

ХИДРАУЛИЧКИ ПРОРАЧУН УМИРУЈУЋЕГ БАЗЕНА НЕПРИЗМАТИЧНОГ СТЕПЕНАСТОГ БРЗОТОКА

Роберт Љубичић¹

Будо Зиндовић²

Бојан Миловановић³

Радомир Капор⁴

Љубодраг Савић⁵

UDK: 627.132 : 532.51

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.069

Резиме: Циљ рада је да се на основу закона механике флуида, постојећих резултата моделских испитивања и постојећих емпиријских израза, анализира утицај непризматичности степенастог брзотока на димензионисање умирујућих базена код гравитационих бетонских брана. Анализирани су параметри који утичу на силе од воде на уласку у умирујући базен, на основу којих је предложена методологија за димензионисање базена. Пружена је и могућност да се поједностави поступак оптимизације целокупног евакуационог органа бране.

Кључне речи: хидраулика, умирујући базен, степенести брзоток, гравитационе бране

1. УВОД

Развој технологије ваљаног бетона допринео је повећаном интересовању за коришћење степенастих брзотока код бетонских брана. Степенести брзоток као спроводник воде од акумулације до низводног корита нуди могућност веће дисипације енергије воде од класичних (глатких) брзотока. Почетком XXI века су обављена значајна истраживања на физичким хидрауличким моделима како би се количина енергије „изгубљена“ на степенастом брзотоку квантификовала (Воес,

¹ Роберт Љубичић, маг.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3370 206, е – mail: robert@hikom.grf.bg.ac.rs

² Будо Зиндовић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3370 206, е – mail: bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs

³ Бојан Миловановић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 556, е – mail: bmilovanovic@hikom.grf.bg.ac.rs

⁴ Проф. др Радомир Капор, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3370 206, е – mail: rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

⁵ Проф. др Љубодраг Савић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 556, е – mail: ljsavic@hikom.grf.bg.ac.rs

Hager 2003a, 2003b, Gonzales, Chanson 2012). Важно је напоменути да су истраживања обављена углавном на призматичним брзотоцима.

Призматични брзотоци су често неповољни, јер захтевају велике количине ископа и велику ширину низводног умирујућег базена. Зато се непризматични степенсти брзоток, који се од ширине која одговара дужини преливне ивице сужава у низводном смеру до ширине низводног корита, намеће као погодно решење које омогућава добру дисипацију енергије уз минималне инвестиције. Смањење инвестиција се не огледа само преко количине ископа, већ и кроз мању потребну висину бране, јер се отвара могућност повећања дужине преливне ивице, а самим тим и смањења висине преливног млаза и укупне висине бране, у односу на одговарајуће решење са призматичним брзотоком.

Квантитативна оцена дисипације енергије на непризматичном степенастом брзотоку не представља лак задатак, јер је струјање у њему сложено – вртлози на степенастој контури брзотока, појава косих стојећих таласа уз разделне зидове, знатно оваздушјење млаза и др. Истраживања указују на то да степенести брзотоци у комбинацији са USBR III базенима могу да захтевају и већу релативну дужину базена L_s/h_2 од класичних због другачијег вертикалног распореда брзина (Cardoso et al. 2007).

Овај рад представља покушај да се постојећи резултати истраживања и емпиријски изрази, у комбинацији са законима механике флуида и хидраулике, искористе за прорачун непризматичног степенастог брзотока и умирујућег базена, како би се предложила методологија за оптимизацију овог типа евакуационог објекта.

2. МЕТОДОЛОГИЈА

Претпоставља се да је ток воде на брзотоку клизећи (Савић 2009, Капор 2015). Посматра се непризматични степенести брзоток на слици 1. Издвајају се 3 зоне течења:

- **централна зона**, за коју ће се претпоставити да је непоремећена, односно да услови течења у њој не зависе од бочних зона (зона стојећег таласа). Параметри течења за ову зону – дубина и брзина – могу се одредити неком од метода за призматичне брзотоке (Voes, Hager 2003a, 2003b),
- **бочне зоне** – зоне косога стојећег таласа, које се одликују повећањем дубина уз разделне зидове, али и већим брзинама течења (Hunt 2008, 2012, Старицац et al. 2013). Ово последње се може објаснити чињеницом да је са повећањем дубине смањена делотворност степенасте контуре, односно дисипација енергије. Целокупан рад је написан под претпоставком да ни у једном пресеку брзотока не долази до сусретања две бочне зоне, тј. да у сваком пресеку брзотока постоји централна, непоремећена зона. Претпоставиће се и да су бочне зоне у попречном пресеку трапезног облика, као на слици 2.

