

Хидрауличко моделирање бране са степенастим брзотоком - пример бране Сиди Насер

Роберт Љубичић¹
Филип Ђорђевић²
Будо Зиндовић³
Радомир Капор⁴
Љубодраг Савић⁵
Радмило Глишић⁶
Ивана Дмитривић⁷

АПСТРАКТ: У раду се приказују резултати хидрауличких моделских испитивања главног евакуатора бране Сиди Насер. На парцијалном моделу проверен је капацитет прелива за рачунски проток од 3708 m³/s. На моделу је проверена ефикасност дисипације степенастог брзотока и висина разделних зидова. Такође, испитана је и ефикасност рада слапишта при рачунском протоку и осетљивост његовог рада на промену нивоа доње воде. Мерењем брзине струјања ниизводно од слапишта показано је да регулисано корито није угрожено. Физичким моделом је потврђено да се пројектовано решење добро понаша за опсег испитаних протока.

Кључне речи: умирујући базен, степенести брзоток, хидродинамички притисци, PIV

Hydraulic modelling of a dam with stepped spillway – Sidi Naucer case study

ABSTRACT: This paper presents the results of hydraulic modelling of the main overflow structure of the Sidi Naucer dam. Scale-model was used to verify weir capacity and it proved to be efficient for the design flow-rate of 3708 m³/s. Model was also used to check the dissipation efficiency of the stepped spillway and proposed height of its side-walls. Also, model was used to verify the efficiency of the stilling basin as well as the sensitivity of the flow field to the change of the tail-water. The measured flow field downstream of the stilling basin indicates that there is no danger of the rip-rap erosion. The results of the scale-model showed that the efficiency of the proposed solution is satisfactory and behaves well for the range of flows.

Keywords: stilling basin, stepped spillway, hydrodynamic pressure distribution, PIV

¹ Роберт Љубичић, асистент-докторант, Грађевински факултет Београд, rljubicic@grf.bg.ac.rs

² Филип Ђорђевић, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Beograd, fdjordjevic@ephydro.com

³ Др Будо Зиндовић, доцент, Грађевински факултет Београд, bzindovic@grf.bg.ac.rs

⁴ Др Радомир Капор, редовни професор у пензији, Грађевински факултет Београд, rkapor@grf.bg.ac.rs

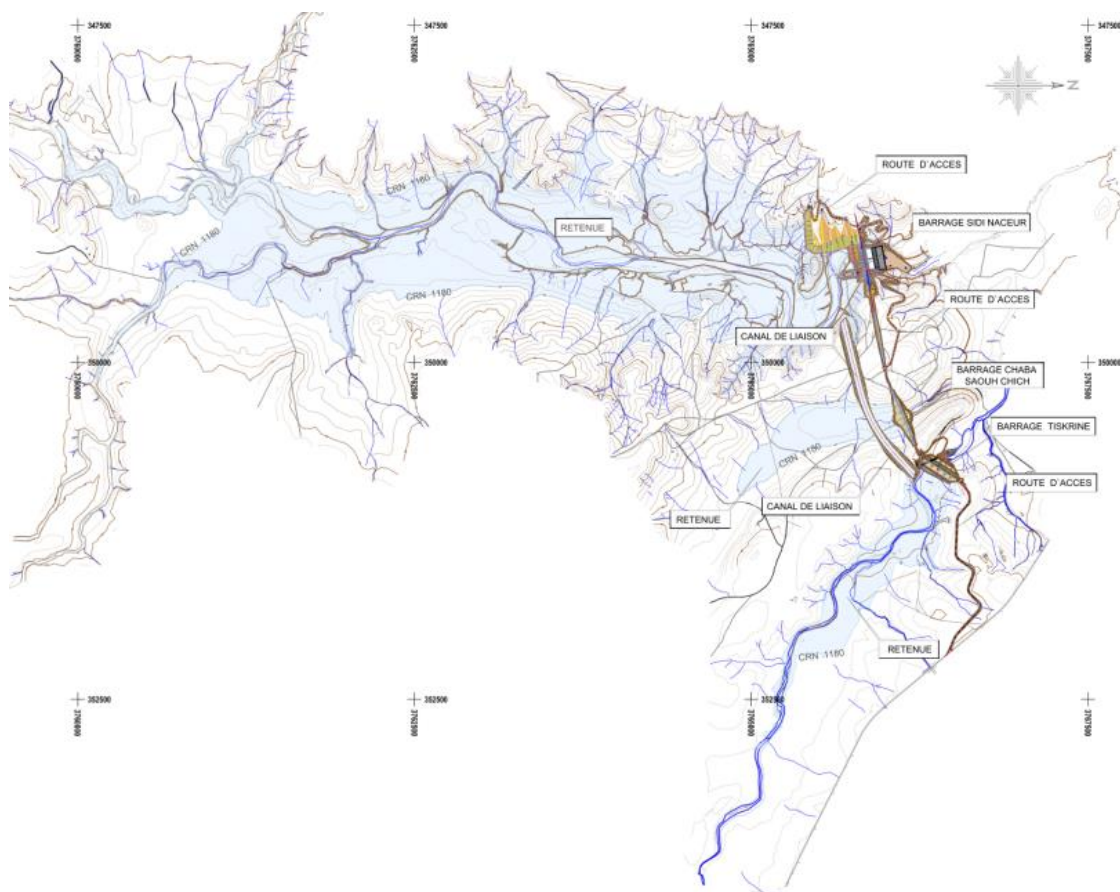
⁵ Др Љубодраг Савић, редовни професор, Грађевински факултет Београд, ljdsavic@grf.bg.ac.rs

