

## POPREČNI OBJEKTI ZA UREĐENJE KORITA BUJIČNIH TOKOVA

Stanimir KOSTADINOV  
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet  
Natalija MOMIROVIĆ, Tomislav STEFANOVIĆ, Suzana MITROVIĆ  
Institut za šumarstvo, Beograd

### REZIME

Poprečni objekti (pregrade, pragovi i fiksacioni - konsolidacioni pojasevi kao metod uređenja bujičnih tokova su poznati još u starom veku, za vreme starih civilizacija, što potvrđuju arheološka iskopavanja. Poprečni objekti, pre svega pregrade, zajedno sa pošumljavanjem goleti u slivu, predstavljaju kičmu protiverozionog sistema za kontrolu erozije zemljišta i odbranu od bujičnih poplava. Uloga poprečnih objekata je višestruka: sprečavaju dubinsku eroziju u koritu toka, smanjuju uzdužni pad korita toka i time smanjuju transportnu sposobnost toka, zadržavaju vučeni nanos, koriguju pravac toka, stabilizuju nestabilne padine uzvodno itd.

Pregrade su najznačajnije od svih poprečnih objekata. Podela pregrada se vrši prema različitim kriterijumima: prema obliku, prema nameni, prema načinu odupiranja uticaju spoljnih sila, prema vrsti materijala od koga se grade, prema specifičnosti konstrukcije itd. U bujičarskoj praksi Srbije najčešće se grade ravne, gravitacione pregrade od betona, a ranije od kamena u cementnom malteru. Znatno ređe su građene lučne pregrade.

Od poznatih sistema za uređenje bujičnih slivova i tokova u Srbiji su najviše primenjivani klasični evropski sistem i znatno manje pregrade iz sistema profesora Rosića.

Pregrade se grade u gornjim i srednjim tokovima bujica i više pregrada, najčešće u sistemu jedna za drugom tako da zaplav nizvodne pregrade štiti uzvodnu od potkopavanja usled pada vode sa preliva. Ako se grade pojedinačno pregrade se rade se slapištem i fiksacionim pojasevima na kraju slapišta. Radi veće sigurnosti posle slapišta se gradi risberma (obloga dna) od gabiona ili krupnih komada kamena u suvo u dužini od 4,0 m.

Slapište obezbeđuje pregradu od potkopavanja usled preliivanja vode.

Prelivi pregrada (i ostalih poprečnih objekata) se dimenzionišu na maksimalni proticaj verovatnoće pojave 1%, po formuli Weissbach-a, a dužina slapišta po formuli Angerholzer-a. Što se tiče statičkog dimenzionisanja pregrada, primenjivano je puno raznih metoda. U Srbiji ranijih godina do početka 70-tih godina XX veka primenjivana je metoda Thiery-a, a posle toga do današnjih dana se primenjuje metoda prof. Jevtića.

Prema metodi prof. Jevtića statičke dimenzije pregrada određuju se na bazi hidrostatičkog pritiska vode koji deluje na korisnoj visini pregrade. Ta metoda obezbeđuje neophodnu stabilnost pregrade, a ujedno daje racionalnije dimenzije, time i ekonomski prihvatljivije, od drugih metoda.

U radu se pored ostalog analiziraju uslovi koji dozvoljavaju da se kod dimenzionisanja pregrada za uređenje bujičnih tokova ne uzima u obzir teorijska puna šema opterećenja i sve one sile koje po teoriji deluju na objekat.

**Ključne reči:** pregrade, bujični tokovi, hidrauličke dimenzije, statičke dimenzije.

### UVOD

Uređenje bujičnih tokova u osnovi se sastoji od kompleksa bioloških radova za zaštitu od erozije zemljišta na padinama sliva i tehničkih radova u hidrografskoj mreži toka za zaštitu od dubinske erozije i zadržavanju vučenog nanosa. Praktično se radi o integralnom uređenju i optimalnim korišćenjem prostora u slivu koji je napadnut erozionim procesima. Poprečni objekti (pregrade, pragovi i fiksacioni - konsolidacioni

pojasevi) kao metod uređenja bujičnih tokova su poznati još u starom veku, za vreme starih civilizacija, što potvrđuju arheološka iskopavanja. Organizovan rad na zaštiti od erozije i uređenju bujičnih tokova počeo je sredinom XIX veka u Francuskoj, i kasnije se proširio na celu Evropu. [1] U Srbiji organizovan rad na uređenju bujičnih tokova u funkciji zaštite železničke pruge od poplava je započeo 1907. godine.

Poprečni objekti, pre svega pregrade, zajedno sa pošumljavanjem goleti u slivu, predstavljaju kičmu protiverozionog sistema za kontrolu erozije zemljišta i odbranu od bujičnih poplava. Za stabilizaciju korita bujičnih tokova široko je rasprostranjen metod izgradnje pregrada [2]. U Mediteranskim zemljama izgradnja pregrada je široko rasprostranjena posebno u planinskim bujičnim tokovima koje karakterišu veliki podužni padovi i transport velikih količina nanosa [3,4,5,6].

U ovom radu će biti govora uglavnom o pregradama kao najznačajnijim poprečnim objektima za uređenje korita bujičnih tokova, njihovoj ulozi, stabilnosti i dimenzionisanju pregrada, kao i o njihovim efektima.

### POPREČNI OBJEKTI KAO KLJUČNI ELEMENT PROTIVEROZIONOG SISTEMA

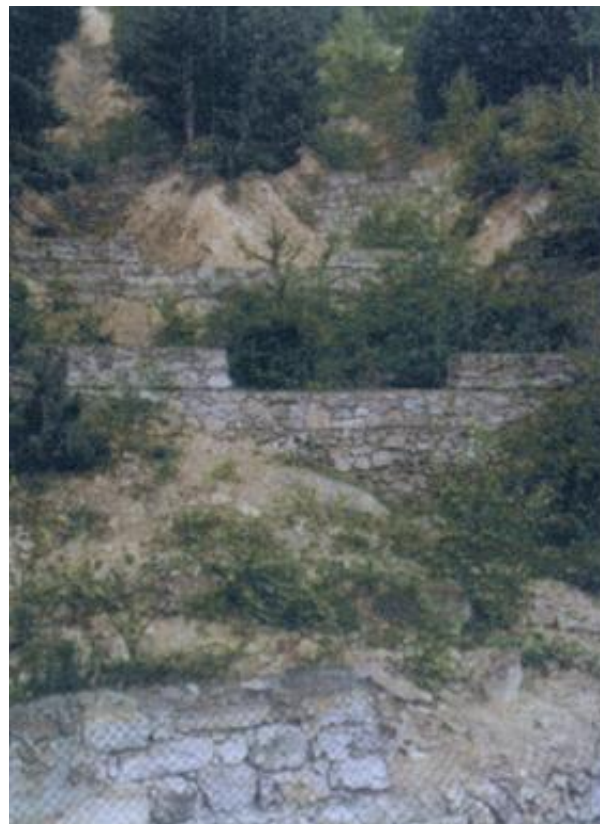
#### Podela uloga poprečnih objekata za uređenje bujičnih tokova

