uticaj mera na vrednost vršnog pro-

toka iskazuje se relativno u odnosu na vrednost dobijenu za referentno stanje na slivu kao:

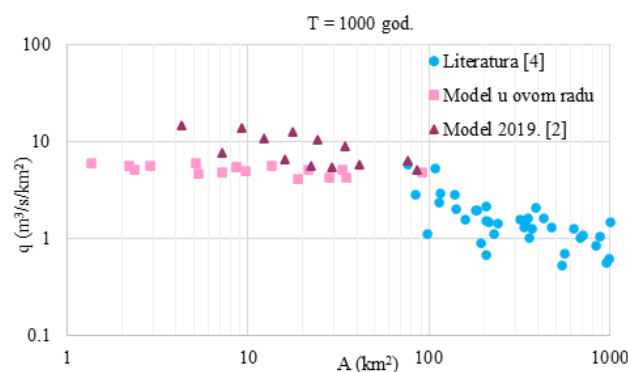
$$\Delta_Q = \frac{Q_{bud} - Q_{ref}}{Q_{ref}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Rezultati se prikazuju za karakteristične profile na slivu, koje čine profil samog grada Krupnja gde se može videti zbirni efekat svih mera, kao i izlazni profili podslivova na kojima se jasno vidi uticaj predloženih mera pojedinačno. Kako je fokus ovog rada na analizi ugroženosti od poplava, rezultati modela erozije su dati na opisnom nivou i to samo za konturno-pojasnu obradu zemljišta, kao jedinu predloženu meru čiji se efekat može videti isključivo kroz model erozije.

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

### 3.1 Validacija hidrološkog modela

Za hidrološki neizučene slivove jedini način za posrednu validaciju hidrološkog modela je poređenje dobijenih računskih velikih voda sa rezultatima regionalne analize. Zato je formirana zavisnost specifičnog oticaja velikih voda od površine sliva korišćenjem podataka opisanih u poglavlju 2.2, a koja je prikazana na slici 7. Na regionalni dijagram naneti su rezultati dobijeni u prethodnoj studiji i rezultati iz ovog rada. Slika 7 pokazuje blago odstupanje računskih velikih voda iz ovog rada od regionalne zavisnosti koju pokazuju računске velike vode na hidrološkim stanicama [4], dok su odstupanja od procena velikih voda iz ekspertize iz 2019. godine [2] nešto značajnija.



Slika 7. Rezultati regionalne hidrološke analize za računске velike vode povratnog perioda 1000 godina

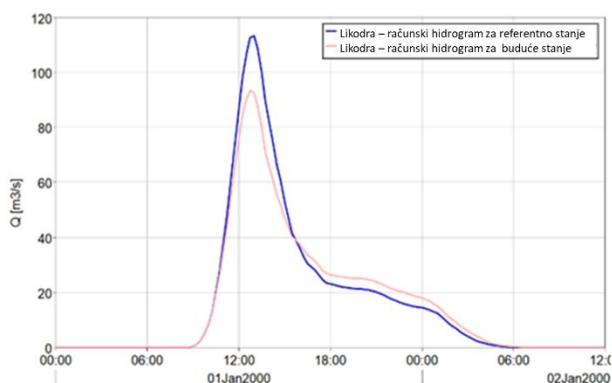
U odnosu na druga dva skupa računskih velikih voda [2, 4], model u ovom radu donekle potcenjuje očekivane vrednosti iz regionalne zavisnosti. Model iz 2019. godine [2] je takođe pravljen za isti neizučeni sliv i isti je



kao model u ovom radu u smislu metoda za proračun oticaja, ali se način određivanja parametara modela razlikuje, što je rezultovalo neizbežnim odstupanjima u procenama merodavnih velikih voda. Osim toga, drugačiji je i meteorološki ulaz u model, jer je u modelu iz 2019. godine [2] uzeta u obzir i prostorna neravnomernost padavina. Međutim, odstupanja dobijenih vrednosti u ovom radu mogu se smatrati prihvatljivim, jer treba imati u vidu da se radi o neizučenom slivu i velikim vodama male verovatnoće pojave, pa i procene ovih protoka prate izuzetno velike neizvesnosti.

