

СТАТИЧКО ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ПРЕГРАДА ЗА УРЕЂЕЊЕ БУЈИЧНИХ ТОКОВА

Станимир Костадинов¹, Наталија Момировић², Томислав Стефановић³,

¹Редовни професор Универзитета у Београду, у пензији

²Маст. инж. шум., истраживач сарадник, Институт за шумарство, Београд

³Научни сарадник, Институт за шумарство, Београд

Извод: Уређење корита бујичних токова се врши изградњом попречних објеката, најчешће преграда, са циљем да се спречи дубинска ерозија и задржи вучени нанос. Организован рад, базиран на стручним и научним принципима на уређењу бујичних токова започео је средином XIX века у Француској док је у Србији започео 1907. године.

Током рада се постављало питање статичког димензионисања преграда имајући дилему у погледу који систем применити:

1. Узимајући у обзир тоталну шему оптерећења, као код високих брана или
2. Узимајући у обзир редуковану шему оптерећења, којом се добијају рационалније димензије.

Усвојено је да се примењује други принцип где се од многобројних формула највише користиле формуле Tіery-а. Формулом Tіery 1 добијале су се врло велике димензије, затим се прешло на Tіery 2, и на крају Tіery 3 формула, која даје најрационалније димензије од њих три. Ове формуле су се најчешће примењивале у Србији до средине 70-тих година прошлог века.

На основу вишегодишњих истраживања проф. Љ. Јевтић, средином 70-тих година прошлог века, предложио је своју методу за статичко димензионисање преграда, која даје најрационалније димензије, али уједно и највећи степен сигурности и отпорност на деловање спољних сила. Кроз истраживања на Катедри за бујице и ерозију доказано је да за димензионисање преграда нема потреба да се узима тотална шема оптерећења, већ је довољно статички димензионисати преграде узимајући у обзир редуковану шему оптерећења.

У раду је извршено поређење методе Љ. Јевтића са методом Tіery 3, у погледу оптималних димензија преграде.

Кључне речи: уређење бујица, преграде, статичко димензионисање, хидростатички притисак

THE STATIC ANALYSIS OF CHECK DAMS FOR TORRENT CONTROL

Abstract: The arrangement of the bed of torrents is done by building transverse structures, most often check dams, with the aim of preventing channel degradation and retaining the bedload. A systematic approach, based on professional and scientific principles on the torrents control, began in the middle of the 19th century in France while it had began in 1907 in Serbia.

The main dilemma regarding the static analysis was which system to apply:

1. Taking into account the total scheme of load, as with high dams or
2. Taking into account the reduced scheme of load, which gave more rational dimensions.

It was adopted to apply the second principle, where beside of the many equations Tiery equations were used the most. The Tiery 1 equations gave very large dimensions, later Tiery 2 were used, and Tiery 3 equations, which gave the most rational dimensions of all the three were finally used. These equations were the most often used until the mid-1970s in Serbia.

Based on long term research of prof. LJ. Jevitc in the mid-1970s, he proposed his method for static analysis of check dams, which gave the most rational dimensions, but also the highest degree of security and resistance to external forces. Based on research at the Chair of Torrents and Erosion, it has been proven that there is no need to take a total scheme of load for dimensioning check dams, the reduced scheme of load is adequate for the static analysis.

The paper compares the method of Lj. Jevtić with the Tiery 3 method, in terms of optimal design of check dam.

Keywords: torrent control, check dams, static analysis, hydrostatic pressure.

1. УВОД

Главни циљ код уређења корита бујичних токова је превенција дубинске ерозије изградњом различитих типова попречних објеката (преграда) дуж тока (дуж деонице која се уређује. На тај начин, корито тока, које је најчешће са великим падом, преградама трансформишемо у степенасто корито са блажим падом. У таквом кориту смањују се брзина течења воде а самим тим се смањују разорна моћ и транспортна способност тока за пронос наноса. (Kostadinov, 1996).

Попречни објекти се углавном разликују по висини (Гавриловић, 1972; Костадинов, 2008).

