

Određivanje protoka na prilazima cevni turbina uz pomoć EM senzora brzine: Prikaz merne metode

Dušan Prodanović¹
Damjan Ivetić²
Predrag Vojt³

APSTRAKT: Određivanje hidrauličke efikasnosti turbina se zasniva na pouzdanom poznavanju nekoliko osnovnih hidrauličkih, mašinskih i elektro veličina. Iz ove grupe, protok vode kroz turbinu je veličina koju je najteže pouzdano izmeriti. Merna nesigurnost je uobičajeno veća nego kod merenja ostalih osnovnih veličina. Pored toga, i sama procedura određivanja merne nesigurnosti je složenija, prvenstveno usled kompleksnosti samog mernog procesa ali i zbog specifičnosti hidrauličkih uslova na mernim mestima. U okviru analize uticaja kosog dostrujavanje i plana revitalizacije cevni agregata na HE Đerdap 2, a sa ciljem bolje procene hidrauličke efikasnosti turbina, projektovan je i primenjen inovativni sistem za posredno merenje protoka. Merni sistem se koristi za određivanje protoka primenom metode Brzina – Proticajni presek i može se postaviti na ulazu u turbinu, uzvodno od grube rešetke. Okosnicu sistema čini 15 elektromagnetnih senzora sve tri komponente brzina, horizontalno postavljenih na čelični ram koji se proteže celom širinom proticajnog preseka. Ram se podiže po celoj visini proticajnog preseka kako bi se uz pomoć EM senzora i dva redundantna akustična Dopler senzora, mapiralo celo polje brzina. Položaj rama se prati pomoću dva enkodera, dok se dva senzora pritiska koriste za merenje dubine vode. Merenja su sinhronizovana sa lokalnim SCADA sistemom, tako da se u post procesiranju – odnosno u konačnoj proceni protoka, koriste i odgovarajući podaci o radu turbine. Merni sistem je korišćen u dva režima rada: inkrementalnom, sporijem ali veće tačnosti i kontinualnom. Imajući u vidu specifičnosti ova dva režima snimanja polja brzina, samog mernog sistema sa novorazvijenim EM sensorima, kao i hidrauličkih uslova, razvijena je adekvatna procedura za procenu nesigurnosti izmerenog protoka. U ovom radu je prikazana merna metoda i dati su neki rezultati merenja na agregatima HE „Đerdap 2“.

Ključne reči: Merenja protoka, Merenje brzine, Merna nesigurnost, Elektromagnetni senzori, Hidroelektrane

Discharge measurements at the tubular turbine intakes with EM current meters: Measuring method

ABSTRACT: The assessment of the turbine hydraulic efficiency is based upon the reliable information on several hydraulic, mechanical and electric quantities. Out of these, discharge, or the flow rate, is the quantity which is most difficult to accurately measure. Measurement uncertainty is typically higher than in rest of the cases. Furthermore, the procedure for the measurement uncertainty assessment is more complex, mainly due to the complexity of the measurement process and the specific flow conditions at the measurement site. As a part of the tubular turbine revitalization plans for the HPP Iron Gate 2, with a goal of improved assessment of the turbine hydraulic efficiency, a novel discharge measurement system was designed and applied. The system is using the Velocity – Area approach for the discharge measurements, and can be installed at the turbine intakes, upstream of the trash rack. The core of the measurement system are 15 novel 3D electromagnetic velocity meters, mounted on steel frame spanning across the width of the flow area. The steel frame is traversed across the height of the flow area to allow for the velocity field mapping using the EM sensors and 2 redundant acoustic Doppler velocimeters. The position of the frame is monitored via 2 position transducers, while 2 pressure transducers are used for the water depth measurements. The measurements are synchronized with local SCADA system, thus in the post processing – and in the final discharge evaluation, additional turbine data are used. Two

¹Dr Dušan Prodanović, Građevinski fakultet Beograd, redovni profesor, dprodanovic@grf.bg.ac.rs

²Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, divetic@grf.bg.ac.rs

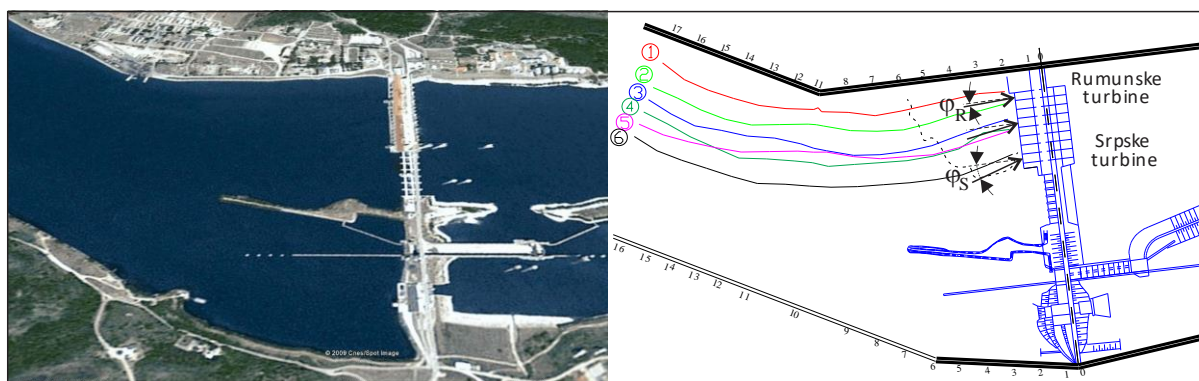
³Predrag Vojt, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, samostalni istraživač, predrag.vojt@jcerni.rs

operating modes of the system can be used: incremental and continuous. Due to the specifics of the measurement system, tailored measurement uncertainty assessment was developed. In this paper the measuring system is presented together with some results obtained on HE “Đerdap 2”.

Keywords: Discharge measurements, Velocity measurements, Measurement uncertainty, Measurement systems, Electromagnetic sensors, Hydro power plants

1 Uvod

Na deonici reke Dunav, u zoni zajedničkog interesa Republike Srbije i Republike Rumunije, nalaze se dve velike hidroelektrane (HE): „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“ koje predstavljaju ključne elemente elektroenergetskog sistema. U narednom periodu je planirana revitalizacija cevnih agregata na HE „Đerdap 2“ pri čemu je jedan od ciljeva i podizanje hidrauličke efikasnosti. Na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom (IJČ, 2006; Prodanović i ostali, 2011). Zbog toga što realni uslovi dostrujavanja nisu kao na modelu, neophodno je kvantifikovati postojeće uslove i proveriti hidrauličke karakteristike turbina pre revitalizacije, kao i nakon revitalizacije.



Slika 1. HE Đerdap 2: situacija (slika levo, Google Earth, 2009: 44°18'24.61"N, 22°33'53.54"E) i strujnice u Dunavu sa fizičkog modela (Institut „Jaroslav Čerņi“, 2006).

Figure 1. HE Đerdap 2: layout (left figure, Google Earth, 2009: 44°18'24.61"N, 22°33'53.54"E) and streamlines in Danube from scale model (Institut „Jaroslav Čerņi“, 2006).

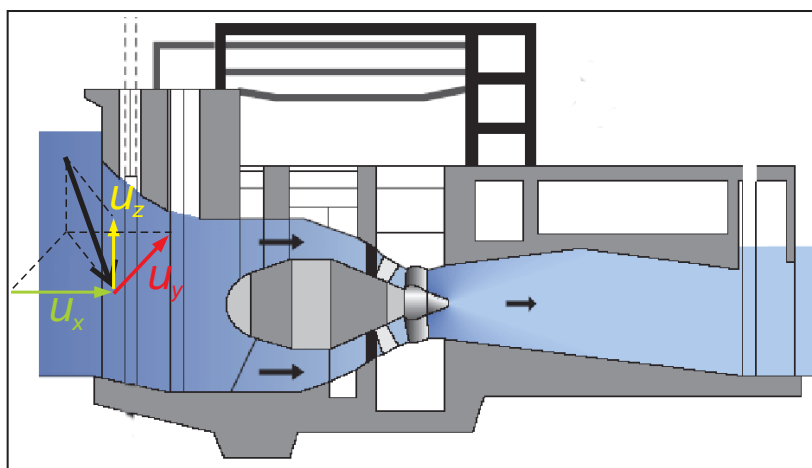
Merenje protoka na kratkim objektima kao što je ulaz u turbinu HE „Đerdap 2“ je hidraulički komplikovan zadatak. U opštem slučaju, merenje protoka na agregatima HE je definisano kroz nekoliko pravilnika i standarda (IEC 60041, 1999; PTC 18, 2002). Iako su cevne turbine, ili Kaplanove turbine za male padove u relativno rasprostranjenoj upotrebi, ne postoje jasne preporuke za merenja protoka u ovim slučajevima. Pored toga, na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom u horizontalnoj ravni, čime je polje raspoloživih rešenja za merenje protoka, dodatno suženo (Prodanović i sar., 2011). Rešenje koje je prihvaćeno za pouzdano određivanje protoka u specifičnim hidrauličkim uslovima na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“ je zasnovano na metodi Brzina-Proticajni presek (IJČ i ostali, 2020; Ivetić i ostali, 2021a). Za potrebe ovog sistema, projektovane su nove 3D EM sonde, koje su praktično funkcionisale kao EM (hidrometrijska) krila. Petnaest EM sondi je postavljeno na kruti čelični ram širine 14,5 m i visine 3,1 m, koji se može spuštati i podizati po visini proticajnog preseka. Zajedno sa dva enkodera položaja, dva senzora dubine i dva redundantna ADV senzora brzine, prikupljani su podaci pomoću kojih je određena srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka. Budući da je sistem inovativnog karaktera, posebno je razvijena procedura za procenu merne nesigurnosti protoka (Ivetić i ostali, 2021b), koji se dobija proizvodom srednje profilske brzine i površine proticajnog preseka. U sklopu ove procedure, obračunavaju se merne nesigurnosti sistematskog i statističkog karaktera, po različitim veličinama, kao i merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka tokom trajanja jednog merenja.

U ovom radu je detaljno predstavljena novorazvijena procedura merenja rasporeda brzina na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“, oprema koja se koristi i prateći softver. Dati su dobijeni rezultati merenja na turbinama A1 i A7, sa komentarima i preporukama za poboljšanje.

