

## НЕИЗВЕСНОСТИ У РЕЗУЛТАТИМА ХИДРОМЕТРИЈСКИХ МЕРЕЊА ПРОТОКА

Иван Станушић<sup>1</sup>  
Драгутин Павловић<sup>2</sup>  
Јасна Плавшић<sup>3</sup>

УДК: 532.57

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2015.069

**Резиме:** Мерења протока на мерним профилима водотока основа су за формирање кривих протока те имају суштински значај на хидролошке, хидрауличке и хидротехничке анализе. Неизвесност садржана у хидрометријским мерењима протока је последица многобројних узрока – врсте мерног уређаја, избора методе, параметара и начина извођења и коначно прорачуна. У раду се даје и осврт на појам неизвесности како у општем смислу тако и у области хидрометријског мерења протока методом брзина-површина. Дефиниције и изрази за оцену неизвесности дати су по ISO стандарду са освртом на област мерења протока по упутствима WMO. Конкретни прорачуни су приказани за хидрометријске станице Бајина Бајина (река Дрина), Сремска Митровица (река Сава) и Пријепо-ље (река Лим).

**Кључне речи:** неизвесност, хидрометријско мерење, брзина-површина, проток

### 1. УВОД

Хидрометријска мерења, мерења протока на мерном профилу водотока, основ су за формирање кривих протока. Због тога су значајна за следствене хидролошке, хидрауличке и хидротехничке анализе које користе трансформацијом осматрених нивограма податке о карактеристичним протоцима и протеклим запреминама воде. Резултати мерења садрже одступања од праве (а непознате) вредности протока - под утицајем су неизвесности мерења. Неизвесности имају многе узроке - тип мерног уређаја, методе и начина извођења мерења и коначно прорачуна протока. Готово комплетан фонд хидрометријских мерења у Србији добијен је употребом хидрометријских крила као мерних уређаја. У последњој декади као главни мерни уређај се уводи ултразвучно мерило протока типа ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Мерења ADCP-ом су бржа, поузданија и безбеднија - могуће је лакше мерење протока поплавних таласа што је са хидрометријским крилом ризично. У наредним поглављима, дат је приказ појма неизвесности и основне релације с

<sup>1</sup> Иван Станушић, дипл.инж.грађ., студент мастер студија, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија (УБ-ГФ), е-mail: [ivan@gmail.com](mailto:ivan@gmail.com)

<sup>2</sup> Доц.др. Драгутин Павловић, дипл.инж.грађ., УБ-ГФ, е-mail: [epavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs](mailto:epavlovd@hikom.grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup> Доц.др. Јасна Плавшић, дипл.инж.грађ., УБ-ГФ, е-mail: [jplavsic@grf.bg.ac.rs](mailto:jplavsic@grf.bg.ac.rs)

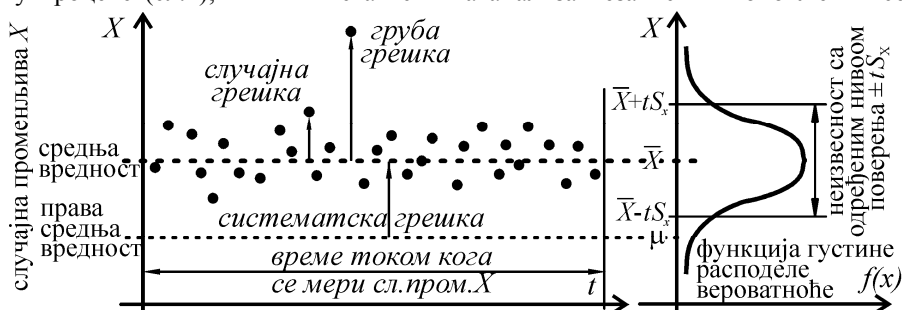
њим у вези, уз осврт на неизвесности у мерењима брзине воде хидрометријским крилом и одређивању протока методом брзина-површина; начином на који је формирана готово комплетана досадашња база хидрометријских мерења у Србији.

## 2. НЕИЗВЕСНОСТ, ПОЈМОВИ И ИЗРАЗИ

Неизвесности су утицаји на мерења/прорачуне која спроводимо и доводе до тога да је измерена/израчуната величина оцена тачне а непознате вредности. Анализа неизвесности је скуп метода које процењују област око мерене/рачунске вредности унутар које ће се наћи стварна вредност, а са изабраним нивоом поверења [1]. Неизвесност је последица разноврсности и сложености физичких појава, као и грешака у осматрању и моделирању.