- а) консолидациони појасеви**, без корисне висине, који се постављају у нивоу дна корита и имају улогу његове стабилизације или стабилизације одређене деонице уздужног профила;
- б) прагови**, са корисном висином до 2,0 m, који се постављају ради фиксирања попречног профила корита или деонице тока у уздужном смислу и као објекти неке друге или посебне намене;
- в) преграде**, са корисном висином изнад 2,0 m, који задржавају нанос и стабилизују корито и долине стране (обале).

Корисна дејства и улога попречних објеката, пре свега прагова и преграда се огледају у следећем (Костадинов, 2008):

- осигуравају попречне профиле корита бујичног тока од даљег дејства процеса дубинске ерозије, што је и најзначајнија улога консолидационих појасева;
- задржавају вучени нанос у заплаву, што се и најпре уочава и траје до потпуног засипања преграде или прага (запуњење акумулационог простора преграде или прага наносом), при чему се доприноси консолидацији нестабилних падина узводно од преграде;
- попречни објекти представљају препреку даљем снижавању дна корита, услед постојања низа стабилних тачака које формирају нови (вештачки) ерозиони базис у бујичном кориту;
- услед смањења уздужног пада корита бујичног тока смањује се брзина кретања поплавних бујичних вода чиме се смањује потискујућа сила (вучна сила) воде и крупнији комади стена не могу бити ношени, већ заостају и служе за заштиту и консолидацију корита;
- попречни објекти коригују правац тока воде усмеравајући је увек у средину корита, што се постиже постављањем прелива (уста) попречних објеката на одређено место;
- преграде и прагови имају улогу регулатора у транспорту наноса јер задржавају велику количину крупног материјала у време бујичних поплава, док ситнији материјал бива однесен од малих и средњих вода у облику суспендованог наноса.

Уређење бујичних токова и бујичних сливова у суштини представља комплекс радова на падинама слива и кориту бујичних токова чиме се реализује и одбрана од бујичних поплава. Организован и на научним основама базиран рад на уређењу бујичних токова

и бујичних сливова започео је средином XIX века у Француској, и касније се проширио у Европи. У зависности од локалних услова, настали различити системи уређења бујичних токова: класични Европски систем, Француски систем, Немачки систем и касније новији системи: Италијански систем, Совјетски систем (у СССР-у), систем интегралних мелиорација (САД), систем проф. Росића (у СФРЈ, Србији) итд. (Гавриловић, 1972; Костадинов, Драговић, 2010).

Преграде и остали попречни објекти у бујичним токовима на почетку су рађени од камена у суво и камена у цементном малтеру (КЦМ), касније са развојем технологија и нових материјала раде се од бетона, габиона, разних типова јаких мрежа итд.

Организован рад на уређењу бујичних токова у Србији започео је 1907. године у бујицама Грделичке клисуре у циљу заштите пута и железничке пруге кроз клисуру. Током времена до данашњих дана радило се на уређењу бујичних токова различитим интензитетом у зависности од друштвених прилика, пре свега од финансија намењених за те послове.

Од почетка рада на изградњи преграда и осталих попречних објеката за уређење бујичних токова било је разних недоумица око њиховог статичког димензионисања. Проблем је у томе што су преграде одмах после изградње, док њихов акумулациони простор није запуњен наносом, изложене хидродинамичком и хидростатичком притиску воде, а касније када се тај простор испуни наносом неки су сматрали да трпе само притисак (потисак) земље (наноса), што је мање оптерећење.

У овом раду ће се разматрати статичко димензионисање преграда.

2. СТАТИЧКО ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ПРЕГРАДА

Циљ статичког димензионисања преграда је да се нађу такве димензије које ће омогућити да се објекат супротстави спољним силама које делују на њега, тј. да буде стабилан и да врши своју функцију, али у исто време те димензије треба за дате услове да представљају и економски најповољније решење, имајући у виду да се прелив преграде димензионише на максимални протицај вероватноће појаве $p = 1\%$. (Костадинов и сар., 2021).

Још од почетка рада на пројектовању и изградњи преграда, јавила се дилема око статичког димензионисања преграда око тога какву шему оптерећења треба усвојити. Наиме проблем је у томе што су преграде одмах после изградње, када је њихов акумулациони простор празан, изложене дејству хидродинамичког и хидростатичког притиска. Многи експерти су заступали мишљење да треба димензионисати преграде на хидростатички притисак.

