

## ОДРЕЂИВАЊЕ ДИМЕНЗИЈА ШАХТНОГ ПРЕЛИВА ЕМПИРИЈСКИМ ЈЕДНАЧИНАМА

Љубодраг САВИЋ, Радомир КАПОР, Владан КУЗМАНОВИЋ, Бојан МИЛОВАНОВИЋ  
Универзитет у Београду – Грађевински факултет

### РЕЗИМЕ

Разматрано је хидрауличко димензионисање шахтног прелива са дефлектором испред вертикалне кривине. На основу хидрауличких моделских испитивања неколико објеката, као и искуства других аутора, процењени су кључни чиниоци који одређују пропусну способност преливног, шахтног и тунелског дела објекта. Предложени су нови и побољшани ранији изрази за процену коефицијената преливања, истицања на дефлектору и коефицијента брзине. Такође, приказан је и поступак за обликовање шахта, укључујући прелазну деоницу између прелива и шахта. На крају се даје сажет алгоритам целог поступка димензионисања објекта.

**Кључне речи:** шахтни прелив, хидрауличко димензионисање, коефицијент преливања, коефицијент истицања

### УВОД

Све високе бране морају се заштити од великих вода евакуационим објектом захтеваног капацитета ([10], [13], [17]). Шахтни прелив је евакуациони објекат са левкастим преливом, који се наставља проводником у виду вертикалног шахта и тунела благог подужног пада, а завршава умирујућим базеном или ски одскоком (сл. 1.). Шахтни прелив се често примењује као алтернатива бочном преливу са брзотоком (и/или чеоном преливу), поготову када се за евакуацију воде током грађења користи опточни тунел, који се адаптира у тунел шахтног прелива. Левкасти облик прелива омогућава преливну ивицу потребне дужине и хидраулички, а и конструктивно, добар прелаз ка вертикалном шахту.

Код шахтног прелива теоријски су могућа три *контролна пресека* (у којима се успоставља

једнозначна веза протицаја,  $Q$ , и нивоа воде у акумулацији,  $Z \equiv Z_U$ , сл. 2.), а практично се остварују два:

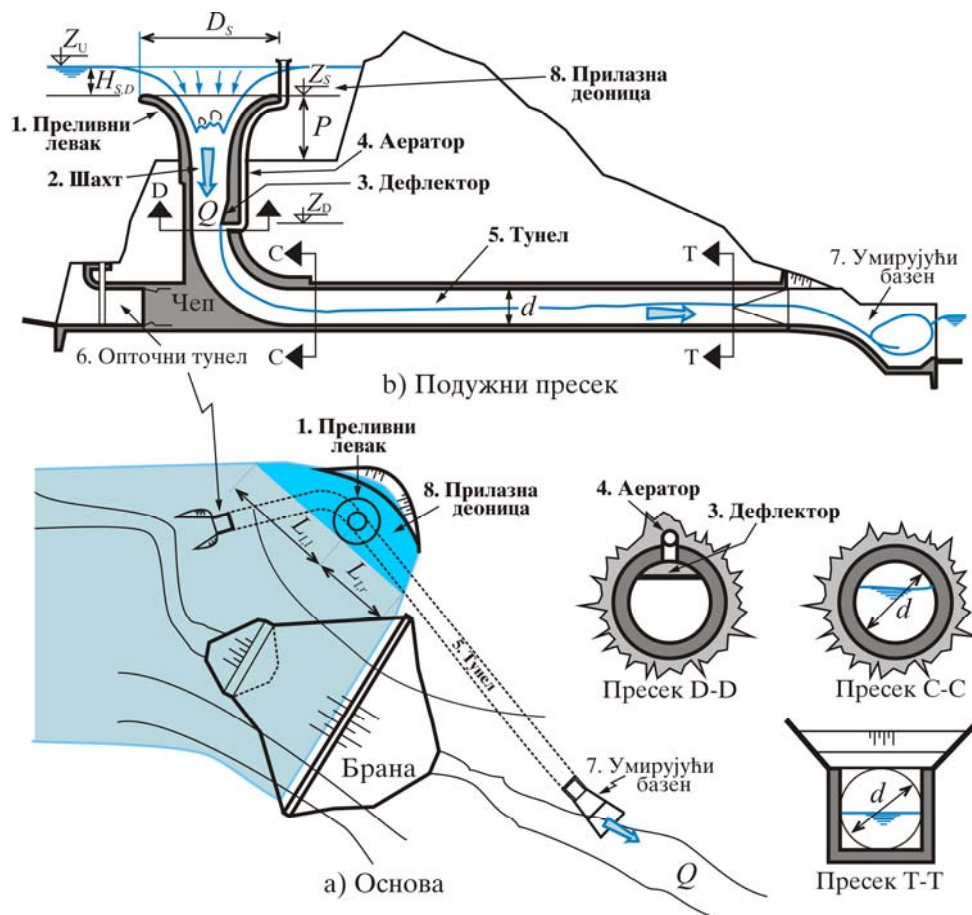
1) **Преливна ивица** левкастог прелива, где влада слободно преливање.

2) **Пресек дефлектора**, где се млаз сужава и одваја од контуре скретачем – *дефлектором*, иза кога се поставља аерациона цев за довод ваздуха. При рачунском протицају, овде се успоставља граница између течења под притиском, које влада изнад дефлектора, и течења са слободном површином испод њега (сл. 1. и сл. 2.). Уколико се изостави аератор (и дефлектор), у целом тунелу настаје течење под притиском и **излазни пресек** тунела постаје трећи контролни пресек. Код високих објеката (односно, при великим брзинама струјања), течење под притиском у тунелу је неприхватљиво због великог потпритиска који се јавља на конвексној страни вертикалне кривине, услед центрифугалног убрзања. Потпритисак може да изазове кавитацију, вибрације и настанак тзв. ваздушних цепова уз „експлозије“ на излазу из тунела, па се не може дозволити да излазни пресек буде контролни пресек.

У овом раду ће се разматрати шахтни прелив са дефлектором и оваздушњем на почетку вертикалне кривине (сл. 1.), с обзиром на велику хидрауличку поузданост која се добија одвајањем млаза и преласком у течење са слободном површином пре кривине. У Србији и бившој СФРЈ изграђен је (или се гради) велики број оваквих објеката (Ариље, Барје, Бован, Првонек, Ровни, Селова, Сјеница, Тиквеш, Шпиље и др.). У табели 1. приказане су битне димензије објеката, провераваних помоћу хидрауличких моделских испитивања, која ће се користити у даљем разматрању ([1], [2], [5], [6] и [7]).

Табела 1. Димензије објеката, чија су моделска испитивања коришћена у истраживању

