

## KALIBRACIJA 3D ELEKTROMAGNETNIH MERILA BRZINE VODE

Predrag Vojt\*, Dušan Prodanović\*\*, Damjan Ivetić\*\*\*

- \* Predrag Vojt, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi” ([predrag.vojt@jcerni.rs](mailto:predrag.vojt@jcerni.rs)) - kontakt za korespondenciju, tel: 066-8560-803
- \*\* Prof. dr Dušan Prodanović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet ([dprodanovic@grf.bg.ac.rs](mailto:dprodanovic@grf.bg.ac.rs))
- \*\*\*Doc. dr Damjan Ivetić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet ([divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs))

Ključne reči: kalibracija, elektromagnetni senzori, brzina vode, protok

### KRATAK SADRŽAJ

Druga najvažnija veličina u hidrotehničkoj praksi je protok vode i sa njom direktno povezana brzina vode (prva je, svakako, nivo/dubina odnosno, pritisak vode). Brzina vode se uglavnom meri posredno, korišćenjem nekog od odgovarajućih pretvarača, koje treba redovno kalibrisati. U sklopu hidrauličke laboratorije Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (IJČ) nalazi se 120 m dug kanal za kalibrisanje sonde za merenje brzine vode apsolutnom metodom, prema ISO 3445 standardu: kroz vodu koja miruje se zadatom brzinom vozi sonda, a brzina se određuje preko pređenog puta u jedinici vremena. Za potrebe analize uticaja kosog dostrujavanje vode na agregate HE Đerdap 2, projektovan je sistem za merenje brzine vode, i posredno protoka, sa elektromagnetnim (EM) sondama koje mogu istovremeno da mere sve tri komponente brzina (3D). Merni sistem se sadrži 15 3D EM sonde postavljenih horizontalno na čelični ram širine 14,5 m, koji se kontinualno, ili postepeno, podiže celom visinom proticajnog preseka (27 m). Tokom konstruisanja 3D EM sonde, na kanalu Instituta IJČ su rađena detaljna ispitivanja, kao i finalna kalibracija prostorne osetljivosti. U sklopu kalibracije samih sonde, ispitivan je i uticaj nosećeg rama na merenja. Kako je ram za terenske potrebe prevelik, izrađen je parcijalni model rama u razmeri 1:1 sa kojim su izvršena ispitivanja u IJČ kanalu. Sva merenja su sinhronizovana sa mernim sistemom po MODBUS protokolu. Merena je referentna brzina kolica preko enkodera sa tačkom na tvrdoj podlozi i pokazivanje brzina 3D EM sonde. Ispitani su različiti napadni uglovi, gde je položaj sonde postavljen preko mehaničkog graničnika. U ovom radu je predstavljena procedura i detaljno su opisani postupci kalibracije i dodatnih ispitivanja 3D EM sonde sa modelom rama. Takođe, kako je kalibrisano 20 3D EM sonde, prikazani su rezultati testova i performanse istih pri različitim napadnim uglovima.