Након изградње преграде долази до задржавања (таложења) вученог наноса у акумулационом простору преграда и он се потпуно попуњава. Некада у великим бујичним поплавним таласима долази до попуњавања акумулационог простора преграда у току само тог једног таласа. Исталожени нанос називамо заплав.

Друга фаза у „животу“ преграде настаје после попуњавању акумулационог простора. Тада је главни фактор оптерећења исталожени нанос, односно преграда трпи тзв. „потисак земље“, који је знатно мањи од хидростатичког притиска. Неки експерти су заступали став да преграде треба димензионисати на потисак земље, као потпорне зидове.

Код решавања ове дилеме већина стручњака су пошли од исправног става да је преграда најугроженија кад је акумулациони простор празан и да је треба димензионисати узимајући у обзир хидростатички притисак и тај став је важећи.

Друга дилема око статичког димензионисања још постоји код неких стручњака, пре свега код људи који се не баве конкретно бујичним токовима и њиховом уређењу. Наиме, они сматрају да преграде треба димензионисати узимајући у обзир тоталну шему оптерећења објекта, као што се ради код димензионисања високих брана.

Стручњаци за бујичне токове, пре свега у Европи, су дошли до закључка да у интересу рационалности изградње преграда није неопходно да се примењује тотална шема оптерећења, већ је довољно, примењивати редуковану шему оптерећења, тј. узимати у обзир само хидростатички притисак, док остале силе, пре свега узгон, није потребно узимати у обзир. Скоро 200 година рада у изградњи преграда у свету и у Србији показале су да је овакав приступ исправан.

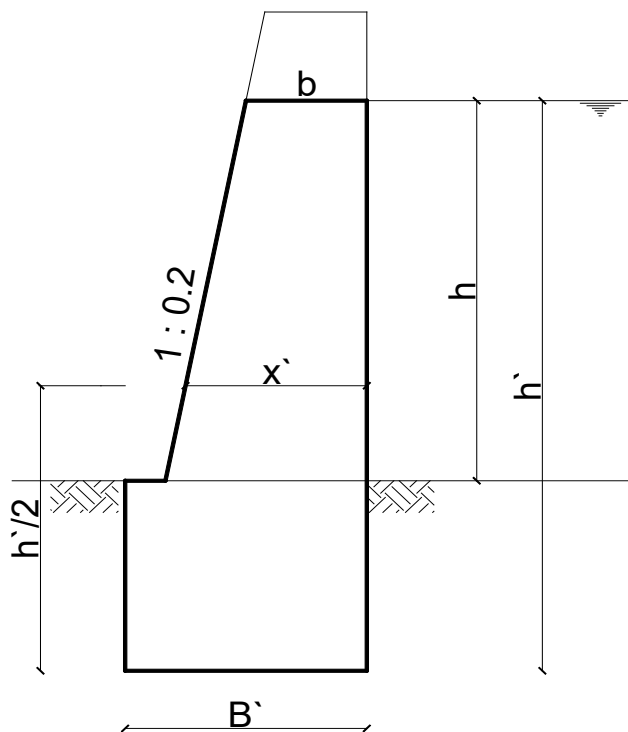
Током рада су разни аутори предложили пуно метода за димензионисање преграда почевши од метода које је предлагао Thierry у другој половини XIX века. Он је предложио 3 формуле унапређујући њихову рационалност. Постепено је његова формула бр. 3 ушла у праксу уређења бујица и у Србији је примењивана негде до почетка 70-тих година XX века. Тада се интензивно бавио статиком преграда проф. Љубиша Јевтић и средином 70-тих година XX века предложио своју методу статичког димензионисања преграда базирану на хидростатичком притиску воде на корисну висину преграде и на карактеристичну стопу преграде. Овако димензионисана преграда задовољава све услове стабилности: на превртање, на клизање и на лом материјала, према њој се добијају најрационалније (најекономичније) димензије.