2 Metodologija

2.1 Određivanje protoka na osnovu polja brzina

Prema standardu IEC 60041 (1999) koji određuje načine obavljanja terenskih ispitivanja karakteristika turbina, na turbinama HE “Đerdap 2” ne postoje adekvatni uslovi da se obavi merenje protoka, jer ne postoji dovoljno dugačka deonica u kojoj je strujanje pravolinijsko. U takvim uslovima, standard dozvoljava da se obave merenja korišćenjem adekvatne, standardom definisane opreme. Da bi se obavilo merenje protoka na turbinama HE “Đerdap 2”, na osnovu slike 2 se vidi da je neophodno koristiti opremu koja može da izmeri podužnu U_x komponentu brzine sa zadovoljavajućom tačnosti u uslovima postojanja značajne druge dve komponente brzina U_y i U_z , a da pri tome sama oprema tokom merenja ne utiče bitno na rad turbine. Pri tome, treba izmeriti celokupno polje brzina pri jednom radnom protoku turbine koji je približno konstantan.

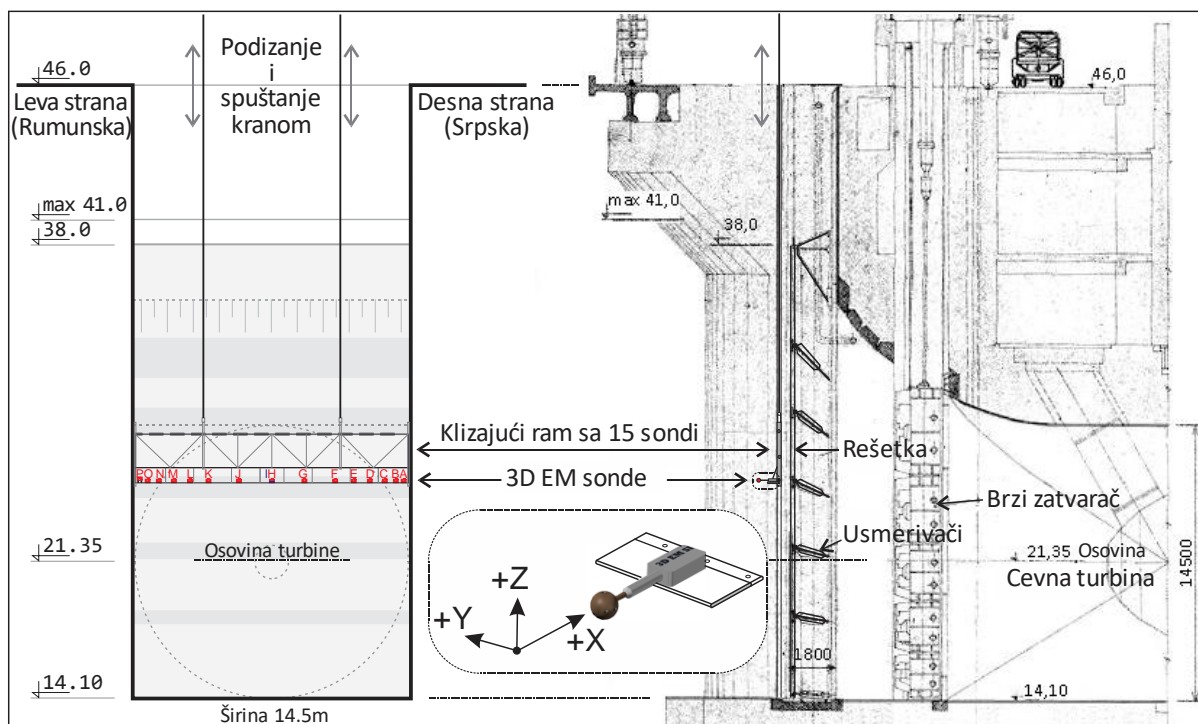


Slika 2. Cevna turbina sa dostrujavanjem koje onemogućava standardno merenje protoka

Figure 2. Bulb turbine with highly irregular conditions for proper flow measurement.

Sistem za merenje protoka je koncipiran tako da se postavi niz senzora za merenje brzine na prilazu/ulazu u turbinu, uzvodno od grube rešetke (slika 3). Kruti čelični ram, opremljen mernom opremom, se postavlja u vodice predviđene za grajfer kojim se čisti rešetka. Sa hidrauličke strane bi bilo nešto povoljnije koristiti lokaciju brzog predturbinskog zatvarača (slika 3, desni deo), nizvodno od ulazne rešetke. Na toj lokaciji je strujna slika nešto povoljnija. Veliki vrtlozi i uticaj poprečne komponente su smanjeni prolaskom kroz rešetku koja se ponaša kao „turbulentni generator“ manjih vrtloga zajedno sa velikim usmerivačima. Takođe, uticaj nanosa na mernu opremu bi bio znatno manji. Na žalost, zbog starosti turbina, dispečeri elektrane se ne mogu osloniti samo na brzo zatvaranje turbinskog kola i u nekim operativnim situacijama im je neophodno brzo spuštanje predturbinskog zatvarača, tako da nije bilo dozvoljeno postavljanje opreme na njegovoj lokaciji.

Na slici 3 se vidi da je predviđeno postavljanje 15 sonda na čeličnom ramu, koji se kranskom dizalicom prvo spušta na dno proticajnog preseka, pa se zatim u okviru jedne merne sesije (merenje jednog protoka), odnosno tokom profilisanja brzina pri jednom protoku, podiže do površine vode, oko 27 m. Pored rasporeda brzina na jednoj horizontali, meri se stalno i položaj merne horizontale. Tokom kretanja rama, sva merna oprema kontinualno radi i može da beleži podatke na svaku sekundu (IJČ i ostali, 2020).



Slika 3. Merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, pomoću sonde koje mere sve tri komponente brzine.

Figure 3. Velocity field measurement at the turbine's inlet with probes that measure all three components.

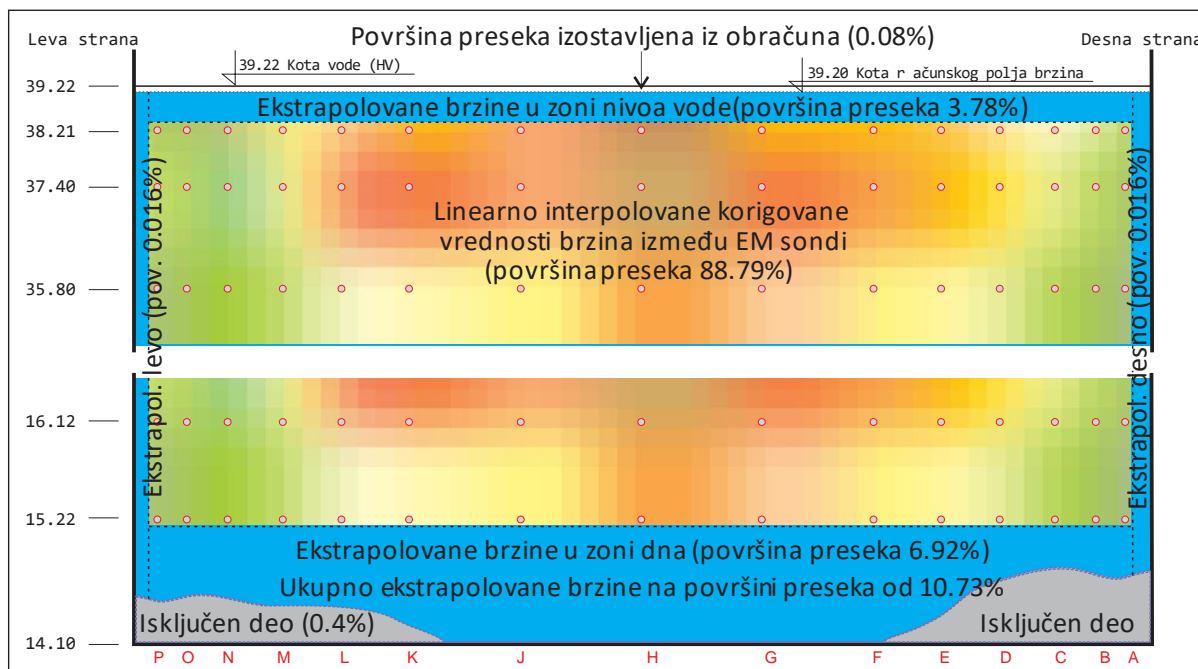
Usvojeni sistem snimanja profila brzina na ulazu u turbinu sa pokretnim ramom je kompromis između dva suprotstavljena zahteva. Sa stanovišta merne nesigurnosti, kao i neustaljenosti protoka, bolje bi bilo postaviti fiksni ram koji ceo ulazni profil istovremeno snima pomoću N horizontalata, a na svakoj horizontali sa M sonde. Za date dimenzije proticajnog profila, trebalo bi najmanje $N=16$ profila i $M=14$ sonde, odnosno ukupno 224 sonde. Pošto se koriste sonde koje mogu da mere prostorni vektor brzine, cena takvog sistema bi bila „prilično“ visoka. Sa druge strane, takav sistem bi značajno povećao pad nivoa na mernoj rešetki, što bi na turbinama HE „Đerdapa 2“ bio relativno veliki pad s obzirom da je ukupni pad oko 7 m.

Snimanje polja brzina može biti inkrementalno (sa „zastajkivanjem“ na određenom profilu, dok se ne skupi dovoljno podataka za osrednjavanje merenja) i kontinualno (ram kontinualno klizi od najniže do najviše kote, približno konstantnom brzinom). Metoda sa zastajkivanjem vrši bolje osrednjavanje ali je vreme trajanja dugačko: ako je na svakom profilu vreme osrednjavanja oko 10 minuta, za 18 profila (oko 1,5 m razmak između profila) je ukupno vreme profilisanja 3 sata. U tom periodu je velika šansa da će doći do nekog poremećaja u radu turbine i da će se drastično promeniti radni uslovi. Sa druge strane, metodom kontinualnog merenja se može obaviti profilisanje za nekih 10 minuta (prosečna brzina podizanja rama 0,045 m/s i visina 27 m), ali je velika standardna devijacija merenih brzina.