⁶ Радмило Глишић, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Beograd, rglisic@ephydro.com

⁷ Ивана Дмитривић, Енергопројект-Хидроинжењеринг, Beograd, idmitrovic@ephydro.com

1 Увод

Акумулација Сиди Насер је вишенаменска акумулација која треба да обезбеди снабдевање пијаћом водом области Брида и Хаџ Мечри (покрајина Лагуат), као и наводњавање пољопривредног земљишта у покрајинама Лагуат и Ел Бајад. Акумулација ће се формирати изградњом објеката на три преградна профила: главне бетонске бране Сиди Насер, као и допунских насутих брана Чаба Саух Чиц и Тискрина. Акумулације које ове бране формирају су међусобно повезане каналима (Слика 1).



Слика 1. Диспозиција система три акумулације и бране: главне бране Сиди Насер и две насуте бране Чаба Саух Чиц и Тискрина.

Figure 1. The system has three reservoirs and dams: the main dam roll-crete Sidi Naucer and two earthfill dams of Chaba Sauh Chic and Tiskrine.

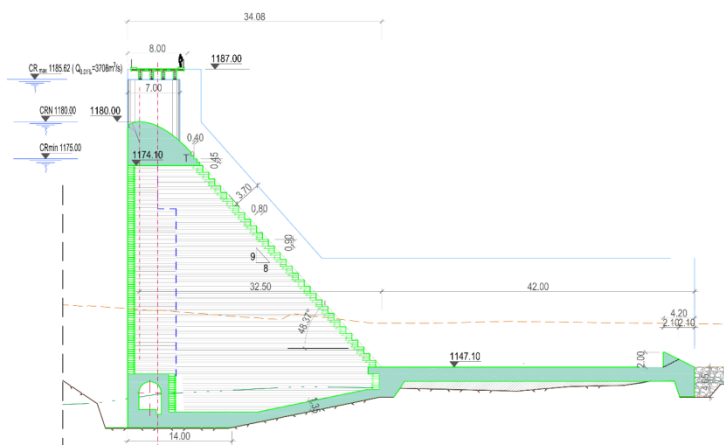
Главни евакуациони објекат система налази се у централном делу бране Сиди Насер. Имајући у виду да систем чине три повезане акумулације са три бране (главна брана Сиди Насер од ваљаног бетона и 2 додатне насуте бране), евакуатор који се налази у централном делу бетонске бране Сиди Насер штити све три бране, па је димензионисан на вршни нетрансформисани проток 10000-годишње велике воде. Преглед меродавних протока приказан је у Табели 1.

Табела 1. Меродавни протоци за преливни део бране Сиди Насер.

Table 1. Design flows for the Sidi Naucer spillway.

повратни период (год.)	проток (m^3/s)	ознака (-)
100	1321	$Q_{1\%}$
1000	2267	$Q_{0,1\%}$
10000	3708	$Q_{0,01\%}$

Главни евакуациони објекат се састоји од прелива практичног профила („USBР са вертикалним узводним лицем“), степенастог брзотока и умирујућег базена – слапишта (Слика 2). Прелив на брани је централно постављен, са 10 преливних поља ширине 13 m и круном на коти 1180 m. Мостовски стубови између преливних поља имају дебљину 2 m, па је укупна ширина прелива 148 m. Сви делови објекта су димензионисани на проток који одговара врху нетрансформисаног таласа 10000-годишње велике воде од $Q_{0,01\%} = 3708 m^3/s$. Преливна ивица је дефинисана са три исечка кружне кривине на делу узводно од круне, и параболом низводно од круне. Координате кружних кривина и једначина параболе одређени су за пројектовану (рачунску) дебљину преливног млаза од $H_R = 5,62 m$.



