

MERENJE PROTOKA NA KRATKIM OBJEKTIMA U HIDRAULIČKI NEREGULARNIM USLOVIMA NA PRIMERU HE „ĐERDAP 2“

Dušan PRODANOVIĆ, Dragutin PAVLOVIĆ, Nemanja BRANISAVLJEVIĆ
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

REZIME

Merenje protoka na objektima gde ne postoje uslovi za formiranje pravolinijskog razvijenog turbulentnog strujanja predstavlja poseban izazov. I pored značajnog napretka u razvoju merne tehnike, ne postoji univerzalna metoda kojom je moguće izmeriti protok sa u napred poznatom tačnošću. U ovom radu je napravljen presek trenutno raspoloživih metoda sa osvrtom na njihovu upotrebljivost u složenim uslovima kao što je slučaj prostornog rasporeda brzina. Kao primer, razmatran je problem merenja protoka na zahvatima agregata hidroelektrane HE „Đerdap 2“. Zbog asimetričnog položaja elektrane u odnosu na maticu toka reke Dunava, kao i zbog toga što radovi na čišćenju dna uzvodno od brane nisu sprovedeni do kraja, voda na turbine dotiče pod izvesnim uglom. Taj ugao je veći kod turbina bližih sredini brane (kod srpskih turbina) dok je kod turbina postavljenih uz levu obalu (rumunsku) zanemarljiv. Da bi se analizirao uticaj kosog dostrujavanja na rad turbina, neophodno je izmeriti protoke. Kako su kod primenjenih kratkih cevni agregata loši hidraulički uslovi za kvalitetno merenje protoka standardnim metodama, u radu se analiziraju moguće varijante snimanja prostornog rasporeda brzina. Za slučaj korišćenja elektromagnetnih sondi, obavljena je i provera uticaja smetnji od strane magnetnog polja generatora. Na kraju, procenjena je moguća tačnost merenja protoka kao i cena takvog sistema.

Ključne reči: merenje protoka, tačnost, turbine

1. UVOD

Protok je, pored nivoa vode, jedna od osnovnih i najvažnijih veličina u hidrotehnici. Merenje protoka, na žalost, nije uvek jednostavno. Metode visoke tačnosti, kao što su masene metode, koje mere direktno proteklu masu (ili zapreminu) u jedinici vremena su primenljive samo na manjim sistemima i za male protoke. Na

velikim hidrotehničkim sistemima, protok se uvek meri posredno ili merenjem neke druge veličine (na primer, nivo vode ispred preliva) i proračunom preko poznate hidrauličke zavisnosti (Q/H kriva) ili merenjem brzine u jednoj ili više tačaka po poprečnom preseku i njihovom integracijom. Posredno merenje preko nivoa zahteva postojanje namenskog objekta ili hidraulički dobro osmišljenog dela objekta gde je Q/H veza jasna i stabilna. Ukoliko ne postoji takav objekat, kao jedino rešenje ostaje merenje brzina.

Merenje protoka na objektima u realnim radnim uslovima je posebno komplikovano i zahteva analizu svakog pojedinog slučaja. Za većinu slučajeva postoje međunarodni i domaći standardi, ali svi ti standardi propisuju postojanje takvih uslova da se dozvoli formiranje razvijenog turbulentnog polja brzina, tako da je moguće unapred pretpostaviti raspored brzina. Ako se koristi metoda merenja brzina, zbog ponovljivosti strujne slike standardi obično propisuju i očekivanu tačnost ukoliko se mere brzine u određenom broju tačaka i ako se na osnovu toga integrišu u protok.

U stvarnosti je situacija često nepovoljnija. Merenja se organizuju na mestima gde je fizički moguće prići objektu i postaviti mernu opremu. To najčešće znači da nisu ispunjene pretpostavke o dugačkim pravolinijskim deonicama, sa simetričnim i razvijenim poljem brzina i da postoje, osim podužne, i značajne poprečne komponente brzina, a često i značajno zavojno strujanje. U takvim uslovima je moguće primeniti neku od standardnih mernih metoda, ali će greška merenja biti značajno veća od greške koju predviđa proizvođač opreme i korisnik neće imati dobru procenu dobijene pouzdanosti merenja. U novije vreme se kombinuju računске metode kojima se modelira strujna slika u okolini objekta a zatim se merenjima brzina u hidraulički „poznatim“ uslovima računa protok. Jedan primer takve metodologije je dat u radu Zindović i ostali (2010), gde je modelirano prostorno strujanje reke Save

u blizini zahvata vode za postrojenje Makiš, a zatim je model kalibrisan na osnovu terenskih merenja.

Ako je neophodno obaviti merenja protoka u neregularnim uslovima, na objektima koji su kratki i postavljeni nesimetrično u odnosu na fluidnu struju gde postoji značajno prostorno strujanje, jedino rešenje je da se izmere sve tri komponente vektora brzine, po celom preseku, u jednom trenutku. Projekcijom izmerenih komponenti na pravac upravan na mernu ravan dobijaju se podužne brzine, a njihovom integracijom protok. Na pouzdanost integrisanja se može uticati smanjenjem i povećanjem broja mernih tačaka, dok se ukupna pouzdanost može odrediti kao kombinacija pouzdanosti metode za merenje brzina, pouzdanosti metode za pozicioniranje sondi u prostoru, pouzdanosti podataka o mernom preseku i pouzdanosti metode inegriranja brzina u protok.

Jasno je da zahtev da se u jednom trenutku izmere sve komponente brzina nije moguće ispuniti u terenskim uslovima. U laboratoriji postoje složene metode (na primer PIV- Particle Image Velocimetry) kojima bi moglo da se obavi ovakvo merenje. U novije vreme se koristi varijanta Large Scale PIV koja je primenljiva na objektima. U radu Branisavljević i Prodanović (2006) su pokazali primenu LS PIV na merenje protoka kišne vode ka jednom kolektoru. Međutim, kako se mere samo površinske brzine, a brzine po dubini se računaju iz pretpostavljenog modela tečenja, LS PIV metoda je primenljiva samo za relativno plitke tokove.

U ovom radu se analiziraju tehničke mogućnosti za merenje protoka merenjem prostornog rasporeda brzina na objektima, u hidraulički neregularnim uslovima gde nije moguće primeniti standardne metode. Daje se ukratko prikaz nekoliko savremenih metoda koje bi se mogle primeniti, sa osvrtom na princip rada svake od metoda i uticajem prostorne neravnomernosti brzina na metodu.