Слика 1. Преграда од КЦМ у бујичном току Качаруша

2.1. Димензионисање преграда по методи Thiery III

Диспозиција објекта:



Слика 2. Облик зида код методе Thiery III

Теоријске поставке:

$$X' = \frac{b + B'}{2}$$

$$b = X' - n \cdot h'/2$$

$$B' = X' + n \cdot h'/2$$

$$m = \frac{\bar{\omega}}{\omega};$$

Где је:

$\bar{\omega}$ – запреминска тежина бујичне воде у t/m^3

ω – запреминска тежина зида у t/m^3

$$C = \frac{h}{h'}$$

$$i = m(3C^2 - 2C^3).$$

Коефицијент притиска

$$A = 3 - \frac{4 \cdot h' \cdot \omega (1 + n^2)}{N};$$

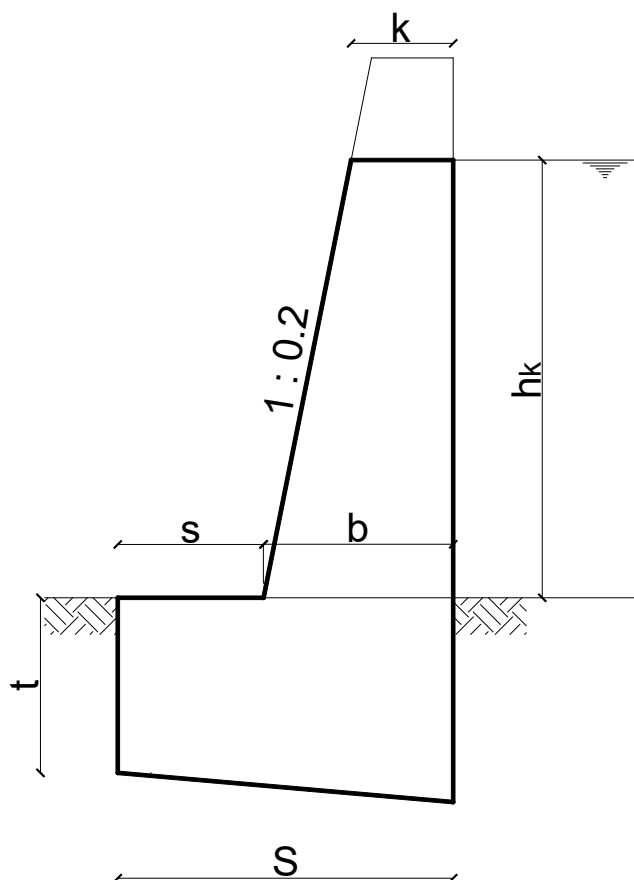
Где је:

$N = \sigma$ дозвољени напон на притисак тла у темељној стопи у t/m^2 .

$$\frac{X'}{h'} = \frac{-3n + \sqrt{9n^2 + 4A(i + n^2/4)}}{2A}.$$

2.2. Димензионисање преграда по методи проф. др Љубише Јевтића

Диспозиција објекта:

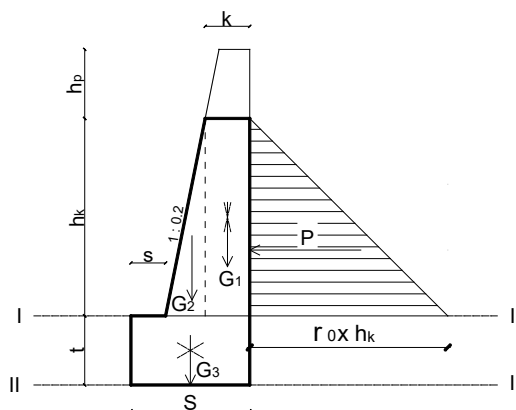


Слика 3. Облик зида код методе проф. Љ. Јевтића

Теоријске поставке:

Облик зида преграде, садржан је у уобичајеној форми пресека, са предњом страницом у нагибу 5:1 и вертикалном задњом страном зида (слика 3). Ова форма је више мање прилагођена линији стварних притисака у зиду те као таква задовољава услове рационалности код овакве врсте објекта. Слободни део зида, као и темељна стопа треба

да буду изведени од камена у цементном малтеру (КЦМ) или од бетона, средње запреминске масе $\rho_z = 2,4 \text{ t/m}^3$ ($\rho_z = 23,54 \text{ kN/m}^3$).