Слика 2. Пресек кроз преливни део бране Сиди Насер.

Figure 2. Cross-section through the Sidi Naucer dam spillway.

На низводну страну прелива надовезује се степенаста брзоток нагиба $V:H = 9:8$, што одговара нагибу низводног лица бране. Висина једног степеника брзотока износи $s = 0,9 m$. Како би се остварило да млаз постепено прелази на степенасту контуру брзотока, висина прва 4 степеника је једнака половини усвојене висине ($s/2 = 0,45 m$). Ширина брзотока је иста као и укупна ширина прелива и износи 148 m.

За умирење преливених вода низводно од брзотока предвиђено је слапиште – умирујући базен (USBР, типа II), пројектовано према препорукама из [6,10]. Ширине је, као и брзоток, 148 m, а дужине 42 m. Иза слапишта предвиђена је заштита од крупног камена, средњег пречника зрна $D_{Z,50} = 1,1 m$, дебљине слоја од $t_Z = 1,8 m$ на дужини од 28 m. Затим даље низводно, на следећих сса. 50 m такође камена облога од нешто ситнијег камена ($d_{Z,50\%} = 0,4 m$, $t_Z = 0,8 m$).

2 Методологија

2.1 Физички модел

Физички модел бране Сиди Насер изграђен је у Хидрауличкој лабораторији Института за хидротехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Због велике ширине преливне ивице, моделом је обухваћено једно преливно поље са стубом. Размера модела прелива, брзотока и умирујућег базена износила је 1:33 а модел је пројектован уз задовољење Фрудове сличности. Изведени модел приказан је на Слици 3.



Слика 3. Фотографија парцијалног модела бране Сиди Насер, у размери 1:33.

Figure 3. Scale-model of the Sidi Naucer dam spillway section. Scale of this model was 1:33.

Преливна ивица и брзоток изведени су на моделу са ширином од 45,5 cm. Дно преливне грађевине и брзотока израђени су од дрвета заштићеног епоксидним премазом. Зидови бочно од преливне грађевине и леви зид брзотока израђени су од дрвета, док је десни зид брзотока израђен од плексигласа. Низводно од брзотока постављено је призматично слапиште (умирујући базен) у каналу ширине 45,5 cm и висине зидова од 58 cm. Укупна дужина канала износила је сса. 2,8 m (од чега је слапиште сса. 1,15 m). Дно и зидови базена изведени су од плексигласа. На низводном крају канала омогућена је контрола граничног услова (нивоа доње воде) помоћу табласте уставе. По дну слапишта пројектовани су отвори за сензоре притисака. Назубљени праг („чешаљ“) на низводном крају слапишта на моделу је изведен монолитно, од дрвета заштићеног епоксидним премазом (Слика 4).



Слика 4. Низводни, назубљени праг умирујућег базена.

Figure 4. Jagged sill at the downstream end of the stilling basin.

2.2 Мерења на хидрауличком моделу

Проток воде на моделу мерен је помоћу Томсонових прелива, мерењем висине преливног млаза мерном иглом са лењиром и нонијусом (резолюције очитавања износила је 0,1 mm). Контрола мерења протока спроведена је помоћу ултразвучног протокомера. Неизвесност мерења протока у систему процењена је на $\pm 1\%$.

Висина преливног млаза на преливу физичког модела одређена је помоћу пијезометра са стакленом цеви. Мерна неизвесност очитавања висине преливног млаза помоћу пијезометра износила је $\pm 0,5$ mm.

За потребе процене нивоа воде у брзотоку коришћена је мерна игла са нонијусом, у комбинацији са техником обраде слика из видео записа добијених камером Sony RX10 M2 [4]. Снимање нивоа у брзотоку камером обављено је кроз десни зид брзотока. Положај камере у односу на зид брзотока одређен је помоћу мреже са 3 контролне тачке на десном зиду брзотока, уз коришћење познатих координата степеника самог брзотока. Мерење нивоа воде уз десни зид брзотока обављено је за седам пресека узводно од места настанка хидрауличког скока при рачунском протоку ($Q_{0,01\%}$).