| Брана   | Кота круне прелива | Кота дефлектора | Кота дна у сужењу на крају кривине | Кота дна на крају тунела | Пречник левка | Пречник тунела | Полупречник кривине | Дужина тунела од "С" до "Т" | Површина пресека дефлектора | Укупна ширина преливних стубова | Висина преливног прага | Ширина левог прилазног канала | Ширина десног прилазног канала | Рачуњски проток     | Рачуњска висина преливног млаза |
|---------|--------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|---------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|
|         | $Z_s$              | $Z_D$           | $Z_{D,C}$                          | $Z_T$                    | $D_s$         | $d$            | $R$                 | $L_T$                       | $A_D$                       | $n_s \cdot b_s$                 | $P$                    | $L_{Ll}$                      | $L_{Rl}$                       | $Q$                 | $H_{s,D}$                       |
|         | (mm)               | (mm)            | (mm)                               | (mm)                     | (m)           | (m)            | (m)                 | (m)                         | (m <sup>2</sup> )           | (m)                             | (m)                    | (m)                           | (m)                            | (m <sup>3</sup> /s) | (m)                             |
| Ариље   | 418,20             | 385,65          | 364,30                             | 362,10                   | 26,60         | 8,50           | 17,06               | 188,54                      | 52,72                       | 2,40                            | 7,20                   | 90                            | 120                            | 1050                | 3,44                            |
| Ровни   | 360,00             | 307,20          | 292,20                             | 289,80                   | 22,00         | 5,00           | 12,50               | 187,50                      | 16,84                       | 2,00                            | 12,50                  | 35                            | 150                            | 420                 | 2,10                            |
| Сјеница | 985,00             | 917,00          | 886,50                             | 885,00                   | 30,00         | 7,00           | 25,00               | 370,00                      | 31,90                       | 0,00                            | 10,00                  | 100                           | 100                            | 1000                | 3,00                            |
| Тиквеш  | 265,00             | 198,00          | 165,00                             | 160,15                   | 45,00         | 10,00          | 28,00               | 420,00                      | 63,19                       | 2,00                            | 20,00                  | 70                            | 140                            | 1600                | 3,09                            |
| Бован   | 258,50             |                 |                                    |                          | 25,40         | 7,50           |                     |                             |                             | 0,00                            | 3,00                   | 200                           | 200                            | 850                 | 3,00                            |



Слика 1. Шахтни прелив са дефлектором испред вертикалне кривине

Према је шахтни прелив са дефлектором и аерацијом разматран у литератури ([3], [4], [8], [9], [10], [11], [12], [14], [15] и [17]), одговори на многа питања су делимично, или потпуно недоречени: облик и димензије прилазне деонице (простор између преливног левка и бока долине), облик и димензије прелазне деонице између преливног левка

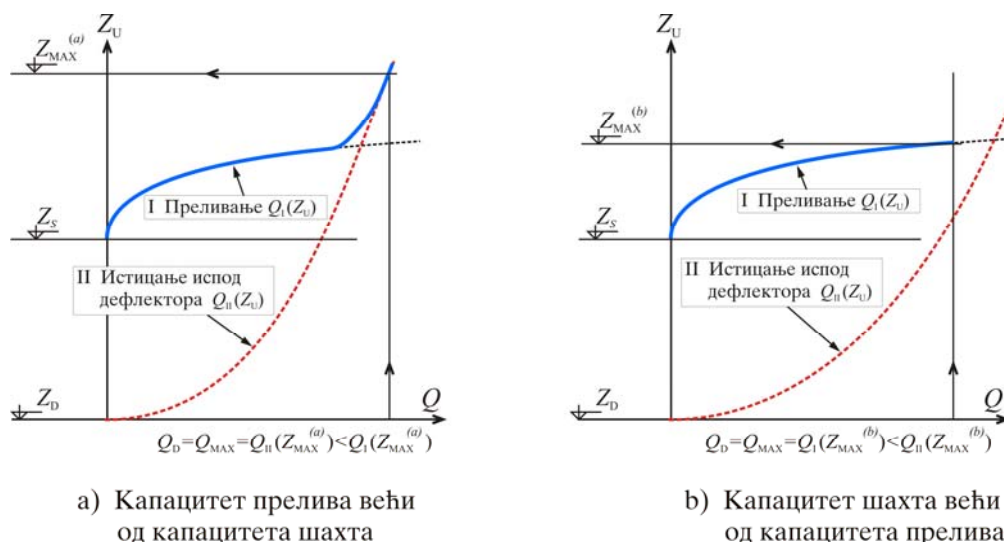
и дефлектора, струјање у пресеку дефлектора, процена дубине у пресеку иза вертикалне кривине и др. Циљ овог рада је да, на основу искустава аутора на пројектовању и физичком моделирању ових објеката, одговори на нека од напред постављених питања, и уобличи ефикасан поступак прорачуна шахтног прелива, који би се могао користити, пре

свега у раним фазама пројектовања, када је потребно размотрити велики број варијанти.

При димензионисању шахтног прелива потребно је ускладити капацитет (пропусну моћ) два контролна пресека: 1) прелива и 2) дефлектора. Под **капацитетом** контролног пресека овде ће се подразумевати проток који се оствари при максималном нивоу у акумулацији,  $Z_U = Z_{MAX}$  (сл. 2.).

Проток *преливања* ( $Q_I$  на сл. 2.) повећава се при порасту нивоа у акумулацији са експонентом од три половине ( $Q_I \propto (Z_U - Z_S)^{\frac{3}{2}}$ ), док проток *истицања* у пресеку дефлектора ( $Q_{II}$ ) расте знатно блаже – са

квадратним кореном денивелације између нивоа у акумулацији и пресека дефлектора ( $Q_{II} \propto (Z_U - Z_D)^{\frac{1}{2}}$ ). Ако би капацитет прелива био већи од капацитета шахта ( $Q_I(Z_{MAX}) > Q_{II}(Z_{MAX}) = Q_D$  као на сл. 2a), добила би се непотребно висока кота максималног успора,  $Z_{MAX}$ . С друге стране, повољно је да капацитет шахта буде нешто већи од капацитета прелива (сл. 2b), чиме се повећава сигурност бране, јер би у случају наиласка протицаја већег од рачунског, ниво у акумулацији само незнатно порастао. Препорука је да тачка пресека криве преливања и криве истицања одговара коти круне бране.



Слика 2. Усклађеност капацитета шахта и преливног левка

## ПРЕЛИВНИ ЛЕВАК И ПРИЛАЗНА ДЕОНИЦА

Капацитет прелива сразмеран је спољашњем пречнику левка,  $D_S$ , па се са великим пречником постиже нижа кота максималног успора, а тиме и нижа и јефтинеја брана. С друге стране, са повећањем пречника повећава се коштање, као и тешкоће у извођењу, па пречници обично не прелазе 40÷50 m. Да би се омогућило правилно струјање ка преливној ивици, без образовања ободног вртлога који смањују капацитет, неопходно је између прелива и падине образовати прилазну деоницу (сл. 1.), а често се на прелив постављају и стубови

усмеривачи млаза. Прилазна деоница представља област око левка прелива у оквиру које је кота терена нижа од круне прелива за висину  $P$ , или више (сл. 1.). Део прилазне деонице обично се мора усећи у падину обале језера, а део се може обезбедити прикладним постављањем левка у односу на терен и остале објекте. Ширина деонице,  $L_I$ , се може дефинисати као ширина области са котом терена нижом за висину  $P$  од круне прелива. Често топографски услови намећу несиметричан облик прилазне деонице, па се може говорити о левој,  $L_{l,l}$  и десној ширини,  $L_{l,r}$  (при чему је  $L_I = L_{l,l} + L_{l,r}$ , на сл. 1.).