### 3.2 Zbirni efekat predloženih mera na lokaciji grada Krupnja

Na slici 8 prikazani su računski hidrogrami velikih voda reke Likodre u čvoru koji predstavlja lokaciju grada Krupnja, odnosno, neposredno nizvodno od sastava četiri glavne reke. Prikazani hidrogrami odgovaraju referentnom i budućem stanju tj. stanju sa razmatranim prirodom inspirisanim rešenjima. U tabeli 1 prikazane su vrednosti računске maksimalnih protoka i relativna razlika računskih velikih voda u budućem u odnosu na referentno stanje.



Slika 8. Računski hidrogrami velikih voda povratnog perioda 20 godina za Likodru u Krupnju za referentno i buduće stanje

Tabela 1. Računске velike vode reke Likodre u Krupnju – poređenje referentnog i budućeg stanja

T [god]	$Q_{ref}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{bud}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\Delta_Q$ [%]
20	113.1	93.4	-17.4
50	168.0	134.3	-20.1
100	213.2	167.3	-21.5
200	263.9	205.9	-22.0
500	335.4	258.0	-23.1
1000	390.3	298.1	-23.6

Zajedničkim dejstvom svih mera ostvareno je značajno ublaženje maksimalnih protoka u Krupnju od oko 20% pri bilo kom povratnom periodu. Stepenn ublaženja se povećava sa povećanjem povratnog perioda. Sa slike 7 se može videti da za povratni period od 20 godina u budućem stanju nije ostvareno produženje trajanja talasa, ali maksimum jeste manji. Za sve ostale povratne periode je pored smanjenja maksimalne vrednosti postignuto i duže trajanje baze talasa.

### 3.3 Analiza efekata pojedinačnih mera

**Čeone retenzije.** Retenzije na uzvodnim delovima slivova Čadavice i Kržave predstavljaju ključne objekte u sistemu predloženih mera i imaju najveći uticaj na ublažavanje poplavnih talasa u Krupnju. Pored smanjenja vršnih protoka, retenzije utiču i na ublaženje i rasplinjavanje poplavnih talasa, kao i na kontrolu nanosa nizvodno. Izgradnja retenzija na uzvodnim delovima sliva je efektivna, jer su ta područjima sa najvećim nagibima, i tu je generisanje oticaja i erozija zemljišta najintenzivnije.

Retenzijom Čadavica se ostvaruje značajan efekat u ublažavanju maksimalnog protoka (tabela 2). Stepenn ublaženja je veći od 60% za sve povratne periode i iznosi čak i oko 90% za povratni period od 1000 godina. Takođe je ostvaren efekat vremenskog rasplinjavanja poplavnog talasa, što je pozitivno sa strane sigurnosti oblasti nizvodno od retenzije. Uticaj retenzije Kržava je nešto manji u odnosu na Čadavicu (tabela 3). Stepenn ublaženja maksimuma poplavnog talasa kreće se između 11% i 45%. Uticaji ovih retenzija ilustrovani su i na slikama 9 i 10, koje prikazuju ulazne i izlazne poplavne talase 20-godišnjeg povratnog perioda.

Tabela 2. Uticaj retenzije Čadavica na velike vode

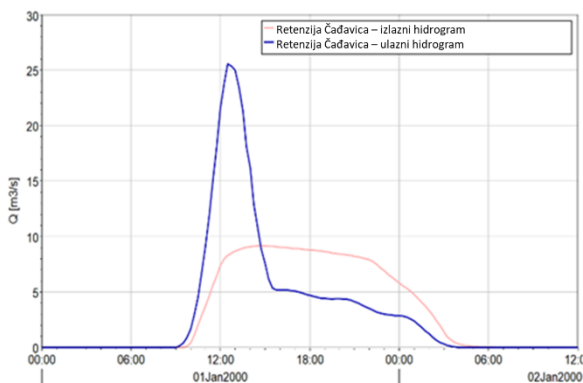
T [god]	$Q_{ulaz}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{izlaz}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\Delta_Q$ [%]
20	25.6	9.2	-64.2
50	38.2	9.9	-74.0
100	48.4	10.4	-78.6
200	59.9	10.8	-82.0
500	76.1	11.2	-85.3
1000	88.9	11.5	-87.0

