

## АНАЛИЗА УЧЕСТАЛОСТИ И ТРАЈАЊА УЗОРКОВАЊА ХИДРОДИНАМИЧКОГ ОПТЕРЕЂЕЊА НА ФИЗИЧКИМ МОДЕЛИМА

Јована Јосиповић<sup>1</sup>

Бојан Миловановић<sup>2</sup>

Владан Кузмановић<sup>3</sup>

Радомир Капор<sup>4</sup>

Љубодраг Савић<sup>5</sup>

Будо Зиндовић<sup>6</sup>

УДК: 627.132 : 532.51

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.071

**Резиме:** У раду се анализира осетљивост резултата мерења на физичком моделу у зависности од учесталости и трајања узорковања. За потребе истраживања коришћени су подаци мерења на физичким моделима умирујућег базена, која су вршена у хидрауличким лабораторијама Завода за хидраулику Института за водопривреду „Јарослав Черни“ и Грађевинског факултета Универзитета у Београду. На основу спроведеног истраживања усвојен је план оптимизације мерења за наредне диспозиције физичког модела.

**Кључне речи:** учесталост узорковања, трајање узорковања, хидродинамички притисак, флукуација, умирујући базен

### 1. УВОД

Слапиште (умирујући базен), у коме се ствара вртложни ваљак хидрауличног скока, је један од најчешће коришћених типова умиривача енергије. Хидраулички скок у слапишту представља нагли прелаз из бурног у мирно струјање воде, праћен знатним расипањем кинетичке енергије тока, због образовања снажног вртложног

<sup>1</sup> Јована Јосиповић, дипл. инж. грађ., е – mail: [josipovicjovanabb@gmail.com](mailto:josipovicjovanabb@gmail.com)

<sup>2</sup> Бојан Миловановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, тел: 011 32 18 556, е – mail: [bojanmil@mts.rs](mailto:bojanmil@mts.rs)

<sup>3</sup> Проф. др Владан Кузмановић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, тел: 011 32 18 556, е – mail: [vladak@grf.bg.ac.rs](mailto:vladak@grf.bg.ac.rs)

<sup>4</sup> Проф. др Радомир Капор, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, тел: 011 32 18 530, е – mail: [rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs](mailto:rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs)

<sup>5</sup> Проф. др Љубодраг Савић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, тел: 011 32 18 556, е – mail: [ljsavic@grf.bg.ac.rs](mailto:ljsavic@grf.bg.ac.rs)

<sup>6</sup> Будо Зиндовић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Београду - Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, тел: 011 32 18 530, е – mail: [bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs](mailto:bzindovic@hikom.grf.bg.ac.rs)

струјања. Одлика овог процеса су и флукуације (пулзације) притисака, посебно изражене на плочама дна, бочним зидовима и осталим бетонским елементима базена [1].

У циљу испитивања хидродинамичких оптерећења која се јављају у умирујућем базену, спроведена су испитивања на физичим моделима са више различитих диспозиција. Истраживања су најпре вршена у Заводу за хидраулику Института „Јарослав Черни“ на хидрауличком моделу бране Бузина (Модел Бузина), а затим су настављена у Хидрауличкој лабораторији Грађевинског факултета у Београду на физичком моделу са променљивом геометријом (ГФ модел).

Већ у првој фази ових истраживања појавио се проблем складиштења и анализе веома дугачких низова података, па се приступило анализи осетљивости резултата мерења у зависности од учесталости и трајања узорковања.

## 2. ОПИС МОДЕЛА

Хидраулички модел бране Бузина израђен је у размери за дужине 1:40 [4]. Брана је од ваљаног бетона, висине 76,5 m. Прелив са пет преливних поља је практичног профила, ширине 81 m и димензионисан је на проток  $Q_{0,1\%} = 1320 \text{ m}^3/\text{s}$ . Низводно од прелива пројектован је степенести брзоток, нагиба 9:8, са висином степеника од 90 cm. Брзоток је непризматичан и сужава се на ширину од 55 m на низводном крају. На брзоток се наставља призматично бетонско слапиште.