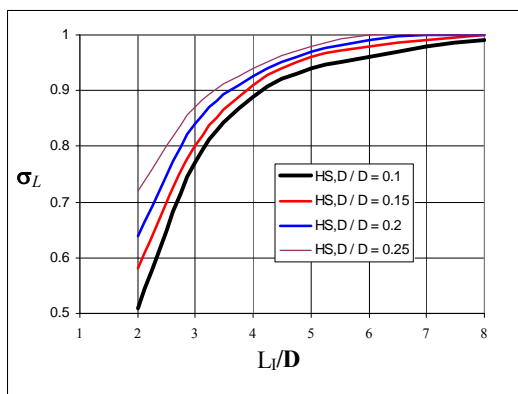
Контура прелива (крива а-а на сл. 8.) обично се обликује на основу експерименталних вредности измерених на цилиндричном оштроивичном преливу ([11], [17]). Протицај преко прелива се рачуна према једначини преливања:

$$Q = L_S C_S \sqrt{2g} H_S^{3/2}, \tag{1}$$

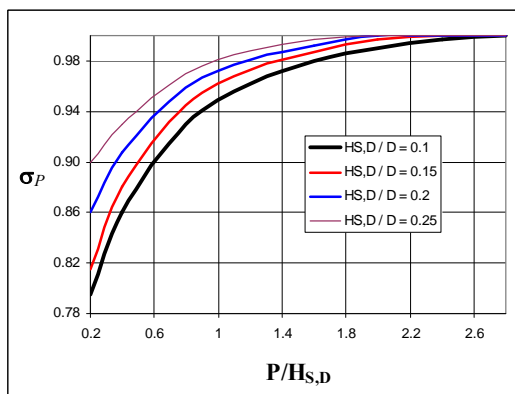
где су:  $L_S = \pi D_S - n_S (b_S - 2 K_S H_S)$  = дужина преливне ивице, мерена по спољном ободу левка,  $b_S$  = ширина стубова усмеривача на преливу,  $n_S$  = број стубова,  $C_S$  = коефицијент преливања и  $H_S$  = висина (дебљина) преливног млаза,  $K_S = 0,01 \div 0,02$  = коефицијент контракције млаза услед опструјавања стуба.

Код тродимензионалног левкастог млаза, струјнице се међусобно “притискају”, услед закривљености преливне ивице, па је коефицијент преливања левкастог прелива нешто мањи него код

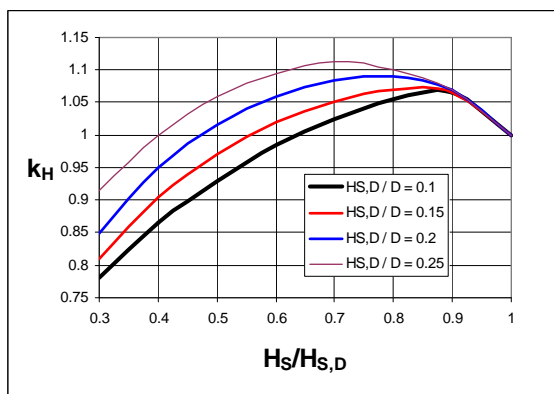
праволинијског. У пројектантској пракси често се вредност коефицијента преливања усваја према резултатима истраживања Вагнера, која су вршена на оштроивичним цилиндричним преливима ([12], [17]). Ове вредности важе за идеализован случај, када гранични услови (падине речне долине, косине бране и сл.) не ометају течење ка преливу. Међутим, највећи број брана са шахтним преливом изграђен је управо у дубоким долинама. Далеко потпунија истраживања Мојса ([12]) омогућавају да се коефицијент протицаја правилније процени, узимајући у обзир утицаје који се јављају при преливању преко левкастог прелива у реалним условима: утицај односа дебљине преливног млаза и висине прелива, односа дебљине преливног млаза и пречника прелива, утицај дужине прилазне деонице, утицај антивртложних грађевина – стубова, прилазних „клинова“ и сл.).



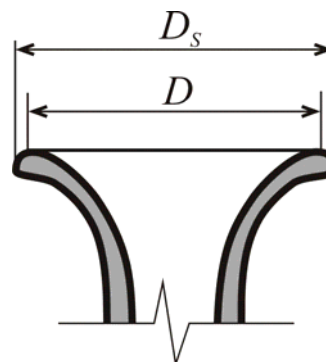
а) поправка према утицају дужине прилазне деонице



б) поправка према висини надземног дела шахта



в) поправка према одступању висине млаза у односу на рачунску



г) Спољашњи пречник левка,  $D_S$  и пречник на koti круне,  $D$

Слика 3. Дијаграми за одређивање коефицијената поправке према Мојсу [12]

Према Мојсу, коефицијент преливања се може одредити на основу ([12]):

$$C_s = \frac{D}{D_s} (0,507 - 0,272 H_{s,D}/D) \sigma_l \sigma_p \sigma_{AV} k_H, \quad (2)$$

где је:  $H_{s,D}$  = висина преливног млаза при рачунском (пројектном) протицају, тј., рачунска висина преливног млаза,  $D$  = пречник левка на koti круне прелива (сл. 3.г),  $\sigma_l = \sigma_l(L_l/D, H_{s,D}/D)$  = коефицијент поправке којим се обухвата утицај „дужине“ прилазне деонице,  $L_l$  (сл. 1.),  $\sigma_p = \sigma_p(P/H_{s,D}, H_{s,D}/D)$  = коефицијент којим се обухвата утицај висине надземног дела шахта,  $P$ ,  $\sigma_{AV}$  = коефицијент којим се обухвата утицај антивртложних грађевина ( $\sigma_{AV} \approx 0,95 \div 1,00$ , ако има грађевина, а  $\sigma_{AV} \approx 1,0$ , без стубова),  $k_H = k_H(H_s/H_{s,D}, H_{s,D}/D)$  = коефицијент којим се вреднује одступање висине преливног млаза,  $H_s$ , у односу на рачунску висину,  $H_{s,D}$ .

На слици 4. су приказане вредности коефицијента преливања,  $C_{s,D}$ , при рачунском протицају, измерене на моделима ([1], [2], [5], [6] и [7]), као и вредности добијене према обрасцима Мојса и USBR. Такође, унете су и вредности добијене преко новог обрасца, који предлажу аутори, а којим се обухвата утицај висине прага и обима прилазне деонице:

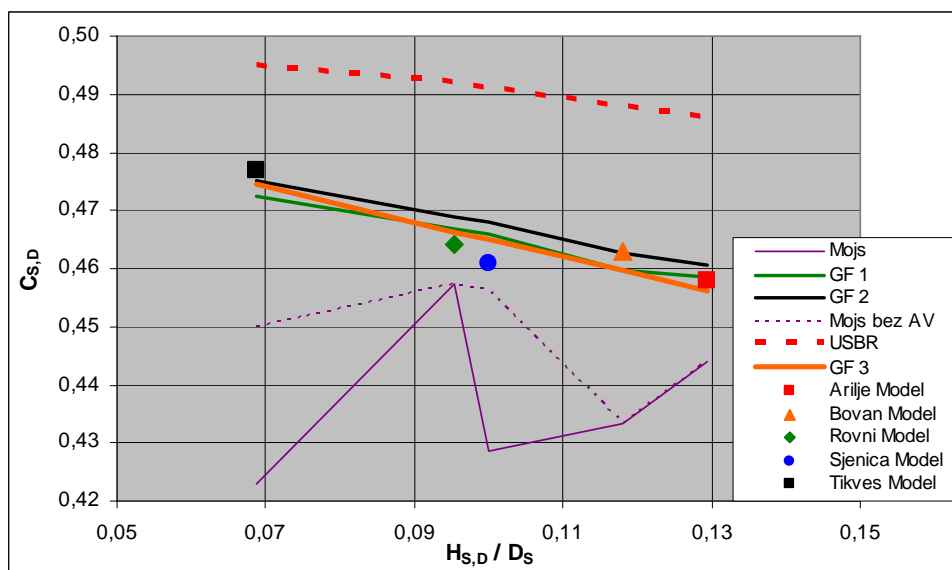
$$C_{s,D} = \left( 0,495 - 0,25 \frac{H_{s,D}}{D_s} \right) \left( 1 - \alpha \frac{P}{H_{s,D}} \right) \left[ 1 - \alpha \left( \frac{D_s}{L_{l,l}} + \frac{D_s}{L_{l,r}} \right) \right] (1 - \alpha_{AV}) \quad (3)$$