Neustaljenost tokom profilisanja je neminovna, tako da je potrebno normalizovati sve izmerene brzine prema jednom referentnom protoku (ili snazi turbine). Zbog toga se pored snimanja profila brzina, uzimaju trenutni podaci o radu turbine: snaga, protok na Winter-Kennedy (WK) davaču, položaj sprovodnog aparata i neto pad. Podatak o promenama u odnosu na izabrani referentni protok (ili snagu) se koristi u procesu normalizovanja svih merenih veličina.

Na slici 4 je prikazan prostorni raspored podužne komponente brzine nakon normalizacije. Ceo merni profil je rasterizovan pravilnom mrežom kvadrata sa korakom $DY=DZ=0,05$ mm (na slici je prikazan grublji raster, da bi se lakše videlo). Kružićima su prikazana mesta gde su se nalazile EM sonde i gde postoji podatak o izmerenim i normiranim brzinama. Između sonde se mreža popunjava vrednostima na osnovu linearne interpolacije i taj deo pokriva malo manje od 90% proticajnog profila.

Plavom bojom su prikazane površine pravilne mreže u kojima se ekstrapoluju brzine koristeći teorijske obrasce koji važe u graničnim zonama. Moguća je primena linearne, eksponencijalne i logaritamske zakonitosti sa različitim parametrima, za svaku od zona.



Slika 4. Linearna interpolacija polja brzina unutar merenog dela profila i ekstrapolacija u četiri nemerena dela.

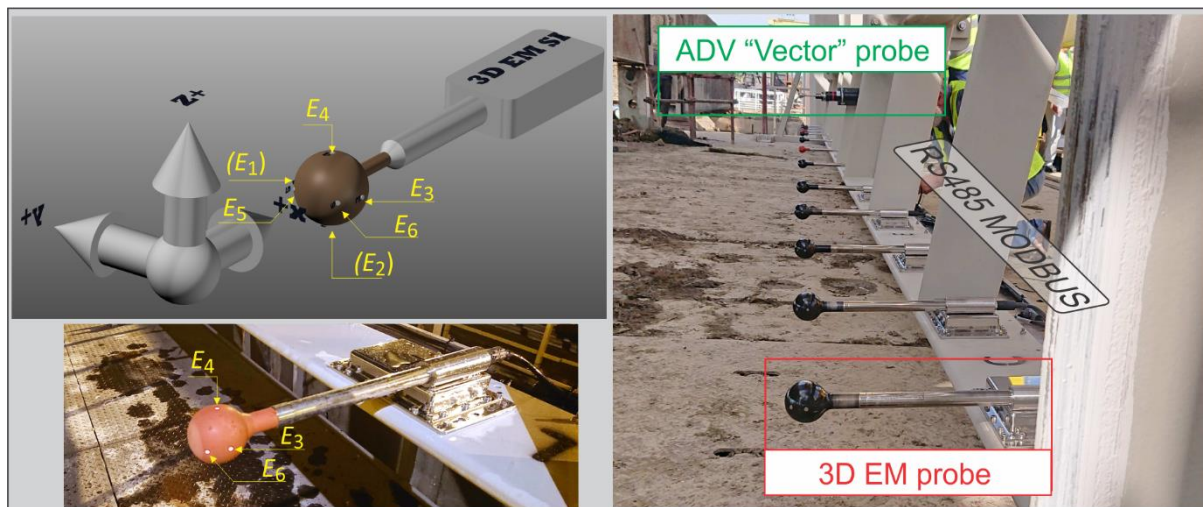
Figure 4. Velocity field interpolation in measured part and extrapolation in four unmeasured parts.

Protok kroz merni profil je jednak integralu rasterizovanog polja brzina V_x , podužne komponente. Taj protok se na kraju poredi sa protokom izmerenim na WK davaču, u periodu koji je izabran kao referentni prilikom normalizovanja merenih podataka. Podaci o druge dve komponente brzina se ne koriste u obračunu protoka već služe kao provera rada ukupne metode. Takođe, podaci sa dve kontrolne ADV sonde se koriste samo kao kontrola izmerenom polju brzina, ne koriste se u obračunu protoka.

2.2 Merenje 3+D komponenti brzine

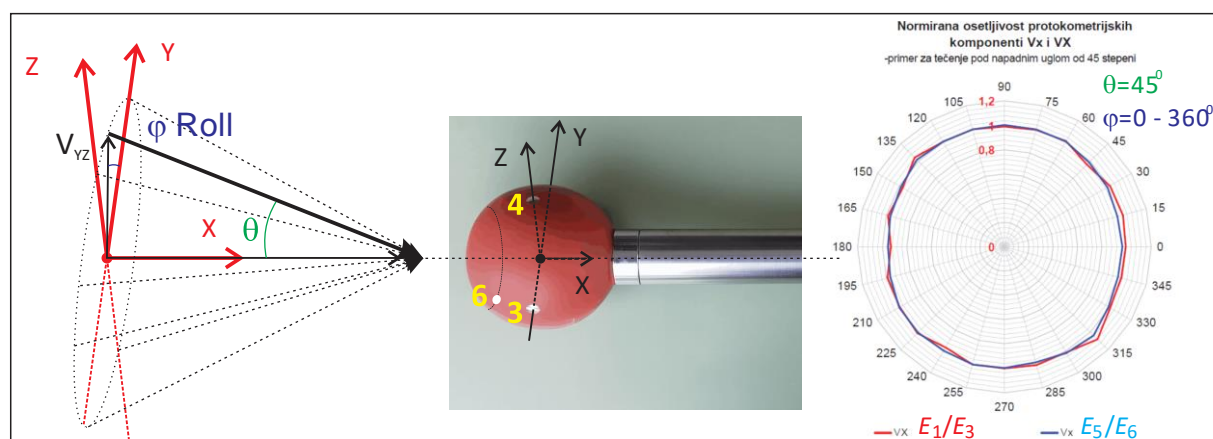
Merenje brzina je obavljeno elektromagnetnim sondama (Ivetić, 2019). Na slici 5 levo je prikazana novorazvijena 3D EM sonda LOG-xXYZ-65 proizvođača "Svet Instrumentata", sa svojim lokalnim koordinatnim sistemom. Prečnik sferne merne glave je 63 mm a ukupna merna zona sonde je prečnika oko 120 mm. Merni opseg sonde je ± 5 m/s, tačnost merenja brzina je bolja od 1 % za opseg brzina 0,2-2 m/s a prag osetljivosti je 0,3 mm/s. Svaka sonda ima u sebi logger sa memorijom za 486.720 merenja, akumulator za samostalni rad kao i priključak za mrežni rad preko RS485 sa MODBUS protokolom. Brzina uzorkovanja je minimum 1 sekunda.

Pomoću elektroda E_1 i E_3 , E_2 i E_4 (slika 5) i dva elektromagnetna kalema u glavi sonde koje se nalaze po obimu sfere, sonda meri bidirekzione (u oba smera) tri komponente brzine V_X , V_Y i V_Z . Pored ove tri komponente, sonda je tako projektovana da može da meri podužnu komponentu V_x i pomoću dve dodatne elektrode (E_5 i E_6) koje se nalaze pod uglom od 45° sa prednje strane (zato je u naslovu podpoglavlja oznaka 3+D sonda). Podužna komponenta V_x je uglavnom osetljivija i može se koristiti samo za užu opseg uglova dostrujavanja (oko $\pm 20^\circ$ - 30°) i bez povratnog toka, ali u datom opsegu brzina može pouzdanije da meri (tačnost 0,5%) i pri velikim dolaznim brzinama (od 2 do 5 m/s).



Slika 5. Korišćena 3D+EM sonda (skica gore levo i detalj dole levo) montirana na ram zajedno sa ADV sondom (slika desno).

Figure 5. 3D+EM probe used for measurement (drawing upper left and detail lower left) installed on steel frame together with ADV probe (figure right).



Slika 6. 3D+EM sonda sa dijagramom prostorne osjetljivosti za dve podužne komponente brzine V_X i V_x .

Figure 6. 3D+EM probe with spatial sensitivity for two streamwise velocity components V_X and V_x .

Na slici 6 je prikazana uglovna geometrija u okviru koje svaka LOG-xXYZ-65 sonda daje izmerene podatke. Na slici 6 desno je prikazan i dijagram uglovne zavisnosti dve podužne komponente V_X i V_x za 360° ugao rotacije dolaznog vektora oko podužne ose, pri napadnom uglu koji je 45° . Na dijagramu se vidi da zbog većeg napadnog ugla dostrujavanja je komponenta V_x nešto lošijih performansi, usled odvajanja mlaza vode u njenoj mernoj zoni.

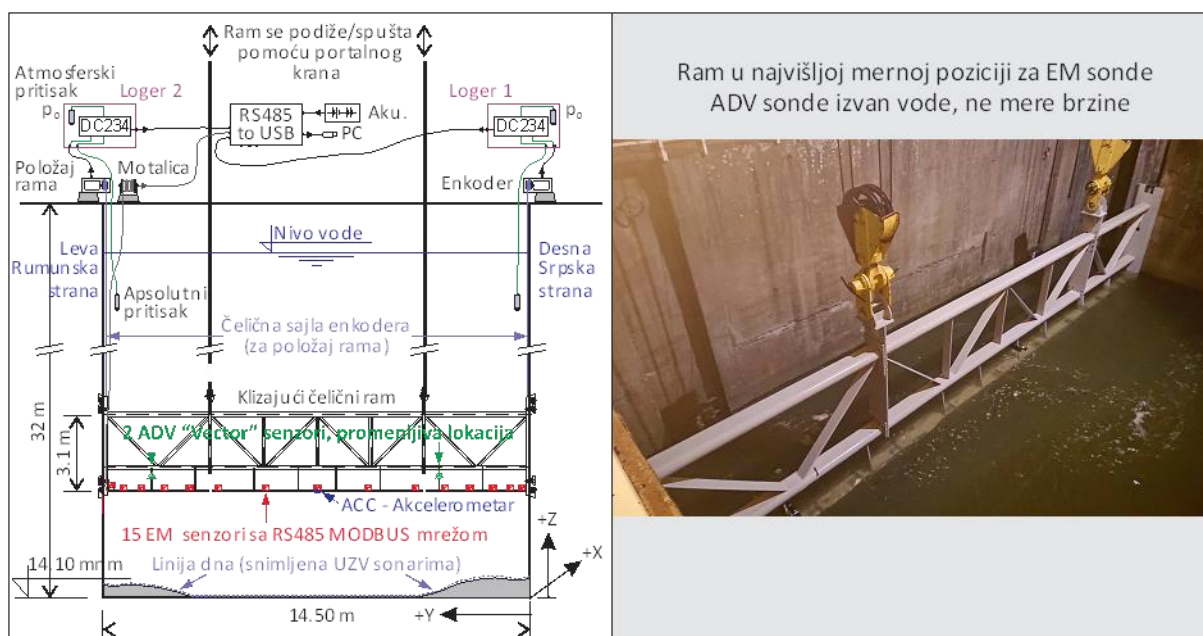
Da bi se obezbedilo kontrolno merenje brzine, pored 3+D EM sonde, na merni ram (slika 5, desno, u gornjem delu) su postavljene i dve trokomponentne ADV sonde „Vector“ proizvođača NORTEK, fabrički predviđene za horizontalnu ugradnju. Tačnost sonde je 1%. Sonde imaju ugradjen loger, baterije i senzor pritiska. Brzina uzorkovanja je bila najniža moguća, 1 sekunda. Da bi se obezbedio neometan i pouzdan rad ADV sonde, korišćene su u autonomnom radu, samo sa lokalnim logerom i sa baterijskim pogonom, bez spajanja na komunikacioni sistem.