Брзина струјања у слапишту одређена је помоћу particle image velocimetry (PIV) поступка према [3], уз употребу камере Sony RX10 M2 и ласера таласне дужине 520 nm. Употребом ласера за осветљавање одабране равни у подужном пресеку канала могу се идентификовати и нагласити ситне суспендоване честице у води и мехурићи ваздуха у води. Одређивањем помераја суспендованих честица (трасера) у унапред познатом интервалу времена може се одредити брзина струјања воде у одабраној равни. Алгоритам процене померања трасера у одабраној равни заснован је на window deformation iterative multigrid (WiDIM) методи [7]. Овај поступак је имплементиран у програмском пакету PIVlab [9], а развијен је у оквиру MATLAB програмског окружења.

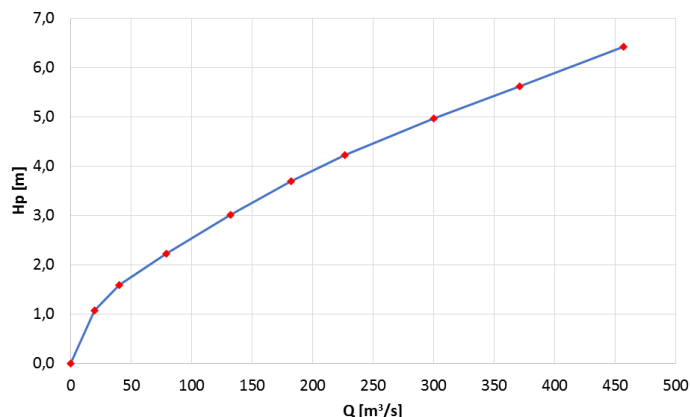
За мерење притисака коришћени су DRUCK сензори притиска, са процењеном неизвесношћу мерења $\pm 0,1\%$. За једновремено прикупљање података коришћени су аквизициони модули НВМ Quantumx. За обраду временских серија и добијање репрезентативних параметара расподеле притиска, примењени су поступци приказани у литератури [5,8].

3 Резултати хидрауличких моделских испитивања

3.1 Крива протока преко прелива

Измерена и рачунска крива протока прелива, приказане су на Слици 5. Резултати показују да је капацитет прелива добро процењен и нема потребе за изменама геометрије

пројектованог решења. Поређењем рачунске (5,62 m, вредност добијена од Пројектанта) и измерене висине преливног млаза (5,63 m), констатовано је да је постигнута задовољавајућа вредност коефицијента преливања за рачунски проток.



Слика 5. Крива протока преко прелива једног поља. Све величине су изражене за прелив прототипа.

Figure 5. Rating curve for a weir sector. Values are given for prototype weir.