# CALIBRATION OF 3D ELECTROMAGNETIC VELOCITY PROBE FOR WATER

Keywords: calibration, electromagnetic sensors, water velocity, flow rate

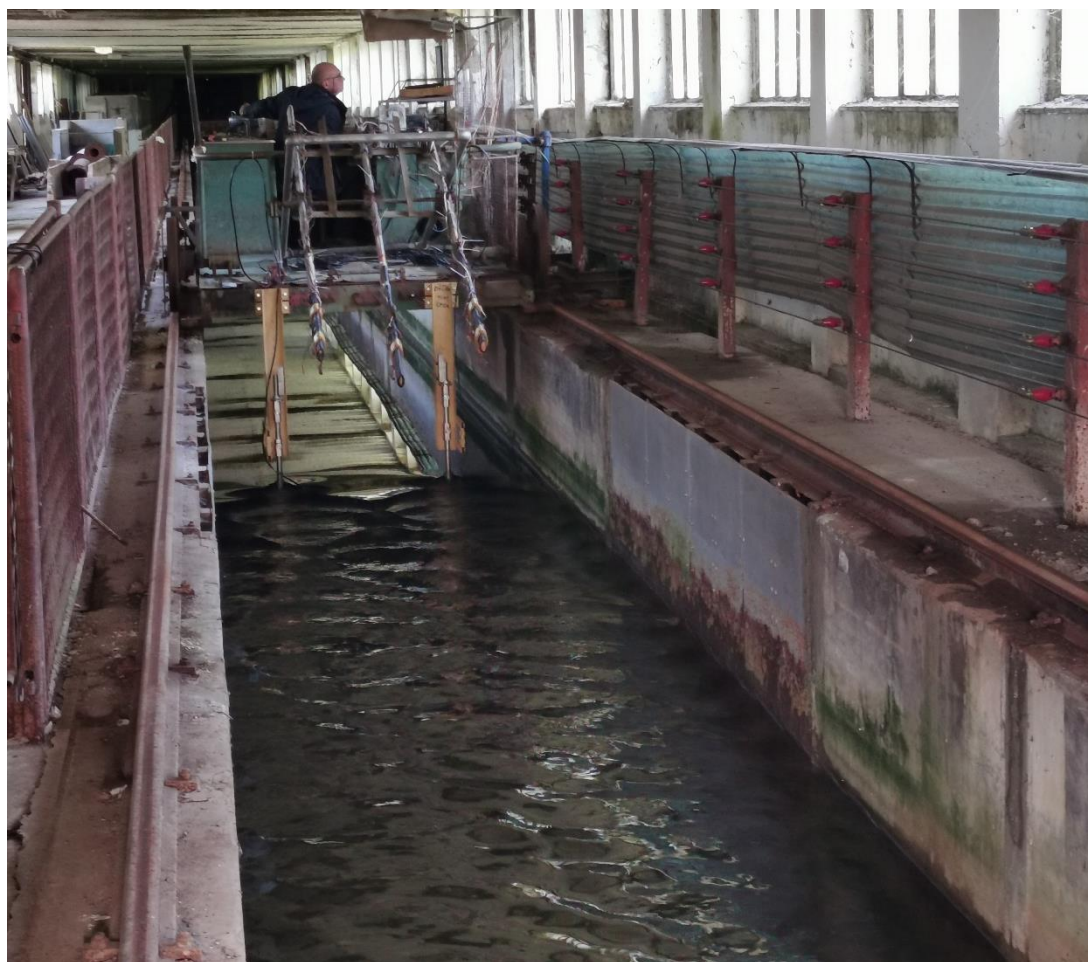
## ABSTRACT

The second most important hydraulic quantity is flow rate or water velocity (the first is water depth/level, or water pressure). Water velocity is usually measured indirectly, using adequate transducer (or probe), which has to be regularly calibrated. Within the hydraulic laboratory of the Jaroslav Černi Water Institute (IJČ) there is a 120 m long towing tank for velocity probe's calibration based on absolute method, according to the ISO 3445 standard: through the still water the probe under the test is towed with set speed, which is calculated as traversed distance in certain time. As part of the analysis of the impact of irregular inflow on the operation of aggregates at HPP Djerdap 2, an innovative system based on water velocity measurement using electromagnetic (EM) probes capable for simultaneous measurement of three velocity components (3D), and indirectly flow rate, is created. System contains 15 3D EM probes placed horizontally on a steel frame of 14.5 m width, which is lifted continuously, or in a stepwise manner, across 27 m to cover the whole flow cross section. During the design of 3D EM probes, the extensive tests were done at the IJČ's towing tank. Also, the final calibration with spatial sensitivity was done there. Within the calibration procedure, the influence of the supporting frame on the measurements was examined. Since the frame for field measurements is too large, a partial model in the scale of 1: 1 was made for tests at the towing tank. All measurements were synchronized with the measuring system according to the MODBUS protocol, which includes measuring the speed and length of the trolley using an encoder with a wheel on a hard surface and the measured velocities of the 3D EM probe. Various attack angles of the sensor's head were analyzed, where the probe orientation was set by a mechanical stop. This paper presents the procedure and describes in detail the steps during calibration, and during additional tests of 3D EM sensors with a frame model. Also, as the 20 3D EM probes were calibrated, the test results and their performance at different angles of attack were presented.

