

METODA ZA ODREĐIVANJE PROTOKA NA ULAZU U TURBINE HE „ĐERDAP 2“

Dušan PRODANOVIĆ¹, Nikola MILIVOJEVIĆ², Damjan IVETIĆ¹, Predrag VOJT²

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

² Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”

REZIME

Protok vode kroz turbinu je jedna od najznačajnijih veličina u postupku upravljanja radom agregata, ali je istovremeno i veličina koju je najteže pouzdano izmeriti. Merna nesigurnost je obično veća nego kod merenja ostalih osnovnih veličina, pritiska i dubine vode, otvorenosti sprovednog kola turbine ili električnih parametara. U okviru analize uticaja kosog dostrujavanje i plana revitalizacije cevnih 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 postavlja se na ulazu u turbinu, uzvodno od grube rešetke. Okosnicu sistema čini 15 elektromagnetnih (EM) senzora za merenje 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 celokupno 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, u konačnom obračunu protoka, koriste i odgovarajući podaci o radu turbine. Merni sistem je korišćen u dva režima rada: inkrementalnom, sporijem ali veće tačnosti i u kontinualnom režimu. 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 data su neka zapažanja sa obavljenih merenja na agregatima HE „Đerdap 2“.

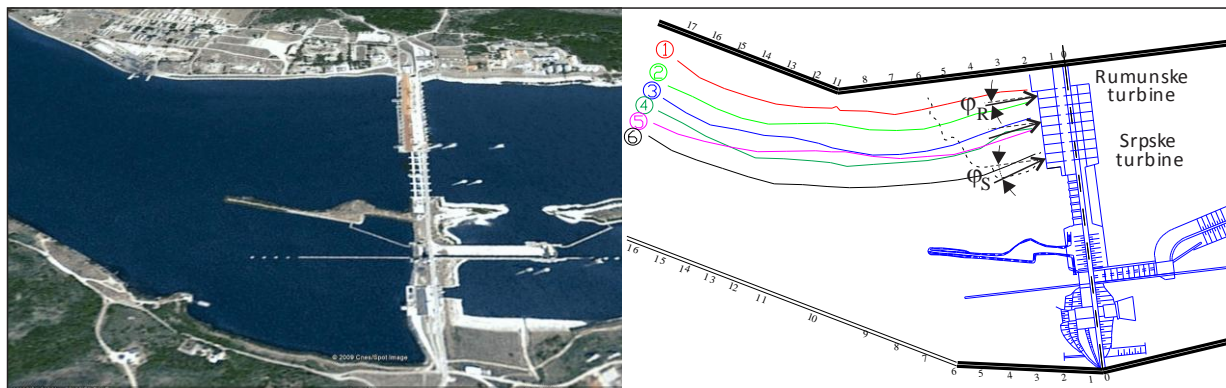
Ključne reči: Merenje brzine, Merenja protoka, Merna nesigurnost, Elektromagnetni senzori

1 UVOD

Hidroelektrana „Đerdap 2“ je druga zajednička srpsko-rumunska hidroelektrana na Dunavu. Sagrađena je 1984. godine, 80 km nizvodno od HE „Đerdap 1“. Zapremina jezera je $716,5 \times 10^6$ m³, što je relativno malo, tako da HE radi kao protočna. Sastoji se od osnovne i dve dodatne elektrane, dve prelivne brane, dve brodske prevodnice i dva razvodna postrojenja (slika 1). Na srpskoj strani elektrane je ukupna instalisana snaga generatora 270 MW pri maksimalnom protoku od 4 220 m³/s (10 agregata po 27 MW pri protoku od 422 m³/s). Agregati su kapsulni cevni sa Kaplanovim turbinama i projektovani su za padove od 2,5 do 11 metara. Prosečna godišnja proizvodnja električne energije je oko 1 500 GWh (HE „Đerdap 2“, 2021).

Uslovi na terenu prilikom izgradnje elektrane su diktirali nesimetričnu dispoziciju, tako da je dostrujavanje vode na turbine pod značajnim uglom (IJČ, 2006; Prodanović i ostali, 2011). Tokom rada HE je i utvrđeno da agregati bliže prelivu (srpski, bliže sredini brane) imaju niži stepen iskorišćenja od agregata koji se nalaze uz levu obalu (rumunski, slika 1 desno). Zbog različitih uglova dostrujavanja na agregat u odnosu na one koji su bili na fizičkom modelu, kao i značajnog uticaja nizvodnih uslova u različitim režimima rada elektrane, rezultati ispitivanja na modelu se ne mogu direktno preneti na objekat (Benišek i ostali, 1994). Tačnost određivanja protoka preko razlike pritisaka na razdeonom zidu (ispod turbine, pomoću Winter-Kennedy metode) kao i na osnovu merenog pada vode i snage, koristeći dijagrame i relacije sa ispitivanja na fizičkom modelu, je zbog toga upitna.

U narednom periodu je planirana revitalizacija cevnih agregata na HE „Đerdap 2“ pri čemu je jedan od ciljeva i podizanje hidrauličke efikasnosti. Zbog toga što realni uslovi dostrujavanja nisu kao na modelu, neophodno je kvantifikovati postojeće uslove i proveriti hidrauličke



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).

karakteristike turbina pre revitalizacije, kao i nakon revitalizacije. Jedan od poslova je i utvrđivanje protoka kroz turbine u realnim radnim uslovima uz određivanje i postignute merne klase.