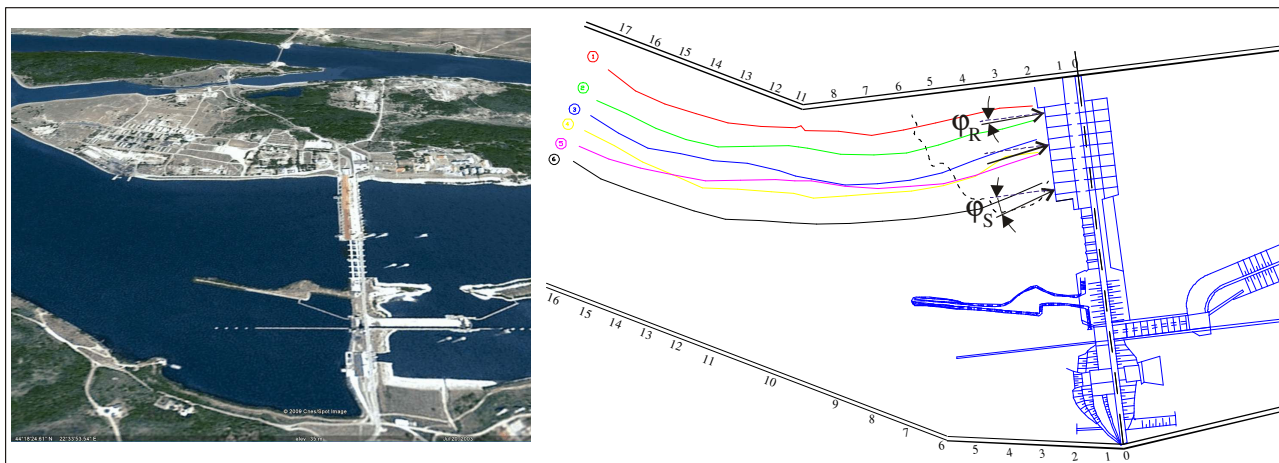
Da bi se približila tematika, kao primer na kome se analizira upotrebljivost metode, izabran je problem merenja protoka na agregatima HE „Đerdap 2”, odnosno merenje protoka na ulaznoj građevini agregata. Na kraju rada, za jednu od metoda koja je procenjena kao najrealnija da se primeni u uslovima merenja na HE „Đerdap 2”, dat je predlog rešenja sa procenom potrebnih resursa (Prodanović, 2010). Naravno, izabrano rešenje je optimalno za dati primer i trenutne uslove razvoja opreme, posebno ponude na domaćem tržištu, što znači da ne predstavlja najbolje rešenje u opštem smislu.

2. HE „ĐERDAP 2” I USLOVI ZA MERENJE PROTOKA

Hidroelektrana „Đerdap 2” je druga zajednička srpsko-rumunska hidroelektrana na Dunavu. Sagrađena je 1984. godine na 863. kilometru Dunava od ušća u Crno more, odnosno 80 km nizvodno od HE „Đerdap 1”, kao kompleksan i višenamenski hidrotehnički objekat. Sastoji se od osnovne elektrane, dve dodatne elektrane, dve prelivne brane, dve brodske provodnice i dva razvodna postrojenja (slika 1, levo). Svakoj strani, srpskoj i rumunskoj, pripada po jedan od pomenutih objekata. Osnovna elektrana, kao građevinska celina, podeljena je na dva jednaka dela. Između njih je državna granica, tako da svaka strana nesmetano održava i eksploatiše svoj deo sistema (HE „Đerdap 2”, 2011). Na srpskoj strani elektrane je ukupna instalisana snaga generatora 270 MW pri maksimalnom protoku od 4200 m³/s (10 agregata po 27 MW pri protoku od 422 m³/s). Agregati su cevni, kapsulnog tipa, sa Kaplanovim turbinama i projektovani za padove od 2,5 do 11 metara. Zapremina jezera je 716,5 10⁶ m³, što je relativno malo tako da hidroelektrana radi kao protočna. Prosečna godišnja proizvodnja električne energije je oko 1.500 GWh.

Uslovi na terenu su diktirali nesimetričnu dispoziciju elektrane (slika 1, desno). Tokom rada HE utvrđeno je da agregati bliže prelivu (srpski, bliže sredini brane) imaju niži stepen iskorišćenja od agregata koji se nalaze uz levu obalu (rumunski). Ispitivanjima je utvrđeno da ugao pod kojim voda dolazi do agregata odstupa od poželjnih vrednosti i da je taj ugao značajan na srpskoj strani (φ_s na slici 1, desno), posebno u redovnim režimima kada nema preliivanja vode preko preliiva. Na slici 1 desno su dati rezultati modelskog ispitivanja trajektorija Dunava, gde se vidi da su uslovi dostrujavanja na srpskoj strani lošiji nego na rumunskoj (Institut Jaroslav Černi, 2006).

Kako ugao dostrujavanja na agregat odstupa od uglova koji su bili na fizičkom modelu, gde su ispitivane karakteristike agregata, jasno je da radni uslovi nisu isti pa se ni rezultati ispitivanja na modelu ne mogu direktno preneti na objekat (Benišek i ostali, 1994). Na agregatima se ne meri stvarni protok već se posredno računa na dva načina: iz razlike pritisaka na razdeonom zidu, ispod turbine i na osnovu merenog pada vode i snage. U oba slučaja se koriste dijagrami i relacije dobijeni ispitivanjima na fizičkom modelu, pa se sa pravom postavlja pitanje kolika su odstupanja između stvarnog i računskog protoka i da li je moguće obaviti



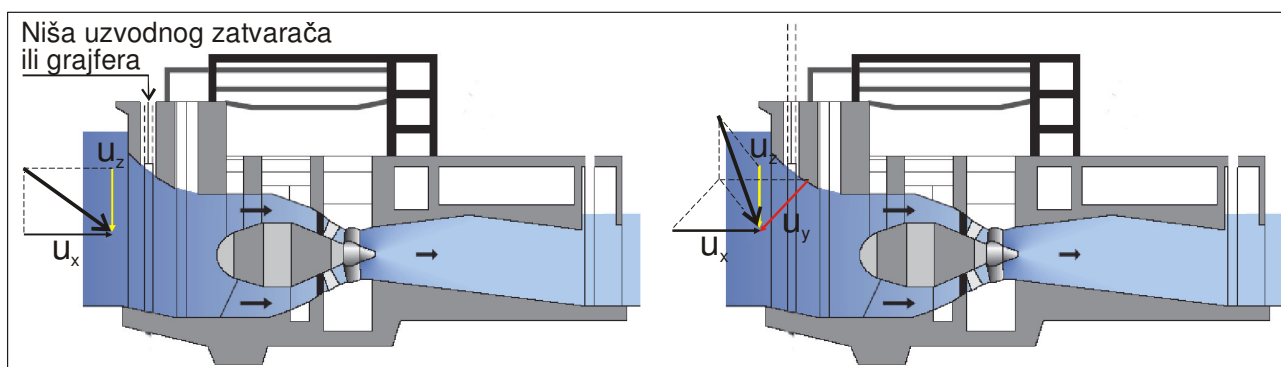
Slika 1. HE „Đerdap 2” (levo) i trajektorije vode izmerene na fizičkom modelu koje pokazuju da voda ne ulazi na turbine pod pravim uglom (desno, preuzeto iz J.Č. 2006).

takva podešavanja na turbinama da se poveća stepen korisnog dejstva. Time bi se povećala proizvodnja električne energije iz hidroelektrane, što, prema Đorđeviću (2008) u uslovima razvoja drugih alternativnih izvora energije znatno povećava ukupnu sigurnost i vrednost celog energetskeg sistema.

U ovom radu se analiziraju mogućnosti za direktno merenje protoka na agregatu, kako bi se on uporedio sa rezultatima proračuna protoka, pri različitim režimima rada elektrane (odnosno, pri različitim uglovima dostrujavanja vode). Na HE „Đerdap 2” su ugrađene cevni agregati, sa veoma kratkom prilaznom deonicom. Na slici 2 je dat presek kroz tipsku elektranu sa cevnim agregatom u slučaju da postoji simetrično dostrujavanje (slika 2, levo) i u slučaju gde postoji koso dostrujavanje (slika 2, desno). U prvom slučaju se može govoriti o ravanskoj 2D strujnoj slici, gde pored primarne podužne

komponente brzine u_x postoji i značajna vertikalna komponenta u_z , dok je u drugom slučaju prostorna 3D strujna slika sa nezanemarljivom trećom komponentom brzine u_y .