## UVOD

Tradicionalno, za ispravno funkcionisanje bilo kojeg senzora neophodno je izvršiti kalibraciju. U procesu kalibracije pronalazi se veza između fizičke veličine koja se meri i veličine koju senzor emituje kao izlaz. U ovom radu akcenat je na sezore za merenje brzine vode, tako hidrometrijska krila (standard u hidrometrijskim merenjima) mere brzinu vode koju direktno vezujemo za broj obrtanja, a sa elektromagnetnim (EM) sondama brzinu vode vezujemo za napon dok akustične sonde imaju vezu brzine sa frekvencijom doplerovog efekta. Uobičajena hidrometrijska krila za ispravno merenje zahtevaju pravac tečenja bez kosog nastrojavanja, u korak ovom problemu izrađene su 3D EM sonde koje bi trebale da budu invarijantne na pravac strujanja, odnosno da imaju sinusnu/kosinusnu zavisnost brzine od pravca strujanja. Postojeći standardi pružaju procedure, pomažu kontroli i povećanju kvaliteta odnosno pouzdanosti kalibracije jednodimenzionalnih (1D) brzinskih sondi (hidrometrijska krila, elektromagnetne i akustičke) [1]. Iako su 3D brzinske sonde u relativnoj rasprostranjenosti upotrebi, postojeći standardi ne pokrivaju, ili veoma malo razmatraju, metodologije za kalibraciju prostorno orijentisanog strujanja na sonde. U sklopu hidrauličke laboratorije Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (IJČ) nalazi se 120 m

dug kanal za kalibrisanje sonde za merenje brzine vode apsolutnom metodom, prema ISO 3445 standardu [1]: kroz vodu koja miruje se zadatom brzinom vozi sonda, a brzina se određuje preko pređenog puta u jedinici vremena.



Slika 1. Pogled na kanal za tariranje brzinskih sonde (L=120 m)

Kalibracija 3D EM sonde je vršena za potrebe analize uticaja kosog dostrujavanje vode na agregate HE Đerdap 2, gde je projektovan system za merenje brzine vode, i posredno protoka, sa elektromagnetnim (EM) sondama koje mogu istovremeno da mere sve tri komponente brzina (3D). Merni sistem se sadrži 15 3D EM sonde postavljenih horizontalno na čelični ram širine 14,5 m, koji se kontinualno, ili postepeno, podiže celom visinom proticajnog preseka (27 m). Detaljnije objašnjenje razvijene metodologije za merenje protoka na HE Đerdap 2 se može naći u [4], dok se ovde navedeni samo ključni aspekti neophodni za opisivanje procedure kalibracije. Budući da su 3D EM sonde novorazvijene, relevantni standard IEC 60041 [2] ih ne prepoznaje kao merilo koje se koristi za apsolutno merenje protoka, međutim u konkretnoj situaciji HE Đerdap 2 su definisana kao optimalno inženjersko rešenje. Tokom konstruisanja 3D EM sonde, na kanalu Instituta IJČ su rađena detaljna ispitivanja, kao i finalna kalibracija prostorne osetljivosti. U sklopu kalibracije samih sonde, ispitivan je i uticaj nosećeg rama na merenja. Kako je ram za terenske potrebe prevelik, izrađen je parcijalni model rama u razmeri 1:1 sa kojim su izvršena ispitivanja u IJČ kanalu. Sva merenja su sinhronizovana sa mernim sistemom po MODBUS protokolu.