Na osnovu korisne visine poprečni objekti su razvrstani u tri grupe [7,8]:

- a) **konsolidacioni pojasevi**, bez korisne visine, koji se postavljaju u nivou dna i kosina korita i imaju ulogu njegove stabilizacije ili stabilizacije određene deonice uzdužnog profila;
- b) **pragovi**, sa korisnom visinom do 2,0 m, koji se postavljaju radi fiksiranja poprečnog profila korita ili deonice toka u uzdužnom smislu i kao objekti neke druge ili posebne namene;
- c) **pregrade**, sa korisnom visinom iznad 2,0 m, koji zadržavaju nanos i stabilizuju korito i dolinske strane (obale).

Kod nas se obično grade pregrade sa korisnom visinom 2,0 -5,0 m, vrlo retko i do 7,0 m. Najčešće se grade sa visinom 3,0 do 5,0 m.

Uloga poprečnih objekata, pre svega pragova i pregrada ogledaju se u sledećem [9]:



Slika 1. Pragovi od gabiona za sanaciju jaruge



Slika 2. Pregrada od KCM u reci Kačaruši

- osiguravaju poprečne profile korita bujičnog toka od daljeg dejstva procesa dubinske erozije, što je i najznačajnija uloga konsolidacionih pojaseva;
- zadržavaju vučeni nanos u zaplavu, što se i najpre uočava i traje do potpunog zasipanja pregrade ili praga (zapunjenje akumulacionog prostora pregrade

ili praga nanosom), pri čemu se doprinosi konsolidaciji nestabilnih padina uzvodno od pregrade;

- poprečni objekti predstavljaju prepreku daljem snižavanju dna korita, usled postojanja niza stabilnih tačaka koje formiraju novi (veštački) erozioni bazu u bujičnom koritu;
- usled smanjenja uzdužnog pada korita bujičnog toka smanjuje se brzina kretanja poplavnih bujičnih voda čime se smanjuje potiskujuća sila (vučna sila) vode i krupniji komadi stena ne mogu biti nošeni, već zaostaju i služe za zaštitu i konsolidaciju korita;
- poprečni objekti koriguju pravac toka vode usmeravajući je uvek u sredinu korita, što se postiže postavljanjem preliva (usta) poprečnih objekata na određeno mesto;
- pregrade i pragovi imaju ulogu regulatora u transportu nanosa jer zadržavaju veliku količinu krupnog materijala u vreme bujičnih poplava, dok sitniji materijal biva odnesen od malih i srednjih voda u obliku suspendovanog nanosa.

Postoji veliki broj različitih tipova i naziva pregrada, kao najvažnijih poprečnih objekata. U zavisnosti sa kog se aspekta posmatraju, pregrade se dele [9]:

a) prema obliku:

- pravolinijske (ravne);
- delimično lučne;
- lučne.

b) prema nameni:

- konsolidacione (za stabilizaciju korita);
- deponijske (za zadržavanje nanosa);

c) prema načinu odupiranja uticaju spoljnih sila:

- gravitacione;
- gravitaciono-lučne;
- lučne;
- uklještenne.

d) prema vrsti materijala:

- pregrade od betona;
- pregrade od armiranih betonskih elemenata;
- pregrade od lomljenog kamena u cementnom malteru;
- pregrade od kamena u suvo (rustikalne pregrade);
- pregrade od drveta;



Slika 3. Lučna pregrada

- pregrade od kamenih sanduka (kombinacija od drveta i kamena);
- pregrade od kamenog nabačaja (složaja);
- gabionske pregrade;
- rešetkaste pregrade od metala;
- jednoredni pleteri (kombinacija kolja i pruća) i dvoredni pleteri (kombinacija kolja i pruća sa kamenom ispunom).

e) prema specifičnosti konstrukcije i specifičnosti dejstva i namene:

- taložnice i procednice po S. Rosić-u;
- "nanosoulovitelji" po I.I. Herheulidze-u;
- funkcionalne pregrade.

Pregrade se obično grade u uskim profilima korita vodotoka, nizvodno od ušća neke pritoke, a od stabilnosti terena i udaljenosti građevinskog materijala takođe zavisi mesto gradnje pregrade.



Slika 4. Pregrada u Lještarskoj dolini

## EFEKTI POPREČNIH OBJEKATA U BUJIČNIM TOKOVIMA

Kod razmatranja kriterijuma i metoda za ispitivanje pojedinih efekata poprečnih objekata (pregrada) za uređenje bujičnih tokova treba početi od njihove uloge: [8,10, 11, 12,]

### a) Zadržavanje vučenog nanosa

Najupečatljivija uloga pregrada je zadržavanje vučenog nanosa u zaplavu (akumulacionom prostoru) uzvodno od pregrade. Pregrade nisu predviđene da budu akumulacije za vodu već su bitne kao akumulacija za vučeni nanos. Efekat u tom pogledu se utvrđuje na osnovu količine zadržanog nanosa i sume novca koja je potrebna da se pregrada izgradi.

Proračun količine zadržanog nanosa iza pregrade (zapremina zaplava) može da se izvrši primenom formule:

$$W = \frac{m \cdot h_k^2}{2(J_t - J_z)} \quad [m^3]$$

$W$  - zapremina zadržanog nanosa u zaplavu u  $m^3$

$m$  - srednja širina zaplava u  $m$

$h_k$  - korisna visina pregrade u  $m$

$J_t$  - prirodni pad korita bujičnog toka u decimalnom obliku

$J_z$  - pad zaplava

Kako se vidi iz predložene formule količina zadržanog nanosa zavisi od: korisne visine pregrade, prirodnog pada bujičnog korita, pada zaplava i srednje širine zaplava.