Rezultati su pokazali da je za pretpostavljenu konfiguraciju dve retenzije ublaženje maksimuma poplavnog talasa veće za veće povratne periode i obrnuto, što je suprotno od očekivanog. To ukazuje da pretpostavljene dimenzije temeljnih ispusta nisu dobro izabrane jer ne optimizuju funkciju ovih retenzija. Takođe, za obe

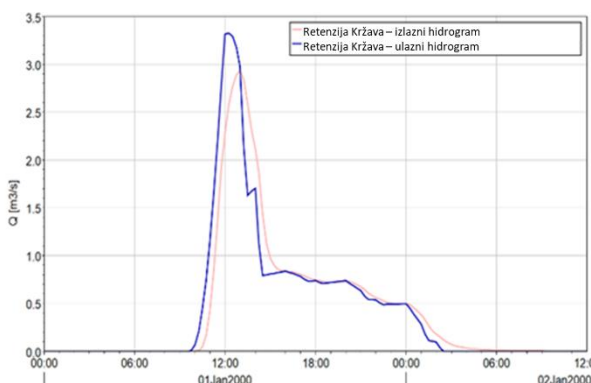
retenzije pretpostavljen je isti prečnik temeljnog ispusta (1 m) bez obzira na to što je dotok u retenziju Kržava višestruko manji nego u slučaju Čađavice. Na slici 11 prikazan je rezultat analize osetljivosti na dimenzije temeljnog ispusta na retenziji Kržava za povratni period od 100 godina. Ova analiza očekivano pokazuje da je efikasnost retenzije veća za manje prečnike ispusta usled dužeg vremena zadržavanja talasa u retenziji i upućuje na neophodnost pažljivijeg dimenzionisanja ovih objekata u višim fazama projektovanja.

Tabela 3. Uticaj retenzije Kržava na velike vode

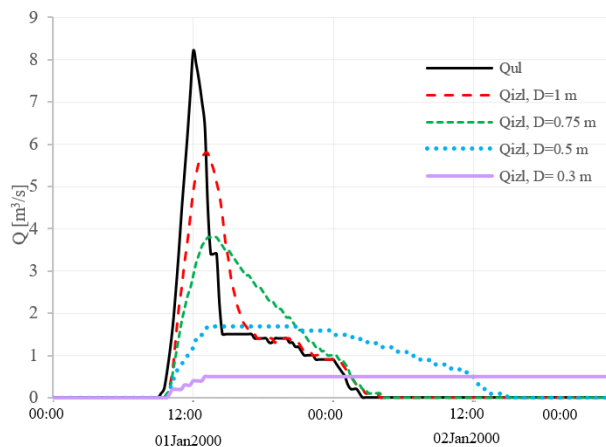
T [god]	$Q_{ulaz}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_{izlaz}$ [ $m^3/s$ ]	$\Delta_Q$ [%]
20	3.3	2.9	-11.7
50	5.9	4.6	-21.4
100	8.2	5.8	-28.5
200	10.8	7.1	-34.1
500	14.5	8.8	-39.2
1000	17.4	9.5	-45.6



Slika 9. Ulazni i izlazni hidrogrami velike vode povratnog perioda 20 godina za retenziju Čađavica



Slika 10. Ulazni i izlazni hidrogrami velike vode povratnog perioda 20 godina za retenziju Kržava



Slika 11. Analiza osetljivosti izlaznog hidrograma na prečnik temeljnog ispusta na retenziji Kržava pri velikoj vodi povratnog perioda 100 godina

Tabela 4. Uticaj pošumljavanja na računске velike vode na podslivu reke Bogošćice

T [god]	CN <sub>ref</sub> = 67.5		CN <sub>bud</sub> = 67.3	
	$Q_{ref}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_{bud}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_{ref}$ [ $m^3/s$ ]	$Q_{bud}$ [ $m^3/s$ ]
20	2.06	2.04	2.06	2.04
50	2.94	2.92	2.94	2.92
100	3.66	3.64	3.66	3.64
200	4.46	4.45	4.46	4.45
500	5.55	5.53	5.55	5.53
1000	6.39	6.37	6.39	6.37

**Konturno-pojasna obrada zemljišta.** Ova mera utiče samo na zapreminu erodiranog zemljišta. Za sve povratne periode dobijeno je isto relativno smanjenje produkcije nanosa koje odgovara procentualnom smanjenju faktora  $P$  za podsliv, a iznosi svega par procenata. To je u skladu sa izrazom metode MUSLE prema kojem je produkcija nanosa direktno proporcionalna faktoru  $P$  (poglavlje 2.4.2). Značajni efekti ove mere se nisu mogli ni očekivati imajući u vidu relativno male površine na kojima je ova mera predviđena (slika 5).