Merenje protoka na hidraulički kratkim objektima, kao što je ulaz u turbinu HE „Đerdap 2“, posebno u realnim radnim uslovima, je 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. U radu Prodanović i ostali (2011) detaljno su analizirane različite merne metode koje bi mogle da dođu u obzir, počev od mehaničkih klasičnih hidrometrijskih krila, preko elektromagnetnih sondi, ultrazvučnih Doppler i transite-time metoda, do specifičnih metoda baziranih na prostiranju zvuka. Nakon pregleda različitih raspoloživih metodologija, kao i nakon probnih merenja, ponuđeno je rešenje za pouzdano određivanje protoka zasnovano na metodi Brzina-Proticajni presek, pri čemu se koristi klizni ram sa većim brojem elektromagnetnih sondi koje mere ne samo podužnu komponentu brzine, već i obe poprečne komponente. Da bi se zadovoljili postavljeni uslovi u ponuđenom rešenju, projektovane su i napravljene nove 3D EM sonde, koje su praktično funkcionisale kao EM (hidrometrijska) krila kao i čelični ram širine 14,5 m i visine 3,1 m. Petnaest EM sondi je postavljeno na ram, koji se pomoću kрана može spuštati i podizati po visini proticajnog preseka i tokom rada agregata sa

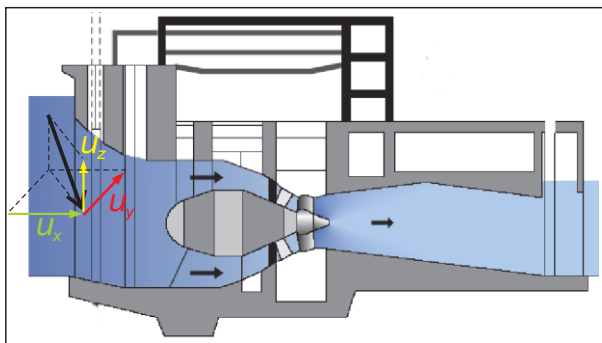
maksimalnom snagom. Zajedno sa dva enkodera položaja, dva senzora dubine i dva redundantna ADV senzora brzine, prikupljeni su podaci pomoću kojih je određena srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka (IJČ i ostali, 2020; Ivetić i ostali, 2021a; Prodanović i ostali, 2021). Budući da je sistem inovativnog karaktera, posebno je razvijena procedura za procenu merne nesigurnosti protoka (Ivetić i ostali, 2021b), u kojoj se obračunavaju 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 metodologija za određivanje protoka na ulazu u turbine HE „Đerdap 2“, merenjem rasporeda brzina ispred ulazne rešetke agregata. Prikazana je korišćena oprema, klase tačnosti za svaku od merenih veličina, prateći softver za upravljanje merenjima i softver za obradu prikupljenih podataka sa merne opreme kao i sa SCADA sistema koji upravlja agregatima. Na kraju rada su dati i primeri dobijenih rezultata merenja na turbinama A1 i A7, sa komentarima i preporukama za moguća dalja poboljšanja.

2 METODOLOGIJA ODREĐIVANJA PROTOKA

2.1 Proračun protoka na osnovu realnog 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.

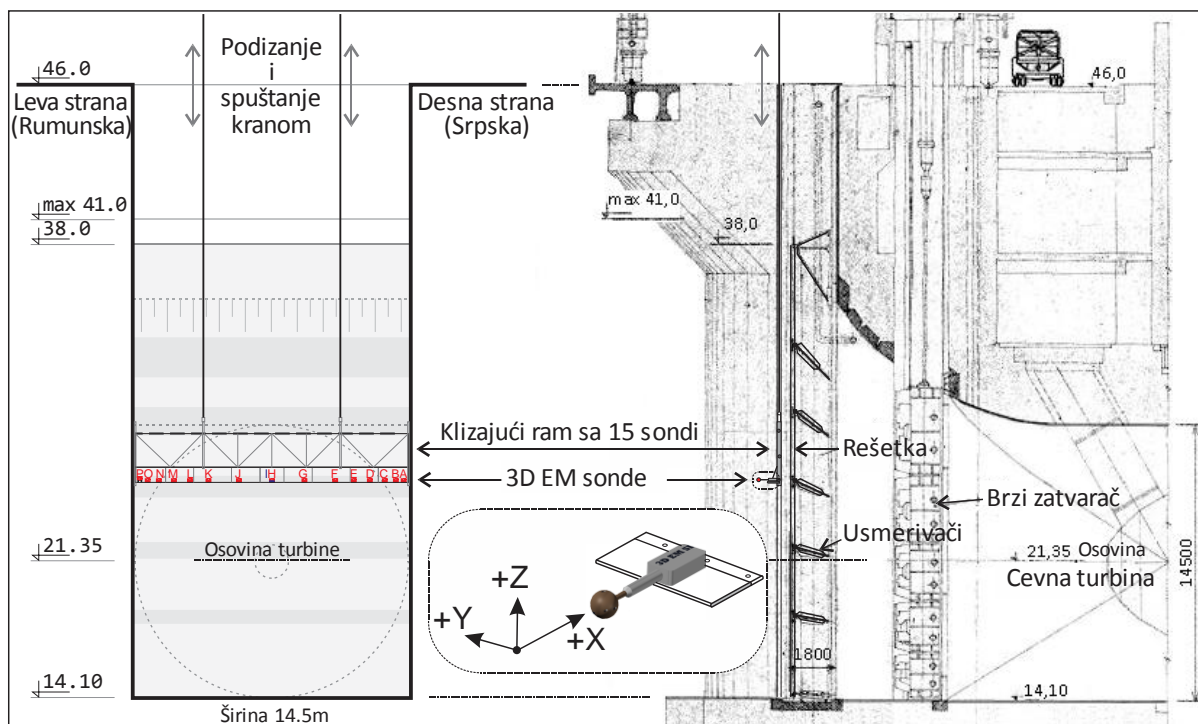


Slika 2. Cevna turbina sa dostrujavanjem koje onemogućava standardno merenje protoka.

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.

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 vođice 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 spuštavanje predturbinskog zatvarača, tako da nije bilo dozvoljeno postavljanje opreme na njegovoj lokaciji.

Na slici 3 se vidi da je predviđeno postavljanje 15 sonde na horizontalnom nosaču čeličnog rama, koji se kranskom dizalicom prvo spušta na dno proticajnog preseka, pa se zatim u okviru jedne merne sesije