Prema standardu IEC 41 (IEC, 1991) koji određuje načine obavljanja terenskih ispitivanja karakteristika turbina, ne postoje adekvatni uslovi da se obavi merenje protoka jer ne postoji dovoljno dugačka deonica u kojoj je strujanje pravolinijsko. Da bi se obavilo merenje protoka, neophodno je koristiti opremu koja može da izmeri sve tri komponente brzina sa zadovoljavajućom tačnošću, a da pri tome sama oprema tokom merenja ne utiče bitno na rad turbine. U nastavku ovog rada, daće se pregled nekoliko mogućih savremenih metoda za merenje protoka i analiziraće se njihova primenljivost na HE „Đerdap 2”.



Slika 2. Dostrujavanje kod regularno postavljenog cevnog agregata je u ravni - 2D (slika levo) dok je u slučaju HE „Đerdap 2” dostrujavanje prostorno - 3D (slika desno).

3. PREGLED MOGUĆIH METODA ZA MERENJE PROTOKA

U tekstu koji sledi daje se prikaz metoda za merenje protoka, koje bi mogle da se koriste u nestandardnim uslovima, pri postojanju značajne zakrivljenosti strujne slike. Sve metode su bazirane na merenju brzine i njenoj integraciji u protok: mehanički (hidrometrijska krila), ultrazvučno dopler (ADCP i ADV), ultrazvučno transite-time, akustično i elektromagnetno. Od navedenih metoda, u pogledu prostorne rezolucije razmatraju se tri varijante:

1. Hidrometrijska krila, ADV i elektromagnetna sonda mere trenutnu brzinu u tački (odnosno u maloj zapremini u blizini sonde). Da bi se snimilo kompleksno polje brzina, potrebno je onoliko sondi koliko treba mernih tačaka.
2. ADCP i akustična metoda mere brzine u više tačaka duž jednog pravca, pri čemu broj mernih tačaka duž tog pravca direktno zavisi od kvaliteta merne opreme. Potrebno je onoliko uređaja koliko se proceni da treba pravaca duž kojih se mere brzine.
3. Ultrazvučna transite-time metoda meri srednju brzinu duž jednog pravca uz linerano inegrisanje. Za postizanje tražene tačnosti, treba proveriti na očekivanom profilu brzina potreban broj parova ultrazvučnih glava.

Prema načinu rada, hidrometrijska krila i elektromagnetne sonde su najrobusnije, jer mogu da rade i u čistim i zaprljanim vodama. ADCP i ADV zahtevaju optimalan (ni preveliki ni premali) broj čestica određene veličine od kojih se odbija ultrazvuk, dok akustična metoda traži postojanje dovoljnog broja turbulentnih vrtloga po celom profilu. Sa druge strane, ultrazvučna transite-time metoda zahteva relativno čistu vodu, bez većih vrtloga.

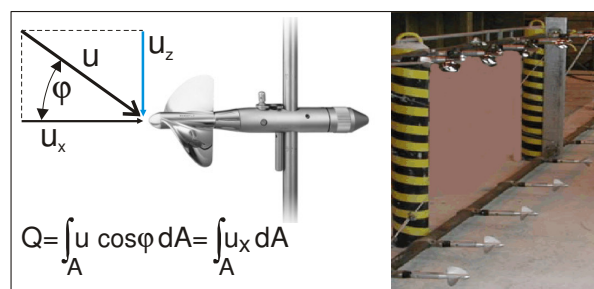
S obzirom na uglavnom visoku cenu mernih sonda, često se za merenja u relativno velikim profilima ne postavlja oprema po celom profilu, već se meri postepno na pojedinim segmentima profila. Takva vrsta merenja podrazumeva da objekat radi u konstantnim uslovima i da je moguće „pomerati“ mernu opremu u toku samog rada objekta. Naravno, dok se obavlja merenje rasporeda brzina, neophodno je meriti i kontrolne parametre (uzvodnu/nizvodnu kotu vode, snagu agregata, brzinu u par fiksiranih tačaka, itd.) i naknadno obaviti korekciju usled manjih neustaljenosti.

3.1 Hidrometrijska krila

U tok vode se postavlja krilo i meri se broj obrtaja krila. Veza između brzine vode i broja obrtaja se uspostavlja

kalibracionim merenjima, koja moraju da se obavljaju relativno često. Merenje brzine hidrometrijskim krilom (slika 3) je standardna metoda koju i standard IEC 41 preporučuje. U zavisnosti od uslova, potrebno je upotrebiti dovoljan broj krila da bi se dovoljno tačno izmerio prostorni raspored brzina, čijom integracijom se dobija protok. U uslovima kada postoji bočna komponenta brzine, mogu se koristiti tzv. „komponentna krila” koja imaju kosinusnu osetljivost (što je potrebno za proračun protoka) ali je njihova tačnost nešto niža a i opseg radnih uglova je relativno mali. Takođe, sam postupak kalibracije takvih krila je dosta složen i dugotrajan.

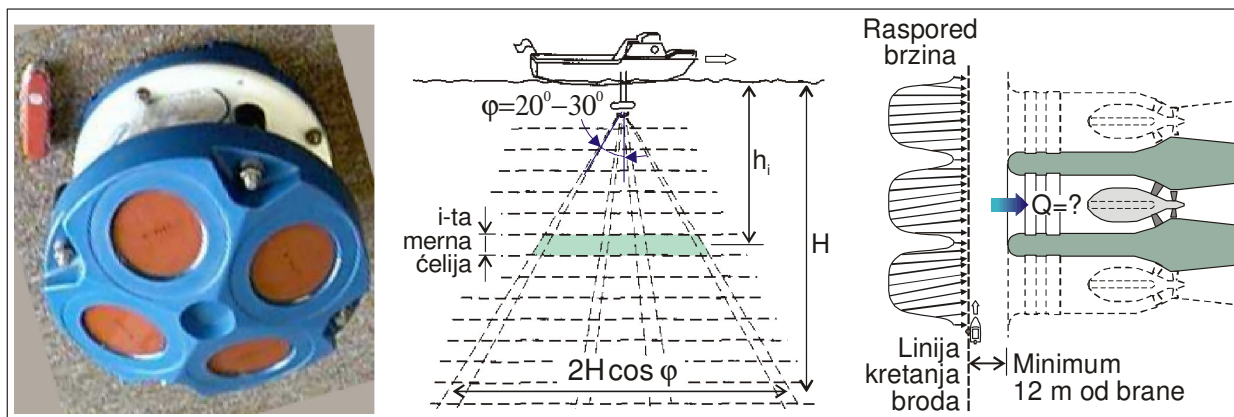
U praksi ima pokušaja da se pomoću hidrometrijskih krila, montiranih na ram koji se spušta u nišu zatvarača ili grajfera (slika 2), postepenim kontinualnim spuštanjem ili radom sa zaustavljanjem rama na određenim dubinama, izmeri raspored brzina. Postignute tačnosti kod 2D polja brzina su od 2,5 do 5%, dok je procenjena tačnost za 3D raspored brzina lošija od 10%.



Slika 3. Komponentno hidrometrijsko krilo u merenju protoka (leva strana) i klizajući ram sa dva reda krila.