Слика 1 Хидраулички модел бране „Бузина“

Димензије физичког ГФ модела (слика 2) изабране су у складу са техничким условима хидрауличке лабораторије Грађевинског факултета. Модел је предвиђен за испитивање течења у степенастом брзотоку и умирујућем базену, за различите геометријске односе. Варијанти су: висина модела, степен сужења брзотока, висина степеника, проток и дубина доње воде.

Хидраулички модел обухвата резервоар, прелив, степенаст брзоток и умирујући базен. Капацитет резервоара износи  $4,25 \text{ m}^3$ . Прелив је слободни чеони, практичног профила и састоји се од једног преливног поља ширине  $98,5 \text{ cm}$ . Прелив је димензионисан на проток од  $100 \text{ l/s}$ . Брзоток је степенаст и непризматичан. Подужни нагиб дна брзотока је  $1:1$ . Ширина на улазу у брзоток је  $98,5 \text{ cm}$ , док је излазна ширина променљива. Брзоток се састоји од степеника, чија висина зависи од разматране диспозиције.

Умирујући базен је призматичан, променљиве ширине и константне дужине од  $250,0 \text{ cm}$ . Низводни гранични услов се, као и на Моделу Бузина, задаје постављањем дрвених летви у предвиђене жлебове.



Слика 2 Умирујући базен на ГФ моделу

### 3. МЕРЕЊА НА ХИДРАУЛИЧКОМ МОДЕЛУ

Програм испитивања на моделима обухватио је мерења и анализу великог броја карактеристичних величина ради што бољег сагледавања сложених услова течења. Притисци су мерени у дну и на зиду слапишта, при различитим геометријама, као и при различитим хидрауличким условима. При свим диспозицијама, за мерење притиска коришћене су сонде произвођача „DRUCK“, са тачношћу од  $\pm 0,1\%$ . Број сонди је варирао од 12 до 18. За синхрону аквизицију података коришћени су аквизициони уређаји „НВМ Quantumx“.

На тачност добијених резултата за укупне хидродинамичке силе, највећи утицај су имали проток и ниво доње воде. Мерна инсталација није пружала техничке могућности да се оствари прецизност мерења већа од  $1\%$ . У првој фази истраживања, на Моделу Бузина, мерења на свим диспозицијама су трајала по  $\Delta t_0 = 500 \text{ s}$ , док је учесталост узорковања износила  $f_0 = 200 \text{ Hz}$ . Како су на ГФ

моделу предвиђена сложенија и обимнија мерења, јавила се потреба за оптимизацијом.

#### 4. ОСНОВЕ ЗА ПРОЦЕНУ ХИДРОДИНАМИЧКОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

За процену карактеристика хидродинамичког оптерећења у слапишту примењен је стандардни поступак анализе, детаљно приказан у [1], [2] и [3].

Тренутна вредност притиска у некој тачки,  $p$ , може се приказати као збир средње вредности притиска,  $\bar{p}$ , и његове флукуације,  $p'$ :

$$p = \bar{p} + p' . \quad (1)$$

Средња вредност притиска дефинише се као:

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt , \quad (2)$$

где је  $T$  укупно време узорковања.

Показатељ развијености флукуација је средње квадратно одступање,  $\sigma$ , које је одређено као:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (p - \bar{p})^2 \cdot dt} , \quad (3)$$

и представља квадратни корен из варијансе:

$$\sigma = \sqrt{\overline{p'^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p'^2 \cdot dt} . \quad (4)$$

За практичне потребе меродавни су највећа и најмања вредност притиска. Велики број истраживања показао је да се функција густине вероватноће за притиске може добро апроксимирати нормалном расподелом:

$$f_n\left(\frac{p}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{p/\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{p^2}{\sigma^2}} \cdot d\left(\frac{p}{\sigma}\right) . \quad (5)$$

Са усвојеном нормалном расподелом, максималне и минималне вредности пулзације притиска могу се дефинисати као:

$$p'_{max} = -p'_{min} = k \cdot \sqrt{\overline{p'^2}} , \quad (6)$$

где је  $k$  коефицијент који зависи од вероватноће појаве. Обично се усваја  $k=3,2$  за притисак вероватноће појаве 99,9 %, што значи да ће овако добијени притисак бити превазиђен само у 0,1 % времена.