2.3 Analiza neodređenosti merenja

Sprovedena je detaljna analiza merne nesigurnosti svake od komponenti mernog sistema. Osnovne smernice za definisanje procedure za određivanje merne nesigurnosti su preuzete iz ISO standarda za merenje protoka u rekama pomoću hidrometrijskih krila ISO 748 (ISO, 1997) i ISO 1088 (ISO, 1973), a korišćena je metodologija prema Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM (Joint committee for Guides in Metrology, 2008). U posebnom radu (Ivetić i ostali, 2021b) su dati svi detalji.

2.4 Sistem za merenja

Merenja prema opisanoj metodologiji su urađena pomoću sistema koji je prikazan na slici 7. Sa leve strane je shematski prikaz kompletne opreme, a sa desne fotografija načinjena prilikom merenja u poslednjem, najvišem profilu mernog preseka (pa su ADV sonde iznad površine vode).

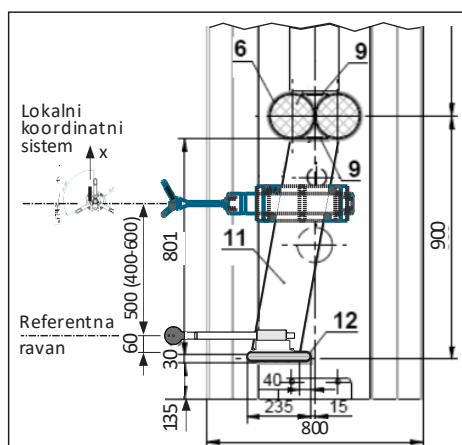


Slika 7. Sistem za merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, shema (levo) i fotografija (desno).

Figure 7. Velocity field measurement system, schematic drawing (left) and photo (right).

Čelični ram dimenzija (14.5x3,1m) je projektovan sa gornjim nosećim delom rešetkatstog tipa sa masovnim hidraulički oblikovanim profilima i sa relativno tankom donjom gredom za kačenje mernih sondi, koja je izbačena u napred i nalazi se izvan uticaja samog rama. Duž te grede, sa nizvodne strane, se nalazi i niša za vođenje kablova. Zbog lakšeg transporta i manipulacije ramom na samom objektu, napravljen je iz tri segmenta. Vođice rama su tako projektovane da smanje trenje uz sprečavanje pomeranja rama.

Na ram je postavljen akcelero metar, kako bi se proverile oscilacije rama, frekvencija i amplituda, pri različitim režimima rada turbine. Ispostavilo se da je bojazan od oscilacija rama usled opstrujavanja vode oko rama i mernih sondi bila preterana. Međutim, glavni generator oscilacija je sistem za kačenje na kran kao i čelične sajle koje su pri merenjima u donjim profilima dužine oko 25 m! Srećom, ram je zahvaljujući svom obliku i sistemu vođica pokazao minimalna pomeranja tokom merenja.



Slika 8. Detalj rama sa sondama.

Figure 8. Detail of frame with probes.

Na donjoj gredi rama je postavljeno 15 EM sondi, sa većom gustinom u zonama bliže zidu (slika 7, levi deo). Merna zona je pozicionirana ispod glavne konstrukcije rama (slika 8, profili 6 i 9 su nosači donjeg dela rama) i ispred noseće grede (pozicija 12 na slici 8). Na vertikalnim nosačima (pozicija 11) su postavljene dve ADV sonde „Vector“ firme Nortek (NORTEK, 2021). Sonde su tako pričvršćene da omogućavaju laku demontažu i premeštanje. ADV sonde su montirane oko 0,5 m iznad referentne ravni, tako da prilikom obrade rezultata, zbog izrazite prostorne neravnomernosti strujanja, treba uzeti u obzir da EM sonda i ADV ne mere u istoj tački.

Položaj rama se meri kontinualno preko dve čelične sajle koje se namotavaju na shaft-enkoder, pretvarači firme UniMeasure „HX-EP“ (UniMeasure, 2021), tačnosti bolje od 0,025%. Koriste se dva pretvarača, tako da se prati i eventualna nagnutost rama.

Položaj slobodne površine se meri pomoću senzora apsolutnog pritiska, odvojeno sa leve i sa desne strane preseka. Koriste se senzori MEAS 86 Series, firme TE CONNECTIVITY (2021), linearnosti 0,2%. Za svako merenje nivoa se koriste po dva senzora u paru: jedan za merenje pritiska u vodi na poznatoj dubini a drugi za merenje atmosferskog pritiska i kompenzaciju. Nakon obavljenih merenja, sa SCADA-e HE „Đerdap 2“ se preuzimaju i njihova merenja nivoa vode ispred rešetke, sa sistema koji se na žalost ne kontroliše redovno pa su podaci niže tačnosti.

Stvarni oblik dna se proverava UZV sonarima pre sprovedenih merenja. Sonari su „Ping Sonar Altimeter and Echosounder“ firme Bluerobotics (2021), single-beam echosonderi koji mere razdaljine do 50 m pod vodom, do maksimalne dubine od 300 m. Rezolucija sonara je 0,5%. Koriste se 4 sonara postavljena sa donje strane noseće grede (ne vide se na prikazanim slikama). Prilikom merenja kota dna, ram se spušta do 1 m iznad najniže tačke tako da se postiže tačnost merenja kota dna od par santimetara.

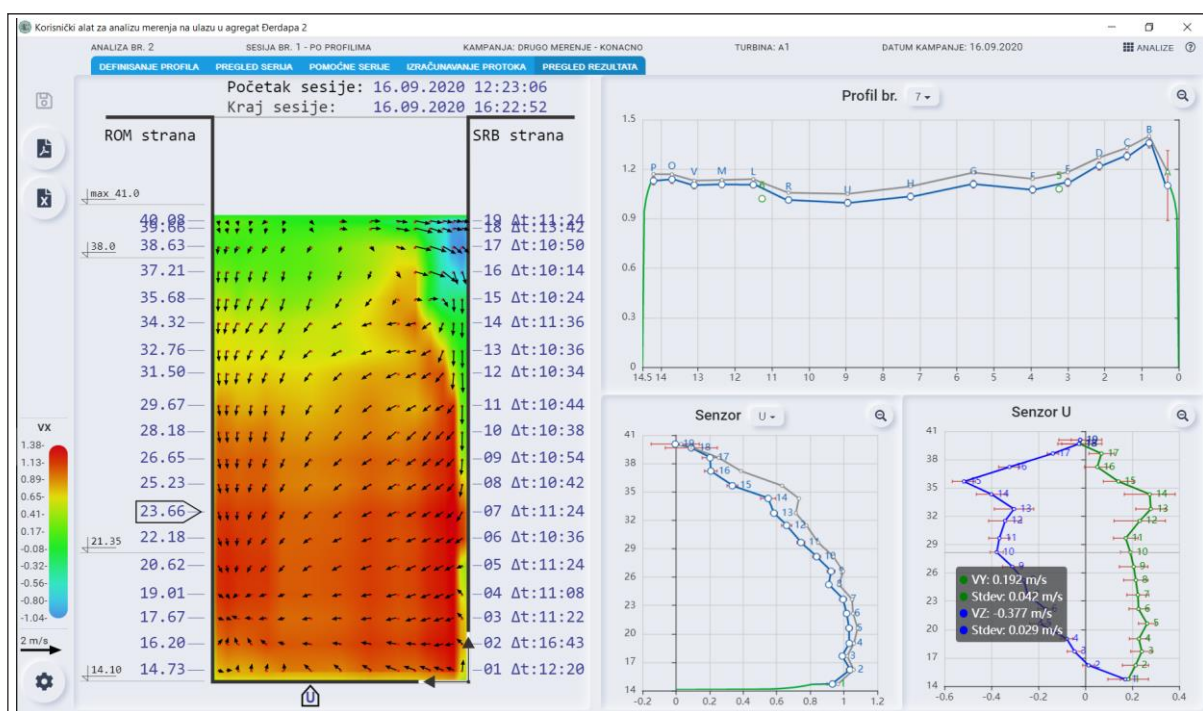
Sve EM sonde su povezane na ramu pomoću RS485 mreže podvodnim kablovima. Na površini terena se nalazi metalica na ručni pogon, sa klizajućim kontaktima. U istu mrežu su spojena i dva shaft-enkodera za položaj rama i dva sistema za merenje nivoa vode. Iako svi logeri imaju sopstvenu bateriju, izvedeno je i dodatno napajanje preko RS485 kabla, pomoću akumulatora. Komunikacija sa svim uređajima se ostvaruje koristeći MODBUS protokol. Svi podaci se iščitavaju na 1 do 2 sekunde. Istovremeno, svaka od sondi u svom logeru čuva širi set podataka, koji je moguće na poseban zahtev preuzeti istom kablovskom vezom.

Dve postavljene ADV sonde nisu povezane u mrežni sistem da bi se obezbedila potpuna nezavisnost i redundatnost merenja. Sonde imaju svoje interno napajanje i loger. Podaci o sve tri komponente brzine i o pritisku (dubini) čuvaju se na 1 sekundu. Po završenom profilisanju i sklanjanju rama sa ulaza u turbinu, vrši se preuzimanje tih podataka. Takođe, sa SCADA-e HE „Đerdap 2“ se po završenom merenju preuzimaju sekundni podaci o radu turbine i sprovednog kola. Sinhronizacija ovih „off-line“ podataka se vrši preko realnog vremena.