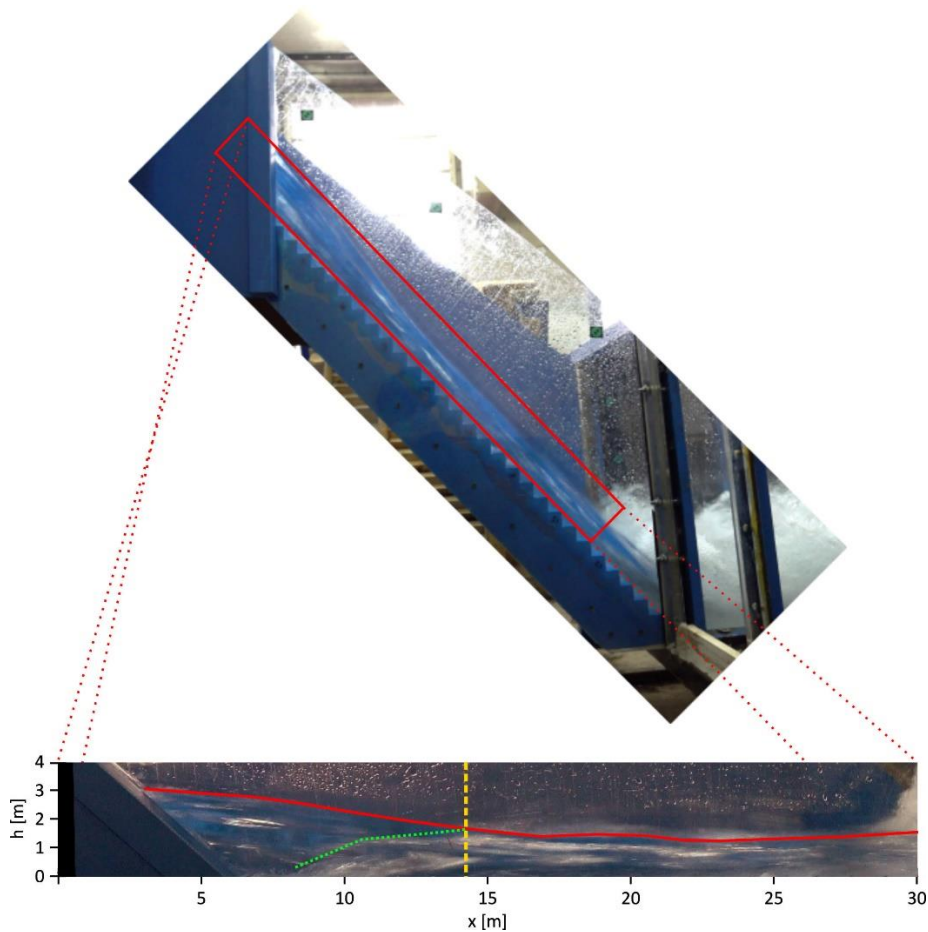
3.2 Дубине воде у степенастом брзотоку

Течење воде у степенастом брзотоку при рачунском протоку ($Q_{0,01\%}$), приказано је на Слици 6. Може се уочити да је ниво слободне површине доста стабилан, са мањим поремећајима који су очекивани за овакав тип струјања. Уочава се релативно слаб интензитет аерације, с обзиром на познати ефекат размере, па ће се измерене (осмотрене) дубине увећати преко искуствених образаца за овај тип течења [1,2]. Нивои, тј. дубине „чисте“ воде, осмотрени при рачунском протоку ($Q_{0,01\%}$) уз десни зид брзотока, као и обрачунате дубине мешавине воде и ваздуха, за различите вероватноће појаве датих или мањих вредности – перцентили, приказани су у Табели 2.

Табела 2. Дубине воде у степенастом брзотоку. Измерене неаерисане дубине h_w увећане су према емпиријским изразима из литературе [1,2] како би се добиле аерисане дубине h_{90} . Дубине $h_{50\%}$ су дубине вероватноће појаве 50%.

Table 2. Depth in the stepped spillway chute. Measured non-aerated depths h_w were used to compute bulk depths h_{90} , as proposed by [1,2]. Depths $h_{50\%}$ are depths for 50% probability.

x (m)	C (-)	дубина	$h_{50\%}$ (m)
3,3	0	h_w	3,12
6,6	0	h_w	2,87
9,9	0	h_w	2,38
13,2	0,23	h_w	1,98
		h_{90}	2,57
16,5	0,27	h_w	1,68
		h_{90}	2,31
19,8	0,30	h_w	1,58
		h_{90}	2,26
23,1	0,34	h_w	1,52
		h_{90}	2,30



Слика 6. Дубине у брзотоку изнад псеудо-дна при рачунском протоку ($Q_{0,01\%}$).

Figure 6. Depths in the spillway chute (measured perpendicular to pseudo-bottom), for design flow-rate ($Q_{0,01\%}$).

Из приказаних резултата може се закључити да је пројектована висина разделних (бочних) зидова брзотока од 3,70 m довољна да прихвати ток мешавине воде и ваздуха.

3.3 Дубине воде у слапишту

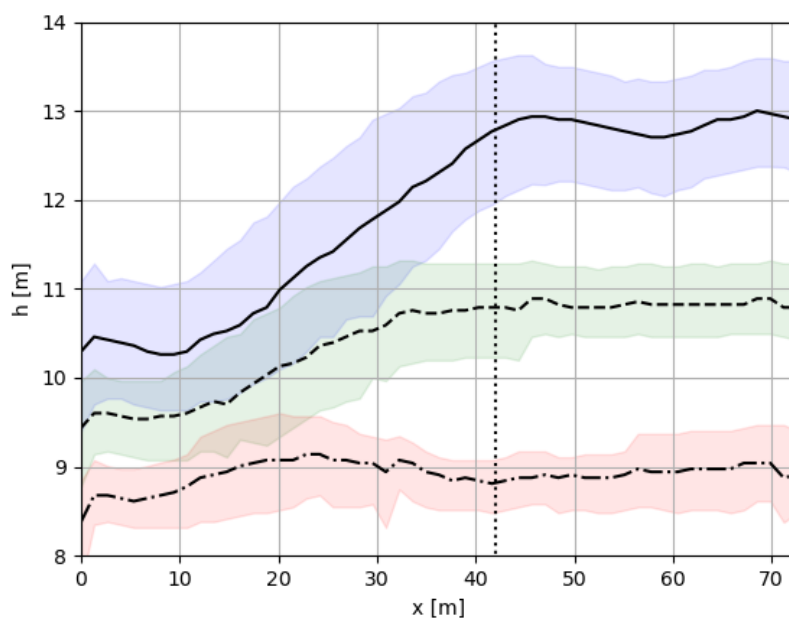
При свим разматраним протоцима ($Q_{0,01\%}$, $Q_{0,1\%}$ и $Q_{1\%}$) и одговарајућим нивоима доње воде (добијеним са криве протока доње воде), хидраулички скок је навучен (његово формирање започиње у оквирима брзотока), и цео вртложни ваљак скока остварује се унутар слапишта. Течење у слапишту је стабилно, без изразитих поремећаја низводно од излазног назубљеног прага („чешља“). Струјање воде при рачунском протоку ($Q_{0,01\%} = 3708 \text{ m}^3/\text{s}$) приказано је на Слици 7. Уочава се да је хидраулички скок навучен на брзоток, да је скок стабилан и да је постигнуто задовољавајуће умирење тока пре упуштања воде у низводну деоницу.