3.2 Ultrazvučna ADCP metoda - vertikalna

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) je savremena metoda za merenje rasporeda brzina (i proračun protoka) koja se koristi u hidrometrijskim merenjima na rekama. Zasniva se na emitovanju ultrazvučnog impulsa poznate frekvencije i merenju doplerovog pomaka odbijenog signala od nečistoća koje nosi voda. Analizom odbijenog signala, kroz vreme, mogu se dobiti brzine na različitim dubinama h_i (slika 4, sredina). Ako se istovremeno radi sa više ultrazvučnih impulsa poslatih pod različitim uglovima (slika 4, levo i sredina) mogu se izračunati sve tri komponente brzine vode (u_x , u_y , u_z) na svakoj od dubina h_i (odnosno, brzine po mernim ćelijama). Pri tome, pretpostavlja se da je polje brzina u jednoj mernoj ćeliji, na dubini te ćelije, homogeno.



Slika 4. ADCP uređaj (levo) koji meri 3D brzine po dubini, osrednjeno u jednom sloju (sredina) i moguće merenje brzina ADCP-om uzvodno od zahvata na „Đerdapu 2“ (desno).

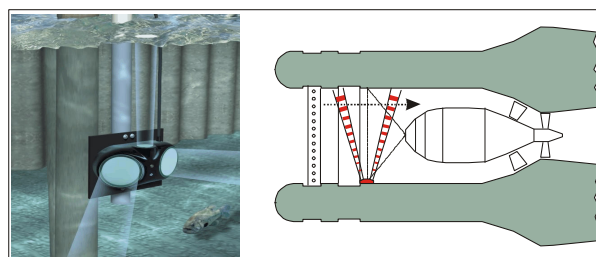
ADCP metoda je veoma pogodna za hidrometrijska merenja na velikim rekama. Postavljanjem uređaja na plovilo, sporom vožnjom upravno na tok reke i kontinualnim merenjem rasporeda brzina po dubini, dobija se kompletan 3D raspored brzina u rečnom toku. Pri tome se brzina samog plovila određuje iz podataka koje uređaj dobija od odjeka sa dna reke (kada radi kao sonar), pretpostavljajući da sva četiri UZV zraka padaju na horizontalno nepokretno dno (bez pronosa nanosa).

ADCP metoda spada u apsolutne metode, koje ne zahtevaju kalibraciju. Daje odlične rezultate ukoliko se meri protok rekom, na pravolinijskoj deonici, sa konstantnom dubinom i sa nepokretnim dnom. U tim slučajevima je merna neodređenost ispod 1%. Međutim, ukoliko bi se ovom metodom merio raspored brzina uzvodno od zahvata na HE „Đerdap 2“, ne bi bili zadovoljeni uslovi za dobar rad; zbog veličine mernih ćelija pri dnu, nije moguće meriti brzine bliže od 12 m od objekta, pa samim tim nije moguće odrediti ni protok po jednom agregatu. Takođe, u zoni ulaza u agregate se javlja i zavojno strujanje, koje pravi nehomogeno polje brzina unutar jedne merne ćelije, pa bi greška merenja bila znatno veća od standardne.

3.3 Ultrazvučna ADCP metoda - horizontalna

Prethodna ADCP metoda se koristi za povremena merenja protoka rekom. Za kontinualna merenja protoka na rekama koriste se fiksni ADCP uređaji, postavljeni horizontalno. U zavisnosti od broja ultrazvučnih glava, mogu meriti 2D i 3D raspored brzina (slika 5). Kao i kod vertikalno primenjenog ADCP-a, ostaje uslov da unutar jedne merne ćelije (odnosno celog sloja na određenom udaljenju od sonde) uslovi strujanja moraju

biti takvi da postoji jedna jasno izražena brzina (prikazana isprekidanom strelicom na slici 5). Ukoliko u jednom sloju postoji zavojno strujanje, greška merenja brzine će biti velika.



Slika 5. Horizontalno postavljen ADCP unutar agregata.

Ukoliko bi se takav uređaj postavio sa unutrašnje strane zahvatne građevine, bilo bi moguće da se izmeri protok po agregatu. Međutim, kako se vidi sa slike, jedan uređaj ne bi bio dovoljan, jer su merne ćelije na suprotnoj strani od mesta montaže uređaja već prevelikih dimenzija (preširoke) da bi moglo da se pretpostavi da je polje brzina homogeno. Primenom više komada uređaja, postavljenih jedan nasuprot drugom, kako po dnu tako i po „plafonu“ zahvata, moguće je postići veću tačnost.

Ako se zanemari relativno visoka cena ovih uređaja, ostaje kao veliki problem način njihove ugradnje. Da bi se to uradilo, neophodno je ući u zahvatnu građevinu, postaviti uređaje i po završenom merenju ponovo ući i skinuti ih. U većini slučajeva, to bi bila organizaciono veoma komplikovana procedura i s'toga limitirajući faktor primene.

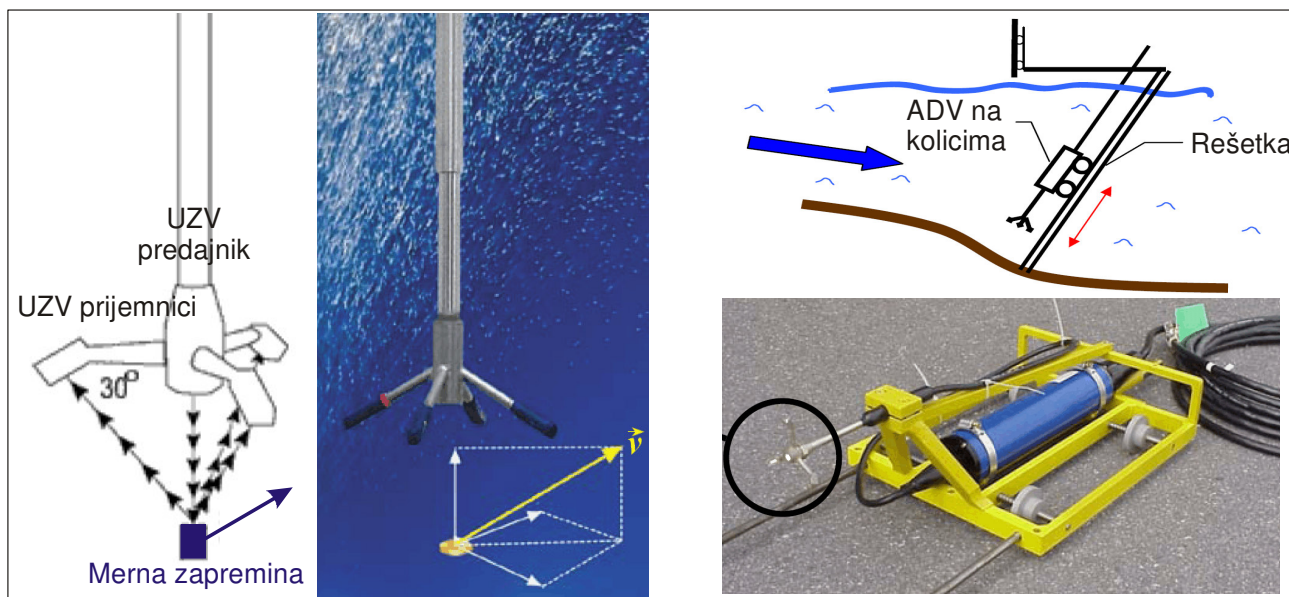
3.4 Ultrazvučna ADV metoda

Ultrazvučna ADV metoda omogućava merenje sve tri komponente brzine u jednoj tački (odnosno maloj mernoj zapremini) u terenskim uslovima. Na slici 6 levo je prikazan princip rada: UZV predajnik pošalje kratak impuls (na frekvencijama od oko 1 – 10 MHz), a tri UZV prijemnika „oslušuju” Doplerov odjek od delića koji prolazi kroz mernu zapreminu. Položaj mesta gde se meri brzina je tačno definisan geometrijom glave sonde. Metoda, kao i ADCP, spada u apsolutne metode (ne zahteva kalibraciju), ali zahteva da u vodi postoje nečistoće koje „putuju” istom brzinom. Nečistoće moraju biti manje od merne zapremine i mora ih biti dovoljno da se za svaki poslati impuls dobije odgovarajući odjek.