### b) Smanjenje pada korita

Zadržani nanosa u akumulacionom prostoru uzvodno od pregrade nazivamo zaplav. Površina zaplava nije horizontalna već ima svoj pad koji se naziva pad zaplava i znatno je manji od prirodnog pada korita toka. Uticaj pregrada na smanjenje pada korita a samim tim i promene u hidrauličkim elementima toka može da se izrazi kroz promenu vučne (potiskujuće) sile vode. Prema jednačini Du Boys-a srednja profilaska potiskujuća sila jednaka je:

$$\sigma_0 = \rho \cdot R \cdot i \cdot g \quad [P_a]$$

$\rho$  - zapreminska masa bujične vode u  $kgm^{-3}$

$R$  - hidraulički radijus toka u  $m$

$i$  - pad dna korita

$g$  - ubrzanje zemljine teže,  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

$\sigma_0$  - potiskujuća (vučna) sila vode u  $Pa$ .

Kako se izgradnjom pregrade smanjuje pad korita i hidraulički radijus (jer nataloženi nanos izdiže i proširuje korito toka i time smanjuje hidraulički radijus) jasno je da se na taj način smanjuje i vučna sila odnosno transportna sposobnost toka za vučeni nanos. To znači da će zbog smanjenja transportne sposobnosti toka doći do taloženja vučenog nanosa uzvodno od pregrade čime se sprečava zasipanje akumulacija ili nekih drugih objekata.

### c) Stabilizacioni efekat

Ogleda se u: formiranju lokalnih erozionih bazisa (konsolidacioni pojasevi, pragovi i pregrade), stabilizaciji pokliznutih padina (pragovi i pregrade) i korekciji pravca toka (konsolidacioni pojasevi, pragovi i pregrade). Efekat može da se izrazi preko procene količine materijala koji je pojedini objekat fiksirao, stabilizovao, da se ne bi pokrenuo i u obliku erozionog nanosa dospelo u vodotok. Izgradnjom pregrade nizvodno od pokliznute padine, zaplav pregrade bi delovao kao nožica koja će podupreti padinu i sprečiti njeno dalje klizanje i dospevanje velike količine materijala (nanosa) u vodotok. Pregrade se obično grade u sistemu jedna za drugom i time na celom sektoru izgradnje sprečavaju dubinsku eroziju korita, a zaplavi pregrada stabilizuju padine bujičnog toka.

Pored ovog naturalnog, stabilizacioni efekat poprečnih objekata bi mogao da se izrazi i kroz finansijski efekat.

Na sličan način može da se izrazi i efekat poprečnih objekata (pregrada) na usmeravanje toka vode. Usmeravanjem toka sprečava se potkopavanje i erodiranje obala. Količina potkopanog i erodiranog materijala ukoliko se ne gradi objekat može da se izračuna i to bi bio efekat izgrađenog objekta koji sprečava to potkopavanje.

### d) Zbirni efekat poprečnih objekata u koritu bujičnog toka

Kod poprečnih objekata u bujičnom koritu najčešće se javlja više efekata zajedno. Kod razmatranja efekata pojedinih objekata treba uzeti sa jedne strane sve pozitivne efekte (zadržavanje nanosa, smanjenje pada korita i stabilizacioni efekat) a sa druge strane cenu koštanja takvog objekta i negativne efekte ako ih ima. Na taj način će se videti da li je neki tip objekta ekonomičan za izgradnju ili treba tražiti drugi tip objekta, drugu vrstu materijala itd.





Slika 5. Sistem pregrada

Ovakve analize treba raditi prilikom izrade projekta tako da se izabere najbolji tip objekta za rešavanje određenih problema u nekom bujičnom vodotoku. Naravno, postoje slučajevi kada zbog značaja objekta, koji se štiti od bujičnih poplava (saobraćajnice, naselja, privredni objekti i dr.), prethodno izneti kriterijumi ne važe, već se ne gleda na cenu pregrade, zbog velikog značaja štice objekta. To znači da treba da se uvede još i kriterijum značaja objekta koji se štiti pregradom ili nekim drugim poprečnim objektom.

### DIMENZIONISANJE PREGRADA

Sve vrste poprečnih objekata se dimenzionišu hidraulički. Pragovi i konsolidacioni pojasevi, zbog male korisne visine, se ne dimenzionišu statički, ali pregrade koje su korisne visine iznad 2,0 m moraju se dimenzionisati hidraulički i statički.

#### Hidrauličko dimenzionisanje pregrada

Hidrauličko dimenzionisanje obuhvata sledeće proračune:

- Dimenzionisanje preliva pregrade (praga ili konsolidacionog pojasa),

- Dimenzionisanje dužine slapišta,
- Određivanje debljine pločnika slapišta,
- Određivanje pada zaplavlava uzvodno od pregrade.

Hidrauličko dimenzionisanje preliva pregrade se vrši da propusti merodavnu veliku vodu, a za bujične pregrade to je maksimalni proticaj verovatnoće pojave  $p = 1\%$  (stogodišnja voda).

Hidrauličko dimenzionisanje je vrlo važno. U praksi se pokazalo da je najčešći uzrok oštećenja ili rušenja (onog malog broja pregrada), nedovoljne dimenzije preliva pregrade, ili kratko slapište.

Ako preliv nema dovoljan kapacitet voda će prelivati i preko krila pregrade, gde nema obezbeđenja terena, jer se slapište radi samo da prihvati vode sa preliva, i brzo može da dođe do potkopavanja temelja pregrade i obalnog zida slapišta, što može dovesti do rušenja pregrade ili nekog njenog dela.

Ako je slapište kratko, ubrzo će doći do potkopavanja pojasa na kraju slapišta, njegovog rušenja zatim, rušenja pločnika slapišta i na kraju i pregrade. To se ranije dešavalo jer su rađena vrlo kratka slapišta, dužine  $2h_k$  (dve korisne visine pregrade). Takva opasnost je otklonjena kad je za proračun dužine slapišta usvojena formula Angerholzer-a, a još veća sigurnost se dobija ako se posle slapišta dno korita bujice obloži gabionima debljine 0,5 m i dužine 4,0. Doći će i tada do potkopavanja na kraju te risberme ali gabionska korpa je elastična, povija se štiti dalje od uzvodnog potkopavanja.