Многи подухвати у хидротехници се спровode без осврта на неизвесност. За то постоје многи разлози [2], међу којима је и недостатак јасно дефинисане терминологије и одговарајућег систематског приступа процене неизвесности.

Међународно признати скуп смерница за анализу неизвесности је „GUM - Guide to Expression of Uncertainty in Measurement” [1], под окриљем Међународне организације за стандарде (ISO). Он доноси нову терминологију и класификације, уз премису да се не прави разлика између компонената неизвесности према томе да ли су случајне или систематске. Уводи се нова класификација неизвесности – према начину процене (сл.1); Тип А – статистичка анализа независних поновљених серија



Слика 1. Неизвесности величине  $X$  – основни појмови.

осматрања, Тип Б – друге методе. Оба типа се базирају на расподели вероватноће, са стандардном девијацијом као мером. Тип А користи функцију расподеле вероватноће поновљених серија осматрања, тип Б претпостављену пасподелу. Прави се разлика између грешке и неизвесности. Грешка мерења је разлика мерене вредности и просечне вредности која замењује непознату праву вредност. Неизвесност је процена те грешке. Ни права ни мерена вредност нису познате због постојања случајних и систематских грешака.

Хидротехничке анализе полазе од протока добијених из осматрања водостаја. Почетне неизвесности су од хидрометријских мерења и овде ће се касније описати. Следеће су неизвесност у кривама протока о којима овде неће бити речи. Сада следи прика појма неизвесности и методе за њену оцену по ISO стандарду [1].

Циљ мерења је утврђивање мерне вредности неке физичке величине. Измерена вредност  $x$  је апроксимација праве (непознате) вредности  $X$ .

$$X = x \pm U \quad (1)$$

Оцену тачне вредности добијамо рачунањем неизвесности  $U$ , коју дефинишемо као интервал унутар којег ће се наћи тачна вредност са одређеним, изабраним, нивоом поверења  $\beta$  (стандардно 90% или 95%). У већини случајева  $X$  се не мери директно, већ преко  $N$  других мерених величина, тј. компонената  $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)[1]$ .

$$X = f(Y) = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_N) \quad (2)$$

Веза  $f$  може бити експлицитна али и веома сложена – експериментална или нумеричка. Она је битна јер све мерне величине доприносе укупној неизвесности мерења. Компоненте могу бити добијене директно - из једног мерења или поновљених осматрања или индиректно – искуствено, из приручника односно стандарда. Процену величине  $X$ , коју означавамо са  $x$ , добијамо проценом вредности  $y=(y_1, y_2, \dots, y_N)$  компонената  $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_N)$ :

$$x = f(y) = f(y_1, y_2, \dots, y_N) \quad (3)$$

Мера неизвесности компонената  $y_i$  је стандардна неизвесност  $u(y_i)$  и добијају се на основу расподеле вероватноће величина  $Y_i$ . За неизвесност типа А расподела је емпиријска, заснована на статистичкој анализи поновљених осматрања, једнака је стандардној девијацији,  $u(y_i)=S(\bar{Y}_i)$ . За тип Б расподела је претпостављена па се из ње рачуна  $u(y_i)$ . Неизвесност оцене резултата мерења  $x$  је комбинована стандардна неизвесност  $u_c(x)$ . Даље се кориси ознака  $Y$  тј.  $y$ , било да је у питању само једна или више компонената које се директно мере ради одређивања  $X$ .

Расипање података хидролошких мерења око средње вредности мери се стандардном девијацијом  $S_X$ . Она је бројна мера неизвесности - компоненте неизвесности се изражавају преко стандардне девијације (или стандардне неизвесности односно стандардне грешке, што су синоними). Други показатељ неизвесности је стандардна девијација средине  $S_{\bar{X}}$  као оцена неизвесности аритметичке средине (4,5).

$$S_X = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 / (N - 1)}, \quad S_{\bar{X}} = S_X / \sqrt{N}, \quad (4), (5)$$

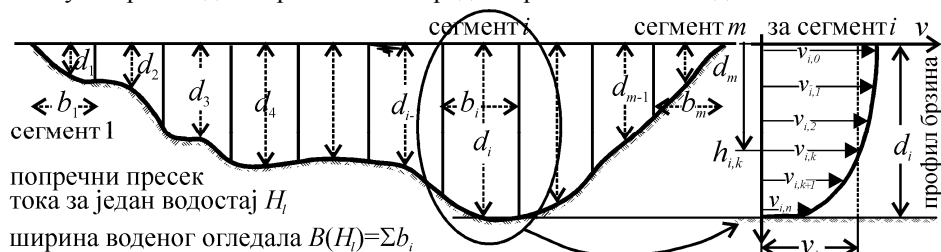
где су:  $N$  - број осматрања,  $S_X$  - стандардна девијација осматране величине,  $\bar{X}$  - аритметичка средина осматрања величине  $X$ ,  $S_{\bar{X}}$  - стандардна девијација средине.