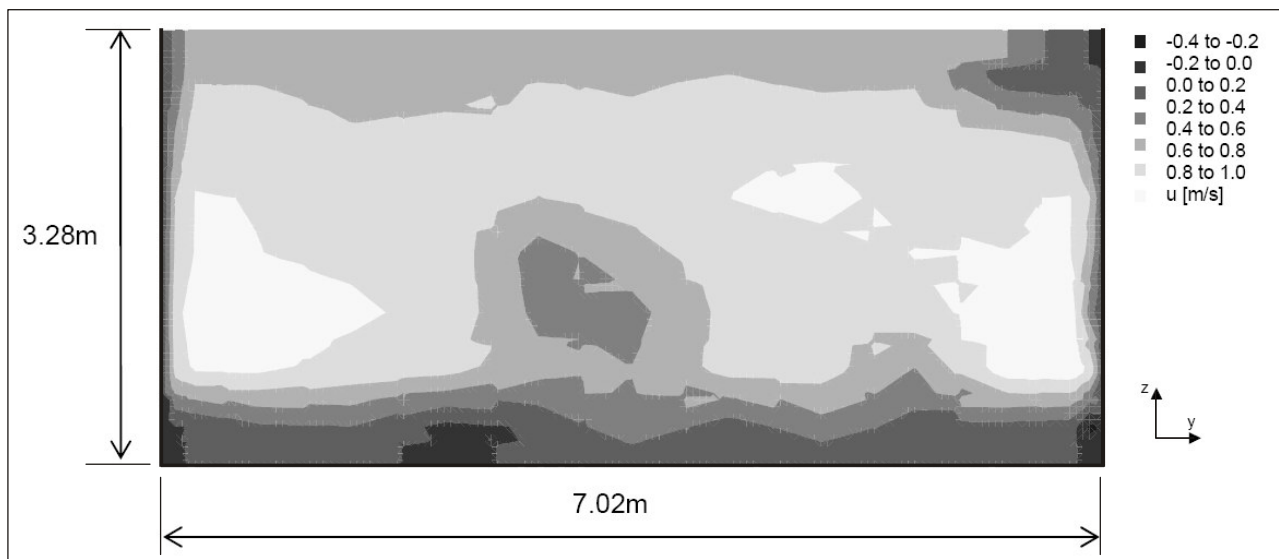
Na slici 6 u sredini je prikazana jedna ADV sonda, koja ima 4 UZV prijemnika. Teorijski, za određivanje tri komponente brzine, dovoljne su tri UZV prijemne glave. Postavljanjem četvrte, moguće je proceniti i trenutnu grešku merenja brzina, što povećava pouzdanost merenja.

ADV bi mogao da se upotrebi za merenje protoka na objektu kao što je to HE „Đerdap 2”. Jedna varijanta je da se postavi niz sonde u celom profilu, u konfiguraciji gde je merna zapremina ispred sonde. Pošto su sonde prilično skupe, realnija je verzija sa mernim ramom koji se postepeno spušta po mernom profilu. Na slici 6 desno je prikazano rešenje koje je primenjeno na maloj hidroelektrani Emmenweid u Lucernu (Staubli, 2000). Korišćen je samo jedan ADV rezolucije 0,1 mm/s, koji je spuštanjem na posebnim kolicima duž rešetke, profil po profil. Nakon korekcije usled neustaljenosti protoka tokom merenja, analizom polja brzina (slika 7), procenjeno je da je postignuta neodređenost protoka od 1,5%.

Na „Đerdapu 2” nije moguće obaviti merenja samo sa jednom ADV sondom zbog velike širine profila i nemogućnosti da se dovoljno dugo radi u ustaljenom režimu, već bi bilo potrebno da se napravi ram sa 15-tak sonde postavljenih horizontalno, u jednoj ravni. Zbog veličine mernog profila i neophodnosti kontrole tačnosti merenja, treba napraviti po dubini barem dve merne ravni, što zahteva 30-tak sonde (a svaka sonda je oko 10.000 €).



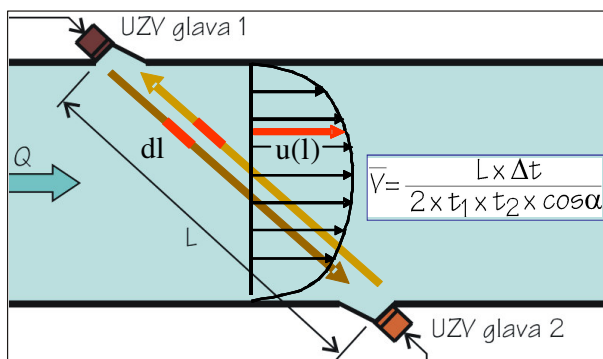
Slika 6. ADV – princip rada (levo) i način merenja rasporeda brzina na zahvatnoj građevini (desno).



Slika 7. Rezultat merenja podužne komponente brzine na jednom zahvatu za turbinu na HE Emmenweid u Lucernu (Staubli, 2000).

3.5 Ultrazvučna Transit-time metoda

Ultrazvučna transit-time metoda se često koristi za merenje protoka vode u cevima. Meri se razlika vremena putovanja ultrazvuka uz vodu i niz vodu, odakle se određuje srednja vrednost brzine (slika 8). Ovo je apsolutna metoda pa stoga nije potrebna kalibracija uređaja.



Slika 8. Transit-time metoda meri srednju vrednost brzine.

Ultrazvučna transite-time metoda linerano uprosečava brzinu duž putanje ultrazvuka. Da bi se odredio protok, mora se znati očekivani prostorni raspored brzina. To znači da je ova metoda pogodna samo na jako dugačkim pravim deonicama tunela/cevi, gde se može biti siguran da je razvijeni turbulentan profil brzina. U uslovima

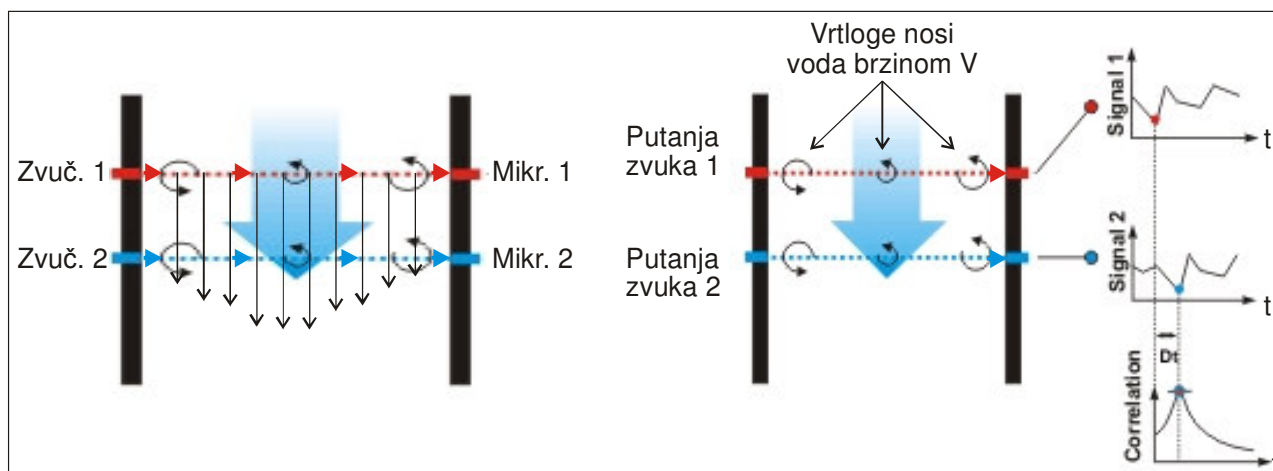
kada je manje pouzdan profil brzina, primenjuje se veći broj pari glava, u različitim pravcima, pa se njihovim osrednjavanjem dobija prosečna profilska brzina.