Najčešće se usvaja preliv trapezne forme. Preliv se dimenzioniše prema formuli Weissbach-a. Ovaj obrazac je uobičajen za tu vrstu proračuna koji jer je empirijski prilagođen uslovima bujičnih tokova:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot [(H + k)^{3/2} - k^{3/2}] \text{ [m}^3/\text{s]}$$

gde je:

$Q$  - propusna moć preliva u  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,

$b$  - širina preliva u m,

$g$  - gravitaciono ubrzanje  $g = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$H$  - visina prelivnog mlaza vode sa nanosom na rastojanju  $3h$  od ivice preliva,

$\mu$  - koeficijent prelivanja  $\mu = 0,6-0,7$ ; usvajamo  $\mu = 0,65$

$k$  - brzinska visina

$$k = \frac{V_0^2}{2 \cdot g}$$

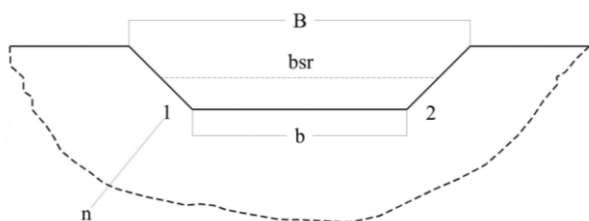
$V_0$  - dolazna brzina u  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$V_0 = \frac{Q}{A}$$

$A$  - površina na profilu pregrade, od vrha maksimalnog protoka na prelivu do nivoa terena, u  $\text{m}^2$

$$b' = \frac{Q}{2/3 \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot [(H + k)^{3/2} - k^{3/2}]}$$

Pri određivanju proticaja preko preliva sa bočnim suženjem, mora se srednja širina preliva povećati zbog bočnih kontrakcija.



Slika 6. Šematski prikaz trapeznog preliva

Prema obrascu Frensis-a računa se bočno suženje:  
 $b_{sr}$  - srednja širina preliva

$$b_{sr} = b' + 0,1 \cdot n \cdot \xi \cdot H_0$$

gde je:

$\xi$  - Krigerov koeficijent opticanja  $\xi = 1,0$

$n$  - broj suženja  $n = 2$

$H_0$  - ukupan pritisak vode na prelivu (m)

$$H_0 = H + k$$

$b$  - širina preliva (m),

$$b = b_{sr} - m \cdot H_0$$

gde je:

$m$  - nagib kosine preliva,

$B$  - gornja širina preliva (m)

$$B = b_{sr} + m \cdot H_0$$

Kod visokih pregrada i u većim bujičnim tokovima dolazi do potkopavanja stope temelja, čak i ako postoji fiksacioni pojas ili zub pregrade, U cilju sprečavanja

takvog potkopavanja, dno korita između pregrade i zuba pregrade se oblaže kamenom, betonom ili nekim drugim materijalom i ceo taj sistem (fiksacioni pojas, pločnik i obalni zid) zovu se slapište (podslaplje).

Postoji više formula za izračunavanje dužine slapišta, a u bujičarskoj praksi najčešće se koristi obrazac Angerholzer-a:

$$L = (V_0 + V') \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (h_k + 0,5 \cdot H)}{g}} + H + 1,0$$

$V_0$  - dolazna brzina vode (m/s),

$V'$  - brzina preliivanja (m/s):

$$V' = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$H$  - visina prelivnog mlaza vode (m),

$h_k$  - korisna visina pregrade (m).

Debljina pločnika slapišta:

$$d = 0,3 \cdot \sqrt{h_k + H_0} + 0,006 \cdot h_k^2 + 0,05 \cdot H \quad [m']$$

*Proračun pada zaplava uzvodno od pregrade*

Pad zaplava predstavlja u stvari pad gornje površine nanosa nataloženog uzvodno od pregrade ili drugih poprečnih objekata. Postoje mnoge empirijske formule za proračun pada zaplava, ali nijedna ne daje dobre rezultate. Zbog toga je prof. Biolčev iz Bugarske predložio da se pad zaplava računa tako što se u svakom regionu gde su već rađene pregrade, nađe zavisnost pada zaplava od pada korita pre izgradnje pregrada i da se na osnovu takve zavisnosti računa pad zaplava za buduće pregrade. Smatra se da je geološki i granulometrijski sastav nanosa u bujicama tog regiona sličan ili isti i tada je moguće primenjivati takve regionalne zavisnosti, jer one daju mnogo realnije rezultate. Katedra za bujice i eroziju je takva istraživanja vršila u više regiona Srbije i došlo se do regionalne zavisnosti za više regiona. Na primer bujični tokovi u regionima Grdelička klisura, Vranjska kotlina i sliv Nišave imaju vučeni nanos sličan po granulometrijskom sastavu. Za ove regione važi sledeća regionalna zavisnost za proračun pada zaplava:

$$J_z = 0,46877 \cdot J_t + 0,212 \quad [3,13]$$

$J_t$  - prirodni pad korita, u decimalnom obliku,

$J_z$  - pad zaplava, u decimalnom obliku.

Dužina zaplava određuje se po sledećoj formuli:

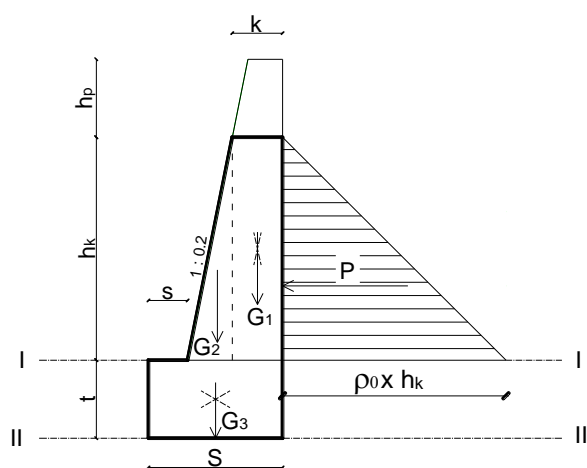
$$L = \frac{h_k}{J_t - J_z} \quad [m]$$

Ovaj proračun pada zaplava i njegove dužine služi da pravilno rasporedimo pregrade u bujičnom toku, kada se radi sistem pregrada. Tada se planira da svaka sledeća pregrada se gradi na kraju zaplava prethodne, tako da zaplav nizvodne pregrade štiti uzvodnu od potkopavanja.