2.5 Softver za akviziciju i obradu

Softveri za akviziciju i obradu su pravljeni za Windows PC računare i izvršavaju se na jednom prenosnom računaru. Softver za akviziciju se sastoji od dve komponente: programa „DC234Server“ (DC234, Svet Instrumenta, 2021) za upravljanje radom RS485 mreže i svim uređajima na toj mreži i programa „RealTimeHydroVisual“ (RTHV, Vodena, 2021) za praćenje, upravljanje, vizuelizaciju i prikupljanje podataka tokom merenja. DC234 je program opšte namene za komunikaciju sa različitim konfiguracijama merne opreme i ima svoj sofisticirani upravljački interfejs koji nije predviđen za neiskusne korisnike. Zbog toga je napravljeno da se DC234 izvršava u pozadini a da je glavni upravljački

program RTHV, sa grafičkim interfejsom i funkcijama prilagođenim konkretnom poslu snimanja rasporeda brzina na ulazu u turbinu. Korisnik započinje novi posao (kampanju) i u okviru njega obavlja više različitih profilisanja (sesija). U svakoj sesiji može da odabere da li je u pitanju kontinualno profilisanje ili inkrementalno, sa zastajkivanjem, kao i da unese druge bitne parametre. Tokom merenja, grafički se prikazuju svi očitani podaci, stanje merne opreme, standardne devijacije brzina, crta se realni položaj rama i slično. Podaci sa DC234 se preuzimaju on-line sa zadatom brzinom. Zbog korišćenog Windows okruženja, moguće je da dođe do povremenog „zastoja“ u komunikaciji i da se neki podaci „preskoče“ – oni će biti naknadno učitani direktno iz logera! Kroz sistem komentara, u svakom trenutku se može uneti dodatna informacija (metapodatak) o trenutnom zapažanju ili očitavanju dispečera („Prestala da radi susedna turbina“, i slično) bitnom u kasnijem tumačenju i obradi podataka.

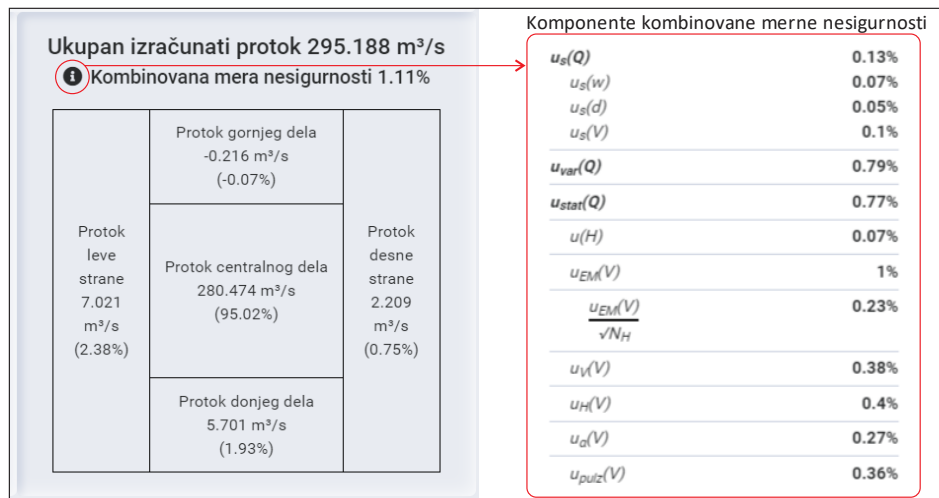


Slika 8. Softver za obradu podataka – radni ekran.

Figure 8. Data analysis software – working screen.

Softver za obradu podataka „AnalysisHydroVisual“ (AHV, Vodena, 2021) se pokreće po završenom profilisanju. Softver AHV omogućava preuzimanje off-line podataka sa ADV senzora, SCADA-e turbine kao i direktno preuzimanje merenih podataka iz EM sonde ako je tokom merenja dolazilo do zastajkivanja sistema i preskoka nekih od on-line podataka. Obrada podataka podrazumeva detaljan pregled podataka sa SCADA-e i izbor referentnog perioda, normalizaciju svih merenih podataka, pregled svih komponenti brzina (slika 8) i upoređivanje EM i ADV podataka, korekcije merenih podužnih komponenti u zonama gde je došlo do blokade senzora i na kraju, proračun protoka (slika 9) sa svim informacijama o komponentama izračunatog protoka kao i komponentama merne nesigurnosti.

Po završenoj jednoj obradi merenih podataka u sesiji, AHV sprema Zapisnik o obavljenom merenju u PDF formatu (slika 10) sa prikazanim režimom rada turbine tokom merenja i izabranim referentnim periodom, sa položajima rama tokom snimanja profila brzina, prostornom komponentom brzine (podužna komponenta prikazana bojom a dve poprečne vektorom), izmerenim i obračunatim protocima po sektorima kao i sa korišćenim analitičkim izrazom za ekstrapolaciju. S obzirom da je moguće birati različita podešavanja filtera, referentnog perioda i referentne veličine, kao i korigovati neke od merenih brzina, AHV omogućava pravljenje više varijanti obrade jedne merne sesije, pri čemu se pri generisanju finalnog Zapisnika (slika 10) „zaključava“ ta obrada.



Slika 9. Izračunat protok za obrađen profil brzina, sa komponentama merne nesigurnosti.

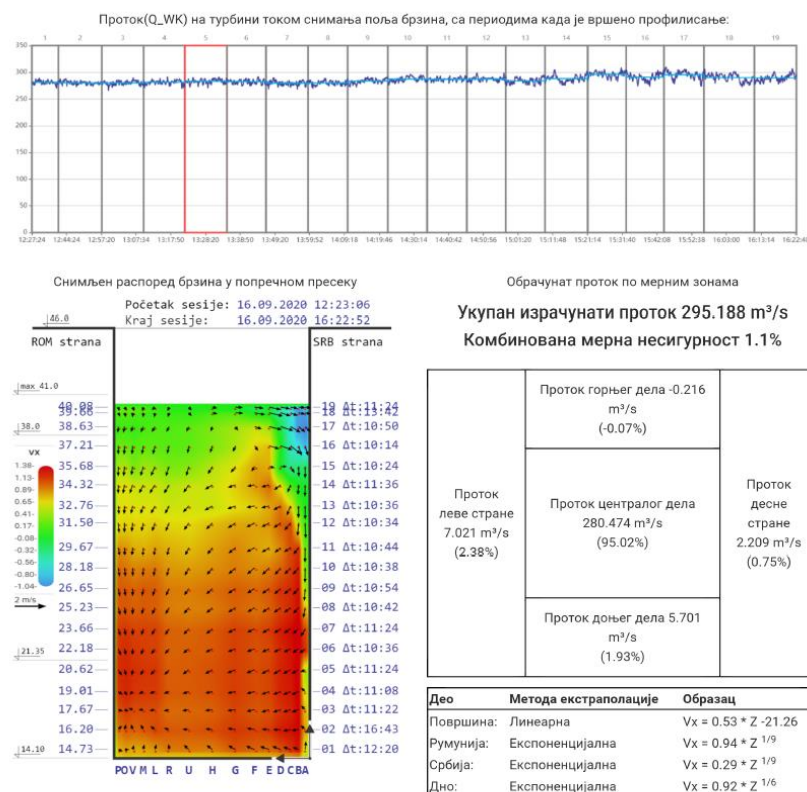
Figure 9. Computed flow rate for processed velocity profile, with all measuring uncertainty components.

Записник са снимања поља брзина и обрачуна протока на турбини ХЕ Ђердап 2

Датум обављеног мерења: 16.09.2020 у времену од: 12:23:06 до: 16:22:52.

Референтни профил број: 5 у времену од: 13:22:44 до: 13:34:08.

Турбина А1 са активном снагом на генератору у референтном периоду од 26.50 MW, средњим протоком у референтном периоду Q_WK 283.35 m³/s, и нето падом у референтном периоду од 9.51 m.



Обраду података урадио: Dusan

Датум обраде података: 23.09.2020 18:26

Slika 10. Записник о урађеном мерењу и обради.

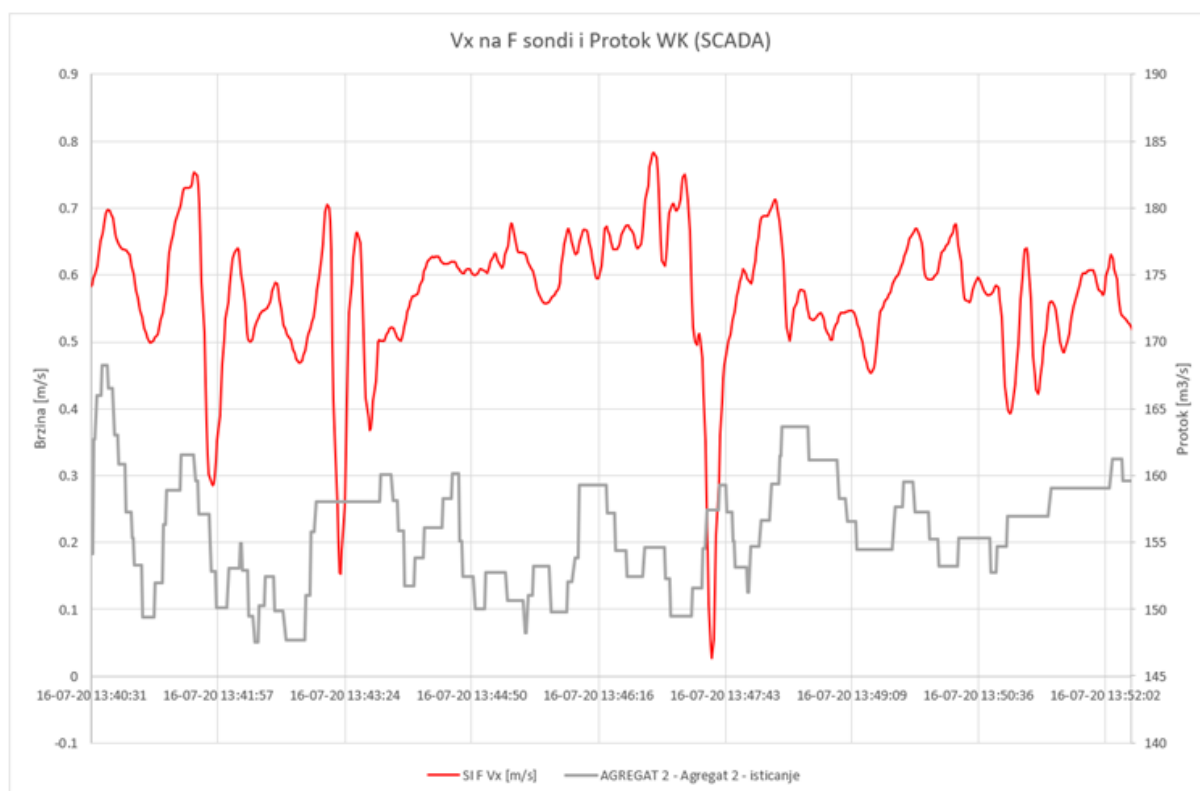
Figure 10. Report on measurement and flow computation.