Bilo je pokušaja da se ovom metodom mere protoci ispred turbina sa kraćim prilaznim deonicama (Walsh i Spain, 2000). Zaključeno je da u uslovima gde je postojao konstantan kvadratni presek relativno velike dužine od 3,5 širine, za neodređenost merenja protoka od 2%, bilo potrebno 8 pari UZV glava, dok je za postizanje neodređenosti od 0,8% bilo potrebno čak 18 pari UZV glava. Na HE „Đerdap 2” su uslovi dostrujavanja znatno lošiji, ne postoji ni jedan deo zahvatne građevine sa konstantnim presekom, te je praktično nemoguće koristiti UZV transite-time metodu.

3.6 Akustična korelaciona metoda

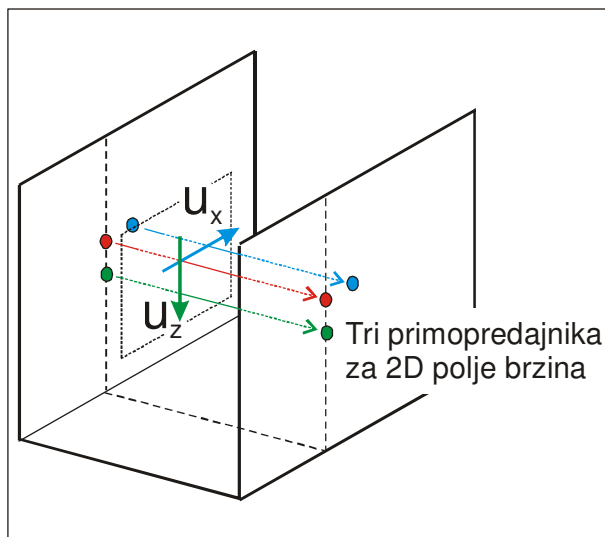
Relativno nova i jeftina metoda bazirana na vremenskoj korelaciji signala koji stignu do mikrofona (slika 9): upravno na tok se emituju dva zvučna talasa koji putuju paralelno i koji bivaju modifikovani sitnim vrtlozima, a te modifikacije se hvataju naspramnim mikrofonom. Analizirajući primljeni signal, moguće je odrediti raspored brzina duž putanje zvuka.

Da bi ova metoda radila, neophodno je da postoje sitni vrtlozi po celoj širini toka, koji putuju sa vodom. Zbog toga je zgodno postaviti ovu opremu nizvodno do ulazne rešetke, koja služi kao generator vrtloga.



Slika 9. Akustička korelaciona metoda omogućava merenje rasporeda brzina duž putanje zvuka.

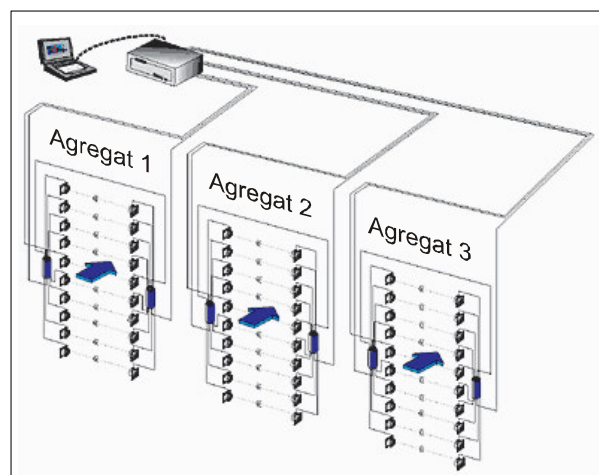
Sa jednim parom predajnik/prijemnik, dobija se komponenta brzine u ravni koju određuju putanje zvuka. Postavljanjem još jednog para predajnik/prijemnik, moguće je odrediti dve komponente brzina (slika 10), tako da je ova metoda pogodna za merenja na simetričnim ulaznim građevinama cevnih turbina (slika 2, levo).



Slika 10. Akustička korelaciona metoda može da izmeri komponente brzina u ravni upravnoj na zvuk.

Na slici 11 je dato rešenje primenjeno na McNary brani na Columbia River (Lemon, 2006). Korišćenjem relativno jeftinih računara i primopredajnika, ukupna cena mernog sistema je relativno mala, a postignuta je

niska neodređenost kontinualanog merenja protoka od 0,5%.



Slika 11. Akustička korelaciona metoda za kontinualno merenje protoka po agregatu.

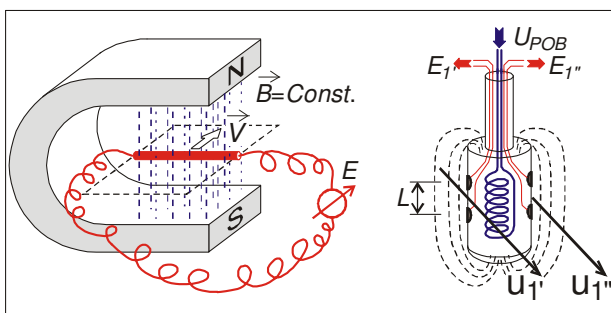
Na žalost, ova metoda ne može da se primeni na HE „Đerdap 2” zbog postojanja značajne treće komponente brzine (slika 2, desno). U literaturi (Shin i ostali, 2008) se mogu naći primeri merenja obavljenih u sličnim uslovima, gde je merna neodređenost u rasponu od 1,6% pa čak do 5,6%.

3.7 Elektromagnetna metoda merenja brzine

Merenje protoka, odnosno brzine provodnih tečnosti koristeći princip elektromagnetne indukcije se koristi od

ranih 50-tih godina dvadesetog veka. Princip se zasniva na Faradejevom zakonu, po kome se na krajevima krutog provodnika dužine L indukuje elektromotorna sila E ukoliko se taj provodnik kreće u magnetnom polju \vec{B} brzinom \vec{V} . Za homogeno magnetno polje i za konstantnu brzinu kretanja (slika 12, levo), indukovana elektromotorna sila biće jednaka izrazu:

$$E = \vec{B} \times \vec{V} \cdot L \quad (1)$$



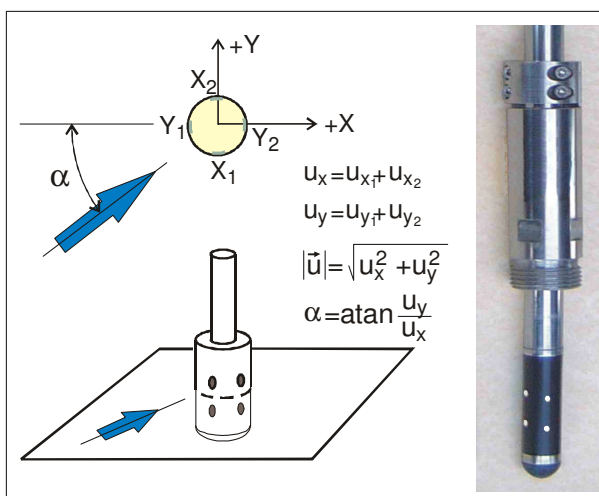
Slika 12: Princip elektromagnetne indukcije (levi deo) primenjen na sondu za merenje brzine vode (desni deo).