где се за параметар  $\alpha$  може узети вредност у опсегу између  $\alpha = 1/100$  (график „GF 1“, на сл. 4.) и  $\alpha = 1/200$  (график „GF 2“), а за параметар  $\alpha_{AV}$ , којим се вреднује утицај антивртложних усмеравајућих конструкција треба усвојити  $\alpha_{AV} = 0$ , када нема усмеравајућих зидова, и  $\alpha_{AV} = 0.00 \div 0.02$ , када се предвиђају зидови. На сл. 4. приказани су и резултати добијени применом новог упрошћеног образаца (график GF 3), којим се не обрачунава утицај висине прага и прилазне деонице:

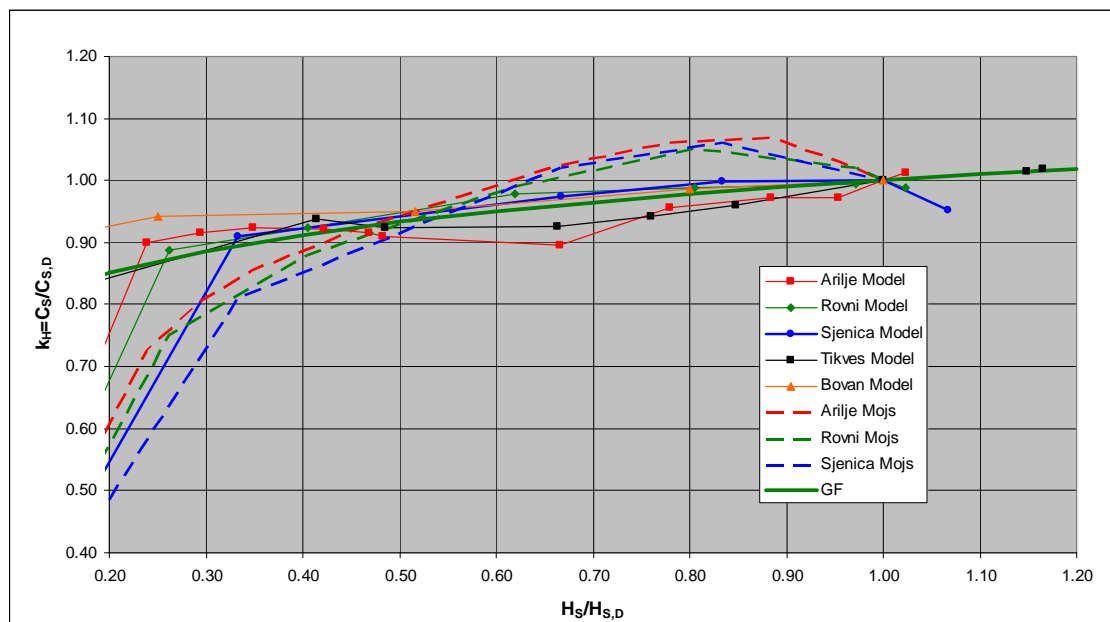
$$C_{s,D} = \left( 0,495 - 0,3 \frac{H_{s,D}}{D_s} \right) (1 - \alpha_{AV}). \quad (3')$$

Зависности на слици 4. нису графици једначина (2), (3) и (3') већ линије које повезују дискретне вредности коефицијента преливања израчунате према поменутим једначинама.

Вредности коефицијента преливања добијене преко дијаграма USBR [17] далеко премашују остварене вредности, с обзиром да се зависност USBR-а заснива на истраживањима са преливом при идеалним условима дотицања. Образац Мојса даје нешто боље слагање, али са неприродним одступањима услед пренаглашеног утицаја геометрије прилазне деонице (прилагођене за објекте са благим падинама обала, где се може образовати нека врста канала) и антивртложних објеката. Може се уочити да образци које предлажу аутори дају најбоље слагање са измереним вредностима.



Слика 4. Измерене и израчунате вредности коефицијента преливања при рачунском протицају



Слика 5. Утицај одступања дебљине млаза од рачунске на коефицијент преливања

Највећи утицај на вредност коефицијента преливања има однос  $H_{S,D}/D_S$ . Практично нема утицаја односа  $P/H_{S,D}$  за вредности веће од 2, док се значај утицаја прилазне деонице и антивртложних мера не може поуздано сагледати, с обзиром на изразиту неправилност облика прилазне деонице у условима реалног објекта. Стога се сматра да је примена упрошћеног обрасца (3') сасвим оправдана, поготову за ниже фазе пројектовања. Треба приметити да предложени обрасци (3) и (3') дају теоријску вредност коефицијента преливања од 0,495 за прелив са праволинијском преливном ивицом (тј., када однос  $H_{S,D}/D_S \rightarrow 0$ ).

Пре израде главног пројекта, препоручује се израда физичког хидрауличког модела, који омогућава да се одреди облик прилазне деонице и/или противвртложних грађевина, којим се остварује што већи капацитет прелива уз што мањи обим земљаних радова.

Утицај одступања дебљине преливног млаза,  $H_S$ , од рачунске дебљине,  $H_{S,D}$ , на коефицијент преливања приказан је на сл. 5. Вредности добијене преко дијаграма Мојса, као и вредности добијене са разматраних објеката не показују добро слагање. На слици су такође приказане и вредности добијене на основу формуле коју предлажу аутори (GF):

$$k_H = \left( \frac{H_S}{H_{S,D}} \right)^\beta, \quad (4)$$

за опсег од  $0,2 \leq \left( \frac{H_S}{H_{S,D}} \right) \leq 1,2$ , где се за параметар

$\beta$  предлаже вредност од  $\beta = 1/10$ .

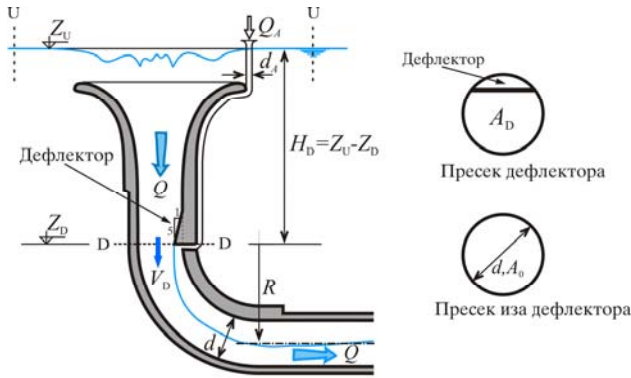
И овде је уочљиво знатно боље слагање измерених вредности и резултата добијених преко обрасца који предлажу аутори, у односу на резултате Мојсовог обрасца.

### ПРЕСЕК ДЕФЛЕКТОРА

Положај, облик и димензије *дефлектора* (скретача млаза) треба да обезбеде да се млаз, пре уласка у тунел, контролисано одвоји од зида. Искуство на великом броју изведених објеката указује да је најповољније млаз одвојити на *почетку вертикалне кривине*, пре него што дође до прерасподеле притисака по пресеку, са појавом вакуума и пулзација, који могу да дестабилизују млаз.

Експерименти су показали ([14], [17]) да би однос протичајног пресека на месту дефлектора,  $A_D$ , и пресека испред (изнад) дефлектора,  $A_0$ , требало да буде  $A_D/A_0 \leq 0,85$ , а косина дефлектора у нагибу 5 : 1

(5 вертикално, према 1 хоризонтално, сл. 6.). Такође, моделска испитивања показују да вредност величине  $R/d$ , не би требало би да буде већа од 2.0, због опасности од нестабилног течења услед наглог скретања млаза.