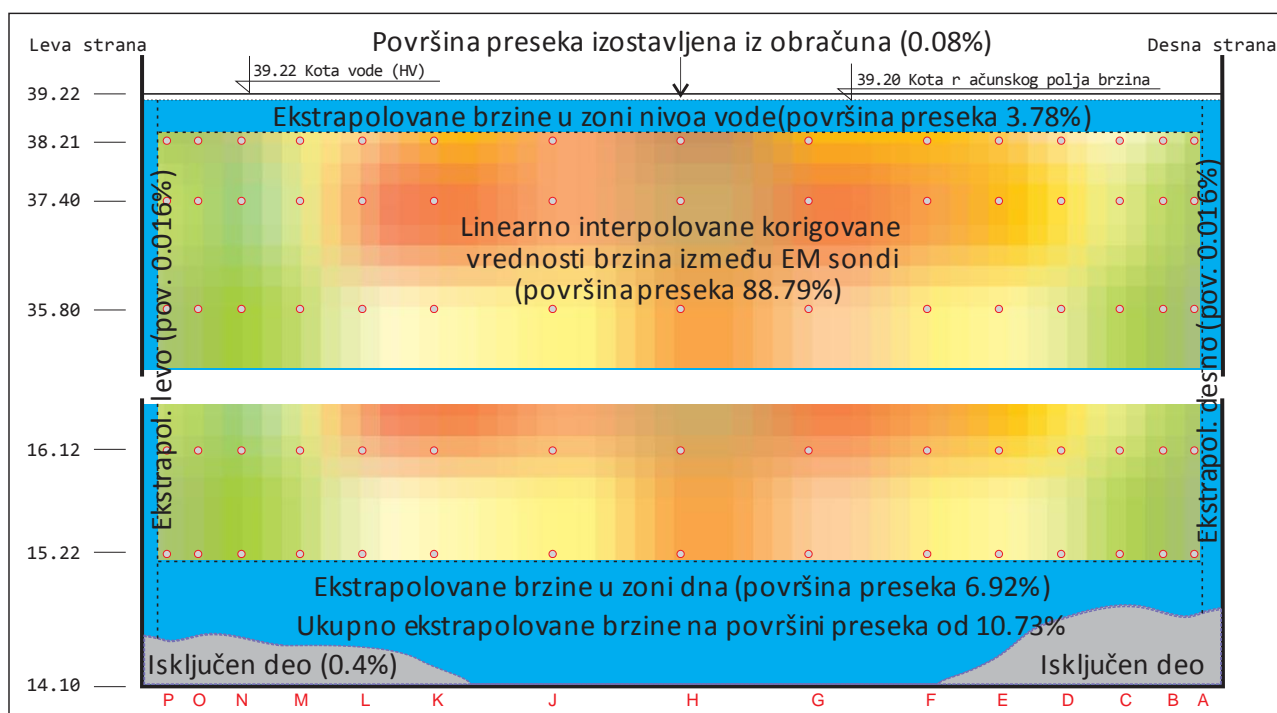
Slika 3. Merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, pomoću sonde koje mere sve tri komponente brzine.

(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 te merne horizontale. Tokom kretanja rama, sva merna oprema kontinualno radi i može da beleži podatke na svaku sekundu (IJČ i ostali, 2020).

Usvojeni sistem snimanja profila brzina na ulazu u turbinu sa pokretnim ramom je kompromis između suprotstavljenih zahteva: visoke tačnosti merenja, brz rad, neuticanje na radne parametre turbine i prihvatljive cene. Sa stanovišta merne nesigurnosti, kao i neustaljenosti protoka, bolje bi bilo postaviti fiksni ram kojim bi se ceo ulazni profil istovremeno snimao pomoću N horizontalata, a na svakoj horizontali bi bilo 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. Takođe, takav sistem bi značajno povećao pad nivoa na mernoj rešetki, što bi na turbinama HE „Đerdapa 2“ bio relativno veliki poremećaj s obzirom da je ukupni radni 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 (sa prosečnom brzinom podizanja rama od 0,045 m/s i visinom 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 sprovednog aparata i neto pad. Podatak o promenama u odnosu na izabrani referentni protok (ili snagu) se koristi u procesu normalizovanja svih merenih veličina.



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

Na slici 4 je prikazan prostorni raspored podužne (U_x) komponente brzine nakon normalizacije. Ceo merni profil je rasterizovan pravilnom mrežom kvadrata sa korakom $\Delta Y = \Delta Z = 0,05$ 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.

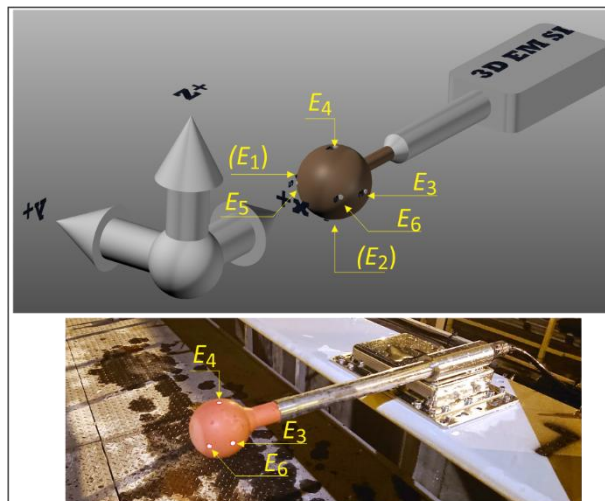
Protok kroz merni profil je jednak integralu rasterizovanog polja brzina V_x , podužne komponente. Taj protok se na kraju poredi sa protokom izmerenim na WK davaču, u periodu koji je izabran kao referentni prilikom normalizovanja merenih podataka. Podaci o druge dve komponente brzina se ne koriste u 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 prostornog polja brzine

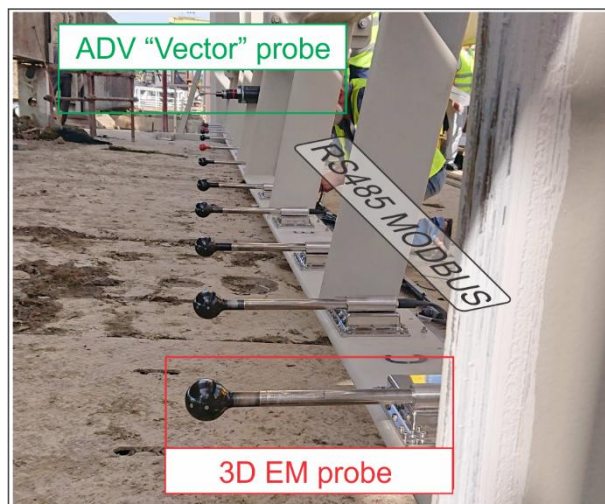
Merenje brzina je obavljeno elektromagnetnim sondama (Ivetić, 2019; Prodanović i Ivetić, 2019). Na slici 5 levo je prikazana novorazvijena 3D EM sonda LOG-xXYZ-65 proizvođača „Svet Instrumenta“, sa svojim lokalnim koordinatnim sistemom. Prečnik sferne merne glave je 63 mm a ukupna merna zona sonde je 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 nazivu sonde oznaka 3+D). Podužna komponenta V_x je uglavno osetljivija i može se koristiti samo za uži 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 sa elektrodama



Slika 6. Korišćena 3D+EM sonda montirana na ram zajedno sa ADV sondom

Da bi se obezbedilo kontrolno merenje brzine, pored 3+D EM sonde, na merni ram (slika 6, u gornjem delu slike) su postavljene i dve trokomponentne ADV sonde „Vector“ proizvođača NORTEK, fabrički predviđene za horizontalnu ugradnju. Tačnost sonde je 1%. Sonde imaju ugrađen logger, 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 loggerom i sa baterijskim pogonom, bez spajanja na komunikacioni sistem.