Ukoliko se umesto provodnika kroz magnetno polje kreće elektroprovodan fluid, na krajevima elektroda koje su u kontaktu sa fluidom generisaće se elektromotorna sila proporcionalna brzini fluida. Na slici 12 desno je prikazan princip rada elektromagnetne (EM) sonde za merenje brzina fluida „u tački”, odnosno, srednje brzine fluida u relativno maloj mernoj zapremini. Kako na slici EM sonda ima elektrode sa obe strane cilindra, mere se istovremeno dve komponente brzine $U_{1'}$ i $U_{1''}$ pa se brzina U_1 može odrediti kao srednja vrednost te dve izmerene brzine.

Indukovana elektromotorna sila je vektorski proizvod, pa komponenta brzine koja se meri zavisi od smera magnetnog polja i pravca elektroda. Na slici 13 je prikazano rešenje za istovremeno merenje dve komponente brzine U_x i U_y . Da bi se istovremeno merile sve tri komponente brzina, uz zadovoljavajuću rezoluciju, neophodno je kombinovati nekoliko 2D sondi.

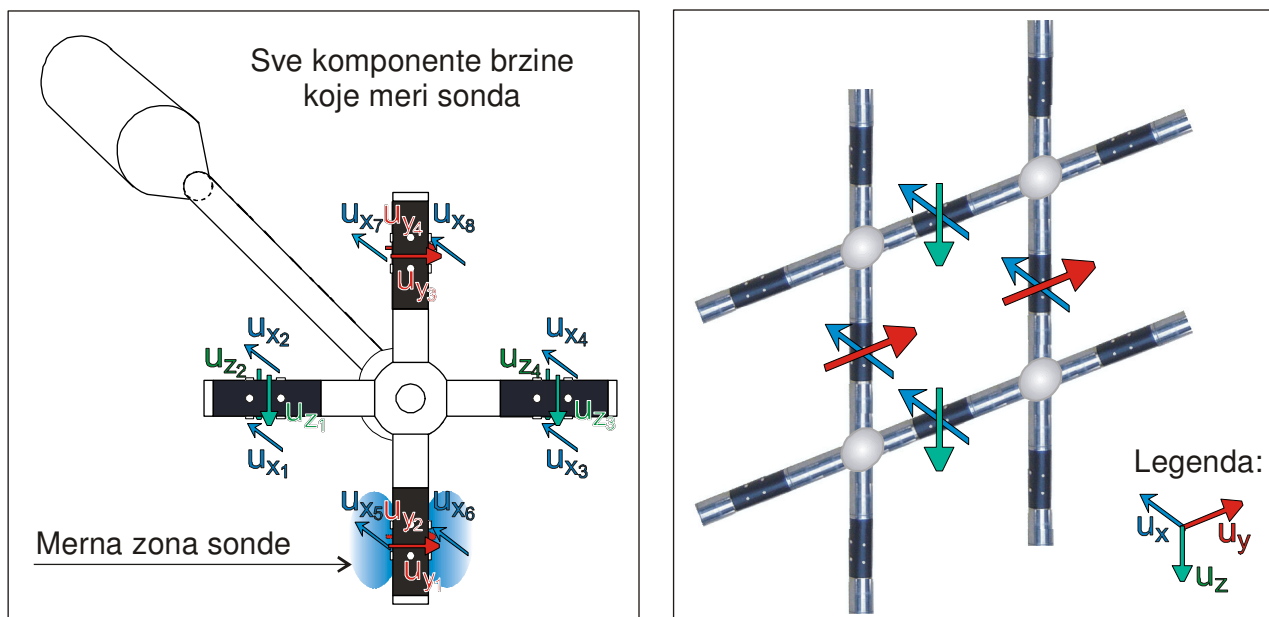
Elektromagnetne sonde mogu da mere brzine i u čistoj i u prljavoj vodi, jedini uslov je da voda bude

elektroprovodna. Sonda korektno radi čak i ako se na elektrodama nataloži nanos (kada se postavi na dno), sve dok su elektrode u električnom kontaktu sa vodom. U zavisnosti od konstrukcije i vremena integracije, sonde mogu da mere brzine od par milimetara u sekundi, kao što je to prikazano u radu Prodanović (2006) gde su merene brzine na ulazu u Čukarički rukavac, pa do nekoliko metara u sekundi. Pri tome, konstruktivno se može uticati na veličinu zone integracije, dužinom i prečnikom sonde, površinom elektroda, jačinom magnetnog polja kao i načinom izrade elektromagneta.



Slika 13: Postojeće elektromagnetne 2D sonde mere brzinu u ravni upravnoj na osu sonde.

Na slici 14 su prikazana dva moguća rešenja za merenje sve tri komponente brzine vode. Koriste se standardne 2D glave i kod oba rešenja se sa većom pouzdanošću meri podužna komponenta U_x od druge dve komponente. Oba rešenja su u potpunosti primenljiva na HE „Đerdap 2”. Kod prvog rešenja je potrebno napraviti ram koji bi nosio dovoljan broj ovakvih EM sondi i koji bi se postepeno spuštao uzvodno od ulazne rešetke. Kod drugog rešenja same EM sonde čine ram, jedino treba konstruktivno razmotriti uticaje na sonde i potrebne prečnike. Cene EM sondi su niže od cene ADV sondi dok su istovremeno EM sonde dosta robustnije i otporne na udarce plivajućih predmeta.



Slika 14: Dva predloga rešenja 3D sonde: kao samostalne sonde (levo) ili kao rešetke (desno).

4. PREDLOŽENA METODA I PROCENA TROŠKOVA

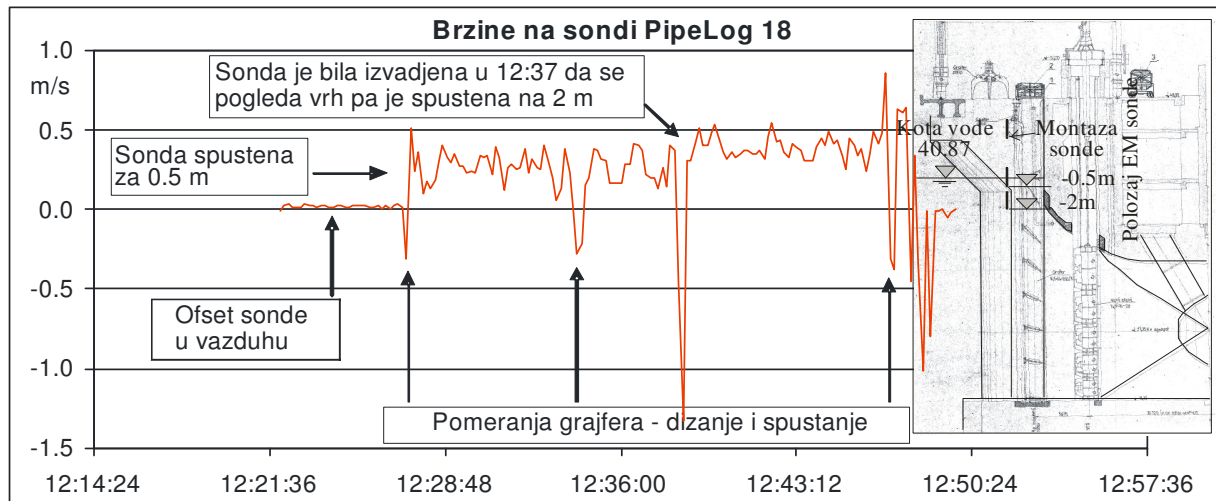
Analizirajući savremena moguća rešenja za merenje protoka na agregatima HE „Đerdap 2”, dolazi se do zaključka da je moguće koristiti samo dve od pobrojanih metoda: ADV i EM sonde. Prednost ADV metode je što spada u apsolutna merenja brzine (sve dok se ne poremeti geometrija sonde), a osnovne mane su visoka cena sondi i nepostojanje domaćeg proizvođača. Prednost EM sonde je što može da obezbedi istu ili bolju rezoluciju od ADV-a uz relativno nisku cenu i što postoji domaći proizvođač, a nedostatak je što EM sonde moraju da se kalibrišu (mada jednom izvršena kalibracija traje (važi) par godina).