## 5. УТИЦАЈ НАЧИНА УЗОРКОВАЊА НА РЕЗУЛТАТЕ МЕРЕЊА

Анализа је рађена са нивовима података са Модела Бузина. На основу усвојених модификација узорковања (скраћено трајање  $\Delta t < \Delta t_0$  и редуција учесталости узорковања  $f < f_0$ ), одређени су одговарајући хидродинамички утицаји, укупна сила од средњих притисака  $F_{sr}(\Delta t, f)$ , и укупна пулзациона сила  $F_{\sigma}(\Delta t, f)$ . Утицаји су упоређивани са одговарајућим вредностима  $F_{sr}(\Delta t_0, f_0)$  и  $F_{\sigma}(\Delta t_0, f_0)$  добијеним на основу комплетних низова података, тако што су одређена релативна одступања:

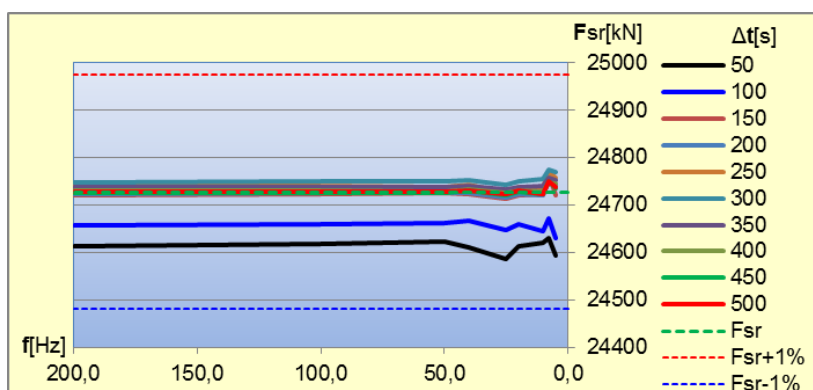
$$\delta F_{sr}(\Delta t, f) = \frac{|F_{sr}(\Delta t_0, f_0) - F_{sr}(\Delta t, f)|}{F_{sr}(\Delta t_0, f_0)}, \quad (7)$$

$$\delta F_{\sigma}(\Delta t, f) = \frac{|F_{\sigma}(\Delta t_0, f_0) - F_{\sigma}(\Delta t, f)|}{F_{sr}(\Delta t_0, f_0)}. \quad (8)$$

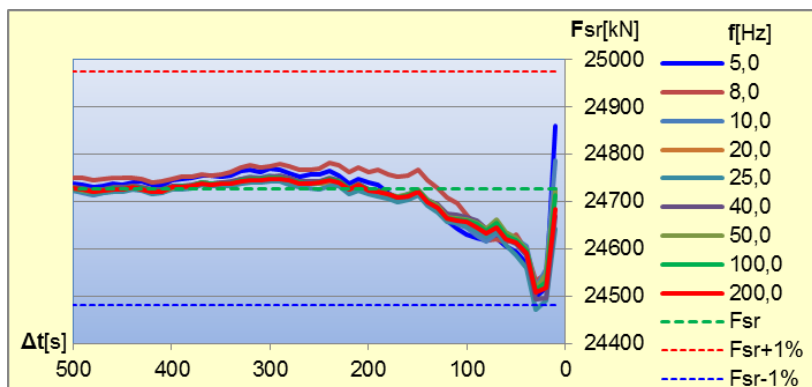
Такође, посматран је и услов "нормалности" расподеле модификованих низова,  $n_{\%}(\Delta t, f)$  у циљу провере оправданости прорачунске претпоставке. Нормалност расподеле је квантификована процентом поклапања броја података у 20 класа (подинтервала) домена мерења, са теоријским вредностима добијеним према изразу (5).