Ниво поверења  $\beta$  је опсег који обухватају границе поверења оцене. Често се уводи претпоставка нормалне расподеле одступања величине  $X$  око средње вредности. За мањи обим мерења може се усвојити Студентова  $T$  расподела (на слици 1 ниво поверења  $\beta$  је исказан преко производа стандардне девијације  $S_X$  и одговарајуће вредности студентове променљиве  $t=t((1-\beta)/2)$ .

### 3. НЕИЗВЕСНОСТ ХИДРОМЕТРИЈСКИХ МЕРЕЊА – МЕТОДА БРЗИНА-ПОВРШИНА (ХМ-МБП)

Брзина-површина је метода одређивања протока мерењем брзине воде у низу тачака попречног пресека. Практична процедура подразумева избор одређеног броја вертикала као и броја и положаја тачака где се мери брзина (слика 2). Проток

крзопречни пресек (за један водостај) добија се интеграцијом поља брзина. У реалним хидрометријским мерењима пресек је сегментираан, а проток  $Q$  се добија као сума производа површине  $b_i d_i$  и средње брзине  $\bar{v}_i$  сваког од сегмента  $i$ .



Слика 2. Хидрометријско мерење – метода брзина-површина.

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i d_i \bar{v}_i \quad (6)$$

где су  $b_i, d_i$  и  $m$  редом ширина сегмента вертикале  $i$ , њена дубина и број вертикала. Методологија за оцену неизвесности хидрометријских мерења која се даље приказује одговара методологији описаној у [3], [4] и [5].

Комбинована стандардна неизвесност ( $KCH$ ) код методе брзина-површина је корен суме квадрата стандардних неизвесности ( $CH$ ) појединих компоненти

$$U_c(Q) = \sqrt{u_m^2 + u_s^2 + \sum_{i=1}^m [(b_i d_i \bar{v}_i)^2 (u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{\bar{v},i}^2)] / \sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)^2}. \quad (7)$$

У изразу (7) су наведене релативне стандардне неизвесности ( $PCH$ ) и то:  $u_c(Q)$  комбинована за проток по методи брзина-површина,  $u_{b,i}$  мерења  $b_i$ ,  $u_{d,i}$  мерења дубине  $d_i$ ,  $u_{\bar{v},i}$  мерења  $\bar{v}_i$ ,  $u_s$  услед особина мерних уређаја и  $u_m$  ограниченог броја вертикала. Неизвесност услед грешака које настају коришћењем уређаја за мерење је:

$$u_s = \sqrt{u_{cs}^2 + u_{bs}^2 + u_{ds}^2} \quad (8)$$

где индекси  $cs$ ,  $bs$  и  $ds$  означавају редом релативне неизвесности ( $PH$ ) услед грешака калибрације хидрометријског крила и инструмената за мерење ширине и дубине. Пракса показује да је  $u_s$  приближно 1% [3].  $PCH$  услед одређивања  $\bar{v}_i$  је:

$$u_{\bar{v},i} = \sqrt{u_{p,i}^2 + (u_{c,s}^2 + u_{e,s}^2) / n_i} \quad (9)$$

где је  $i$  индекс вертикале,  $n_i$  број мерних тачака у вертикали  $i$ , а индекси  $p, i, c, i$  и  $e, i$   $PH$  у мерењу средње брзине услед редом а) броја тачака по вертикали  $i$ , б) употребе хидрометријског крила и да ли се мерења понављају и ц) неустаљености тока, тачке у којој се мери брзина и трајања мерења. Ако се мерења врше да су протоци по сегментима приближно једнаки, израз (7) се упрошћава у облик (10) где се компоненте неизвесности односе на цео попречни пресек

$$U_c(Q) = \sqrt{u_m^2 + u_s^2 + [u_b^2 + u_d^2 + u_p^2 + (u_b^2 + u_b^2) / n] / m}. \quad (10)$$

Према [3], за више од 20 вертикала, разлика у  $U_c(Q)$  према (7) и (10) износи до 7% што је задовољавајуће ако се не захтева велика тачност.  $KCH$  из истих израза одговара интервалу поверења 68%. Интервалу поверења од 95% одговара  $2U_c(Q)$ .

Значајно је да се повећањем броја мерних вертикала смањује неизвесност компонената за прорачун  $U_c(Q)$ .