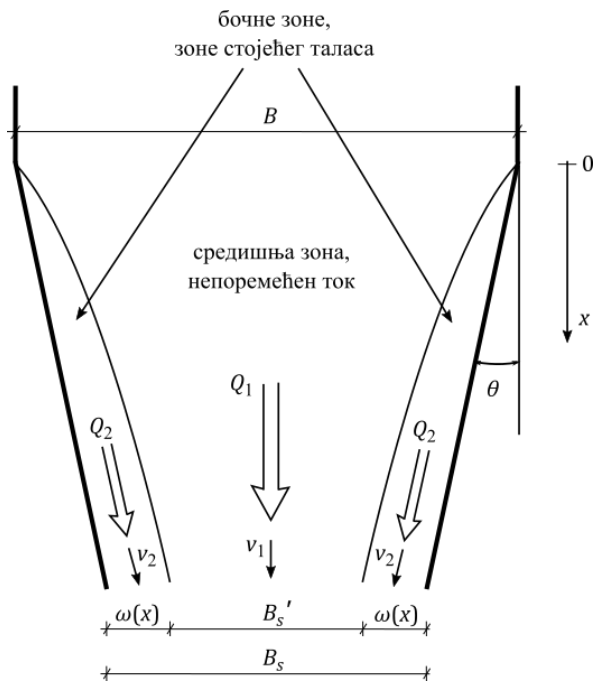
Основне величине, приказане на слици 1, су:

- x – растојање од преливне ивице у основи,
- θ – угао сужења (конвергенције) брзотока у основи,
- B – узводна ширина брзотока, уједно и дужина преливне ивице,

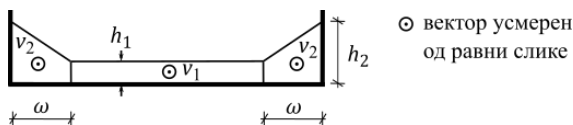
B_s – ширина умирујућег базена, уједно и низводна ширина брзотока,
 B'_s – ширина централне зоне на низводном крају брзотока,
 $\omega(x)$ – ширина зоне косог стојећег таласа у функцији координате x ,
 Q_1, Q_2 – проток „чисте“ воде у централној зони на низводном крају брзотока, односно у зони косог таласа на низводном крају брзотока,
 v_1, v_2 – средња профилска брзина „чисте“ воде у средишњој зони на низводном крају брзотока, односно у зони косог таласа на низводном крају брзотока.

На слици 2:

h_1, h_2 – дубина „чисте“ воде (неаерисана дубина) у централној зони на низводном крају брзотока, односно уз разделне зидове на низводном крају брзотока.



Слика 1. Зоне течења у основи брзотока, са одговарајућим протоцима и брзинама



Слика 2. Зоне течења у попречном пресеку брзотока, са одговарајућим протоцима, брзинама и дубинама

За најнизоводнији пресек брзотока, на улазу у умирујући базен, важи једначина континуитета:

$$Q = Q_1 + 2Q_2. \quad (1)$$

Према слици 1 проток у централној зони на низводном крају брзотока, односно на уласку у умирујући базен једнак је:

$$Q_1 = B_s' h_1 v_1, \quad (2)$$

односно у зони косог таласа у истом пресеку:

$$Q_2 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} \omega(L) v_2, \quad (3)$$

Заменом израза (2) и (3) у израз (1) и сређивањем, за ширину зоне косог таласа добија се:

$$\omega(L) = \frac{Q - B_s h_1 v_1}{(h_1 + h_2) v_2 - 2h_1 v_1}, \quad (4)$$

односно, пошто је јединични проток у централној зони $q = Q/B = h_1 v_1$:

$$\omega(L) = \frac{q(B - B_s)}{(h_1 + h_2) v_2 - 2q}, \quad (5)$$

Исти израз је за даље коришћење погодније изразити и преко брзине v_2 :