Дубине воде у слапишту и деоници низводно од слапишта при рачунском протоку, приказани су на Слици 8. За све испитиване вредности протока ($Q_{0,01\%}$, $Q_{0,1\%}$ и $Q_{1\%}$) хидраулички скок се задржава у слапишту и при нижим котам доње воде од оних на које је пројектован умирујући базен.



Слика 7. Дубине воде у слапишту при рачунском протоку ($Q_{0,01\%}$).

Figure 7. Depth profile in the stilling basin, measured for design flow-rate ($Q_{0,01\%}$).



Слика 8. Дубине у слапишту и делу низводне деонице при протоцима 100-, 1000- и 10000-годишње велике воде. Осенчене области означавају опсег између 5-ог и 95-ог перцентила измерених вредности дубина, док пуне црне линије представљају 50-ети перцентил. Вертикална испрекидана линија означава положај низводне границе слапишта.

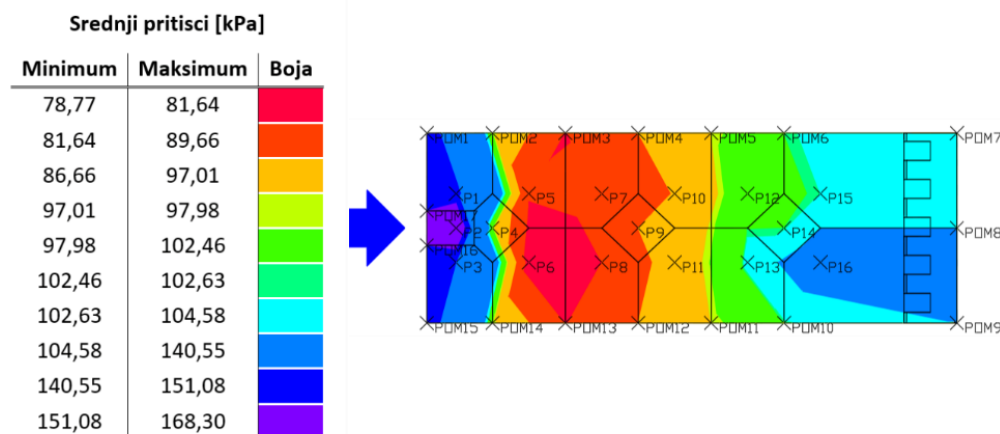
Figure 8. Depths in the stilling basin and downstream river reach, at 100-, 1000- and 10000-year floods. The shaded areas indicate the range between the 5th and 95th percentiles of measured depths, while the solid black lines represent the time-average. The vertical dashed line indicates the position of the downstream boundary of the stilling basin.

3.4 Средњи притисци и пулзације у слапишту

На Слици 9 приказан је распоред временски осредњених притисака на дно умирујућег базена. Уочава се да су највеће вредности на узводном крају. Мало низводније, на растојању од приближно 30% дужине слапишта, јавља се снижење притиска. Оба запажања могу се објаснити наглом променом правца струјања услед промене нагиба дна (са брзотока на слапиште).