#### 4. НЕИЗВЕСНОСТ ХМ-МБП – ПРИМЕРИ

Прорачун неизвесности хидрометријских мерења приказан је за хидрометријске станице Бајина Башта (река Дрина), Сремска Митровица (река Сава) и Пријепоље (река Лим) и део је активности на изради квалификационог рада [6]. Задати обим приказа не дозвољава детаљисање, па су резултати прорачуна по описаној методологији приказани у табели 1. Наглашава се да је у питању процена неизвесности по типу Б, јер је већина релативних неизвесности које су елементи прорачуна усвојена по литературним препорукама [3].

Табела 1. Прорачин неизвесности хидрометријских мерења.

1. Река	Сава	Дрина	Лим
2. Профил	С.Митровица	Б.Башта	Пријепоље
3. Број вертикала [ - ]	20	15	15
4. Ширина водног огледала [m]	170	100	40
5. Просечно време мерења [min]	1		
6. Број тачака по вертикали [ - ]	2		
7. Положај тачака (према дубини $h$ ) [ - ]	0.2h, 0.8h		
8. Максимална дубина у пресеку [m]	12	4.88	3.6
9. Средња брзина мерења [m/s]	0.65	1	1
10. Релативне стандардне неизвесности услед [%]			
11. - лимитираног броја вертикала, $u_m$	2.5	3	3
12. - коришћења мерних уређаја, $u_s$	1		
13. - мерења ширине, $u_b$	0.35	0.15	0.1
14. - мерења дубине, $u_d$	0.3	0.6	0.65
15. - ограниченог броја тачака, $u_p$	3.5		
16. - мерења $\bar{v}_i$ хидрометријским крилом, $u_c$	0.5		
17. - неустајености тока, $u_{e,0.8h} / u_{e,0.2h} / u_e$	3 / 3 / 4.2		
18. Релативна комбинована стандардна неизвесност протока по методи брзина-површина [%]			
19. $U_c$	2.9	3.4	3.4
20. за $\beta=95\% \Rightarrow U_{c,95\%}$	5.8	6.8	6.8

#### 5. ЗАКЉУЧАК

Према добијеним резултатима могу се извести следећи закључци. У погледу неизвесности појединачних хидрометријских мерења, израчунато је да грешка услед хидрометријских мерења на три посматране станице приближно иста и да на нивоу поверења  $\beta=95\%$  износи  $U_{c,95\%} \approx 7\%$  у односу на одређене вредности протока.

На повећање тачности се најлакше може утицати повећањем броја мерних вертикала. Оцена је да се добијени резултати могу применити и на хидрометријским где постоје континуална осматрања водостаја и мерења протока под сличним условима као на приказаним профилима. Ово закључци се, уз комбиновање са неизвесностима у кривама протока, могу искористити за квантификацију неизвесности одређивања протока трансформацијом осматрања водостаја.

Аутори се захваљују Републичком хидрометеоролошком заводу Србије који им је обезбедио податке о хидрометријским мерењима, кривама протока и осматрањима водостаја и протока на приказаним хидрометријским профилима.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] JCGM 100:2008: *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)*, Joint Committee for Guides in Metrology, **2008**.
- [2] Di Baldassarre, G., Montanari, A.: Uncertainty in river discharge observation: a quantitative analysis, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **2009**, 13, 913-921, 913-921.
- [3] Herschy, R.W.: *Streamflow Measurement (third edition)*, Taylor & Francis, Oxon, OX14 4RN, UK, **2009**. 443-474.
- [4] WMO-No. 1044: *Manual on Stream Gauging, Volume I – Fieldwork* World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, **2010**.
- [5] WMO-No. 1044: *Manual on Stream Gauging, Volume II – Computation of Discharge*, Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, **2010**.
- [6] Станушић, И.: *Утицај неизвесности зависности водостај-проток на хидролошке анализе*, дипломски рад, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Београд, **2014**.

## UNCERTAINTIES IN STREAM GAUGING DISCHARGE MEASUREMENTS

**Summary:** *The discharge measurements on stream gauging stations are the basis for stage-discharge curves determination. As such, they have a key role on subsequent hydrological, hydrological and water resources analyses. Uncertainties inherent in the stream gauging are the result of multiple causes – the type of current meter, the gauging method its parameters and application and finally in discharge calculations. The paper addresses the uncertainty in general and particularly in gauging the stream discharge by the velocity-area method. Definitions and relations for assessing the uncertainty are given according to the ISO standards and in the scope of discharge by the WMO recommendations. Presented case study use the data from gauging stations Bajina Bašta (the Drina river), Sremska Mitrovica (the Sava river) and Prijepolje (the Lim river).*

**Keywords:** *uncertainty, stream gauging, discharge, velocity-area*