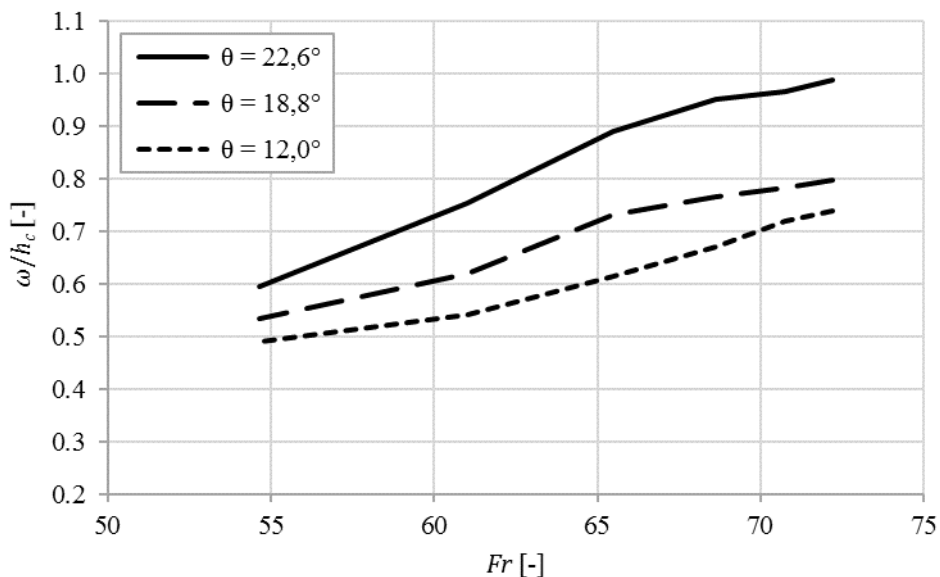
$$v_2 = \frac{q(B - B_s + 2\omega(L))}{\omega(L)(h_1 + h_2)}. \quad (6)$$

У изразима (5) и (6) фигурише 5 непознатих величина: дубине h_1 и h_2 , њихове средње брзине v_1 и v_2 , и ширина зоне косог стојећег таласа $\omega(L)$. За одређивање дубине h_1 и брзине v_1 изрази које предлажу Voes, Nager (2003a, 2003b) дају резултате задовољавајуће тачности. Нешто већи изазов представља одређивање дубине воде уз разделне зидове h_2 , услед недостатка довољног броја истраживања који се овом проблематиком баве. Hunt (2012) даје аналитичко решење за одређивање ове дубине у зависности од геометрије брзотока, засновано на поједностављеној једначини одржања количине кретања:

$$\frac{h_2}{h_1} = \sqrt{\frac{\cos(\varphi) + 2Fr_1 [\cos(\varphi) \cos(\psi) \sin(\theta) + \sin(\varphi) \sin(\theta)]^2}{\cos(\psi_2) \cos(\psi) - 0,46 \sin(\psi) tg^{1,37}(\theta)}}, \quad (7)$$

где је $Fr_1 = v_1^2 / (gh_1)$ Фрудов број за централну зону брзотока. Дубину добијену преко израза (7) треба узети уз одређену дозу опреза, с обзиром на то да постоје истраживања која указују на значајна одступања експериментално добијених резултата у односу на вредности добијене преко израза (7), при истој геометрији брзотока, а при различитим висинама степеника (Wadhai et al. 2015).

За одређивање ширине зоне косог таласа, анализирани су резултати добијени на хидрауличком моделу бране „Бузина“, који је израђен у хидрауличкој лабораторији Института „Јарослав Черни“ у Београду (Старинац et al. 2013). Физички модел бране направљен је у размери 1:40, а испитане су 3 конфигурације непризматичног брзотока – са угловима сужења $12,0^\circ$, $18,8^\circ$, $22,6^\circ$, а при подужном нагибу брзотока Н:V = 8:9 (угао брзотока према хоризонталу $\varphi = 48,37^\circ$), који се, као и подужни нагиб Н:V = 1:1 ($\varphi = 45^\circ$), често среће код брзотока гравитационих бетонских брана. При томе су мерене и ширине зоне косог таласа у различитим пресецима брзотока. Резултати тих мерења су приказани на слици 3, у зависности од Фрудовог броја средишње зоне брзотока.