2.3 Analiza neodređenosti merenja i proračuna protoka

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).

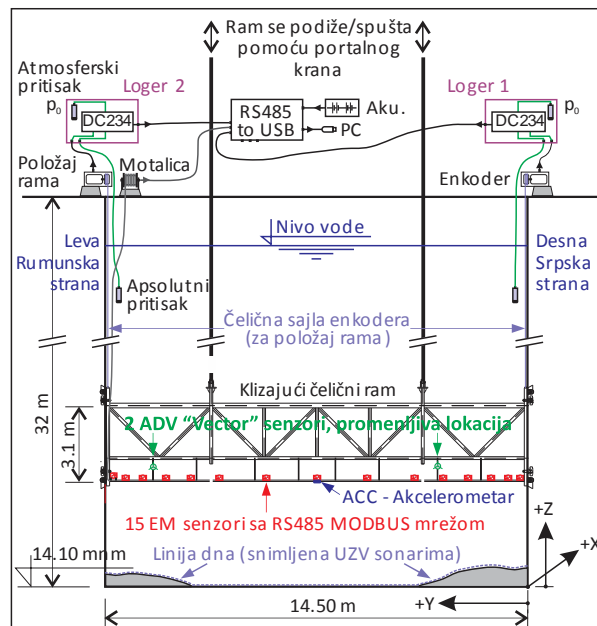
Kako je merni sistem inovativnog karaktera, sa novorazvijenim EM sondama i specifičnim režimima rada, razvijena je posebna procedura za određivanje merne nesigurnosti (Ivetić i ostali, 2021b). U osnovi, ukupnu mernu nesigurnost izmerenog protoka čine tri komponente: sistematska nesigurnost, statistička nesigurnost i novo dodata nesigurnost izmerenog protoka usled varijabilnosti uslova na agregatu tokom merenja. Sistematsku nesigurnost definišu odstupanja determinističkog karaktera koja se mogu javiti u proceni protoka kao i osnovnih veličina preko koje se određuje protok, dubina, širina proticajnog preseka i brzina. Statističku nesigurnost definišu uticaji na merni rezultat koji su stohastičkog karaktera, koji se javljaju kao posledice promene mernih uslova kao i nesavršenosti merne opreme. Ovde su se našle nesigurnosti usled konačnog broja mernih tačaka po vertikali i horizontali, nesigurnosti samih merila, nesigurnosti usled veličine napadnog ugla kao i usled turbulენტnih pulzacija u toku. Konačno, budući da merenja, tokom jedne merne sesije, mogu trajati i po nekoliko sati, tokom kojih je teško održati protok konstantnim, uvedena je nesigurnost usled varijabilnosti uslova tokom trajanja merne sesije.

2.4 Merni sistem

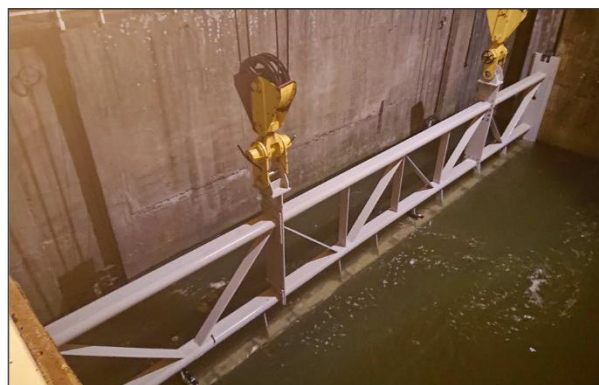
Merenja prema opisanoj metodologiji su urađena pomoću sistema koji je prikazan na slici 7, gde je dat šematski prikaz celokupne korišćene opreme.

Čelični ram dimenzija (14,5 x 3,1 m) je projektovan sa gornjim nosećim delom rešetkastog tipa sa masovnim hidraulički oblikovanim profilima i sa relativno tankom donjom gredom za kačenje mernih sonde, 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 fotografiji na slici 8 se

vidi ram prilikom merenja u poslednjem, najvišem profilu mernog preseka (pa su ADV sonde iznad površine vode). Ram je okačen na kran na mestu gde se spajaju segmenti.

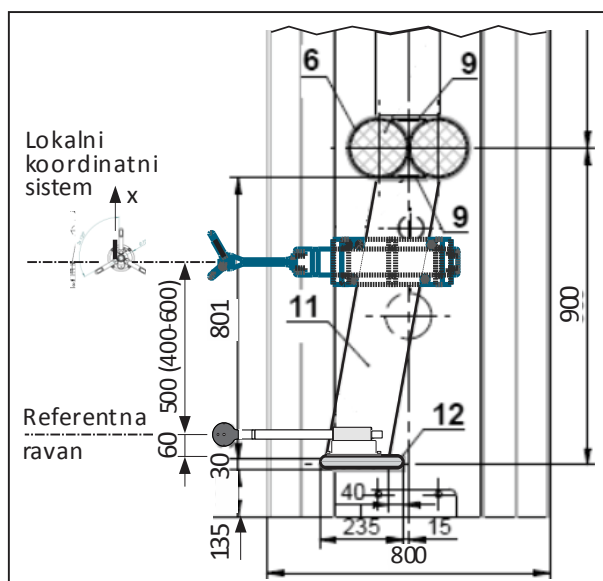


Slika 7. Sistem za merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu



Slika 8. Fotografija sistema za merenje rasporeda brzina na ulazu u turbinu, ram je u najvišjoj mernoj poziciji za EM sonde, ADV sonde su u ovom najvišljem profilu izvan vode, ne mere brzine

Na ram je postavljen akcelerometar, kako bi se proverile oscilacije rama, frekvencija i amplituda, pri različitim režimima rada turbine. Zahvaljujući svom obliku i dizajnu ukućenja, kao i sistemu vođica, ram je pokazao minimalna pomeranja tokom merenja.