Слика 4. Облик зида преграде са приказом дејствујућих сила

h_k - корисна (слободна) висина зида преграде (m)

t - дубина темељне стопе преграде (m)

h_p - висина прелива у (m)

ρ_z - средња запреминска маса зида преграде (t/m^3), (креће се у интервалу од 2,4 до 2,5 t/m^3 , односно $\rho_z = 23,54 \text{ kN/m}^3$)

ρ_v - средња запреминска маса бујичне воде (t/m^3), (креће се у интервалу од 1,0 до 1,5 t/m^3 , односно најчешће, $\rho_v = 10,79 \text{ kN/m}^3$)

За дати систем сила, при чему је свесно искључен утицај сила хидростатичког притиска воде на темељну стопу, као и сила узгона гравитацији, имамо следеће величине:

P - сила хидростатичког притиска бујичне воде у kN/m

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

Y - крак силе (m)

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

K - дебљина зида круне (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 - дебљина зида у спојници I-I (m)

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

$$\left\{ \begin{array}{c} 52 \end{array} \right\}$$

Контрола напона у спојници I-I:

Укупна вертикална сила V_1 је:

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

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

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

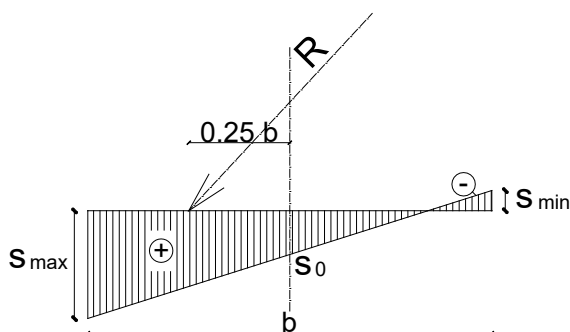
Напони у осовини пресека I-I у kN/m^2 :

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

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

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

Овакав положај резултанте у пресеку I-I изазива затежуће силе, односно негативне напоне величине 20% од максималног ивичног напона на притисак, али увек мање од $29,43\ N/cm^2$, што је дозвољено за бетонске зидове и за зидове од камена у цементном малтеру (слика 3).



Слика 5. Положај резултанте сила спојница I-I

Дебљина зида у темељној спојници II-II:

За утврђени положај резултанте сила у овом пресеку, као и раније представљене услове биће параметри који дефинишу дебљину темељне стопе.

A, B и C су бездимензионални коефицијенти.

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

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

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

На основу чега је:

S – дебљина зида у темељној спојници:

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

Контрола напона у пресеку II-II

За дати положај резултанте сила у овом пресеку, укупну вертикалну силу (V_2) одређујемо по формули:

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

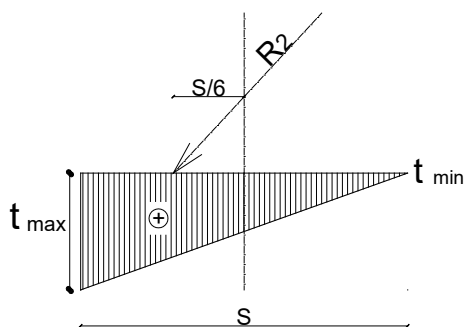
Напон у осовини пресека II-II у kN/m^2 :

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

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

$$\sigma_{min} = 0$$

Максимални напон притиска је у границама дозвољених за дато земљиште, када је $\tau_{max} < \tau_{doz}$.



Слика 6. Положај резултанте сила спојница II-II

Контрола напона у пресеку III-III:

$$s = S - b$$

Због велике ширине стопе темеља (S) потребно је проверити стање напона у пресеку III-III према претходној диспозицији.

За напон под темељном стопом је:

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

σ' напон у пресеку III-III од масе стопе у kN/m^2 :

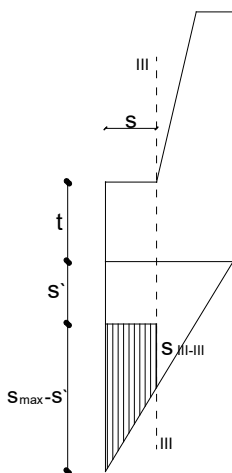
$$\sigma' = \rho_z \cdot t$$

$\sigma_{III-III}$ - напон у пресеку III-III у kN/m^2 :

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

На основу тога моменат савијања у пресеку III-III $M_{III-III}$ (у kN/m^2) је:

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



Слика 7. Напон у пресеку III-III

$W_{III-III}$ - отпорни моменат пресека III-III у m^2 :