3 Rezultati i diskusija

3.1 Inkrementalno profilisanje

3.1.1 Potrebno vreme merenja na jednom profilu

U inkrementalnom režimu profilisanja, korisnik sam odlučuje koliko će dugo ram mirovati na određenoj koti. Softver RTHV pomaže time što za trenutne vrednosti prikazuje sve komponente brzina i njihove standardne devijacije. Da bi se proverila kolika je neustaljenost strujanja prilikom konstantnog rada turbine, urađen je duži snimak brzina, bez osrednjavanja.



Slika 11. Podužna komponenta brzine na jednoj EM sondi na koti 24,054 m.

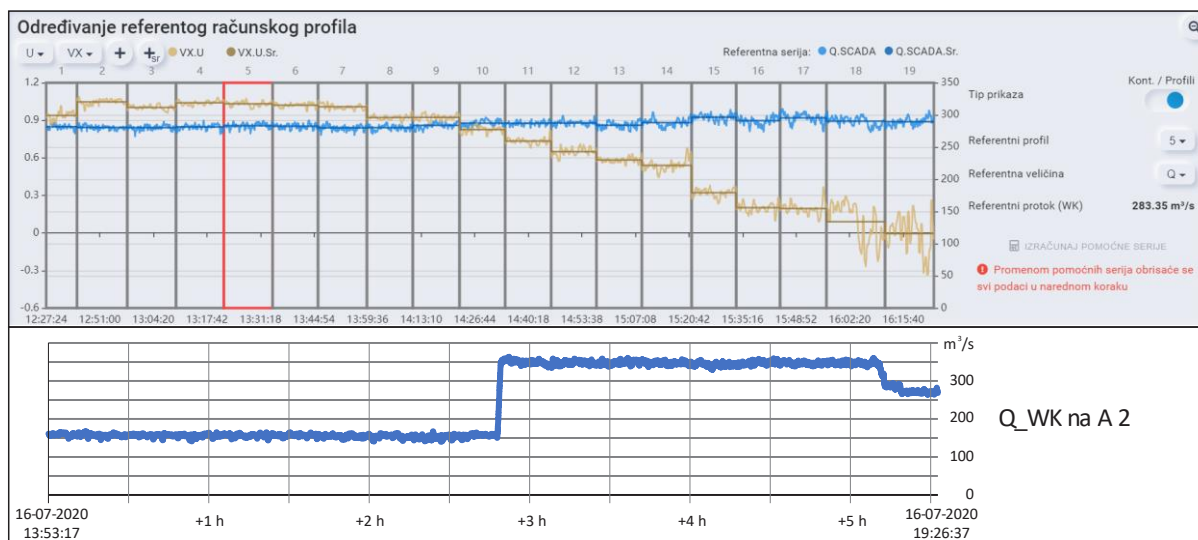
Figure 11. Streamwise velocity component on one EM probe at 24.054 m position.

Na slici 11 se vidi da, pored „bržih“ promena brzine, postoji i sporija komponenta varijacije od nekih 3 minuta. U razgovoru sa drugim istraživačima (Staubli, 2021) potvrđeno je da su uočene te spore varijacije protoka, koje najverovatnije potiču od automatike turbine. Naime, turbina je podešena za rad sa konstantnom snagom i povremeno se sprovodni aparat turbine podešava prema ostalim uslovima. Bilo bi interesantno ponoviti sličan snimak, ali sa isključenom automatikom turbine.

Na osnovu učinjenih provera kao i na osnovu iskustva sa obavljenih merenja, zaključeno je da je optimalno vreme osrednjavanja na jednom profilu 10 minuta.

3.1.2 Neustaljenost protoka tokom profilisanja

Izbor inkrementalnog profilisanja znači da će jedna merna sesija trajati par sati. U tom periodu će turbina automatski održavati snagu, ali će, ukoliko se promene radni uslovi usled rada okolnih agregata ili dotoka Dunavom, dolaziti do varijacija u protoku. Prema usvojenoj metodologiji, te varijacije će biti kompenzovane prema jednom, izabranom referentnom protoku.



Slika 12. Neustaljenost protoka tokom snimanja profila brzina (plava linija) i odabir referentnog protoka – gornja slika sa korektnim (malim) varijacijama, donja slika primer neprihvatljive promene tokom profilisanja.

Figure 12. Unsteady flow during velocity profiling (blue line) and selection of referent flow rate – upper figure demonstrates the case with small acceptable variations, lower figure is with unacceptable changes.

Na slici 12 gore, je prikazan redovan režim merenja, gde nije bilo velikih varijacija u dotoku na turbinu (mereno sa WK davačem, plava linija). Na dijagramu je (oker boja) nacrtana i podužna komponenta brzine za sondu na vertikali U (slika 8), trenutne vrednosti i osrednjene (merenja kreću od dna profila pa idu na gore). Korisnik bira koji će profil (period vremena) proglasiti za referentni (na slici 12 je to profil 5) i za taj profil se sve merene brzine normalizuju (za sve ostale profile se računa koeficijent neustaljenosti kao odnos referentnog i protoka na WK za taj profil, a onda se merenja brzina dele sa tako dobijenim koeficijentima). Moguće je, međutim, da tokom profilisanja dođe do značajne promene režima rada turbine (slika 12 donji deo, nesporazum sa dispčecom, nagle promene režima HE, ili nešto treće). S obzirom da koristimo WK merač koji je nelinearan i, verovatno, pogrešan, te veće promene nije moguće kompezovati i potrebno je odbaciti takvo merenje.

3.1.3 Merenja na turbinama A1 i A7

Primenom inkrementalnog profilisanja, sa osrednjavanjem od 10-tak minuta po profilu i sa 18 do 19 snimljenih profila, obavljena su merenja protoka na dva agregata A7 (27. i 28.08.2020.) i A1 (16. i 17.09.2020.) pri tri, odnosno četiri protoka.

Prva merna kampanja je bila od 24.08.2020. do 28.08.2020. pri čemu je samo merenje protoka obavljeno 27. i 28.08.2020. Snimljena su tri režima rada turbine A7. Tokom snimanja, susedne turbine A6 i A8 su radile sa istim snagama kao i turbina A7.

Komponente kombinovane merne nesigurnosti protoka, kao i vrednosti kombinovane (ukupne) merne nesigurnosti za tri izmerena protoka su prikazane u tabeli 1. Tokom merenja pri minimalnom protoku, Q_{wk} je povremeno padao na $0 \text{ m}^3/\text{s}$, što je u obradi (proračunu srednjeg protoka Q_{wk}) otklonjeno Mediana filterom.

Druga merna kampanja je bila od 14.09.2020. do 18.09.2020. a samo merenje protoka na turbini A1 je obavljeno 16. i 17.09.2020. Snimljena su tri režima rada turbine. Režim sa maksimalnim protokom je dva puta snimljen, pri čemu je tokom drugog snimanja došlo do promene rada turbine, (Q_{wk} je promenjen sa $280 \text{ m}^3/\text{s}$ na $260 \text{ m}^3/\text{s}$ u 19:40, od profila 12 do kraja merenja) koja je kompenzovana normalizacijom merenja. Tokom svih merenja, susedna turbina A2 je radila sa maksimalnom snagom u opsegu od 20 MW do 27 MW. Tokom merenja pri minimalnom protoku, Q_{wk} je često padao na $0 \text{ m}^3/\text{s}$ što u obradi podataka za tabelu 2 nije bilo moguće otkloniti Mediana

filterom. Umesto Qwk, za normalizaciju i procenu varijacije protoka je korišćena snaga agregata, a za proračun referentnog protoka je izabran profil 5 gde nije bilo ispada protoka na Qwk. Komponente kombinovane merne nesigurnosti protoka, kao i vrednosti kombinovane (ukupne) merne nesigurnosti za četiri izmerena protoka su prikazane u tabeli 2.