Slika 2. 3D EM sonde u pripremi za kalibraciju

## METODOLOGIJA KALIBRACIJE I DODATNIH ISPITIVANJA

Referentna brzina kolica koja se kreću iznad mirne vode meri se preko enkodera sa točkom na tvrdoj podlozi a pokazivanje brzina 3D EM sonde koje su potopljene u vodi se odvija sinhrono po MODBUS protokolu programom DC234 server. Svako merenje/kalibracija definisano je u prostorno vremenskom domenu, 3D EM sonda ima svoj tačan položaj u vodi u kanalu i prethodno je odležala u vodi kao prema standardu [1], pa se tako nakon svakog testa koji traje 1-2 minuta čeka po sat vremena da se voda u kanalu umiri što povlači da su predmetna ispitivanja vršena u periodu od par meseci što znači da je ovo mukotrpan i dugotrajan proces. Pre kalibracije vrši se takozvano nulovanje, pokazivanje sonde u mirnoj vodi podese se da pokazuje nultu brzinu.



Slika 3. Levo) Kalibracija 3D EM sonde, pogled iz vazduha; Desno) Kalibracija 3D EM sonde, pogled pod vodom

Prvo je izvršena kalibracija po glavnom protokometrijskom pravcu pri 1 m/s (u terenskim uslovima na HE Đerdap 2 se očekuju ovi uslovi a i sonda daje dovoljan koristan signal za kalibraciju). Nakon kalibracije izvršena su ispitivanja po glavnom pravcu za ponovljivost, osetljivost od dubine potapanja (insertion faktor) pa linearnost. Nakon glavnog pravca usledila je kalibracija ostalih pravaca i ispitivanja pod različitim napadnim uglovima, gde je položaj sonde postavljen preko mehaničkog graničnika. Kalibracija bočnih komponenti, radi eliminacije uglovne greške postavljanja, je izvršena sa pozitivnim i negativnim uglom od 45 stepeni prema glavnom pravcu. Ovi uglovi su izabrani jer se na terenu (HE Đerdap 2) očekuje uglovno dostrujavanje do ovih uglova. Sva dodatna ispitivanja (linearnost, insertion faktor i uglovna zavisnost) dali su informacije o tipu merila. Za glavni pravac izvršena su dodatna ispitivanja uticaja merne kontstrukcije na rezultate sa parcijalnim modelom rama.