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

напон у пресеку III-III у kN/m^2 :

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

Контрола зида на хоризонтално померање стопе:

За хоризонталну стопу, нормалне и смичуће силе у пресеку II-II су:

$$N_2 = V_2 \text{ (kN/m)}$$

$$T_2 = P \quad (\text{N/m})$$

K_s - коефицијент сигурности против клизања без пасивног притиска:

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

3. ДИСКУСИЈА

Поређењем површине попречног пресека преграде за корисну висину од 3,0m видимо да је код преграде димензионисане по Тиерију 3, $P = 6,3 \text{ m}^2$, док је код преграде димензионисане по методи Јевтића $P = 5,99 \text{ m}^2$. Још је већа разлика ако се посматра површина пресека преграде изнад терена (без стопе темеља). Тада је по Тиерију 3 површина пресека $3,6 \text{ m}^2$ а пресек по Јевтићу $3,0 \text{ m}^2$. Можда изгледа да је то мала разлика, али ако се узме да је на пример просечна ширина профила за изградњу преграда, од 30,0 m па навише, то помножено са површином пресека даје значајну количину зида од камена у цементном малтеру или од бетона.

С друге стране конструкција пресека са широм темељном стопом код методе Јевтића обезбеђује прегради значајно већу стабилност. Такође преграда са широм стопом може да се гради и на подлози која има релативно малу носивост на специфични притисак по cm^2 , јер се укупна маса преграде распоређује на већу површину, него што је случај код преграда са ужом стопом (код методе Тиерија 3).

Треба додати да је последњих 40 година било случајева наиласка бујичних поплавних таласа вероватноће појаве око 1% (Јевтић и Костадинов, 1992) или ређе, на управо изграђене преграде димензионисане по методи Јевтића и преграда није претрпела никаква оштећења.

Све показује да за статичко димензионисање бујичарских преграда треба увек примењивати методу проф. Јевтића.

4. ЗАКЉУЧАК

Преграде су главни објекти за уређење корита бујичних токова са улогом: да штите корито од дубинске ерозије стварајући локалне ерозионе базисе и задржавајући вучени нанос. На тај начин смањују пад корита бујичних токова чиме смањују разарајућу и транспортну способност тока.

Током скоро двеста година изградње преграда у бујичним токовима рашчишћене су дилеме око њиховог статичког димензионисања:

- Преграде треба димензионисати на хидростатички притисак воде,
- Код статичког димензионисања преграда не треба узимати у обзир тоталну шему оптерећења (хидростатички притисак на укупну висину преграде и силу узгона). Код изузетних случајева као што су: врло важни објекти који се преградом штите, дуго задржавање воде у акумулационом простору преграде, велика инфилтрациона моћ подлоге, треба као оптерећење преграде усвојити хидростатички притисак на корисној висини плус висина преливног млаза.
- За статичко димензионисање преграда треба користити методу Љ. Јевтића, која се доказала у практичној примени последњих 40 година. Метода даје оптималне димензије које у исто време обезбеђују стабилност објекта.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Јевтић, Љ., (1978): Инжењерски приручник за решавање проблема из области бујичних токова, Издавачки центар студената, Београд.
2. Јевтић, Љ., Костадинов, С., (1992): Анализа стабилности равне бујичарске преграде у условима трајања поплавног таласа; Гласник Шумарског факултета, Београд, бр.74/1992, стр.669- 677.
3. Гавриловић, С., (1972): Инжењеринг о бујичним токовима и ерозији; Часопис „Изградња“, посебно издање. Београд
4. Костадинов, С., (2008): Бујични токови и ерозија; Шумарски факултет, Београд
5. Kostadinov, S., (1996.): Check Dams in the Torrent Control Practice in Serbia: Former and Present Experiences and Future Perspectives. *Proceedings of IECA Conference XXVII: Erosion Control Technology Bringing It Home*. Feb. 27-March 1, 1996; Seattle Washington, USA, 507-522.
6. Kostadinov, S., 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.
7. Kostadinov, S., Momirović, N., Stefanović, T., Mitrović, S., (2021): *Poprečni objekti za uređenje korita bujičnih tokova*, Vodoprivreda 0350-0519, Srpsko društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje, vol. 53 (2021), No. 311-312, p. 87-98, UDK: 627.141.2