Tabela 1. Rezultati merenja rasporeda brzina i obračuna protoka na turbinama A7 i A1

Table 1. Results of velocity field measurement and flow computation for turbines A7 and A1

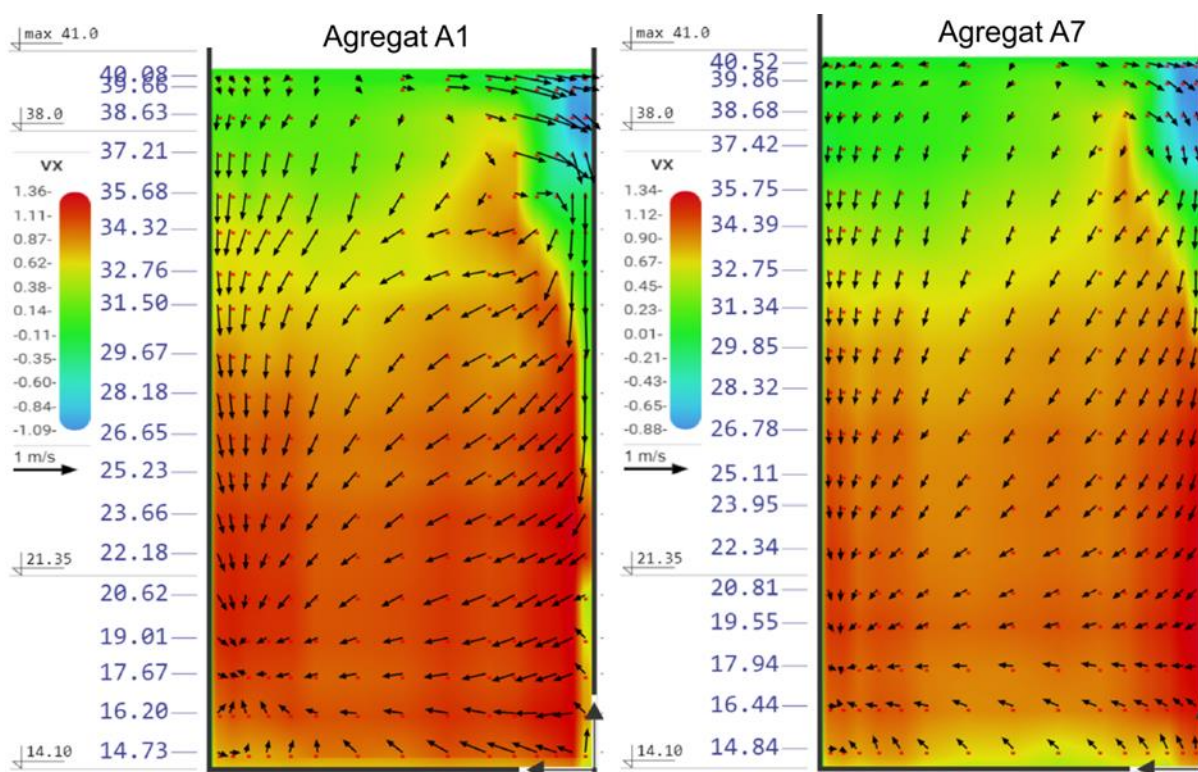
Datum	EM sonde		SCADA		Merna nesigurnost			
	Vreme profilisanja (od-do)	Obračunat protok Q	Referentni profil i vreme (od-do)	Protok Qwk	Sistematska nesigurnost	Nesigurnost usled varijabilnosti protoka	Slučajna (statistička) nesigurnost	Kombinovana nesigurnost
	hh:mm	m ³ /s	-	m ³ /s	%	%	%	%
27.08.2020.	09:43-13:23	288.6	7 10:54-11:05	299.3	0.13	0.71	0.91	1.16
28.08.2020.	11:37-15:11	202.5	7 12:46-12:57	220.8	0.13	0.35	0.95	1.02
27.08.2020.	14:50-19:34	108.1	6 15:48-15:58	122.4	0.13	0.42	1.47	1.53

Tabela 2. Rezultati merenja rasporeda brzina i obračuna protoka na turbini A1

Table 2. Results of velocity field measurement and flow computation for turbine A1

Datum	EM sonde		SCADA		Merna nesigurnost			
	Vreme profilisanja (od-do)	Obračunat protok Q	Referentni profil i vreme (od-do)	Protok Qwk	Sistematska nesigurnost	Nesigurnost usled varijabilnosti protoka	Slučajna (statistička) nesigurnost	Kombinovana nesigurnost
	hh:mm	m ³ /s	-	m ³ /s	%	%	%	%
16.09.2020.	12:23-16:23	295.2	5 13:23-13:34	283.4	0.13	0.77	0.77	1.10
16.09.2020	17:18-21:05	289.7	4 17:58-18:09	280.7	0.13	2.15	0.79	2.29
17.09.2020	16:00-19:26	182.5	5 17:00-17:11	186.9	0.13	1.13	1.06	1.55
17.09.2020	12:30-15:47	115.7	5 13:22-13:33	98.58	0.13	0.16	1.99	2.00

Na slici 13 je dat i raspored brzina na ulazu u turbine A1 i A7, pri maksimalnim protocima. Bojama su predstavljene podužne komponente V_x , a sa vektorima poprečne V_y i V_z . U gornjem desnom uglu je evidentan povratni tok, sa negativnim brzinama, dok je u donjem levom uglu maksimalna brzina. Osa turbine je na 21,35 mm, prečnim turbine 14,5 m pa je gornja kota ulaza turbine na 28,6 mm (slika 3).



Slika 13. Polje brzina na ulazu u turbine A1 i A7 pri maksimalnom protoku.

Figure 13. Velocity field at entrance of turbines A1 and A7, for maximal flow rate.

3.1.4 Nulti protok

Dobar test merne opreme je snimanje rasporeda brzina na ulazu u turbinu pri nultom protoku. Zbog rada okolnih agregata, postoji jaka vrtložna komponenta ispred ulaza u turbinu. Ta komponenta je „zadužena“ i za pomeranje naslaga trave: evidentno je nakon zaustavljanja turbine kako okolne turbine polako „izvlače“ travu iz profila!

Na slici 14 je dat rezultat snimanja polja brzina na agregatu A7 pri zatvorenom sprovodnom aparatu turbine. Izmerene brzine su u opsegu od par cm/s dok je obračunati protok $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Na žalost, korišćeno je samo 6 mernih profila tako da je jako grubo snimljen prostorni raspored brzina, pa je i procenjena kombinovana merna nesigurnost jako velika. I pored toga, na slici se lepo vidi vrtlog koji cirkuliše unutar preseka, praveći pozitivne i negativne brzine.

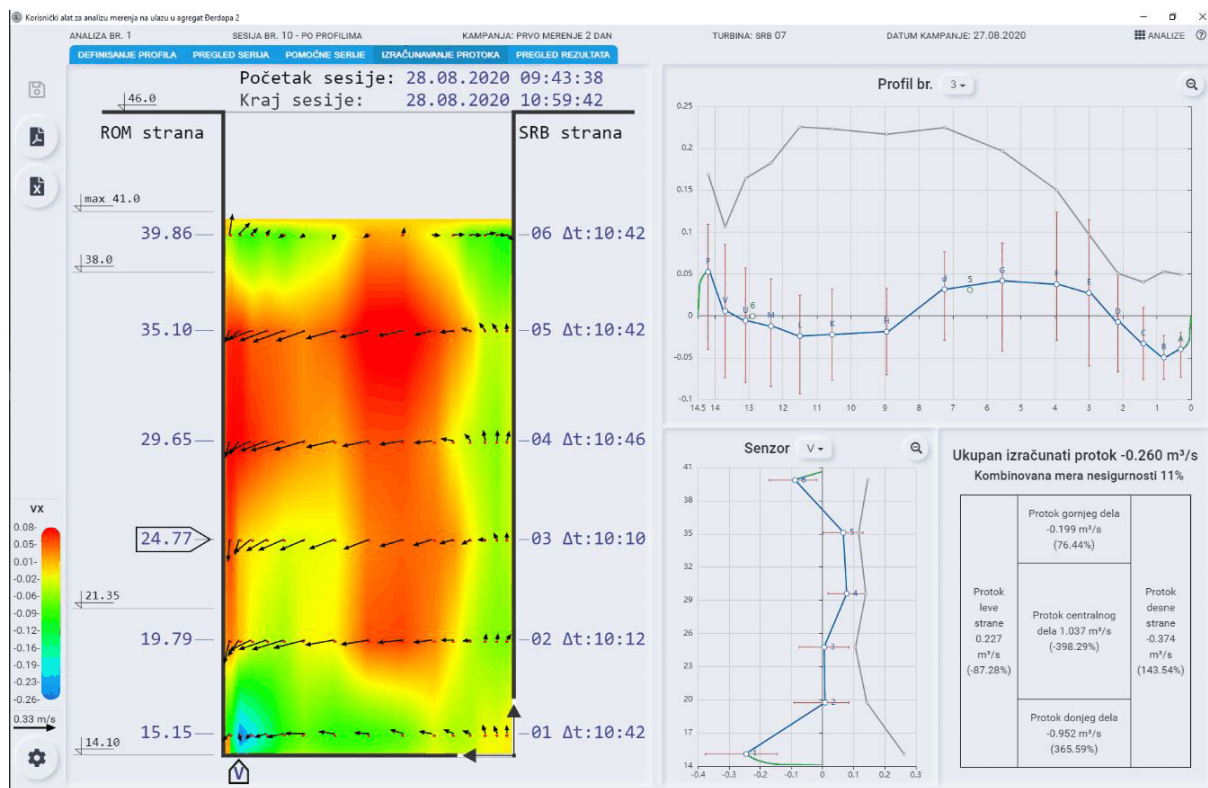
Iz rasporeda brzina i dobijenih rezultata se vidi da sonde dobro mere i brzine daleko ispod $0,05 \text{ m/s}$, u oba smera. Obračunati protok najverovatnije nije pokazatelj da voda zaista „ističe“ iz agregata i ide prema Dunavu, već je to greška merenja, koja je ispod $0,1\%$ punog opsega merne opreme od $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.1.5 Poređenje EM i ADV sondi

Na ramu sa opremom, pored 15 komada EM sondi, postavljene su i dve ADV sonde (slika 7 i detalj na slici 8). Prilikom obrade podataka, korisnik ima uvid u pokazivanje ADV sondi na lokacijama gde su postavljene (nije fiksna lokacija, korisnik bira gde će ih postaviti). Na slici 14 se u rasporedu brzina po profilu (gore desno) ADV prikazane zelenim kružićima i brojevima 5 (na $6,5 \text{ m}$ od desnog zida) i 6 (na 13 m). S obzirom da su merene jako male brzine, UZV metoda nije osetljiva na te brzine i pokazuje nulto čitanje!

Na slici 15 je dat uvećan prikaz merenja podužne komponente brzine na ADV sondi (crvena linja) i na EM sondi (zeleno linja) iz prve sesije drugog merenja, na A1, u profilima 8 i 9. Opseg

brzina na ordinati je od 0,8 – 1,2 m/s. Dat je sirovi signal, bez prostorne interpolacije (dve sonde ne mere u istoj tački), tako da se vidi da sonde ne mere iste vrtloge, ali ukupna osrednjena brzina je ista.



Slika 14. Polje brzina na ulazu u turbinu A7 pri zatvorenoj turbini (nulti protok).

Figure 14. Velocity field at entrance of turbine A7, closed turbine (zero flow rate).