Slika 9. Detalj rama sa sondama

Na donjoj gredi rama je postavljeno 15 EM sonde, sa većom gustoćom u zonama bliže zidu (slika 7). Merna zona je pozicionirana ispod glavne konstrukcije rama (slika 9, profili 6 i 9 su nosači donjeg dela rama) i ispred noseće grede (pozicija 12 na slici 9) kako bi se smanjio uticaj rama na merene brzine. 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-ekoder, 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% od specificiranog radnog opsega. 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-ekodera 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 sonde 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. Te sonde imaju svoje interno napajanje i dataloger. 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 sprovodnog kola. Sinhronizacija ovih „off-line“ podataka se vrši preko realnog vremena.

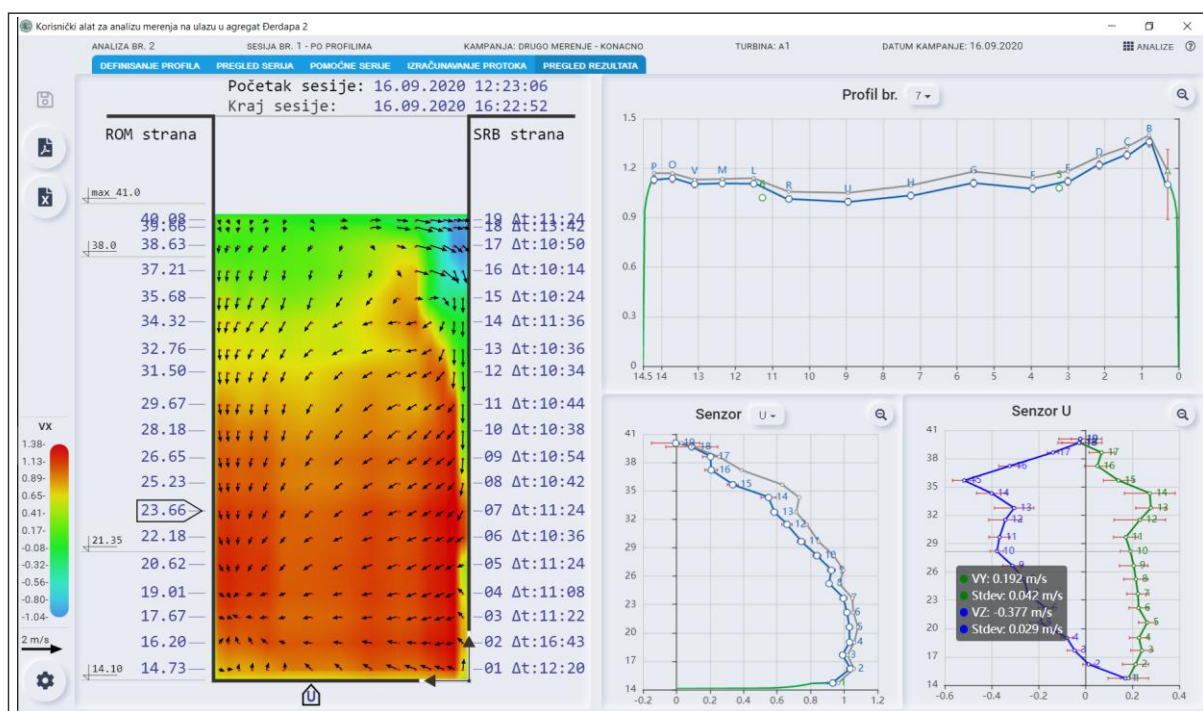
2.5 Softver za akviziciju i obradu

Softveri za akviziciju i obradu su pravljani za Windows PC računare i izvršavaju se na jednom prenosnom računaru.

Softver za akviziciju se sastoji od dve komponente: programa „DC234Server“ (DC234, Svet Instrumentata, 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 10. Softver za obradu podataka – radni ekran

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 10) i upoređivanje EM i ADV podataka, korekcije merenih podužnih komponenti u zonama gde je došlo do blokade senzora i na kraju, proračun protoka 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 11) 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 11) „zaključava“ ta obrada.

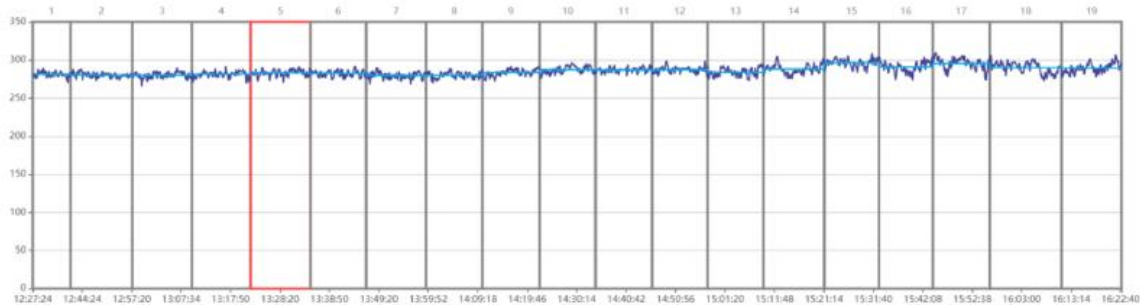
Записник са снимања поља брзина и обрачуна протока на турбини ХЕ Ђердап 2

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

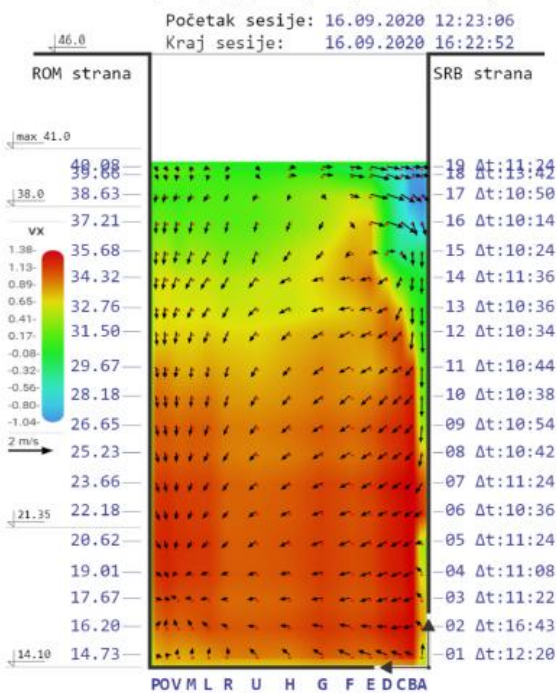
Референти профил број: 5 у времену од: 13:22:44 до: 13:34:08.