## 6. РЕЗУЛТАТИ

Анализом вредности силе од средњих притисака, у зависности од трајања и учесталости узорковања, добијена је прилично униформна вредност за све интервале мерења дуже од 100 s, и све учесталости веће од 25 Hz (слика 3 и 4).

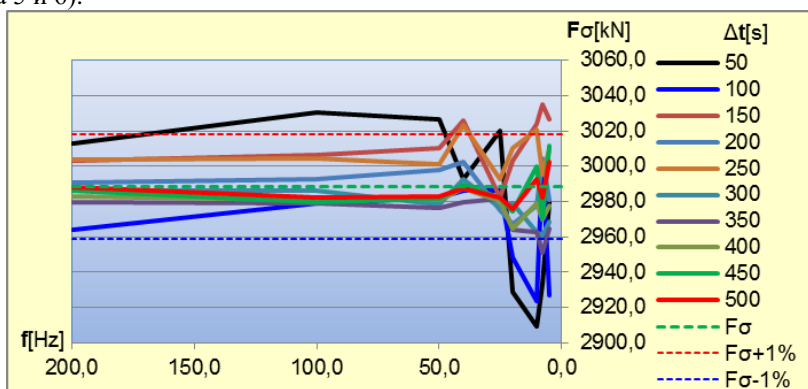


Слика 3  $F_{sr}(f)$ , са параметром  $\Delta t$

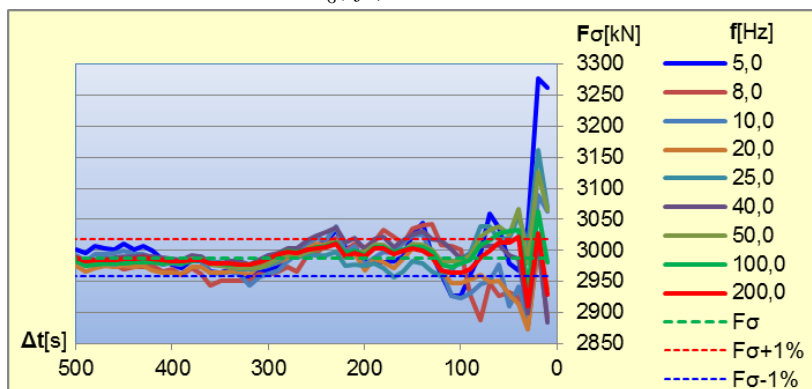


Слика 4 Сила  $F_{sr}(\Delta t)$ , са параметром  $f$

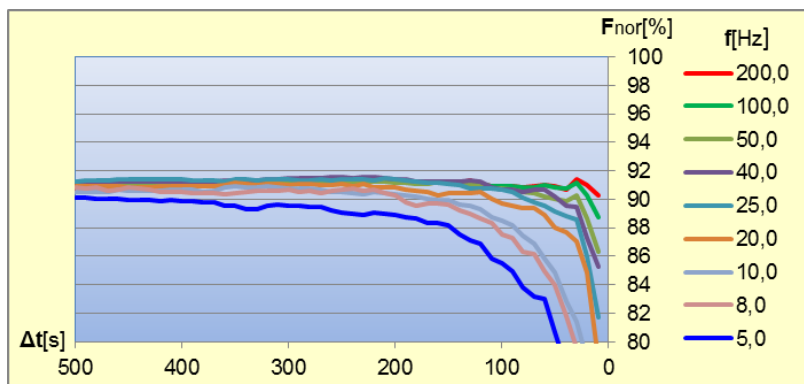
Може се приметити да су сва одступања у границама тачности за мерну инсталацију ( $F_{sr} \pm 1\%$ ). При прорачуну силе од пулзација добијено је значајно расипање резултата код мерења краћих од 120 s и за учесталости мање од 50 Hz (слика 5 и 6).