### Statičko dimenzionisanje pregrada

Cilj statičkog dimenzionisanja pregrada je da se iznađu takve dimenzije koje će omogućiti da se objekat suprotstavi spoljnim silama koje deluju na njega, tj. da bude stabilan i da vrši svoju funkciju, ali u isto vreme te dimenzije treba za date uslove da predstavljaju i ekonomski najpovoljnije rešenje, imajući u vidu da se preliv pregrade dimenzioniše na maksimalni proticaj verovatnoće pojave  $p = 1\%$ .

Proračun statičke stabilnosti pregrade vrši se po metodi prof. dr Ljubiše Jevtića [13]. Oblik zida pregrade, sadržan je u uobičajenoj formi preseka, sa prednjom stranicom u nagibu 5:1 i vertikalnom zadnjom stranom zida (slika 7). Ova forma je više manje prilagođena liniji stvarnih pritisaka u zidu te kao takva zadovoljava uslove racionalnosti kod ovakve vrste objekata. Slobodni deo zida, kao temeljna stopa treba da budu izvedeni od kamena u cementnom malteru (KCM) ili od betona, srednje zapremine mase  $\rho_z = 2,4 \text{ t/m}^3$  ( $\rho_z = 23,54 \text{ kN/m}^3$ ).



Slika 7. Oblik zida pregrade sa prikazom dejstvujućih sila

$h_k$  - korisna (slobodna) visina zida pregrade (m)

$t$  - dubina temeljne stope pregrade (m)

$h_p$  - visina preliva u (m)

$\rho_z$  - srednja zapreminska masa zida pregrade ( $\text{t/m}^3$ ), (kreće se u intervalu od 2,4 do 2,5  $\text{t/m}^3$ , odnosno  $\rho_z = 23,54 \text{ kN/m}^3$ )

$\rho_v$  - srednja zapreminska masa bujične vode ( $\text{t/m}^3$ ), (kreće se u intervalu od 1,0 do 1,5  $\text{t/m}^3$ , odnosno najčešće,  $\rho_v = 10,79 \text{ kN/m}^3$ )

Za dati sistem sila, pri čemu je svesno isključen uticaj sila hidrostatičkog pritiska vode na temeljnu stopu, kao i sila uzgona gravitaciji, imamo sledeće veličine:

$P$  - sila hidrostatičkog pritiska bujične vode u  $\text{kN/m}$

$$P = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot h_k^2$$

$Y$  - krak sile (m)

$$Y = \frac{h_k}{3}$$

$K$  - debljina zida krune (m)

$$K = -0,5 \cdot h_k + \sqrt{0,25 \cdot h_k^2 - 0,033 \cdot h_k^2 + 4 \cdot \frac{P \cdot Y}{\rho_z \cdot h_k}}$$

$b$  - debljina zida u spojnici I-I (m)

$$b = K + 0,2 \cdot h_k$$

Kontrola napona u spojnici I-I:

Ukupna vertikalna sila  $V_1$  je:

$$V_1 = G_1 + G_2 \quad [kN/m]$$

$$G_1 = K \cdot h_k \cdot \rho_z \quad [kN/m]$$

$$G_2 = \frac{(b - k) \cdot h_k}{2} \cdot \rho_z \quad [kN/m]$$

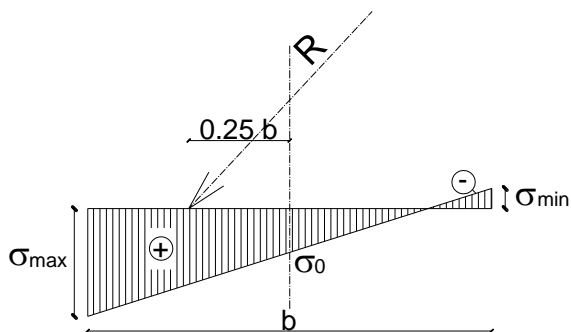
Naponi u osovini preseka I-I u  $\text{kN/m}^2$ :

$$\sigma_{0 \text{ I-I}} = \frac{V_1}{b} \cdot 1,0$$

$$\sigma_{\max \text{ I-I}} = 2,5 \cdot \sigma_{0 \text{ I-I}}$$

$$\sigma_{\min \text{ I-I}} = 0,5 \cdot \sigma_{0 \text{ I-I}}$$

Ovakav položaj rezultante u preseku I-I izaziva zatežuće sile, odnosno negativne napone veličine 20 % od maksimalnog ivičnog napona na pritisak, ali uvek manje od 29,43 N/cm<sup>2</sup>, što je dozvoljeno za betonske zidove i za zidove od kamena u cementnom malteru (slika 8).



Slika 8. Položaj rezultante sila spojnice I-I

Debljina zida u temeljnoj spojnici II-II:

Za utvrđeni položaj rezultante sila u ovom preseku, kao i ranije predstavljene uslove biće parametri koji definišu debljinu temeljne stope.

A, B i C su bezdimenzionalni koeficijenti.

$$A = \frac{2 \cdot h_k}{t} \cdot (K + b)$$

$$B = 2,259 \cdot \frac{b \cdot h_k}{t} \cdot (K + b)$$

$$C = 6,024 \cdot \frac{P}{\rho_z}$$

Na osnovu čega je:

S – debljina zida u temeljnoj spojnici:

$$S = -0,5 \cdot A + \sqrt{0,25 \cdot A^2 + B + C}$$

Kontrola napona u preseku II-II

Za dati položaj rezultante sila u ovom preseku, ukupnu vertikalnu silu (V<sub>2</sub>) određujemo po formuli:

$$V_2 = V_1 + G_3 = V_1 + S \cdot t \cdot \rho_z \quad [kN/m]$$

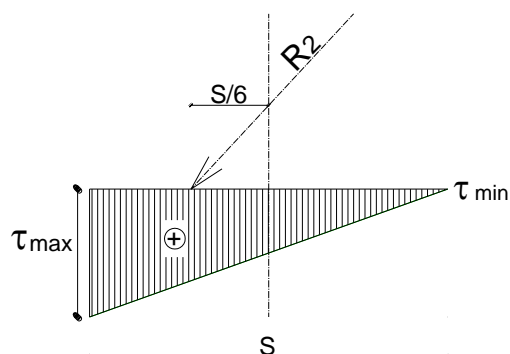
Napon u osovini preseka II-II u kN/m<sup>2</sup>:

$$\tau_0 = \frac{V_2}{S \cdot 1,0}$$

$$\sigma_{max} = 2 \cdot \tau_0$$

$$\sigma_{min} = 0$$

Maksimalni napon pritiska je u granicama dozvoljenih za dato zemljište, kada je  $\tau_{max} < \tau_{doz}$ .