**Pošumljavanje slivnog područja.** Pošumljavanje je primenjeno samo na slivu Bogošćice, gde postoje površine pokrivene pašnjacima i šibljacima koje su pogodne za pošumljavanje. U tabeli 4 dat je primer koji pokazuje uticaj pošumljavanja na maksimalnu vrednost oticaja. Ostvaren je pozitivan rezultat u pogledu smanjenja maksimuma hidrograma, ali su efekti zanemarljivi, odnosno manji od 1%, što je razumljivo s

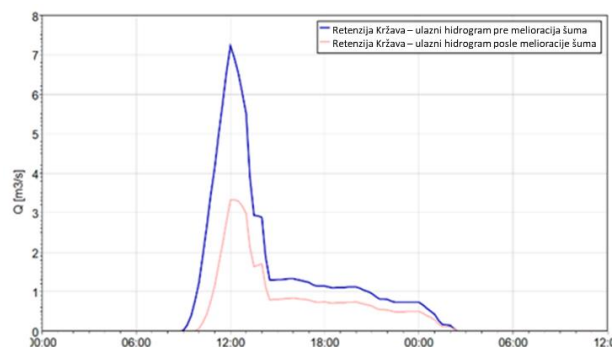
obzirom na to da se broj CN na razmatranom podslivu smanjio za svega 0.2%. Brojevi CN za pašnjake i šibljacke iznose 58 odnosno 56, pa razlika u odnosu na vrednost 55 koja odgovara novim šumama sa dobrim uslovima za upijanje nije dovoljno velika da ostvari značajnije efekte. Osim toga, površine pod pašnjacima i šibljacima su među najmanje zastupljenim namenama površina na slivu. Uticaj ove mere se smanjuje sa povećanjem povratnog perioda, kao što je i očekivano.

**Melioracija šuma.** Efekti poboljšanja kvaliteta šuma na područjima gde su one već zastupljene je ispitano samo na slivu Kržave, i to na dva podsliva uzvodno od ove retenzije. Brojevi CN na ova dva podsliva su značajno manji u modelu za buduće stanje u odnosu na model za referentno stanje, tako da se očekuje značajniji uticaj od pošumljavanja. Melioracija šuma se pokazala kao izrazito efektivna mera za kontrolu oticaja na podslivovima (tabela 5 i slika 12), sa smanjenjem maksimuma dotoka između 28 i 54% u zavisnosti od povratnog perioda. Iako se uglavnom analizira u kontekstu smanjenja oticaja, takođe postoji i uticaj na smanjenje produkcije nanosa. Kao i kod prethodne mere, efekti smanjenja oticaja opadaju sa povećanjem povratnog perioda kiše. Ovi rezultati pokazuju da se biološkim radovima u slivovima retenzija može značajno smanjiti oticaj u retenziju, što ukazuje na neophodnost simultane optimizacije dimenzija i funkcionisanja retenzije sa obimom ove biotehničke mere.

**Bujične pregrade** nisu direktno modelirane, nego je njihov efekat procenjen kroz zapreminu zemljišta koje se zadržava na slivu usled dodatnih bujičnih pregrada. Zapremina zaplave (zadržanog nanosa) iza pregrade izračunata je na osnovu usvojene visine pregrade i dužine zaplave, koja je određena primenom empirijskih izraza. Ukupna zapremina zadržanog zemljišta za 18 novih pregrada iznosi nešto više od 28 hiljada m<sup>3</sup>, dok se pojedinačne zapremine kreću između 215 i 4860 m<sup>3</sup>.

Tabela 5. Uticaj melioracije šuma na dotok u retenziju Kržava.