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.

Проток(Q_WK) на турбини током снимања поља брзина, са периодима када је вршено профилисање:



Снимљен распоред брзина у попречном пресеку



Обрачунат проток по мерним зонама

Укупан израчунати проток 295.188 m³/s
Комбинована мерна несигурност 1.1%

Проток леве стране 7.021 m³/s (2.38%)	Проток горњег дела -0.216 m³/s (-0.07%)	Проток десне стране 2.209 m³/s (0.75%)
	Проток централог дела 280.474 m³/s (95.02%)	
	Проток доњег дела 5.701 m³/s (1.93%)	

Део	Метода екстраполације	Образац
Површина:	Линеарна	$V_x = 0.53 * Z - 21.26$
Румунија:	Експоненцијална	$V_x = 0.94 * Z^{1/9}$
Србија:	Експоненцијална	$V_x = 0.29 * Z^{1/9}$
Дно:	Експоненцијална	$V_x = 0.92 * Z^{1/6}$

Обраду података урадио: Dusan

Датум обраде података: 23.09.2020 18:26

Слика 11. Записник о урађеном мерењу и обради

3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Inkrementalno profilisanje

3.1.1 Potrebno vreme merenja na jednom profilu

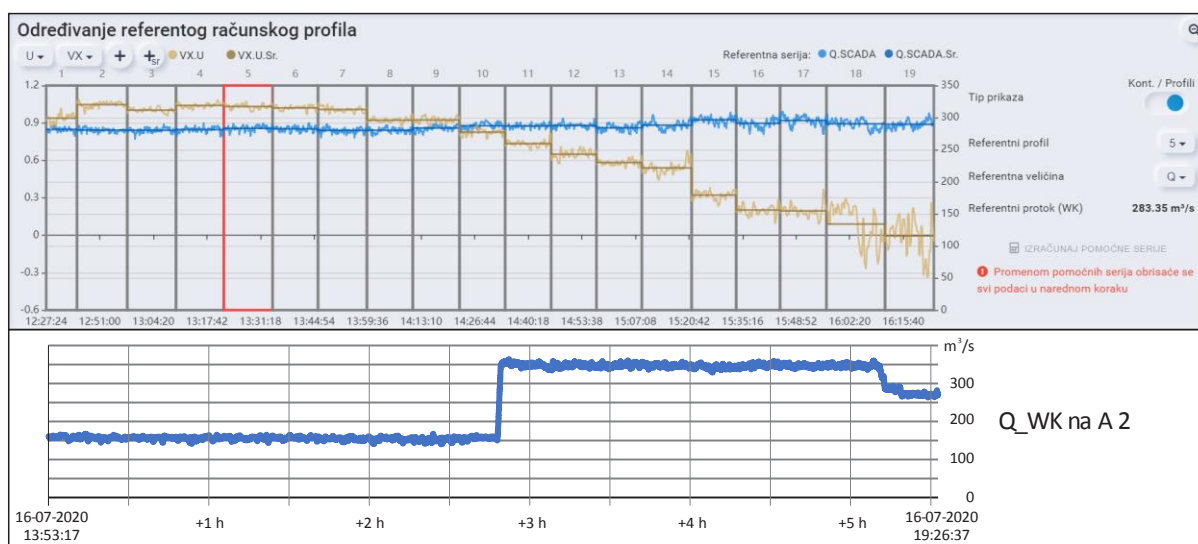
U inkrementalnom režimu profilisanja, korisnik sam odlučuje koliko će dugo ram mirovati na određenoj koti. Softver RTHV pomaže time što za trenutne vrednosti prikazuje sve komponente brzina i njihove standardne devijacije. Neustaljenost strujanja prilikom konstantnog rada turbine je proverena dužim snimanjem brzina u jednom profilu. Ustanovljeno je da, pored „bržih“ varijacija brzine usled postojanja turbulencije koja utiče i na varijacije protoka i pada, postoji i sporija komponenta varijacije od nekih 3 minuta. U razgovoru sa drugim istraživačima (Staubli, 2021) potvrđeno je da su uočene takve spore varijacije protoka na hidroelektranama sa sličnom dispozicijom (mali pad, kratak dovodni trakt, široki ulazni profil). Te spore

varijacije utiču na potrebno vreme osrednjavanja prilikom merenja parametara, posebno rasporeda brzina, odnosno protoka i potrebno ih je proveriti na svakom objektu posebno.

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.