Slika 9. Položaj rezultante sila spojnice II-II

Kontrola napona u preseku III-III:

$$s = S - b$$

Zbog velike širine ctope temelja (S) potrebno je proveriti stanje napona u preseku III-III prema prethodnoj dispoziciji.

Za napon pod temeljnom stopom je:

$$\sigma_{max I-I} = \tau_{max I-I}$$

$\sigma'$  napon u preseku III-III od mase stope u kN/m<sup>2</sup>:

$$\sigma' = \rho_z \cdot t$$

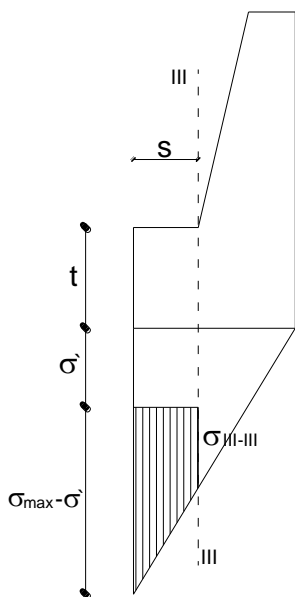
$\sigma_{III-III}$  - napon u preseku III-III u kN/m<sup>2</sup>:

$$\sigma_{III-III} = \tau_{max III-III} \cdot \frac{b}{S}$$

Na osnovu toga momenat savijanja u preseku III-III  $M_{III-III}$  (u kN/m<sup>2</sup>) je:

$$M_{III-III} = (\sigma_{III-III} - \sigma') \cdot \frac{s^2}{2} + [(\tau_{max} - \sigma') - (\sigma_{III-III} - \sigma')] \cdot \frac{s^2}{3}$$





Slika 10. Napon u preseku III-III

$W_{III-III}$  - otporni momenat preseka III-III u  $m^2$ :

$$W_{III-III} = \frac{t^2}{6}$$

napon u preseku III-III u  $kN/m^2$ :

$$\sigma_{min}^{max} III = \pm \frac{M_{III}}{W_{III}}$$

Kontrola zida na horizontalno pomeranje stope:

Za horizontalnu stopu, normalne i smičuće sile u preseku II-II su:

$$N_2 = V_2 \quad (kN/m)$$

$$T_2 = P \quad (N/m)$$

$K_s$  - koeficijent sigurnosti protiv klizanja bez pasivnog pritiska:

$$K_s = N_2 \cdot \frac{f}{T_2}$$

### Diskusija o statičkom dimenzionisanju pregrada

U bujičarskoj praksi Srbije do početka 70-tih godina XX veka postojala je velika šarolikost u pogledu primene metode za statičko dimenzionisanje pregrada [14]. Najčešće je korišćena neka od tri formule Thiery-a [7,15] ili neke od njihovih varijanti. Uglavnom se išlo sa takozvanom redukovanom šemom opterećenja, tj. pregrade su dimenzionisane uzimajući u obzir opterećenje samo hidrostatički pritisak na korisnu visinu

pregrade. Imajući u vidu da su pregrade samo kratko izložene na hidrostatički i hidrodinamički pritisak vode, dok se ne zapuni njihov akumulacioni prostor, a dalje se suprotstavljaju pritisku nanosa, neki autori su dimenzionisali pregrade na potisak zemlje. Naravno takvih je bilo malo.

Sedamdesetih godina XX veka prof. Jevtić je razvio svoju metodu, na osnovu dugih istraživanja u laboratoriji (za svoj magistarski rad o statici pregrada je laboratorijske analize vršio na Građevinskom fakultetu u Beogradu) i na terenu. Na kraju je dao finalnu verziju metode, koja je ovde prikazana, a po kojoj se radi u Srbiji od tada pa do današnjih dana.

Ova metoda kao silu opterećenja za pregradu uzima u obzir samo hidrostatički pritisak na korisnoj visini pregrade. Svesno su zanemarene ostale sile pa i sila uzgona. Do toga se došlo imajući u vidu iskustva u projektovanju i izgradnji pregrada u Evropi od 1848. godine (kada je počeo organizovan rad na uređenju bujičnih tokova u Francuskoj). Uvidelo se da uzgon nema dejstvo na pregrade, jer da ga ima većina ili sve izgrađene pregrade bi se srušile, kod prvog nailaska poplavnog talasa u bujičnom toku.

U našoj praksi bilo je mnogo slučajeva gde i posle prolaska velikog poplavnog talasa preko pregrade dimenzionisane na prikazani način, ona se nije srušila. Jedan takav primer je detaljno istražen i prikazan u radu objavljenom u „Glasniku Šumarskog fakulteta“ br. 74, [16].

Krajem 1987. godine, prema projektu urađenom na Katedri za bujice i eroziju Šumarskog fakulteta u Beogradu, završena je izgradnja pregrade br.1 od betona u Prisjanskoj reci kod Pirota, sa korisnom visinom  $h_k = 3,0$  m. Krajem juna 26.06.1988. godine u poznatim poplavama na jugoistoku Srbije bio je zahvaćen i sliv Prisjanske reke i bila su poplavljena sela Rasnica, Barja Čiflik i deo Pirota. Na osnovu tragova velikih voda rekonstruisan je maksimalni proticaj koji je prošao Prisjanskom rekom. Zabeležen je proticaj  $Q_{max} = 48,61 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , verovatnoće pojave  $p = 1,1 \%$  (jednom u 91. godini). [17]

Posle prolaska poplavnog talasa na terenu je konstatovano da izgrađena pregrada br.1 stoji neoštećena, akumulacioni prostor pregrade potpuno ispunjen nanosom. Nizvodno od slapišta i fiksacionog pojasa formirao se vir dužine 8,0 m i maksimalne dubine 1,2 m kod fiksacionog pojasa. Vir se formirao jer investitor nije uradio, nizvodno od slapišta, risbermu od gabiona koja je bila predviđena projektom.