Слика 3. Дијаграм зависности бездимензионалне ширине зоне косог стојећег таласа од Фрудовог броја централне зоне, h_c – критична дубина на преливу

Претпоставиће се да је бездимензионална ширина зоне косог таласа функција облика:

$$\frac{\omega}{h_c} = f(x) = f(\theta, Fr_1, \varphi). \quad (8)$$

Пошто су мерења обављена само при једном подужном нагибу брзотока φ , тренутно није могуће дефинисати утицај овог параметра, што би у будућим истраживањима требало испитати. Израз (8) се може апроксимирати емпиријском функцијом (Љубичић 2015, Hunt 2012):

$$\frac{\omega}{h_c} = a \operatorname{tg}^b(\theta), \quad (9)$$

где се коефицијенти a и b могу добити калибрацијом података са слике 3 и износе:

$$a = -1,092 \cdot 10^{-4} Fr^3 + 2,075 \cdot 10^{-2} Fr^2 - 1,279 Fr + 26,609, \quad (10)$$

$$b = 0,4. \quad (11)$$

Максимално релативно одступање коефицијента a од вредности добијене калибрацијом износи $\varepsilon_a^{\max} \approx 8\%$, па је на страни сигурности корекција израза (9):

$$\frac{\omega}{h_c} = K a \operatorname{tg}^b(\theta), \quad (12)$$

где је коефицијент $K = 1,1$.

Укупна инерцијална сила на низводном крају брзотока од централне зоне износи:

$$I_1 = \rho v_1 Q_1 = \rho v_1^2 h_1 (B_s - 2\omega(L)). \quad (13)$$

На сличан начин, за зону косог таласа се може написати (посматрано у правцу осе брзотока и слапишта):

$$I_2 = \rho v_2 Q_2 \cos(\theta) = \rho v_2^2 \frac{(h_1 + h_2)}{2} \omega(L) \cos(\theta), \quad (14)$$

где је ρ густина воде.

Анализом је могуће показати да је утицај сила притисака занемарљив у односу на инерцијалне силе, услед великих брзина струјања воде, те се оне неће даље узимати у обзир (детаљнија анализа приказана у Љубичић 2015).

Поређењем величина инерцијалних сила непризматичног брзотока (I_1 за средишњу и I_2 за бочну зону) и призматичног брзотока константне ширине B (инерцијална сила I_{pr}) може се добити јаснија слика о утицају непризматичности брзотока на силе од воде. Уводи се коефицијент „корекције“ инерцијалних сила:

$$\psi_I = \frac{I_1 + 2I_2}{I_{pr}}, \quad (15)$$

где је:

$$I_{pr} = \rho v_1 Q = \rho v_1^2 h_1 B, \quad (16)$$

па се израз (15) може написати у следећем облику:

$$\psi_I = \psi_I(B, \theta) = \psi_I(B_s, \theta) = \frac{v_1^2 h_1 (B_s - 2\omega(L)) + v_2^2 (h_1 + h_2) \omega(L) \cos(\theta)}{v_1^2 h_1 B}. \quad (17)$$

У претходном изразу се може уочити да коефицијент ψ_I не зависи само од угла сужења брзотока, већ и од узводне или низводне ширине брзотока, тј. могуће је за исту вредност угла сужења остварити различите вредности односа B/B_s . На тај начин формира се фамилија кривих $\psi_I(B, \theta)$.

Наведена методологија прорачуна сила је примењена на примеру бране „Бузина“ и добијен је дијаграм зависности коефицијента ψ_I од угла сужења (слика 4). Помоћу таквог дијаграма је могућа бржа и једноставнија оптимизација система прелив-брзоток-слапиште.

На низводном крају непризматичних брзотока дубине и средње брзине нису равномерно распоређене по ширини пресека. Стога ни одређивање потребне низводне дубине у умирујућем базену није могуће путем експлицитног изрази који се користи за умирујуће базене који се налазе у наставку призматичних брзотока. Међутим, полазећи од динамичке једначине за силе од воде унутар умирујућег базена, уз занемаривање сила притисака на узводном крају, могуће је добити израз за одређивање потребне низводне дубине h_{niz} (детаљнија објашњења уз извођење у Љубичић 2015):