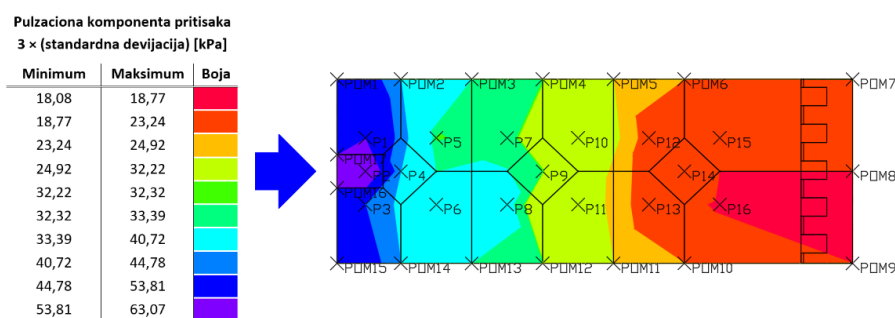
Низводно, вредности се постепено повећавају ка водотоку. Поређењем са дубинама воде у слапишту, средњи притисци су реда величине дубине воде (изражено у висини воденог стуба).

На Слици 10 приказан је распоред 3 стандардне девијације притиска на дно слапишта. Слично средњим вредностима, највеће вредности су измерене на узводном крају. За разлику од средњих вредности, девијације не указују на појаву локалних минимума већ се постепено смањују ка низводном крају.



Слика 9. Распоред временски осредњених вредности притисака на дно слапишта, при рачунском протоку.

Figure 9. Time-averaged pressure distribution on the bottom of a stilling basin, for design flow rate.



Слика 10. Распоред 3 стандардне девијације притиска на дно слапишта, при рачунском протоку.

Figure 10. Distribution of 3 standard deviation of pressure on the bottom of a stilling basin, for design flow rate.

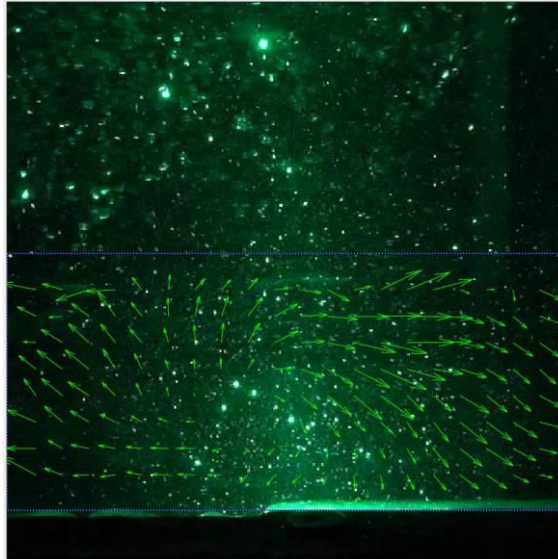
На основу приказаних дијаграма, може се закључити да у слапишту не постоји опасност од појаве потпритиска.

3.5 Брзина воде на деоници водотока низводно од слапишта

Брзине воде низводно од слапишта мерене су да би се установио карактер струјања (појава вртлога и повратног струјања), као и да би се проценио интензитет брзина при дну, што би омогућило прецизније димензионисање пројектоване камене заштите.

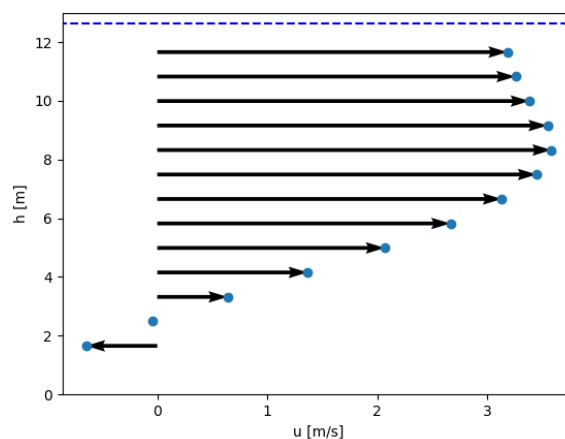
На Слици 11 приказана је визуелизација тренутног поља брзина воде при дну низводно од слапишта. Распоред временски осредњене брзине струјања приказан је на Сликама 12 и 13.

Може се уочити уобичајено повратно струјање низводно од назубљеног прага. Интензитет осредњеним вредности измерених брзина при дну варирао је у интервалу од 0,5 m/s до 1,2 m/s. Опсег измерених брзина (са урачунатим варијацијама у времену) је нешто шири и кретао се у опсегу од 0,8 m/s до 2,6 m/s. Из свега наведеног, може се закључити да не постоји опасност од оштећења камене заштите.