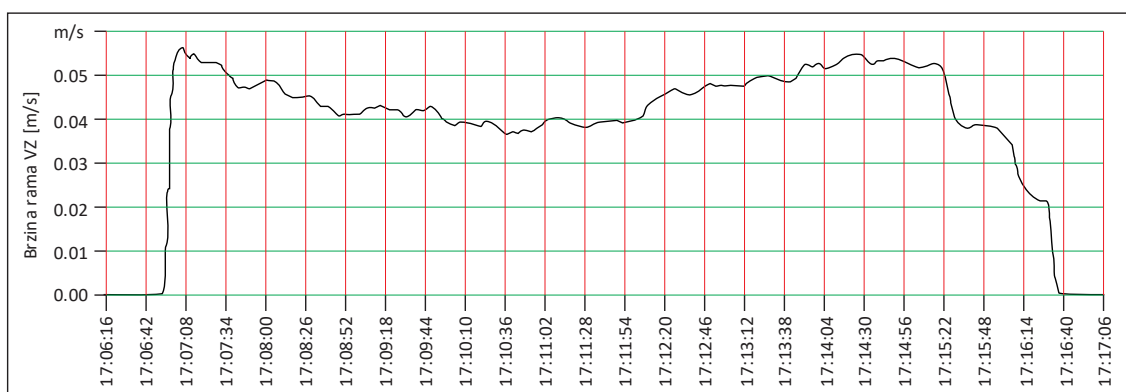


Slika 15. Poređenje podužne brzine merene EM sondom i ADV sondom.

Figure 15. Comparison of streamwise velocity component measured with EM and ADV probes.

3.2 Kontinualno profilisanje

Kontinualno profilisanje značajno ubrzava mernu sesije i omogućava da se snimi jedan profil brzina u celom strujnom polju za desetak minuta. Sa rukovaocem kрана je proverena mogućnost rada kрана sa kontinualnim sporim podizanjem (slika 16). S obzirom da se položaj rama meri u sekundnom intervalu, u softveru za obradu se računa brzina rama i smer i ta se brzina odbija od izmerenih vertikalnih komponenti brzina vode.



Slika 16. Brzina rama prilikom podizanja (VZ je pozitivno na gore).

Figure 16. Velocity of steel frame during towing (VZ positive is in upward direction).

Sa slike 16 se vidi da je moguće veoma sporo podizati ram (brzina VZ je pozitivna na gore), sa brzinama koje su do desetak puta manje od merenih vertikalnih komponenti brzine vode. Dok je ram u vodi, brzina je 0,036-0,056 m/s, kada ram počne da se pojavljuje iz vode brzina pada prvo na 0,038 m/s (kada se pojavi kolutača kрана) pa na 0,022 m/s. Za prosečnu brzinu podizanja rama od 0,045 m/s i visinu od 27 m, potrebno je $t=10$ minuta za snimanje celog profila.

Tabela 3. Rezultat tri ponavljanja proračuna jednog protoka profilisanjem.

Table 3. Results of three repeated computations of single flow using continuous profiling.

Datum	EM sonde		SCADA		Merna nesigurnost			
	Vreme profilisanja (od-do)	Obračunat protok Q	Referentni profil i vreme (od-do)	Protok Q _{wk}	Sistematska nesigurnost	Nesigurnost usled varijabilnosti protoka	Slučajna (statistička) nesigurnost	Kombinovana nesigurnost
	hh:mm	m ³ /s	-	m ³ /s	%	%	%	%
27.08.2020.	19:39 – 19:48	114.28	7 19:42-19:43	128.31	0.13	1.61	2.28	2.79
27.08.2020.	19:51 – 20:00	108.27	4 19:53-19:54	125.33	0.13	1.07	2.13	2.39
27.08.2020.	20:10 – 20:19	111.92	4 20:12-20:13	121.74	0.13	0.76	2.33	2.45

U tabeli 3 su dati rezultati kontinualnog profilisanja u jednoj radnoj tački turbine A7. Urađena su tri merenja u istoj radnoj tački da bi se proverila ponovljivost. U obradi rezultata sve serije su diskretizovane po visini na segmente od 1,5 m (u 18 profila) i izračunate su srednje vrednosti po segmentima. Nakon toga, sprovedena je analiza kao da je rađeno inkrementalno profilisanje. Iz tabele 3 se vidi da je dobijena značajno veća slučajna merna nesigurnost, jer su periodi osrednjavanja jako kratki.

Prednost kontinualnog snimanja je što se brzo obavi posao snimanja polja brzina, a osnovna mana je što se ne osrednje dobro vrtlozi koji postoje u profilu. Ponavljanjem više merenja (što je i učinjeno na oba merenja), ako se ne menjaju radni uslovi, trebalo bi da se osrednjavanjem snimljenog protoka, dobije tačniji podatak. Na žalost, većim brojem ponavljanja se opet otvara pitanje dugotrajne stabilnosti režima rada agregata.

4 Zaključak

Razvijena metodologija, merna oprema kao i softver za merenja i obradu su uspešno primenjeni na dve turbine HE „Đerdap 2“. Na osnovu dobijenih rezultata, moguće je podesiti ugrađene Winter-Kennedy merače protoka. Održan je i kurs, obuka inženjera sa HE koji mogu dalje da nastave sa merenjima na ostalim turbinama kako bi proveravali i rekalisirali ostale Winter-Kennedy merače protoka. Pored podatka o protoku, korisan je podatak i o izmerenim nivoima, kako bi proverili merenja nivoa i padova na turbinama koje koristi postojeća SCADA. Prilikom narednih korišćenja opreme, neophodno je obavljati periodično pregled EM i ADV sonde, funkcionalno (očitanje nulte brzine) i brzinski, makar na jednu podužnu komponentu brzine ($V_x=1$ m/s).

Tokom primene razvijene metodologije snimanja profila brzina, uočeni su i određeni problemi, koje bi trebalo u narednim merenjima otkloniti:

- Plivajuća trava - Turbine tokom rada privlače dosta plutajuće trave. Ta trava dolazi plutajući u paketima, i na svu sreću, pokazalo se da ne smeta tokom merenja pod vodom, da se „ne kači“ na EM ni ADV sonde. Najugroženije su sonde u gornjim profilima, kada ram svojim dizanjem „pokupi“ travu i iznese je iz profila. Da bi se smanjila opasnost od uticaja trave na merne sonde, potrebno je grajferom pre merenja obaviti detaljno čišćenje rešetke. Redovna procedura podrazumeva samo skidanje i odnošenje krupnijih balvana i grana, dok se trava rasrese i vrati ponovo u vodu! Potrebno je grajferom čišćenje obaviti pri maloj snazi agregata, dok je trava „zalepljena“ za rešetke, i tu travu izneti iz profila. Takođe, uočeno je da rad susednih agregata utiče na kretanje trave u dovodu na agregat gde se meri: ako susedni agregati promene režim rada, „njihova“ trava će preći u profil koji se meri (ako se smanji protok na susednim agregatima) ili će povući travu iz merenog agregata (ako se poveća protok).
- Napajanje sistema – svi merni uređaji (EM sonde, ADV sonde, nivomeri i shaft-enkoderi) su „pametni“ uređaji sa svojim akumulatorima i lokalnom memorijom, sa primarnim zadatkom da kontinualno rade svoj posao. Lako se dogodi da korisnik nije svestan ponašanja opreme u svakoj od situacija (posebno po završenom merenju, pri „parkiranju“ sistema) i da pojedini uređaji počnu da troše više ili manje struje. Potrebno je odlično poznavanje sistema da bi se lokalni rad kontrolisao, ali i veći akumulator i ispravljač, kao i jasnija pravila čuvanja opreme preko noći.
- Akvizicija podataka – kao osnova za merenja u realnom vremenu koristi se PC sa Windows operativnim sistemom. Zbog prirode Windows-a paralelni rad DC234, AHV i drugih Win aplikacija je teško sinhronizovati i kontrolisati. Pri merenjima sa $\Delta t=1$ s bilo je relativno dosta „izgubljenih“ podataka (svi logeri u sondama čuvaju te izgubljene podatke), tek sa $\Delta t=2$ s je uspešno sprovedeno merenje, uz uslov da se korisnik „ne igra“ previše na računaru. Bolja bi bila varijanta da se DC234, kao vremenski kritična aplikacija koja komunicira sa mernim sistemom na MODBUS-u, izvršava na odvojenom računaru a da na mrežnom nivou DC234 šalje AHV aplikaciji merene rezultate.

Literatura

1. Bluerobotics (2021) *Ping Sonar Altimeter and Echosounder*, Bluerobotics, USA <https://www.bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sonar/ping-sonar-r2-rp/>
2. IEC 60041 (1999) *International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines*. European Equivalent: EN 60041
3. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2006) *Hidraulički model HE „Đerdap 2“ – Izveštaj ispitivanja na hidrauličkom modelu uslova dostrujavanja na turbine*, Beograd.
4. Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet – Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumentata (2020) *Izveštaj o sistemu za merenje protoka na prilazima HE „Đerdap 2“*, Beograd.
5. Ivetić D. (2019) *Određivanje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja primenom ravnih elektromagnetnih senzora*, *Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet Beograd.

19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

6. Ivetić D., Prodanović D., Vojt., P (2021a) Novel discharge measurement system at the turbine intakes of Iron Gate 2 hydropower plant: a system description, *8th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, Subotica, Srbija, April.
7. Ivetić D., Prodanović D., Vojt P. (2021b) Određivanje protoka na prilazima cevnih turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka. *SDHI i SDH*, Beograd.
8. ISO 1088, (2007) Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
9. ISO 748, (2007) Velocity area methods, *International Standards Organization*, Geneva.
10. Joint committee for Guides in Metrology (2008) Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), *International Organization for Standardization*.
11. NORTEK (2021) <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m>
12. Performance Test Code - PTC (2002) Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines, *American Society of Mechanical Engineers*, New York, USA
13. Prodanović D., Pavlović D., Branisavljević N. (2011) Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE „Đerdap 2“, *Vodoprivreda*, 43, broj 252-254, strane 103-115.
14. Staubli T. (2021) Private communication, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, thomas.staubli@hslu.ch
15. Svet Instrumenata (2021) <http://www.si.co.rs/>
16. TE CONNECTIVITY (2021) MEAS 86 Series Sensors <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-MIPS0020.html>
17. UniMeasure (2021) <https://unimeasure.com/wp-content/uploads/2019/12/HX-EP-SERIES-CATALOG-PAGES-1.pdf>
18. Vodena (2021) <https://vodena.rs/>