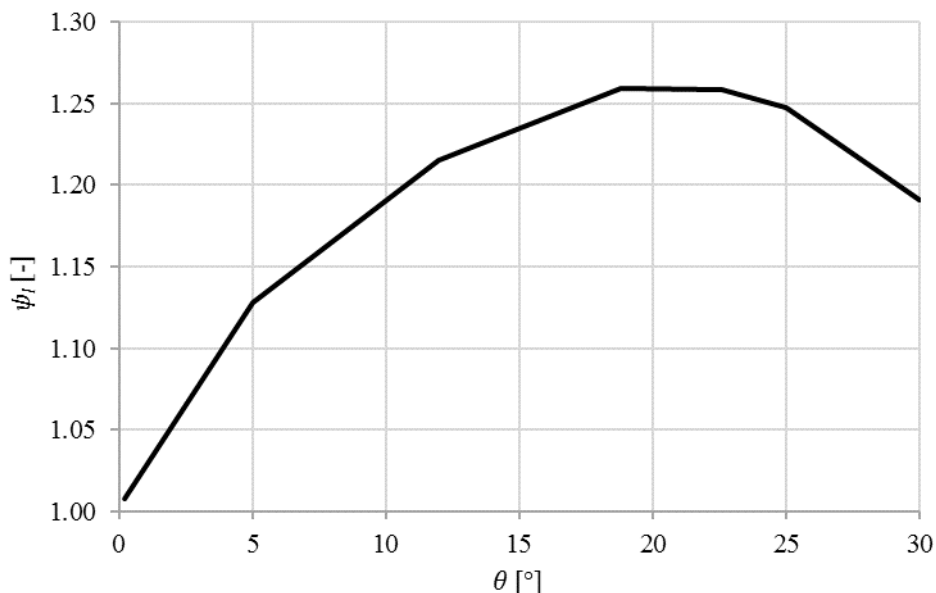
$$h_{niz} = h_1 \sqrt{\psi_I \frac{B}{B_s} \frac{Fr_1}{Fr_{niz}} + \frac{1}{2}}. \quad (18)$$

где је $Fr_{niz} = v_{niz}^2 / (g h_{niz})$ Фрудов број за низводни пресек базена. За одређивање дубине h_{niz} је неопходно користити израз (18) у комбинацији са једначином континуитета:

$$h_{niz} = \frac{Q}{B_s v_{niz}}. \quad (19)$$

3. ПРИМЕР

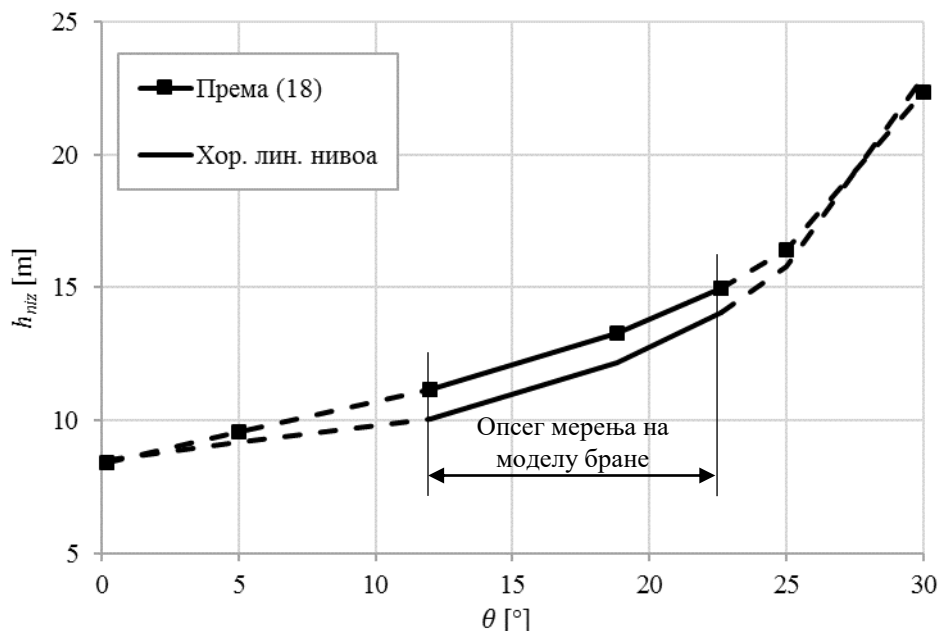
Приказана методологија је примењена на примеру бране „Бузина“. За проток хиљадугодишње воде $Q = Q_{0,1\%} = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$, дужину преливне ивице $B = 80 \text{ m}$ и подужни нагиб брзотока $\varphi = 48,37^\circ$, испитан је опсег углова сужења од 0° до 30° .



Слика 4. Дијаграм зависности корекционог коефицијента ψ_1 од угла сужења, брана „Бузина“, $Q = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$, $B = 80 \text{ m}$

На слици 4 се уочава повећање инерцијалних сила, што се може објаснити смањеним утицајем степенасте контуре са повећањем дубине у бочним зонама. Такође, изнад одређене вредности угла сужења долази до постепеног слабљења дејства инерцијалних сила, што се може објаснити сударањем два млаза из бочних зона на уласку у умирујући базен (у изразу (14) инерцијална сила је узета у правцу осе брзотока, па се компонента у попречном правцу поништава, јер су бочне зоне симетричне).