Слика 5  $F_{\sigma}(f)$ , са параметром  $\Delta t$



Слика 6 Сила  $F_{\sigma}(\Delta t)$ , са параметром  $f$

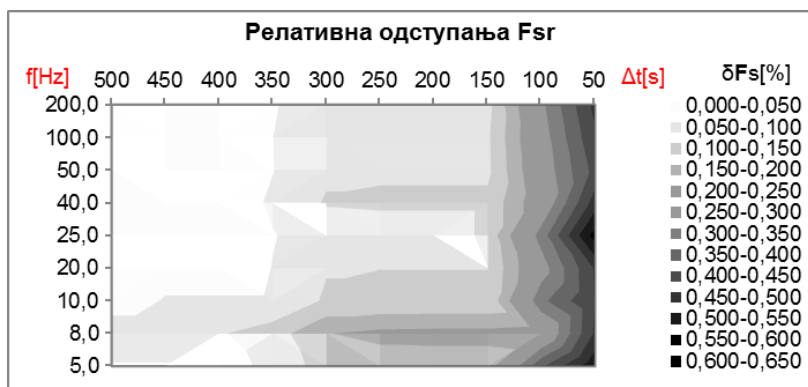


Слика 7 Поклапање расподеле података у низу са нормалном расподелом

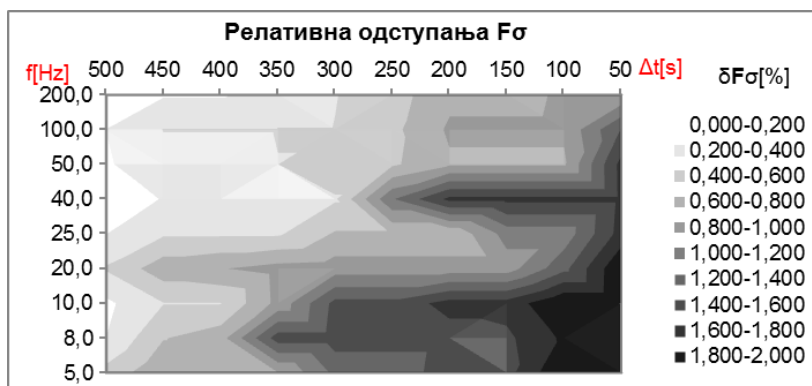
При анализи нормалности расподеле података у редукованим низовима уочава се да она пре свега зависи од броја података ( $n = \Delta t \cdot f$ ) и да се добро слаже са теоријским вредностима за нормалну расподелу (слика 7).

Већа осетљивост, добијена у случају анализе сила услед пулзација, је очекивана, јер су оне за ред величине мање него одговарајуће силе од средњих притисака, док су мерна опрема, техника мерења и тачност поступка исти. На основу тога, закључено је да ће се најзахтевнији услови (по питању трајања и учесталости узорковања) добити за диспозиције мерења код којих се очекују најмање вредности хидродинамичких утицаја.

Резултати обављене анализе се најбоље могу сагледати приказивањем релативних одступања резултујућих сила и нормалности расподеле у испитиваном "простору мерења" (трајање,  $\Delta t$  и фреквенција,  $f$ ).



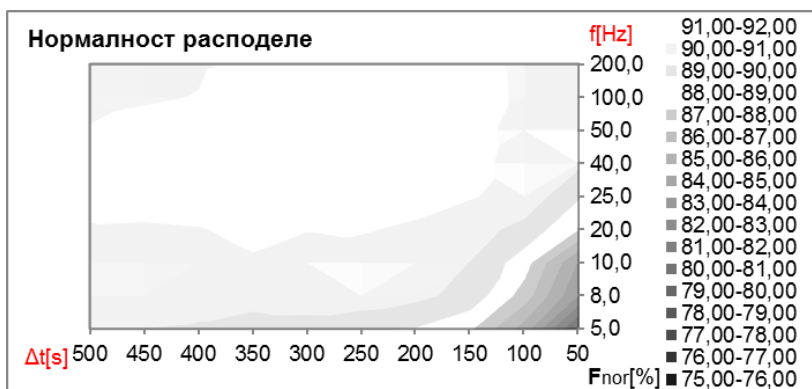
Слика 8 Релативна одступања силе од средњих притисака у "простору мерења"