T [god]	$Q_{ref}$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_{bud}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\Delta Q$ [%]
20	7.23	3.32	-54.0
50	10.62	5.90	-44.4
100	13.42	8.17	-39.1
200	16.57	10.80	-34.8
500	20.86	14.50	-30.5
1000	24.18	17.44	-27.9



Slika 12. Ulazni hidrogram velike vode povratnog perioda 20 godina u retenziju Kržava pre i posle primene melioracije šuma

#### 4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Cilj ovog rada bila je analiza uticaja prirodom inspirisanih rešenja na ublažavanje poplava i erozije na slivu reke Likodre uzvodno od Krupnja. Sprovedena analiza je pokazala da svako od razmatranih rešenja u nekoj meri utiče na ublažavanje poplava ili smanjenje produkcije nanosa na slivu. Glavni zaključci su:

- Zbirni efekat mera na lokaciji grada Krupnja (neposredno nizvodno od sastava četiri reke sastavnice) ogleda se u smanjenju računskih velikih voda (maksimuma talasa) za oko 20% pri bilo kom povratnom periodu.
- Retenzija Čadavica ublažava maksimume poplavnih talasa za između 60 i 90%, dok u slučaju Kržave ublaženje iznosi između 11 i 45%. Dobijeni rezultati važe za preliminarno pretpostavljene dimenzije objekata retenzija i njihovih evakuacionih organa i jasno ukazuju na neophodnost pažljivije optimizacije ovih dimenzija u sklopu svih planiranih mera.
- Smanjenje produkcije nanosa usled primene konturno-pojasne obrade zemljišta je malo i iznosi nekoliko procenata za sve podslive i za bilo koji povratni period.
- Pošumljavanje na slivu Bogoštice vrlo malo doprinosi sniženju oticaja i maksimalnih protoka (manje od 1% pri svim povratnim periodima).
- Melioracija šuma uzvodno od retenzije Kržava je izrazito efektivna u pogledu smanjenja dotoka vode u retenziju.
- Uticaj bujičnih pregrada na ublaženje talasa velikih voda i na transport nanosa je veoma teško kvantifikovati bez veoma detaljnih podloga. Za ovu meru se, međutim, može proceniti zapremina zadržanog

nanosa na slivu i time omogućiti procena uštede u potencijalnom gubitku građevinskog materijala ili poljoprivrednog zemljišta.

Iako pošumljavanje sliva i konturno-pojasna obrada u poređenju sa retenzijama i melioracijom šuma daju gotovo zanemarljive uticaje u pogledu smanjenja ugroženosti grada Krupnja od velikih voda, ove mere mogu pružiti dodatne pozitivne efekte, pa njihova primena ne treba biti u potpunosti odbačena. Ove preporuke se odnose i na bujične pregrade, čije uticaje nije bilo moguće direktno modelirati sa raspoloživim modelom i podacima u ovom radu.

Analiza efekata prirodom inspirisanih rešenja na smanjenje rizika od poplava je pokazala neophodnost raspolaganja modelima koji imaju mogućnosti za modeliranje različitih vrsta efekata, a ne samo osnovnih pokazatelja kao što je smanjenje oticaja usled velikih voda. Međutim, svaki model je u nekoj meri opterećen pretpostavkama i pojednostavljenjima koja znatno olakšavaju rešavanje razmatranog problema, ali u isto vreme utiču na tačnost dobijenih zaključaka. U tom kontekstu, u ovom radu su prepoznata dva ključna faktora koji utiču na rezultate proračuna, a odnose se na ulazne podatke i modeliranja efekata prirodom inspirisanih rešenja.

Neizvesnost u ulaznim podacima u ovoj analizi prevashodno potiče od nedostatka podataka sa lokaliteta od interesa, zbog čega je bilo neophodno da se usvajaju podloge sa najbližih lokacija sa dostupnim podacima. Najveće neizvesnosti se mogu vezati za računске kiše koje su preuzete sa stanice koja se ne nalazi na predmetnom slivu, zatim na nepostojanje bilo kakvih hidroloških podataka koji bi omogućili kalibraciju i validaciju hidrološkog modela, kao i nepostojanje bilo kakvih osmatranja erozije i transporta nanosa na slivu.