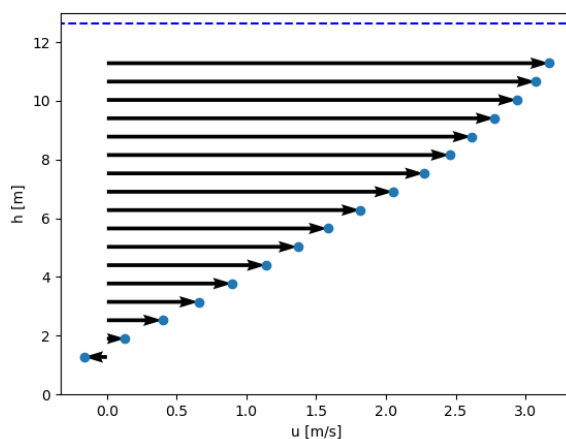
Слика 11. Визуелизација тренутног поља брзина воде низводно од слапишта. Уочава се карактеристично вртложно струјање низводно од назубљеног прага на низводном крају слапишта.

Figure 11. Visualization of the velocity field downstream of the stilling basin. A characteristic eddy is observed downstream of the jagged sill.



Слика 12. Распоред по дубини временски осредњене, хоризонталне компоненте вектора брзине у профилу 12 m низводно од слапишта. Испрекиданом линијом приказан је положај слободне површине воде.

Figure 12. Distribution of the time-averaged, horizontal component of the velocity vector in profile 12 m downstream of the stilling basin. The dashed line is the location of the free surface.



Слика 13. Распоред по дубини временски осредњене, хоризонталне компоненте вектора брзине у профилу 25 m низводно од слапишта. Испрекиданом линијом приказан је положај слободне површине воде.

Figure 13. Distribution of the time-averaged, horizontal component of the velocity vector in profile 25 m downstream of the stilling basin. The dashed line is the location of the free surface.

4 Закључци

Хидрауличка моделска испитивања на физичком моделу бране Сиди Насер спроведена су са циљем да се провере и, по потреби, побољшају услови течења у зони објекта бране. На основу извршених моделских испитивања, изведени су следећи закључци:

- Пројектовано решење прелива омогућава да се при коти максималног успора у акумулацији кроз прелив пропусти пројектовани проток 10000-годишње велике воде.
- Пројектовано решење брзотока омогућава безбедно пропуштање 10000-годишње велике воде без опасности од преливања разделних зидова.
- При свим разматраним протоцима ($Q_{0,01\%}$, $Q_{0,1\%}$ и $Q_{1\%}$) и одговарајућим нивоима доње воде течење у слапишту је стабилно, без изразитих поремећаја, а хидраулички скок је навучен (цео скок се остварује унутар слапишта). Висина разделних (бочних) зидова слапишта, за пројектовану кату доње воде, је довољна да прихвати скок без опасности од њиховог преливања. Показано је да скок остаје у слапишту при рачунском протоку и при снижењу доње воде у односу на пројектовану.
- Средња оптерећења на дно слапишта при рачунском протоку су у границама очекиваног. Средњи притисци су реда величине дубине воде у слапишту (изражено у висини воденог стуба), а пулзације су довољно мале да се не очекује појава потпритиска.
- Измерене брзине при дну низводно од слапишта показују да се при рачунском протоку од $Q_{0,01\%} = 3708 \text{ m}^3/\text{s}$ не јављају интензитети који би могли да покрену и оштете пројектовану камену заштиту.

Литература

1. Boes, R. M., Hager, W. H. (2003) Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661–670.
2. Boes, R. M., Hager, W. H. (2003) Hydraulic Design of Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671–679.

3. Lennon J. M., Hill D. F. (2006) Particle Image Velocity Measurements of Undular and Hydraulic Jumps, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 132, no. 12, pp. 1283–1294.
4. Ljubičić R., Vićanović I., Zindović B., Kapor R., Savić Lj. (2020) Image processing for hydraulic jump free-surface detection: coupled gradient/machine learning model, *Meas. Sci. Technol.*, 1:.
5. Миловановић, Б. (2018) *Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина*, докторска дисертација, Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Београд.
6. Peterka A. J. (1958) *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*, Water Resour. Tech. Publ.
7. Scarano F., Riethmuller M. L. (1999) Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset, *Exp. Fluids*, vol. 26, no. 6, pp. 513–523.
8. Spoljaric A., C. Maksimovic, G. Hajdin (1982) Unsteady Dynamic Force Due to Pressure Fluctuations and an Energy Dissipator: An Example, *International Conference on Hydraulic Modelling Structures*, Conventry.
9. Thielicke W., Stamhuis E. J. (2014) PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB, *J. Open Res. Softw.*, vol. 2.
10. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION (1987) *Design of Small Dams*, A Water Resources Technical Publication.