Слика 6. Пресек дефлектора и вертикална кривина – колено

Капацитет шахта одређује се преко контролног пресека истицања, на месту сужења са дефлектором (пресек D на сл.1., 2. и 6.). Обично се користи једначина енергије за деоницу између прелива (замишљени цилиндрични пресек око преливне ивице, U) и пресека дефлектора:

$$Z_U = Z_D + \frac{p_D}{\gamma} + \frac{V_D^2}{2g} + \Delta E_{U-D}, \quad (4)$$

где су  $Z_D$  = kota дефлектора,  $p_D$  и  $V_D$  = притисак и брзина у пресеку дефлектора и  $\Delta E_{U-D}$  = губитак енергије између пресека U и D. Притисак  $p_D$  није атмосферски по целом ободу млаза, због вертикалне кривине испод дефлектора, преко које контура притиска млаз и онемогућава слободно истицање. Притисак расте са величином  $d/R$ , а распоред притисака у пресеку дефлектора очигледно није хидростатички (па строго узевши, није испуњен услов за примену једначине енергије између два пресека). Ако се губици енергије обрачунају користећи брзинску висину у пресеку дефлектора ( $\Delta E_{U-D} = \xi V_D^2 / 2g$ , где  $\xi$  претставља коефицијент свих губитака на деоници), може се написати ([10], [11]):

$$Z_U - Z_D = H_D = \frac{V_D^2}{2g} \left( 1 + \xi + \frac{p_D}{\rho \frac{V_D^2}{2}} \right), \quad (4')$$

одакле се добија брзина, односно, протицај истицања на дефлектору:

$$Q = C_Q A_D \sqrt{2gH_D}, \quad \text{где је:} \quad (5)$$

$$C_Q = C_A C_V = \frac{C_A}{\sqrt{1 + \xi + p_D / \rho \frac{V_D^2}{2}}} = C_Q \left( \frac{d}{R} \right), \quad (6)$$

при чему је  $C_A$  = коефицијент контракције млаза. За процену коефицијента протицаја на дефлектору,  $C_Q$ , обично се користи експериментално одређена зависности ([14]):

$$C_Q = 0,92 - 0,2 d/R. \quad (7)$$

На основу резултата доступних моделских испитивања, као и испитивања које су сами обавили, аутори предлажу следећу зависност:

$$C_Q = 0,95 \left( 1 - 0,25 \frac{d}{R} \right)^{1,1}, \quad (7')$$

На слици 7 приказане су обе зависности (7) и (7') као и остварене вредности коефицијетна протицаја на разматраним моделима. Уочава се да вредност која представља коефицијент протицаја за модел прелива бране Ровни није у складу са осталим вредностима, зато што је ниво воде у шахту био значајно нижи од нивоа у акумулацији. Примена формуле коју предлажу аутори (график GF) боље се слаже са измереним вредностима од зависности (7).

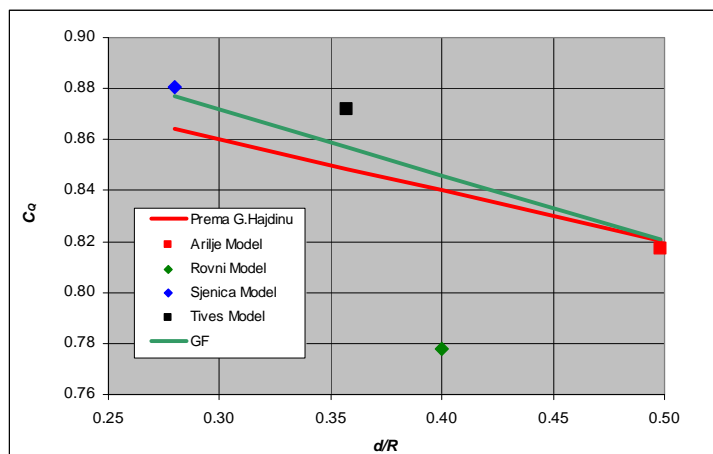
Да би се низводно од дефлектора омогућило течење са слободном површином, потребно је, кроз аерациону цев, надокнадити део запремине ваздуха који се захвата и одводи турбулентним струјањем низводног тока. Проток ваздуха,  $Q_A$ , потребан да обезбеди течење са слободном површином, може се проценити као:

$$Q_A = K_A Q, \quad (8)$$

где је:  $K_A$  коефицијент оваздушјења, који зависи од интензитета турбуленције млаза, односно од силовитости тока. USA Corps of Engineers ([16]) предлаже следећу искуствену зависност:

$$K_A = 0,03 (\sqrt{Fr} - 1)^{1,06}, \quad (9)$$

где је  $Fr = V_D^2 / gd$  (сл. 6.).

Слика 7. Измерене и срачунате вредности коефицијента протицаја  $C_Q$  у пресеку дефлектора

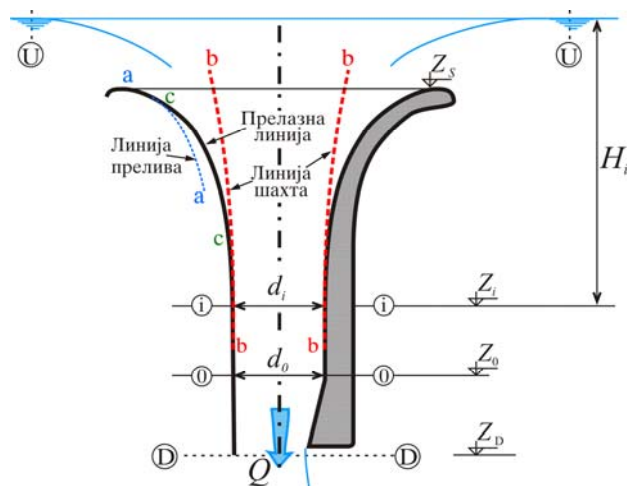
Да би се одредио пречник аерационе цеви,  $d_A$ , потребно је проценити и брзину ваздуха у цеви,  $V_A$ . Обично се, као и за аераторе брзотока, дозвољава брзина ваздуха до 50 m/s. Веће брзине се избегавају, због непријатног звука и опасности од вибрација. За усвојени пречник цеви, корисно је проверити и вредност притиска који ће се остварити на излазу цеви – у пресеку “D” испод дефлектора (сл. 6.). Ерчић ([4]) наглашава потребу да се прецизније проучи кретање ваздуха у одводном делу прелива, што би био предмет наредних истраживања.

#### ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ШАХТА ИЗНАД ДЕФЛЕКТОРА

Облик и димензије шахта изнад дефлектора (сл. 8.), треба да омогуће течење без вакуума и знатних губитака енергије, што захтева постепено сужавање (од прелива ка дефлектору), јер би за константан пресек шахта, притисак опадао идући навише, сагласно једначини енергије. С друге стране, није добро ни превише ширити шахт, јер се тиме непотребно повећава сила узгона на прелив. Оптимална контура постиже се из услова да се по целој контури шахта не јави вакуум. Применом једначине енергије на деоницу између пресека  $U$  испред прелива и пресека  $i$  у шахту, а уз претпоставку да је притисак у пресеку  $i$  једнак нули, добија се пречник шахта  $d_i$ :

$$d_i = \frac{2}{\pi^2} (1 + \xi)^{\frac{1}{4}} \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{(2gH_i)^{\frac{1}{4}}}, \quad (10)$$

где је  $\xi$  = коефицијент укупних губитака на деоници, који према искуству аутора није мањи од  $\xi = 0,1$ , а  $H_i$  = денивелација између нивоа у акумулацији и пресека  $i$ .