Uključivanje prirodom inspirisanih rešenja kao mera za zaštitu od velikih voda u modele se ispostavilo kao značajan izazov, pre svega zbog načina na koji se one mogu uključiti u modelski lanac. Mere koje predstavljaju hidrotehničke objekte, kao što su retenzije, često su već predviđene kao opcije u postojećim modelima, uključujući i ovde korišćeni HEC-HMS. Međutim, HEC-HMS ima vrlo skromne mogućnosti za modeliranje upravljanja retenzijama. Za detaljniju analizu bi bilo korektnije napraviti lanac modela koji bi obuhvatio detaljnije modeliranje retenzionih prostora (npr. u programu HEC-ResSim, koji je specijalizovan za modeliranje akumulacija). U lanac modela bi trebalo uključiti i hidrauličke modele (npr. HEC-RAS) koji ne

samo što detaljno modeliraju transformaciju poplavnih talasa duž rečne mreže i imaju i komponentu modeliranja transporta nanosa, već mogu da obuhvate i efekte drugih objekata i mera (npr. uticaj mostova, regulacionih radova, vegetacije u inundacijama itd).

Za razliku od retenzija i drugih hidrotehničkih objekata, efekti antierozionih mera moraju se posredno modelirati u hidrološkom modelu. Pošumljavanje sliva i melioracija šuma su u hidrološkom modelu simulirani samo smanjenjem CN broja (količine oticaja). Čak i kada se koriste modeli produkcije nanosa, javljaju se značajni izazovi kao što je konceptualizacija sliva u modelu, nedostatak ulaznih podataka i/ili nedovoljno fina rezolucija za predstavljanje efekata ovih mera. Takođe, dodatne koristi od biotehničkih i bioloških antierozionih mera (skladištenje ugljenika u zemljištu, poboljšanje kvaliteta vazduha, pozitivan uticaj na životnu sredinu i zdravlje ljudi, i dr.) se za sada ne mogu obuhvatiti ni indirektno kroz hidrološke modele. Sličan zaključak se nameće za modeliranje bujičnih pregrada, koje je u ovom radu naposljetku odbačeno zbog nemogućnosti kvantifikovanja njihovog efekta, čime se gubi potencijalno bitna komponenta modela.

Imajući u vidu ograničenja hidroloških modela, sve navedene pretpostavke i pojednostavljenja bi trebalo detaljnije razmotriti i po potrebi korigovati u slučaju da se pristupi ponovnoj analizi ovog sliva u budućnosti, kao i prilikom analize bilo kog drugog slivnog područja. Razvoj ovakvih modela za preciznu kvantifikaciju osnovnih efekata, kao i metodologije koja bi omogućila preciznu procenu dodatnih efekata prirodom inspirisanih rešenja, jesu preduslov za prihvatanje tih rešenja od strane donosioca odluka, a samim tim i za njihovu širu primenu.

## ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je sprovedeno i finansijski podržano kroz projekat RECONNECT (*Regenerating ECOSystems with Nature-based solutions for hydro-meteorological risk rEduCTion*) iz programa istraživanja i inovacija Horizon 2020 Evropske Unije pod ugovorom br. 776866. Rad odražava stavove autora i Evropska Unija ne snosi odgovornost za bilo koji vid korišćenja informacija iz ovog rada. Autori se takođe zahvaljuju dr Vukašinu Milčanoviću sa Šumarskog fakulteta Univerziteta u Beogradu na ustupljenim podlogama za područje opštine Krupanj, kao i Nikoli Zlatanoviću, spec.inž.građ., na konsultacijama u vezi sa razvojem hidrološkog modela. Na kraju, dugujemo zahvalnost Slavici Đotunović i drugim zaposlenima Opštine

Krupanj što su nam obezbedili lokalnu podršku i dali informacije od neprocenjivog značaja.