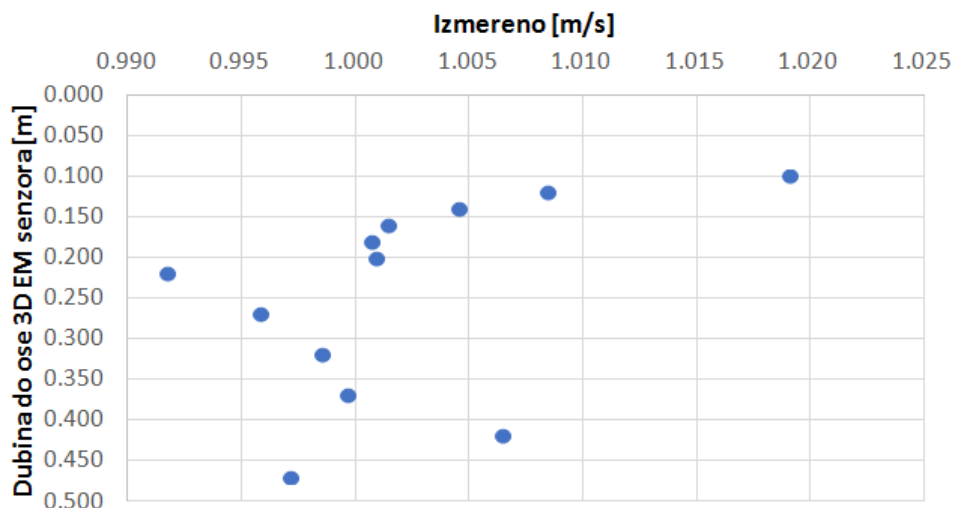


Slika 4. Parcijalni model rama pri ispitivanju sa UZV ADV i 3D EM sondama

## REZULTATI

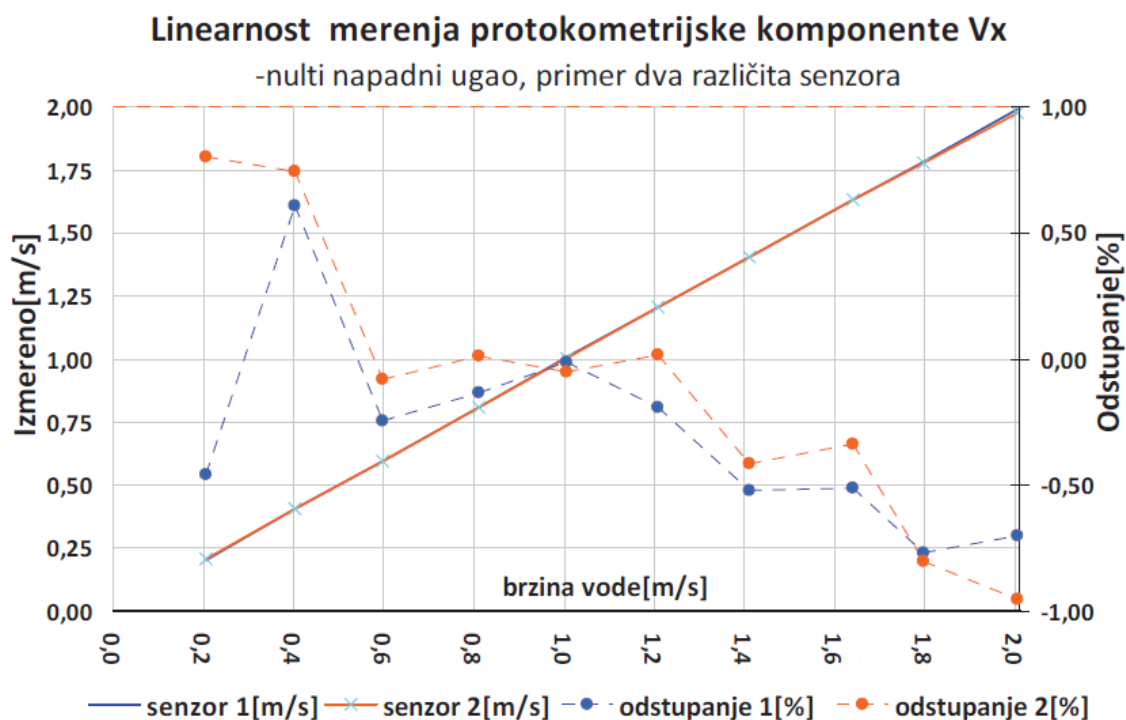
Prvo su po pomenutoj proceduri izvršene kalibracije na 20 sondi a onda su rađena detaljnija ispitivanja čiji su rezultati prikazani u nastavku. Prvo je rađeno ispitivanje uticaja potapanja gde su se dobili odlični rezultati, odnosno sonda je pokazivala odstupanje samo 2 % pri 0.1 m (oko 1.5 prečnika sonde) potopljenosti, a već 1 % pri 0.13 m potopljenosti što je i klasa tačnosti same 3D EM sonde.