Слика 8. Димензионисање шахта изнад дефлектора

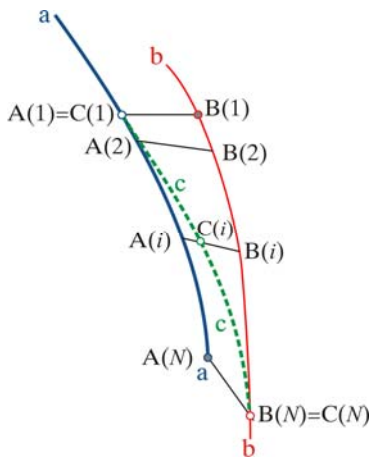
Најнижи део шахта, почевши од доње ивице дефлектора, па до краја косине дефлектора (пресек 0), увек је цилиндричан из конструктивних разлога. Да би се обезбедио континуалан и гладак прелаз, између контуре шахта b-b и контуре преливног левка a-a, поставља се прелазница c-c, која додирује обе криве (сл. 8). Аутори предлажу пондерисану интерполацију између двеју кривих (сл. 9). Ако се тачка A(1) изабере за тангентну тачку на кривој прелива (a-a), а тачка B(M) за тангентну тачку криве шахта (b-b), онда се координате тачке C(i) на прелазници (c-c) рачунају као:



$$\begin{aligned} X_C(i) &= \theta X_A(i) + (1 - \theta) X_B(i) \\ Z_C(i) &= \theta Z_A(i) + (1 - \theta) Z_B(i) \end{aligned} \quad (11)$$

где коефицијент пондерације,  $\theta$ , зависи од положаја пресека  $i$  у односу на додирну тачку прелива  $A(1) \equiv C(1)$  (што је пресек  $i$  ближи тачки  $A(1)$ , то се више тежине даје координати са криве прелива, и обрнуто):

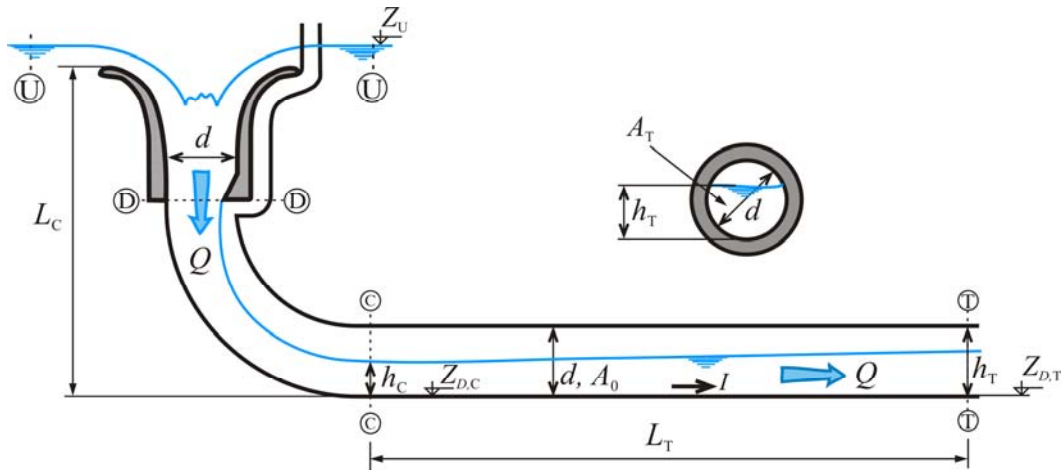
$$\theta = \left( \frac{N-i}{N-1} \right)^{0.5+0.15(i-1)} \quad (12)$$



Слика 9. Прелазница између криве прелива и криве шахта

**ВЕРТИКАЛНА КРИВИНА И ТУНЕЛ**

По изласку из пресека дефлектора (пресек D на сл. 10.), ток са слободном површином, преко



Слика 10. Течење у колену и тунелу прелива

вертикалне кривине, прелази у тунел благог нагиба. Да би се омогућило течење са слободном површином, потребно је дуж целог тунела, закључно са излазним пресеком Т, обезбедити довољну површину протицајног пресека за “набубрелу” мешавину воде и ваздуха. Такође се мора оставити простор (при врху калоте тунела), кроз који се надокнађује ваздух који је турбуленција на површини, дуж тунела, увукла у ток воде. Искуство са постојећих објеката ([17]) налаже да се на излазном пресеку, при рачунском протицају остави макар  $20 \div 25\%$  од укупне површине попречног пресека за струјање ваздуха. Другим речима, испуњеност пресека Т, не би требало да буде већа од  $75 \div 80\%$ , ( $A_T / A_0 \leq 0,80$ ), што одговара дубини од  $h_T / d \leq 0,75$ .

Изразна дубина  $h_T$  се одређује прорачуном линије нивоа, за коју је гранични услов дубина  $h_C$ , у пресеку С, на крају вертикалне кривине (сл. 10.). Дубина  $h_C$  се рачуна преко једначине енергије између пресека горње воде, U и пресека С. Укупни губици енергије на овој деоници приказаће се преко коефицијента брзине  $C_{V,C}$ , па се брзина може изразити као:

$$V_C = C_{V,C} \sqrt{2g(Z_U - Z_{D,C} - h_C)} \quad (13)$$

а из једначине континуитета се добија дубина  $h_C$ , као инверзна функција површине пресека:

$$h_C = h^{-1}(Q / V_C) \quad (14)$$

На основу резултата моделских испитивања (сл. 11.), може се закључити да се коефицијент брзине,  $C_{V,C}$ , креће у опсегу вредности између 0,80 и 0,86. С обзиром на изразите флукуације брзина и притисака при течењу у кривини, измерене вредности се не могу сматрати потпуно репрезентативним – могућа су одступања услед померања млаза уз зидове. На основу приказаног на слици 11. усвојено је да је коефицијент брзине константан (график GF), при чему се предлаже вредност од:

$$C_{V,C} = 0,85. \tag{15}$$

Линија нивоа у тунелу рачуна се применом једначине енергије и једначине одржања масе на течење са слободном површином, на деоници између пресека на крају вертикалне кривине и пресека на крају тунела (сл. 10.). На слици 12. приказане су вредности коефицијента брзине на излазу тунела,  $C_{V,T}$ , добијене према резултатима мерења на обрађеним моделским испитивањима, као и вредности добијене на основу прорачуна линије нивоа. За линију нивоа су приказана два случаја: а) када је дубина  $h_C$  преузета са мерења на моделу, и б) када је дубина  $h_C$  рачуната са коефицијентом брзине  $C_{V,C} = 0,85$  (сл. 11.). У оба случаја је усвојен Манингов коефицијент храпавости  $n = 0,013 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ . Као и на слици 11, паралелно су приказане и

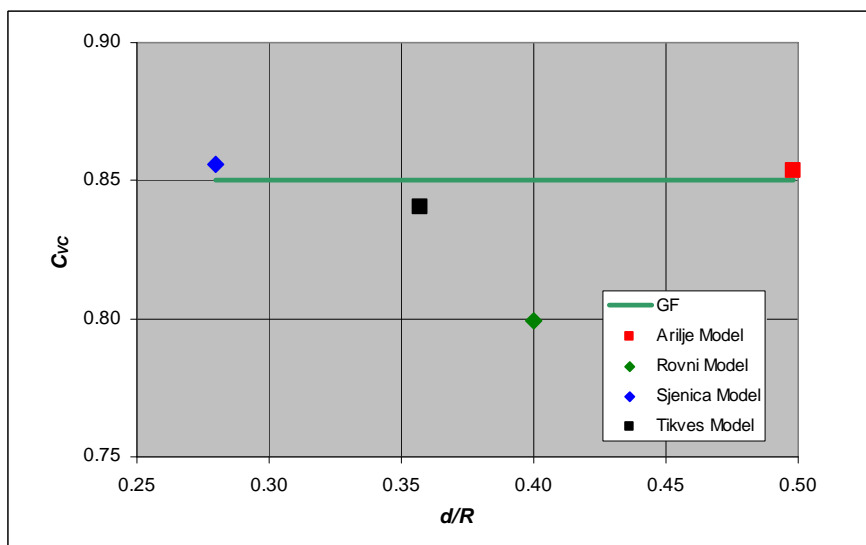
вредности коефицијента  $C_{V,T}$ , добијене преко зависности (16), коју су аутори одредили на основу резултата прорачуна и моделских испитивања, а која се може користити за ниже фазе пројектовања (график GF):