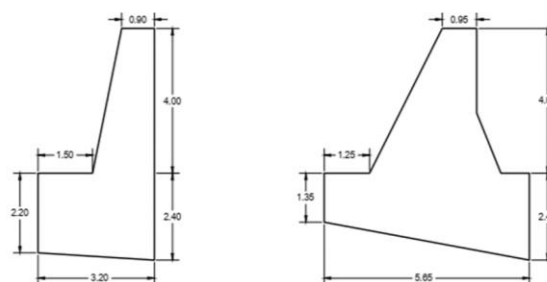
Izvršena je teorijska statistička analiza za slučaj primene potpunog opterećenja pregrade za vreme poplavnog talasa: hidrostatički pritisak na ukupnu visinu pregrade i sila uzgona. Pregrada je trebalo da bude srušena sa dimenzijama sa kojima je izgrađena jer je projektom dimenzionisana po metodi Lj. Jevtića. Uoči nailaska poplavnog talasa Prisjanske reke, pregrada je bila sa praznim akumulacionim prostorom jer posle izgradnje nije bio nijedan poplavni talas do 26. juna 1988. godine i primila je udar talasa u trenutku kad je najranjivija. (Kritičan trenutak za bujičarske pregrade je odmah posle izgradnje dok njen akumulacioni prostor nije napunjen vučenim nanosom) Ipak pregrada se nije srušila, niti je bila oštećena.

Objašnjenje ove nedoumice oko sile uzgona i ostalih sila koje se zanemaruju kod metode Lj. Jevtića, moglo bi da se potraži u sledećim činjenicama:

- Bujičarske pregrade se grade sa velikim brojem barbakana (otvora za proceđivanje) na telu pregrade. Obično u donjem redu budu 3 barbakane dimenzija 40X60 ili 50X70 cm i 5 barbakana u gornjem redu dimenzija 20X30 cm. To važi u slučaju pregrade od 3,0 m korisne visine, a kad su pregrade 5,0 ili 6,0 m može biti i tri reda barbakana. Kad su široki profili na mestu izgradnje pregrade, u redu može biti i više barbakana. Kroz ove barbakane prolazi voda ali ne i vučeni nanos. Naime, uzvodno od pregrade prilikom izgradnje formira se moćan nabačaj od kamena koji pri vrhu pregrade ima debljinu oko 0,5 m a u dnu korita toka debljina je  $0,95h_k$ . Zadatak ovog kamenog nabačaja je da primi prvi udar poplavnog talasa neposredno po izgradnji pregrade, a takođe da brže drenira vodu iz zaplavlja pregrade i evakuise je kroz barbakane, čime smanjuje hidrostatički pritisak vode. Sa barbakanama, pregrada deluje kao rešetka i obara nivo vode na prelivu čime smanjuje hidrostatički pritisak vode.
- Sporno je aktiviranje sile uzgona. Trajanje poplavnog talasa je u bujičnim tokovima vrlo kratko (par sati češće i manje). Temeljenje objekata se vrši na rečnom nanosu koji je vodom donošen i zbijan, usled čega i prisustva glinovitih materijala u sebi ima veliku gustinu i malu infiltracionu moć. Izgradnjom pregrade noseće tlo se dodatno sabija masom pregrade čime se povećava zbijenost materijala ispod temelja objekta. U takvim uslovima male su mogućnosti za brzo proviranje mutne vode (uz to i relativno malog hidrostatičkog pritiska), pod temeljom objekta i po tom osnovu uspostavljanja sile uzgona. Može se smatrati da kod bujičarskih

pregrada nema vremena da se uspostavi uzgon za to kratko vreme trajanja poplavnog talasa. Kod visokih brana za akumulaciju vode, voda je stalno prisutna i u nekom trenutku dođe do uspostavljanja sile uzgona i ona za te objekte mora da se uzme u obzir.

Imajući sve to u vidu, a i racionalne dimenzije koje se dobijaju po metodi Lj. Jevtića, treba nju primenjivati kod projektovanja pregrada za uređenje bujičnih tokova.



Slika 11. Poprečni presek pregrade korisne visine 4,0 m dimenzionisane po metodi prof. Lj. Jevtića (na slici levo, površina preseka  $12,55 \text{ m}^2$ ) i pregrada iste visine dimenzionisana uz primenu potpune šeme opterećenja (na slici desno, površina preseka  $18,95 \text{ m}^2$ )

Na slici 11 vidi se da bi pregrada dimenzionirana po metodi prof. Jevtića bila znatno jeftinija, a to je vrlo važno jer u Srbiji ima potrebe za izgradnjom više hiljada pregrada.

## ZAKLJUČAK

Poprečni objekti a pre svega pregrade zajedno sa pošumljavanjem goleti predstavljaju kičmu protiverozionog sistema u slivu u cilju kontrole erozionih i bujičnih procesa.

Poprečni objekti kontrolišu eroziju u hidrografskoj mreži bujičnih tokova stvarajući niz lokalnih erozionih bazisa, smanjuju pad korita toka i time smanjuju njegovu transportnu sposobnost za pronos nanosa, zadržavaju vučeni nanos i smanjuju mogućnost zasipanja vodoprivrednih objekata, oranica, naselja i dr.

Kod projektovanja i izgradnji pregrada treba voditi računa o njihovoj stabilnosti, ali i njihovoj ekonomičnosti.

Za hidrauličko dimenzionisanje pregrada treba koristiti u praksi dokazane formule Wissbach-a, Angerholzer-a i Frensis-a.

Kod statičkog dimenzionisanja pregrada ne treba uzimati u obzir potpunu šemu opterećenja (hidrostatički pritisak na ukupnu visinu pregrade i silu uzgona). Kod izuzetnih slučajeva kao: vrlo važni objekti koji se njome štite, dugo zadržavanje vode u akumulacionom prostoru pregrade, velika infiltraciona moć podloge, treba kao opterećenje pregrade usvojiti hidrostatički pritisak na korisnoj visini plus visina prelivnog mlaza.

Za statičko dimenzionisanje pregrada treba koristiti metodu Lj. Jevtića, koja se dokazala u praktičnoj primeni poslednjih 40 godina. Metoda daje racionalne dimenzije koje u isto vreme obezbeđuju stabilnost objekta.