### Zavisnost pokazivanja od potopljenosti 3D EM senzora za protokometrijski pravac



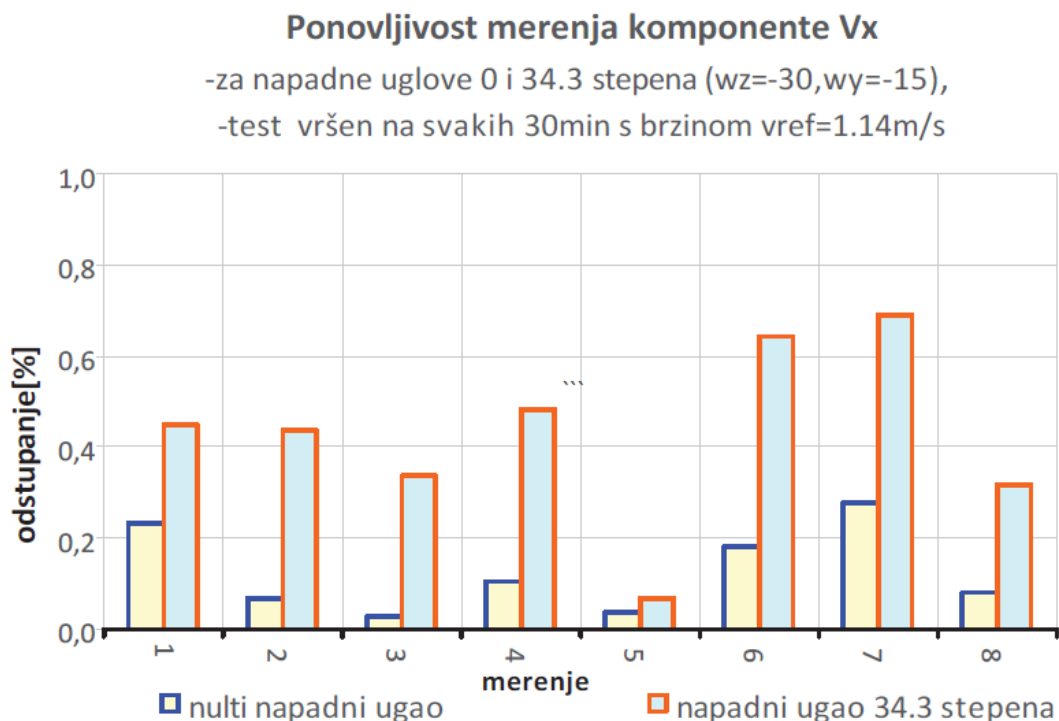
Slika 5. Osetljivost pokazivanja brzine od dubine potapanja

Nakon ispitivanja uticaja potopljenosti urađen je test linearnosti po glavnom kojim je potvrđeno da je sonda klase 1 %



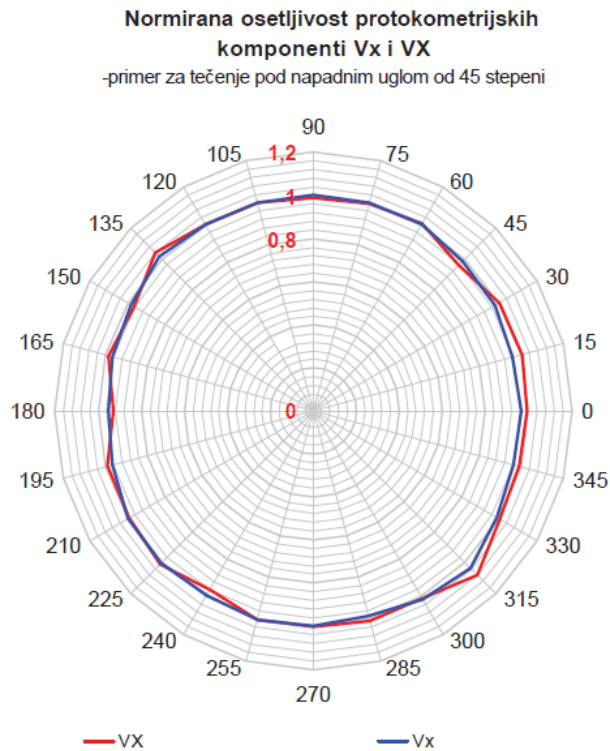
Slika 6. Linearnost 3D EM sonde

Nakon testova osetljivosti po dubini i po linearnosti izvršen je test ponovljivosti mernih rezultata. Rezultati su po glavnom pravcu pokazali ponovljivost do 0,3 % dok je ponovljivost po prostornom uglu iznosila do 0,7 % što je opet dokazalo da sonda pripada klasi 1 %.