$$C_{V,T} = 0,8 \exp\left(-\frac{1}{2700} \frac{Q^2 L}{g d^6}\right). \tag{16}$$

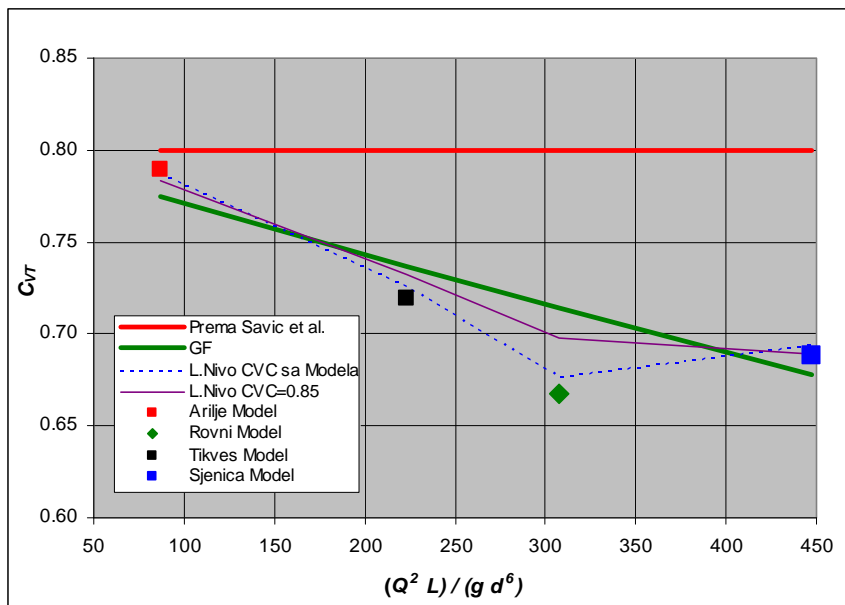
Карактеристична дужина је  $L = L_C + L_T$  (сл. 10.). Брзина у излазном пресеку рачуна се као:

$$V_T = C_{V,T} \sqrt{2g(Z_U - Z_{D,T} - h_T)}. \tag{17}$$

Запажа се добро слагање вредности коефицијента брзине добијених преко једначине (16) са резултатима моделских испитивања, као и са резултатима прорачуна линије нивоа. Ипак, потребно је образац (16) поткрепити са већим бројем узорака, да би се добила поуздана зависност. У сваком случају, сл. 12. указује на прецењеност коефицијента брзине у досадашњим изворима ([10], [11]). Треба приметити да је на свим разматраним моделима био задовољен услов  $h_T/d \leq 0,75$ , односно да утицај мањег отпора трења на објекту у односу на модел, омогућава да се овај услов испуни ([15]).



Слика 11. Коефицијент брзине у пресеку сужења иза кривине



Слика 12. Коефицијент брзине на излазном пресеку тунела

**ПРЕЛАЗНИЦЕ ДО ИЗЛАЗНОГ ДЕЛА**

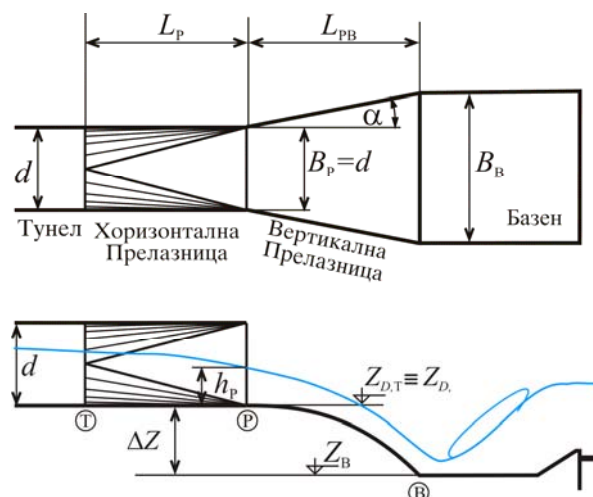
На крају тунела, пре улаза у умирујући базен (или ски одскок), вода се из кружног пресека тунела уводи у корито правоугаоног пресека. Због силовитости тока, овај прелаз је најчешће постепен и остварује се у оквиру *прелазне деонице* (обично са хоризонталним дном), дужине  $L_p = 2 \div 2,5 d$  (сл. 13.). Због мале ширине излазног пресека ( $B_p = d$ ), често је потребно раширити млаз пре упуштања у *умирујући базен*. Степен ширења корита мора бити ограничен да се не би јавили поремећаји тока и да би се млаз заиста проширио (да би заузео ширину која му је намењена). Степен ширења треба да буде ([10], [11]):

$$tg\alpha = \frac{\left(\frac{B_B}{B_P} - 1\right)^{\frac{1}{3}}}{4.5 + 2\sqrt{Fr_p}}, \tag{18}$$

где је  $Fr_p = \frac{V_p^2}{gh_p}$ , (сл. 13.)

Из једначине (18) добија се дужина *вертикалне* прелазнице према *услову постепености ширења*, као

$$L_{1B} = \frac{B_B - B_P}{2 tg\alpha}.$$

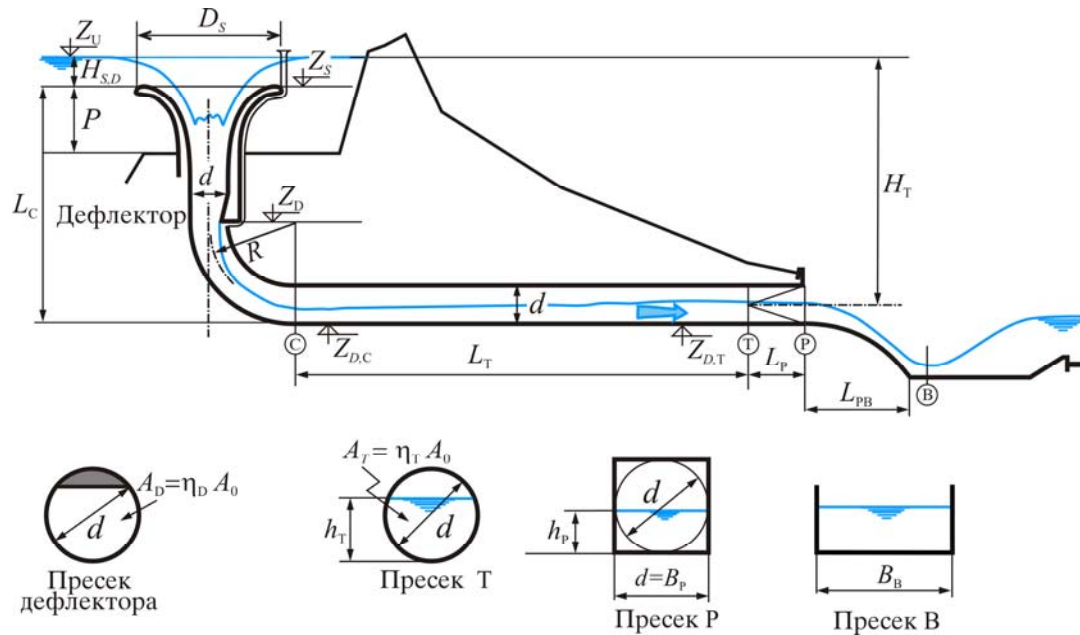


Слика 13. Прелазнице и умирујући базен шахтног прелива

С друге стране, вертикална прелазница не сме бити краћа од домета млаза, да не би дошло до вакуума. Ако се домет млаза апроксимира “олакшаном” параболом хоризонталног хица (где је гравитационо убрзање “умањено“ на  $2/3 g$ ), добија се дужина прелазнице према *услову безвакуумног течења*:

$$L_{2B} = V_p \sqrt{\frac{3\Delta Z}{g}}. \tag{19}$$

За коначну дужину прелазнице  $L_{PB}$ , усваја се већа вредност између  $L_{1B}$  и  $L_{2B}$ .