#### LITERATURA

- [1] Kostadinov, S., and Dragović, N., (2010): Check Dams in the Torrent Control Practice in Small Mountainous Catchments, In monograph "Check Dams, Morphological Adjustments and Erosion Control in Torrential Streams"; © 2010 Nova Science Publishers, Inc. Editors: C.C.Garcia and M.A.Lenzi, ISBN 978-1-60876-146-3, p.p.63-88.
- [2] Heede, B. H., (1967): Gully development and control in the Rocky Mountains of Colorado. PhD dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colo.
- [3] Kostadinov S., (1993): Possibility of Assessment of the Slope of Siltation Based on the Some Hydraulic Characteristics of the Torrential Flows. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 45, 5, 28-33.
- [4] Porto P., Gessler J. (1999): Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams. Field study. *Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, 12, 1231-1242.
- [5] Boix-Fayos C., Barberá G. G., López-Bermúdez F., Castillo V. M., (2007): Effects of check-dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: Case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology* 91, 103-123.
- [6] Romero-Diaz A., Alonso-Sarria F., Martínez-Lloris M. (2007): Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena* 71, 172-178.
- [7] Gavrilović, S., (1972): Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, Časopis izgradnja, specijalno izdanje Beograd.
- [8] Kostadinov, S., Tošić, R., Hrkalo, D., Nikolić, S., Sudar, N., Kapović-Solomun, M., Dragičević, S., Momirović, N., Cupać, R., Bosankić, G., Bundalo, S., (2019): Kontrola erozije zemljišta u funkciji smanjenja rizika od poplava u slivu reke Vrbas, Republika Srpska; Časopis "Vodoprivreda" br. 300-302, 2019, 4-6, str.211-224.
- [9] Kostadinov, S., (1996): Torrent Control Works, Past Experiences and Contemporary Trend of Further Development. Invited paper: First European Conference on Erosion Control, Barcelona - Lecture Book, Vol. I, p.p. 67-81.
- [10] Kostadinov, S., (1995): Analysis of the Effects of Classical and Filtration Check Dams in the Torrents of Serbia. Proceedings of Conference XXVI of International Erosion Control Association, Atlanta, Georgia, USA, February 28<sup>th</sup> - March 3<sup>th</sup> 1995. p.p. 111-124.
- [11] Kostadinov, S., Marković, S., Dragović, N., (1995): Erosion Control Works and Their Effects on the State of Erosion and Sediment Transport in the Kalimanska Reka Watershed. Proceedings of Third International Symposium on Headwater Control: "Sustainable Reconstruction of Highland and Headwater Region" Editors: R. B. Singh and Martin J. Haigh; Oxford and IBH publishing Co. PVT. Ltd, New Delhi, Calcuta, p.p 477-486.
- [12] Kostadinov, S., Dragović, N., Zlatić, M., Todosijević, M., (2008): Uticaj protiverozionih radova u slivu reke Toplice uzvodno od brane „Selova“ na intenzitet erozije zemljišta, Časopis „Vodoprivreda“, 40 (2008), 231-243, str.115-126.
- [13] Kostadinov, S., (2008): Bujični tokovi I erozija; Šumarski fakultet, Beograd, str.1-505.
- [14] Kostadinov, S., (2009): Traditional Uses of Check Dams Along History: From Classical to Functional Check Dams, Proceedings of International Conference „Land Conservation - LANDCON, Global Change Challenges for Soil management“, May 26-30, 2009, Tara mountain, Serbia, Abstract Book,
- [15] Thiery, E., Restauration des terennes en montagne, Paris (1911)
- [16] Jevtić, Lj., Kostadinov, S., (1992): Analiza stabilnosti ravne bujičarske pregrade u uslovima trajanja poplavnog talasa; Glasnik Šumarskog fakulteta, Beograd, br.74/1992, str.669- 677.
- [17] Kostadinov, S., (1990): Analiza poplavnog talasa Prisjanske reke kod Pirota na dan 26.6.1988. godine; „Šumarski list“, broj 3-5/90, Zagreb.

## TRANSVERSE STRUCTURES FOR ARRANGEMENT OF TORRENT CHANNELS

by

Stanimir KOSTADINOV  
University of Belgrade, Faculty of Forestry  
Natalija MOMIROVIĆ, Tomislav STEFANOVIĆ, Suzana MITROVIĆ  
Institute of Forestry, Belgrade

## Summary

Transverse structures (check dams, sills and submerged sills) as a method of arranging torrents have been known since ancient times, during ancient civilizations, which is confirmed by archaeological excavations. Transverse structures, primarily check dams, together with the afforestation of bare lands in the basin, represent the backbone of the anti-erosion system for soil erosion control and torrential floods protection. The role of transverse structures is multiple: they prevent deep erosion in the riverbed, reduce the longitudinal slope of the riverbed and thus reduce the transport capacity of the stream, retain bedload, correct the flow direction, stabilize unstable slopes upstream, etc.

The check dams are the most important of all transverse structures. They are divided according to different criteria: according to the shape, the purpose, the way of resisting the influence of external forces, according to the type of material from which they are built, according to the specifics of construction, etc. In the torrential practice of Serbia, the flat, gravity check dams are most often built of concrete compared to previous years when they were built of stone masonry. Arch check dams were rarely built.

The classical European system was the most widely used system for the regulation of torrents of the well-known systems in Serbia and the check dams from Professor Rosić's system are the second mostly used system.

The check dams are built in the upper and middle streams of torrents and several check dams, most often in the system one after the other, so that the siltation of the downstream check dam protects the upstream from scour below a structure due to water overtopping. If

individual check dams are built, they are made with an apron and a submerged sill at the end of the apron. After the apron, a paved streambed is built from gabions or large pieces of dry stone in the length of 4.0 m for greater safety. The apron provides a check dam from scour below a structure due to water overtopping.

Spillways of check dams (and other transverse structures) are dimensioned to a maximum flow, with probability of occurrence of 1%, according to the Weissbach formula, and the length of the apron is dimensioned according to the Angerholzer formula. Many different methods have been applied regarding the static stability of check dams. The Thiery method was applied until the beginning of the 70s of the XX century, and after that, the method of prof. Jevtić was applied in the Republic of Serbia.

According to the method of prof. Jevtić, the static dimensions of the check dams are determined on the basis of the hydrostatic water pressure which acts at the effective height of the check dam. This method provides the necessary stability of the check dam, and at the same time gives more rational dimensions, and thus more economically acceptable, than other methods.

The paper analyzes, among other things, the conditions that allow the theoretical total load scheme and total forces that theoretically act on the object not to be taken into account when dimensioning the check dams for the regulation of torrents. The total load scheme and forces acting must be taken certainly into account in the case of high dams.

Key words: check dams, torrents, hydraulic dimensions, static stability.

Redigovano 3.11.2021.