#### LITERATURA

- [1] Hidrološko-hidraulička studija o uzrocima poplava na području Krupnja maja 2014. godine, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [2] Ekspertiza poplavnih događaja u junu 2019. godine na području opština Krupanj, Lučani i Trstenik i grada Kraljeva, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, 2019.
- [3] Milčanović V., Razvoj metodologije za identifikaciju erozionih područja kao element sistema u prevenciji bujičnih poplava, Doktorska disertacija, 2021.
- [4] Prohaska S., Bartoš-Divac V., Ilić A., Velike vode Srbije na profilima hidroloških stanica, 2020.
- [5] Vićanović J., Hidrološko-hidraulička analiza uticaja prirodom inspirisanih rešenja na velike vode u slivu rijeke Gračice, Diplomski rad, 2022.
- [6] Muškatirović D., Regulacija reka, Građevinski fakultet Beograd, 1979.
- [7] Savić Lj., Uvod u hidrotehničke građevine (treće izdanje), Građevinski fakultet Beograd, 2022.
- [8] Castillo V.M., Mosch W.M., Conesa García C., Barberá G.G., Navarro Cano J.A, López-Bermúdez F., Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain), 2007.
- [9] Čustović H., Ljuša M., Blesić M., Održivo upravljanje zemljištem – pristupi i prakse u Bosni i Hercegovini, 2022.
- [10] <https://bmpbooks.com/media/Contour-Farming-and-Strip-Cropping.pdf> (2.11.2023)
- [11] Informacija o gospodarenju šumama u Federaciji BiH u 2017. godini i planovima gospodarenja šumama za 2018. godinu, Federalno ministarstvo poljoprivrede, vodoprivrede i šumarstva, 2018.
- [12] Plavšić J., Inženjerska hidrologija, Građevinski fakultet, Beograd, 2019.
- [13] Prohaska, S., Bartoš Divac, V., Koprivica, A., Đukić, D., Ilić, A., Čatović, S., Kapor, B., Marjanović, S., Vukelić, V., Božović, N., 2014. Intenziteti jakih kiša u Srbiji. Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi,” Beograd.
- [14] Babić Mladenović, M., 2018. Uređenje vodotoka. Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd, Beograd.
- [15] Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Plavšić, J., Doong, D.-J., Bahlmann, T., Alves, A., Tseng, L.-H., Randelović, A., Todorović, A., Kocic, Z., Beljinac, V., Wu, M.-H., Lo, W.-C., Perez-Lapeña, B., Franca, M.J., 2021. Incorporating stakeholders’ preferences into a multi-criteria framework for planning large-scale Nature-Based Solutions. *Ambio* 50. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01419-4>
- [16] Shi, W., Chen, T., Yang, J., Lou, Q., Liu, M., 2022. An improved MUSLE model incorporating the estimated runoff and peak discharge predicted sediment yield at the watershed scale on the Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology* 614, 128598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128598>
- [17] Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning, The USDA Agricultural Handbook No. 537. United States Department of Agriculture, Washington, D.C.; Maryland.
- [18] Vučićević, S., 2004. Мелиорација букових шума Србија у функцији унапређења животне средине. *Šumarstvo*, br. 3, str. 149-157.
- [19] European Commission, 2021. *Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners*, Publications Office of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577>
- [20] RECONNECT Measure Selector Tool, <http://www.reconnect.eu/services-platform/measure-selector-tool/>

## ANALYSIS OF THE EFFECTS OF NATURE-BASED SOLUTIONS ON THE FLOOD MITIGATION IN THE CITY OF KRUPANJ

by

Jovana VIĆANOVIĆ, Andrijana TODOROVIĆ, Nikola ROSIĆ, Jasna PLAVŠIĆ  
University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

### Summary

This paper discusses the implementation of nature-based solutions in the form of technical, biotechnical, and biological measures in the Likodra River watershed upstream of Krupanj to mitigate the intensity of flash floods and erosion. The proposed measures imply construction of reservoirs in the upper basin and check dams, implementation of soil conservation measures, reforestation of the watershed, and improvement of existing forests. The impact of these measures was assessed through developing a modelling chain that consist of hydrological and erosion models for the current and future conditions in the watershed using the HEC-HMS program, and the obtained results were compared. Based on the analysis conducted, it was concluded that each of the solutions has a positive effect in mitigating the issues of flooding and erosion in the watershed, with the most effective measures being reservoirs and forest improvement.

**Acknowledgement:** This research has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 776866 for the RECONNECT (Regenerating ECOsystems with Nature-based solutions for hydro-meteorological risk rEduCTion) project. The study reflects only the authors' view and the European Union is not liable for any use that may be made of the information contained herein. The authors are also thankful to Dr Vukašin Milčanović from the Faculty of Forestry of the University of Belgrade for providing various data on the Krupanj municipality, as well as to Nikola Zlatanović, MSc., for useful consultations on the development of the hydrological model. Finally, our gratitude also goes to Slavica Đotunović and other staff of the Municipality of Krupanj for providing local support and invaluable information.

**Key words:** nature-based solutions, flash floods, erosion, hydrological model, HEC-HMS