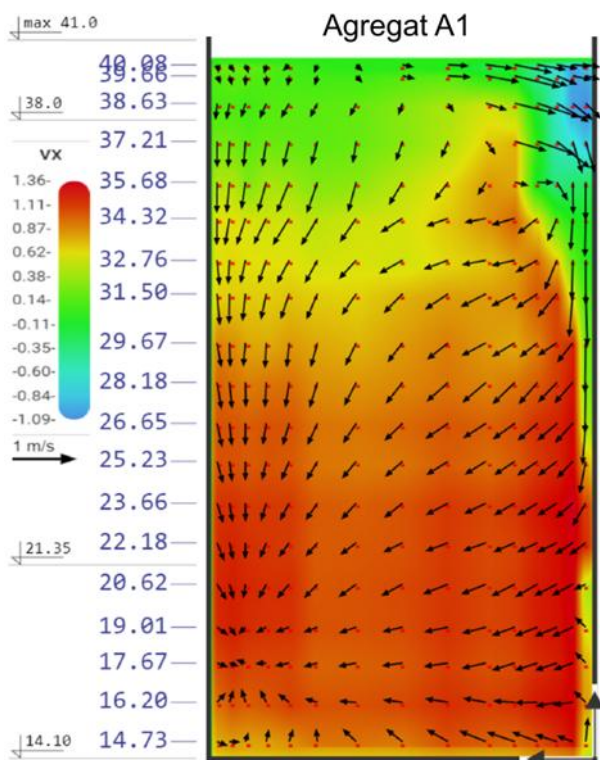
Na slici 12 gore, je prikazan redovan režim merenja, gde nije bilo velikih varijacija u dotoku na turbinu (mereno sa WK davačem, plava linija). Na dijagramu je (oker boja) nacrtana i podužna komponenta brzine za sondu na vertikali U (slika 10), trenutne vrednosti i osrednjene (merenja kreću od dna profila 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 dispečerom, nagle promene režima HE, ili nešto treće). S obzirom da koristimo WK merač koji je nelinearan i, verovatno, pogrešan, te veće promene nije moguće kompenzovati 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. Kombinovane (ukupne) merne nesigurnosti za sva merenja su u rasponu 1,02 do 1,5%, jedino je pri maksimalnom protoku, pri promeni uslova rada agregata (slika 12 dole) dobijena kombinovana merna nesigurnost od 2,3% pa je to merenje ponovljeno. 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 ugrađenim Mediana filterom.



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

Na slici 13 je dat i raspored brzina na ulazu u turbinu A1, 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 uočena 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).

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.

Snimanja polja brzina na agregatu A7 pri zatvorenom sprovodnom aparatu turbine, dobijene su izmerene brzine u opsegu od par cm/s dok je ukupno 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 bila velika (veća od 5%). Obračunati protok naravno nije pokazatelj da voda zaista „ističe“ iz agregata i ide prema Dunavu, već je to greška merenja, koja je, i pored grubo snimljenog profila brzina, bila 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 (slike 7, 8 i detalj na slici 9). Kako ADV sonde nisu spojene na on-line sistem, tokom merenja korisnik nema na ekranu njihova trenutna očitavanja. Međutim, 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 10 se u rasporedu brzina po profilu (gore desno) ADV prikazane zelenim kružićima i brojevima 5 (na 6,5 m od desnog zida) i 6 (na 13 m).



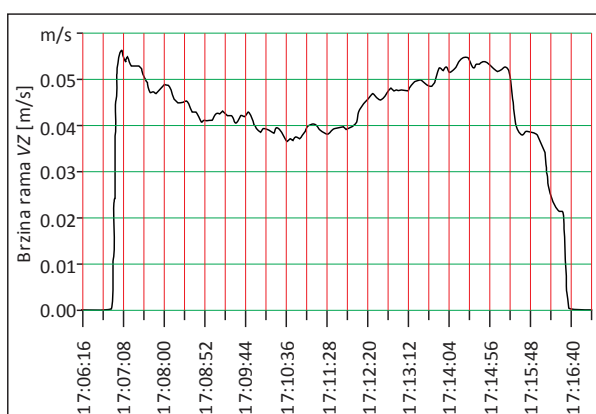
Slika 14. Poređenje podužne brzine merene EM sondom i ADV sondom.

Na slici 14 je dat uveličan prikaz merenja podužne komponente brzine merene ADV sondi (crvena linija) i na EM sondi (zeleno plava linija) iz prve sesije drugog merenja, na A1, u profilima 8 i 9. Opseg brzina na ordinati je razvučen na 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.

3.2 Kontinualno profilisanje

Kontinualno profilisanje značajno ubrzava mernu sesiju i omogućava da se snimi jedan profil brzina u celom strujnom polju za desetak minuta. Sa rukovaocem kрана

je proverena mogućnost rada krana sa kontinualnim sporim podizanjem. Na slici 15 je prikazana brzina rama, merena preko enkodera, tokom kontinualnog podizanja. Ta brzina će, prilikom snimanja profila brzina, biti dodata vertikalnoj komponenti brzine vode. S obzirom da se položaj rama meri u sekundnom intervalu, u softveru za obradu se računa brzina rama i smer (pozitivna brzina je smer na gore) i ta se brzina odbija od izmerenih vertikalnih komponenti brzina vode.



Slika 15. Brzina rama prilikom podizanja (VZ je pozitivno na gore).

Sa slike 15 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 kolotača krana) 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 (za jednu sesiju profilisanja).

Tokom merenja na turbini A7, urađeno je kontinualno profilisanje. Da bi se proverila ponovljivost, snimljene su tri sesije u istoj radnoj tački. 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. Dobijeni rezultati pokazuju značajno veću slučajnu mernu nesigurnost, jer su periodi osrednjavanja jako kratki. Ukupna kombinovana nesigurnost je bila u opsegu 2,39 do 2,79% za tri ponovljena profilisanja.

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: za dati primer, kombinovana merna nesigurnost bi se smanjila na 1,47%. Na žalost, većim brojem ponavljanja se opet otvara pitanje dugotrajne stabilnosti režima rada agregata.

4 ZAKLJUČAK

Zbog dispozicije elektrane HE „Đerdap 2“ i hidrauličkih uslova, postojeći posredni sistemi za određivanje protoka pomoću Winter-Kennedy metode i peko karakteristika turbine, koji su inicijalno podešeni u odnosu na sprovedena modelska ispitivanja, nisu bili do sada proveravani direktnim merenjima protoka. Razlog za to je što postojeći standardi ne definišu pravila za merenja u uslovima kada postoji izrazita neravnomernost prostorne komponente brzine. S obzirom na to da je u planu skora revitalizacija cevnih agregata uz podizanje hidrauličke efikasnosti, bilo je neophodno kvantifikovati postojeće karakteristike turbina, a pre svega omogućiti pouzdano određivanje protoka u realnim radnim uslovima.

U radu je prikazana razvijena metodologija koja omogućava merenje protoka na bilo kom agregatu HE „Đerdap 2“ bez njegovog zaustavljanja i posebnih pripremnih radnji. Prikazana je merna oprema, prateći sistemi i softver za merenja i obradu, koji su uspešno primenjeni na dve turbine HE „Đerdap 2“. Na osnovu dobijenih rezultata, moguće je izvršiti podešavanje ugrađene Winter-Kennedy merače protoka.