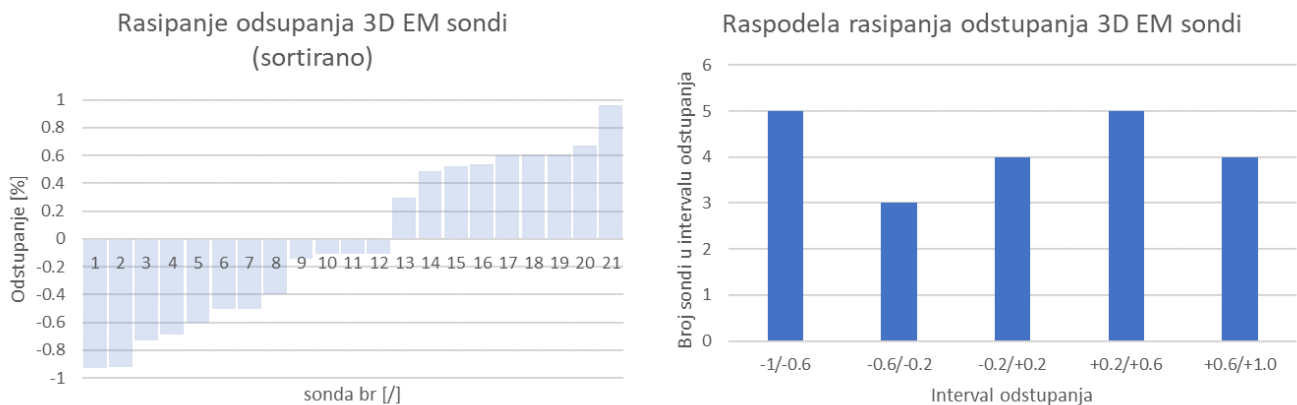
Slika 7. Ponovljivost 3D EM sonde u zavisnosti od napadnog ugla

Kako je sonda dokazala svoju klasu 1 % u svim do sada ispitivanjima prešlo se na merenje kompletne rotacije sonde pod napadnim uglom od 45 stepeni gde su se dobila odstupanja pomenute klase.



Slika 8. Prostorna osetljivost 3D EM sonde pri napadnim uglom 45 stepeni

Sve sonde nakon kalibracije su proverene i zadovoljile su klasu tačnosti 1% po glavnoj protokometrijskoj komponenti a odstupanja se kreću do 1 % dok je srednja vrednost odstupanja 0,02 %.



Slika 9. Odstupanje 21 3D EM sonde – levo rasipanje, desno raspodela

Ram za nošenje sonde ima konstruktivnu ulogu u nošenju sonde a treba da bude izrađen tako da minimalno remeti strujno polje. Minimizacija rama mogla bi da dovede do pojave vibracija a koje bi mogle uticati na merenje pa je taj uticaj proveren in situ pri realnim uslovima merenjem podvodnim akcelometrijma i zaključeno je da ram ima dovoljnu krutost. Model rama pokazao je da nema značajnijeg uticaja na merenja brzina odnosno da klasa od 1%, koliko su 3D EM sonde, ne mogu da uvide uticaj rama.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložena modifikacija kalibracije, definisane ISO 3455 standardom, kako bi se uspešno koristile specifičnosti rešenja mernog sistema, zasnovanog na primeni 3D EM sonde, a primenjenog na HE Đerdap 2. Kalibrisani su i analizirane razne moguće situacije u kojima je pomenuta sonda zadovoljila traženu klasu od 1 %. Primenom više sonde, kao što je i očekivano, dobija se bolja merna nesigurnost u merenju protoka uvezano sa standardima [3, 5 i 6] a koja je neophodna za merenja kao što su predmetna na HE Đerdap 2.

## LITERATURA

- [1] ISO 3455: Hydrometry — Calibration of current-meters in straight open tanks, 2021
- [2] IEC 60041: International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. (European Equivalent: EN 60041) 1999.
- [3] ISO 3354: Measurement of clean water flow in closed conduits — Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, 2008.
- [4] Prodanović D, Ivetić D, Milivojević N, Vojt P, „Flow measurement methodology for low head and short intake bulb turbines - Iron Gate 2 case“, in *IGHM2022 proceedings*, Grenoble, France, 2022.
- [5] GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM, 2008.
- [6] ISO 5168: Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties, 2005