Добијени резултати се могу упоредити са методом прорачуна у којој се претпоставља хоризонтална линија нивоа у попречном пресеку непризматичног брзотока (као код призматичног брзотока). Резултати поређења су приказани на слици 5. У односу на прорачун са хоризонталном линијом нивоа у попречном пресеку, уочава се да је за углове сужења до око 28° потребна већа низводна дубина, а самим тим и дужина умирујућег базена, са максималним релативним одступањем од 11%. За углове сужења веће од 28° према приказаној методологији је потребна мања низводна дубина, услед поништавања попречних компоненти вектора сила инерције у бочним зонама.



Слика 5. Потребне низводне дубине у умирујућем базену, брана „Бузина“, $Q = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$, $B = 80 \text{ m}$

4. ЗАКЉУЧАК

У раду је представљена оригинална методологија за процену сила од воде које су од значаја за димензионисање умирујућих базена код прелива са непризматичним степенастим брзотоком. На основу свега представљеног, закључује се да је укупна сила која се из брзотока преноси у базен у значајној вези са углом сужења брзотока. Непризматичност брзотока у одређеном распону углова сужења условљава повећање дубине воде уз разделне зидове, што смањује губитке енергије, па су неопходне нешто веће димензије умирујућег базена, у односу на решење са призматичним брзотоком. Напомиње се да је до сада прикупљен недовољан број података на хидрауличким физичким моделима, па су потребна додатна истраживања у циљу провере и унапређивања предложене методе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Boes, R., Hager, W.H.: Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2003.**, Vol. 129, бр. 9, стр. 661-670.
- [2] Boes, R., Hager, W.H.: Hydraulic Design of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2003.**, Vol. 129, бр. 9, стр. 671-679.

- [3] Cardoso, G., Meireles, I., Matos, J.: Pressure head along baffle stilling basins downstream of steeply sloping stepped chutes, *Proceedings 32nd IAHR Congress, Venice, Italy*, **2007**.
- [4] Frizzell, K.W., Kubitschek, J.P., Matos, J.: Stilling Basin Performance for Stepped Spillways of Mild to Steep Slopes – Type III Basins, *33rd IAHR Congress, Canada*, **2009**.
- [5] Gonzalez, C.A., Chanson, H.: Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams, *Dam Engineering*, **2012**, Vol. XXVII, бр. 4, стр. 224-244.
- [6] Hunt, S., Kadavy, K., Abt, S., Temple, D.: Impact of Converging Chute Walls for Roller Compacted Concrete Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2008**, Vol. 134, бр. 7, стр. 1000-1003.
- [7] Hunt, S., Temple, D., Abt, S., Kadavy, K., Hanson G.: Converging Stepped Spillways: Simplified Momentum Analysis Approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2012**., Vol. 138, бр. 9, стр. 796-802.
- [8] Wadhai, P.J., Ghare, A.D., Deshpande, N.V., Vasudeo, A.D.: Comparative Analysis for Estimation of the Height of Training Wall of Convergent Stepped Spillway, *International Journal of Engineering & Technology*, **2015**., Vol. 4, бр. 2, стр. 294-303.
- [9] Капор, Р.: *Хидраулика*, Грађевински факултет, Београд, **2015**.
- [10] Љубичић, Р.: *Прорачун умирујућег базена степенастог преливаса примером на брани „Ариље“*, мастер рад, Грађевински факултет, Београд, **2015**.
- [11] Савић, Љ.: *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет, Београд, **2009**.
- [12] Старицац, Д., et al.: *Хидрауличка моделска испитивања бране Бузина – коначни извештај*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, **2013**.

HYDRAULIC COMPUTATION OF CONVERGING STEPPED-CHUTE STILLING BASIN

Summary: *The influence of converging stepped spillways on dimensions of the stilling basins for RCC dams was studied, based on the results of physical modeling, existing empirical expressions, and basic laws of fluid mechanics and hydraulics. The study includes analysis of parameters that affect the magnitude of a hydrodynamic force which is transferred into the stilling basin, and presents an original design methodology. A procedure for simplifying the optimization process for the entire spillway is proposed.*

Keywords: *hydraulics, stilling basin, stepped spillway gravity dams*