S obzirom da je metodologija i oprema koja se koristi složena, tokom obavljenih merenja održan je i kurs, obuka inženjera sa elektrane, za korišćenje i održavanje sistema. Prilikom narednih korišćenja opreme, posebno ako protekne više od godinu dana ne korišćenja sistema, 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) na kanalima za tariranje hidrometrijskih krila. Takođe, neophodno je proveriti status baterija u svakom od uređaja (ES sonde, ADV sonde i shaft-enkoderi).

Pored podatka o protoku, tokom obavljenih merenja na dva agregata se pokazalo da je jako korisan i podatak o izmerenim nivoima ispred rešetke. Sa stanovišta sistema koji upravlja radom agregatom, to je redundantan podatak ali se pokazalo da je zgodan za proveru merenja nivoa i padova na turbinama koje koristi postojeća SCADA.

Tokom primene razvijene metodologije snimanja profila brzina, uočeni su i određeni problemi, na koje bi trebalo u narednim merenjima obratiti pažnju. To je pre svega problem plivajuće trave: turbine tokom rada privlače dosta plutajuće trave koja „dolazi“ plutajući u paketima. Pokazalo se da trava ne smeta tokom merenja pod vodom („ne kači“ se na EM ni ADV sonde) a najugroženije su sonde u gornjim profilima, kada ram svojim dizanjem „pokupi“ travu i iznese je iz profila. Da bi se smanjio uticaja trave 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).

ZAHVALNOST

Rad je rezultat posla „Oprema za merenje protoka na brani HE Đerdap 2“ koji je Institut „Jaroslav Černi“ zaključio sa investitorom JP „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak HE Đerdap, jula 2019. godine, a u okviru te nabavke je Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu razvio metodologiju i koncipirao softvere za akviziciju i obradu podataka. U ovom radu se prikazuje samo metodologija merenja, dok se za sve konkretne podatke i rezultate merenja čitaoci upućuju na investitora. Autori rada se posebno zahvaljuju kolegama sa HE „Đerdap 2“ koji su aktivno učestvovali u pripremi merenja, obuci i organizaciji merenja tokom 2020. godine.

LITERATURA

- [1] Benišek M., B. Ignjatović, M. Nedeljković (1994): *Uticaj kosog dostrujavanja vode na karakteristike cevni turbina*. 11. Savetovanje Hidrauličara i Hidrologa, Beograd.
- [2] Bluerobotics (2021): *Ping Sonar Altimeter and Echosounder*, Bluerobotics, USA, <https://www.bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sonar/ping-sonar-sonar-r2-tp/>
- [3] HE „Đerdap 2“ (2021): <http://www.eps.rs/cir/djerdap>
- [4] 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
- [5] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ (2006): *Hidraulički model HE „Đerdap 2“ – Izveštaj ispitivanja na hidrauličkom modelu uslova dostrujavanja na turbine*, Beograd.
- [6] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet – Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata (2020): *Izveštaj o sistemu za merenje protoka na prilazima HE „Đerdap 2“*, Beograd.
- [7] Ivetić D. (2019): *Određivanje protoka tečnosti u složenim uslovima strujanja primenom ravnih elektromagnetnih senzora*, *Doktorska disertacija*, Građevinski fakultet Beograd.
- [8] Ivetić D., D. Prodanović, P. Vojt (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.
- [9] Ivetić D., D. Prodanović, P. Vojt (2021b): *Određivanje protoka na prilazima cevni turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka*. *SDHI i SDH*, Beograd.
- [10] ISO 1088, (2007): *Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods*, *International Standards Organization*, Geneva.
- [11] ISO 748, (2007): *Velocity area methods*, *International Standards Organization*, Geneva.
- [12] Joint committee for Guides in Metrology (2008) *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, *International Organization for Standardization*.
- [13] NORTEK (2021): <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m>
- [14] Performance Test Code - PTC (2002): *Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines*, *American Society of Mechanical Engineers*, New York, USA
- [15] Prodanović D., D. Pavlović, N. Branislavljević (2011): *Merenje protoka na kratkim objektima u hidrauličkim neregularnim uslovima na primeru HE „Đerdap 2“*, *Vodoprivreda*, 43, broj 252-254, strane 103-115.

- [16] Prodanović D., D. Ivetić (2019): Primeri primene ravnih elektromagnetnih sondi za merenje protoka u kolektorima, *Vodoprivreda*, 51, broj 300-302, strane 197-209.
- [17] Prodanović D., D. Ivetić, P. Vojt (2021): Određivanje protoka na prilazima cevnih turbina uz pomoć EM senzora brzine: Prikaz merne metode, *SDHI i SDH*, Beograd.
- [18] Staubli T. (2021): Private communication, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, thomas.staubli@hslu.ch
- [19] Svet Instrumenata (2021): <http://www.si.co.rs/>
- [20] TE CONNECTIVITY (2021): MEAS 86 Series Sensors <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-MIPS0020.html>
- [21] UniMeasure (2021): <https://unimeasure.com/wp-content/uploads/2019/12/HX-EP-SERIES-CATALOG-PAGES-1.pdf>
- [22] Vodena (2021): <https://vodena.rs/>

DISCHARGE MEASUREMENT METHOD AT INTAKES OF HE “DJERDAP 2” TURBINES

by

Dušan PRODANOVIĆ¹, Nikola MILIVOJEVIĆ², Damjan IVETIĆ¹, Predrag VOJT²

¹ University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering

² Institute for Water Management “Jaroslav Černi”

Summary

Discharge, or the flow rate, is quantity important for optimal control of turbine. However, at the same time the discharge is the most difficult to accurately measure. Measurement uncertainty is typically higher than other influential quantities, like water pressure or depth, mechanical turbine parameters or electrical parameters. Furthermore, the procedure for the measurement uncertainty assessment is more complex, mainly due to the large number of sensors used in the measurement process and the specific flow conditions at the measurement site. As a part of the revitalization plans for the HE “Djerdap 2”, with a goal to improve 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 (EM) 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 phase additional turbine data are used to evaluate the discharge. Two operating modes of the system are tested: 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 experience gained during measurements on HE “Đerdap 2”.

Keywords: Velocity measurements, Discharge measurements, Measurement uncertainty, Electromagnetic sensors

Redigovano 6.9.2021.