Слика 9 Релативна одступања силе од пулзација у "простору мерења"

На основу расподеле релативних одступања, како силе од средњих притисака (слика 8), тако и силе од пулзација (слика 9), могу се уочити учесталости код којих оне изразито расту. Ове учесталости су карактеристичне за сваку диспозицију мерења и у спроведеној анализи све су ниже од 100 Hz.

По питању нормалности расподеле измерених вредности, на слици 10 се може уочити да је на највећем делу простора мерења, слагање са нормалном расподелом око 90 %.



Слика 10 Слагање расподеле измерених вредности са нормалном расподелом

Такође се може приметити како се нормалност расподеле значајно нарушава тек када број података мерења падне испод 1000. Дакле, по овом критеријуму нема опасности да буду нарушене претпоставке прорачуна хидродинамичких сила.



### 7. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе резултата добијених са модификованим нивовима мерних података може се закључити:

- Сила од средњих притисака није осетљива на смањење броја података у мерном низу, како скраћивањем трајања, тако и смањењем учесталости узорковања.
- Сила од пулзација не може се прецизно одредити ако су интервали мерења краћи од 120 s и учесталости мање од 50 Hz .
- За одређене учесталости узорковања, које су карактеристика за одређену диспозицију мерења, постоје знатна расипања добијених резултата.
- Поклапање расподеле података у модификованим нивовима са теоријском нормалном расподелом је прихватљиво за све нивове који имају више од 1000 мерних вредности.

Ако се као циљ анализе постави усвајање трајања и учесталости узорковања која неће давати релативно одступање резултата веће од тачности мерне инсталације, могуће је значајно смањење, простора за складиштење података, трајање мерења и обраде резултата.

Међутим, због могућности да се при одређеним учесталостима узорковања појави значајна непрецизност при одређивању одговарајућих хидродинамичких утицаја, не препоручује се битна редукција мерних података по овом критеријуму.

На основу приказане анализе, водећи рачуна о односу трајања узорковања и времена потребног за припрему модела (постављање и повезивање сонди, као и задавања хидрауличких услова, протока и дубине доње воде), усвојено је да се мерења на ГФ моделу наставе са учесталости узорковања од 200 Hz, док је трајање узорковања скраћено са 500 s (на Моделу Бузина) на 120 s.

### ЗАХВАЉИВАЊЕ

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Савић, Љ., *Увод у хидротехничке грађевине*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, **2009**.
- [2] Хајдин, Г., *Прилози за процену флукуационог оптерећења на граничне површине флуидне струје – на основу измерених притисака у неколико тачака површине*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож, **1982**.
- [3] Мушкатиновић, Ј., Јовић, С., *Анализа хидродинамичког оптерећења слапшита преливне бране*, VIII саветовање Југословенског друштва за хидрауличка истраживања, Порторож, **1982**.

- [4] Старицац, Д., *Хидрауличка моделска испитивања бране Бузина – Коначни извештај*, Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, **2013**.
- [5] Миловановић, Б., *Истраживања при изради докторске дисертације под насловом: "Хидродинамички утицаји на евакуационе објекте хидротехничких грађевина* , Београд, **2016**.

## FREQUENCY AND DURATION OF HYDRODYNAMIC-LOAD SAMPLING IN THE STILLING BASIN

*Summary:* Sensitivity of the hydrodynamic-load measurements on physical models depending on the sampling frequency and duration is considered. The hydrodynamic-load data were obtained from the stilling basin physical models at the hydraulic laboratories of "Jaroslav Cerni" Water Resources Institute, and Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade. Based on the results of this research, an optimization strategy for the future experiments is proposed.

**Keywords:** sampling frequency, duration of sampling, hydrodynamic load, fluctuations, stilling basin