Сл. 14. Скица уз прорачун шахтног прелива

### ПОСТУПАК ЗА ХИДРАУЛИЧКО ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

Аутори предлажу следећи поступак за хидрауличко димензионисање шахтног прелива:

1. Прво се за усвојен пречник левка прелива,  $D_S$ , кота круне прелива,  $Z_S$  и рачунски протицај,  $Q$ , одреди кота горње воде  $Z_U$ , преко једначине преливања (1) и обрасца за коефицијент преливања (3), или (3').

2. Процени се пречник тунела тако што се брзина на излазу, према једначини (17) апроксимира са:

$$V_T = C_{V,T} \sqrt{2gH_T},$$

где је  $H_T \approx Z_U - Z_T - h_T =$  бруто пад од горње воде до осовине тунела у пресеку "Т" (сл. 14.), а коефицијент брзине  $C_{V,T}$ , се добија из једначине (16). Одавде се добија прва апроксимација површине тунела,  $^{(1)}A_0$ , тако да тунел на излазу буде 80% испуњен:

$$^{(1)}A_0 = \frac{1}{0,8} \frac{Q}{V_T}, \quad \text{и} \quad ^{(1)}d = \sqrt{4 \frac{^{(1)}A_0}{\pi}}.$$

3. Са овако процењеним пречником тунела, рачуна се полупречник вертикалне кривине  $^{(1)}R = (2,5 \div 3,5) ^{(1)}d$ , на основу чега се одреди кота дефлектора  $^{(1)}Z_D$ .

4. Са усвојеном котом дефлектора срачуна се нето површина пресека дефлектора,  $A_D$ , из једначине (5), а из услова да је  $\eta_D = A_D/A_0 \approx 0,8 \div 0,85$ , добије се бруто површина шахта,  $^{(2)}A_0$ , која би требало да буде једнака процењеној површини тунела  $^{(1)}A_0$  (срачунатој у тачки 2). Ако се површине  $^{(1)}A_0$  и  $^{(2)}A_0$  разликују, треба поновити поступак почевши од тачке 3.

5. Када се после неколико итерација добије пречник шахта и тунела,  $d$ , треба проверити претпоставку о степену испуњености излазног пресека (утврдити да ли је на излазу обезбеђено 20 ÷ 25% површине пресека за ваздух), па се рачуна линија нивоа између пресека дефлектора и излазног пресека "Т". У случају веће испуњености излазног пресека од дозвољених 80%, пречник тунела (и шахта) се повећава, а поступак се понавља почевши од тачке 3.

6. Димензионише се шахт, користећи једначине од (10) до (12).

7. На крају се одређује облик прелазнице ка умирујућем базену, применом једначина (18) и (19).

## ЗАКЉУЧЦИ

На основу анализе резултата са бројних моделских испитивања на шатхним преливима са сужењем изнад вертикалне кривине, могу се извести следећи закључци:

- На коефицијент преливања највише утиче однос дебљине преливног млаза и пречника преливног левка, као и облик и ширина прилазне деонице. Коефицијент преливања може се поуздано утврдити само на моделским испитивањима, с обзиром на сложен и по правилу неправилан облик прилазне деонице. Штавише, моделска испитивања омогућавају да се постигне оптимални облик прилазне деонице, према пропусној моћи.
- Установљено је да се на моделима јавља нешто већи – а тиме и повољнији коефицијент истицања у пресеку дефлектора, у односу на до сада примењивани образац. С друге стране, коефицијенти брзине у пресеку на крају вертикалне кривине и у пресеку на излазу тунела су нижи од вредности које су до сада препоручиване.
- Аутори су предложили неколико нових искуствених образаца за процену коефицијента преливања, коефицијента истицања у пресеку дефлектора, коефицијента брзине у пресеку сужења иза кривине, као и коефицијента брзине у излазном пресеку тунела.
- Такође, аутори су предложили поступак за хидрауличко димензионисање целог објекта.
- Корисно би било допунити низ експеримената, којима ће се потврдити и/или, по потреби, кориговати предложени коефицијенти истицања и брзина.

## ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 „Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и морфодинамичких параметара река и водних акумулација“.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грађевински Факултет у Београду, (1988), ”Извештај о обављеним моделским истраживањима евакуационих органа уз брану Ровни“, Београд.
- [2] Грађевински Факултет у Београду, (1971), ”Извештај о обављеним моделским истраживањима евакуационих органа бране Сјеница“, Београд.
- [3] Дашић, Т. и Батинић, Б., (1996), ”Хидрауличка анализа шатхног прелива“, Водопривреда, бр.163-164.
- [4] Ерчић, Ж., (1997), ”Високи шахтни преливи“, Водопривреда, бр.169-170.
- [5] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, (2002), ”Извештај о хидрауличким моделским испитивањима евакуационих објеката бране Ариље“, Београд.
- [6] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, (1976), ”Извештај о хидрауличким моделским испитивањима евакуационих објеката бране Бован“, Београд.
- [7] Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, (1964), ”Моделско испитивање органа за евакуацију воде бране Тиквеш“, Београд.
- [8] Капор, Р., (2011), ”Хидраулика – Друго допуњено издање“, Грађевински факултет у Београду, Београд.
- [9] Khatsuria, R.M., (2005), ”Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators”, Marcel Dekker, New York.
- [10] Савић, Љ., (2009), ”Увод у хидротехничке грађевине – Друго издање“, Грађевински факултет у Београду, Београд.
- [11] Савић, Љ., Миловановић, Б., Кузмановић, В., Коматина, Д., (2010), ”HIDROSOFT-софтверска подршка за пројектовање хидротехничких грађевина“, Грађевински факултет у Београду, Београд.
- [12] Слискиј, С.М., (1979), ”Гидравлические Расчеты Высоконапорных Гидро-технических Сооружения”, Энергија, МОСКВА.
- [13] Smith, D.C, (1995), ”Hydraulic Structures”, University of Saskatchewan.

- [14] Hajdin, G. (1979), "Two Contributions to Spillway Designing Based on Experimental Studies", Commission Internationale Des Grand Barrages, New Delhi.
- [15] Хајдин, Г. и Дмитровић, И., (1998), "Коментар о моделским истраживањима три шахтна прелива са посебним освртом на утицај хрпавости", Зборник радова са 12. саветовања Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Суботица, стр. 139 – 148.
- [16] U.S.A. Corps of Engineers, (1977), "Hydraulic Design Criteria".
- [17] USBR, (1987), UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION, "Design of Small Dams", A Water Resources Technical Publication.

## HYDRAULIC DESIGN OF MORNING GLORY SPILLWAY WITH A DEFLECTOR UPSTREAM OF THE VERTICAL BEND

by

Ljubodrag SAVIĆ, Radomir KAPOR, Vladan KUZMANOVIĆ,  
Bojan MILOVANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

### Summary

Hydraulic design of shaft spillways (morning-glory spillways) with flow deflector before the vertical bend is considered. Based on the physical hydraulic model investigations of several structures and available experience of other authors, the key features, concerning capacity of the spillway, vertical shaft and tunnel-flow are defined and discussed. New expressions for discharge and velocity coefficients have been proposed, and some

of the old ones improved. Also, a new procedure for the shaft design is proposed, including the spillway-to-shaft transition-reach definition. Finally, an algorithm for entire design procedure has been put forward.

Key words: shaft spillway, hydraulic design, discharge coefficient, velocity coefficient

Redigovano 30.08.2012.