Uzimajući izložene prednosti i mane u obzir, izabrana je metoda merenja protoka sa EM sondama. Da bi se proverilo da li EM sonde domaćeg proizvođača pouzdano rade i u uslovima visokih elektromagnetnih smetnji kakve su u okolini generatora, obavljeno je probno merenje brzine, tako što je jedna 2D EM sonda prišvrčena na grajfer i spuštena u vodu. Na slici 15 su dati dobijeni rezultati, gde se jasno vidi da u periodu dok je sonda bila u vazduhu (a tada je najosetljivija na smetnje) ne postoje velike smetnje (standardna

devijacija za $\Delta t=10$ s je $\sigma=0.008$ m/s odnosno $\sigma=8$ mm/s). Tokom merenja, vidi se i da je standardna devijacija nešto veća pri površini vode (na dubini od 0,5 m) nego dublje, zbog postojanja površinskih vrtloga.

Na osnovu obavljenih probnih merenja, predloženo je da se za merenja koristi niz samostalnih sonda (slika 14, levo), postavljenih na kruti ram. Predlaže se niz od dva puta po 15 EM sonda kao na slici 16. Ram treba da bude od hidraulički oblikovanih profila, kako bi pružao što manji otpor, a da ima dovoljnu krutost kako bi se obezbedilo njegovo pouzdano i mirno spuštanje i podizanje. Time bi se smanjili udari brzina koji su registrovani tokom probnog merenja (slika 15) pri pomeranju grajfera.

Varijanta sa više EM sonda koje formiraju samostalnu rešetku (slika 14, desno) je odbačena pre svega zbog nemogućnosti da se na datim rastojanjima postigne dovoljna krutost sistema. Takođe, takav sistem je teško napraviti da bude modularan, da može da se koristi i na drugim objektima. Varijanta sa nizom samostalnih EM sonda dozvoljava da se po obavljenom merenju demontiraju sa rama i da se kasnije koriste na nekom drugom objektu, na kome će se napraviti odgovarajući noseći ram.



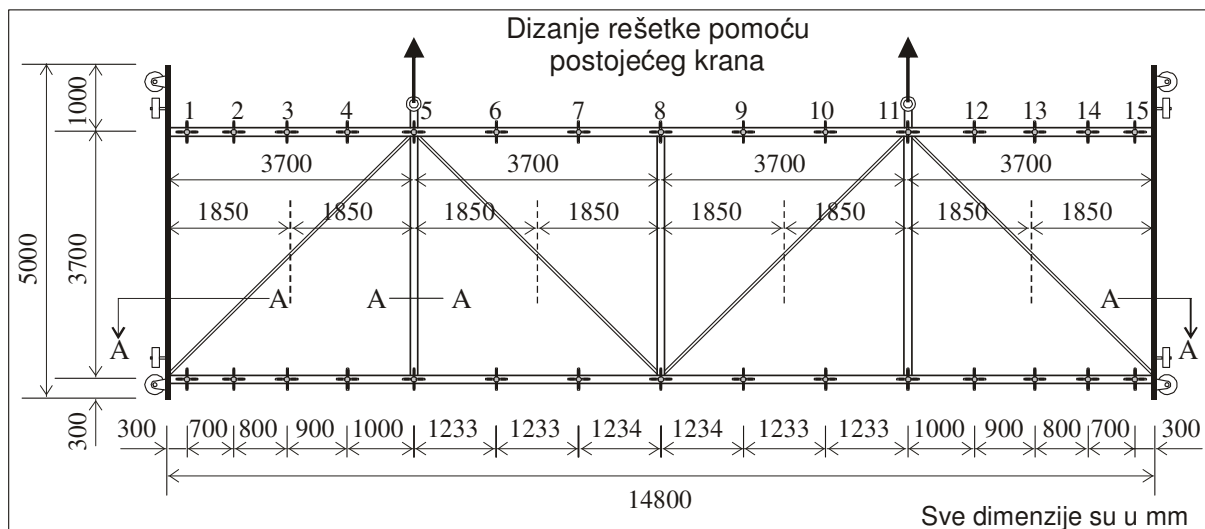
Slika 15. Rezultati merenja brzina pomoću EM sonde na agregatu 3.

Izradom rama i postavljanjem 30 EM sondi, moguće je obaviti merenja protoka prema dva različita protokola: ram se tokom merenja postepeno (kontinualno) spušta sa površine do dna i podiže nazad (prema IEC 41 standardu, tačka 10.2.4.4 – Direct integration method) ili da se ram postavi na određenu dubinu i tu zadrži potrebno vreme dok se obavi merenje (minimum 2 minuta, ali treba proveriti prema lokalnim uslovima, prema IEC 41 standardu, tačka 10.2.2.1 – Duration of measurement).

Prema gruboj proceni, trošak izrade metalnog rama je 50.000 €, 30 EM sondi za 3D merenje sa logerima su

120.000 €, baždarenje sondi je 40.000 € i ostala merna oprema (za praćenje položaja rama, kontrolna hidrometrijska krila i par ADV sondi za redundantna merenja, napajanja i slično) je oko 50.000 €.

Metalni ram se može koristiti na svim agregatima HE „Đerdapa 2”, dok EM sonde kao i kontrolne ADV sonde mogu biti demontažne, tako da se jednom nabavljena oprema može koristiti i na drugim objektima EPS-a za kontrolna merenja kao i u naučnim institutima u istraživačke svrhe.



Slika 16. Ram za nošenje EM sondi.

5. ZAKLJUČAK

Merenje protoka na kratkim objektima, u hidraulički neregularnim uslovima, uvek predstavlja poseban izazov. I pored značajnog napretka u razvoju merne tehnike, nepostoji univezalna „bogom dana” metoda kojom je moguće obaviti merenje. U ovom radu je napravljen presek trenutno raspoloživih metoda sa osvrtom na njihovu upotrebljivost u ovakvim uslovima.

Kod cevnih agregata, sa relativno kratkom ulaznom građevinom, zbog ne postojanja hidraulički povoljnih uslova, uobičajeno je da se protok ne meri direktno već da se računa koristeći rezultate modelskih ispitivanja. Kako na HE „Đerdap 2” uslovi dostrujavanja nisu isti kao na modelu, postoji realna potreba da se izmeri stvarni protok i uporedi sa merenjima na modelu. Upravo je HE „Đerdap 2” u ovom radu uzet kao primer na kome se proverava upotrebljivost izloženih mernih metoda. Zaključeno je da od svih pobrojanih metoda, jedino metode koje mere tri komponente brzine u tački mogu da se iskoriste: ultrazvučna ADV i modifikovana elektromagnetna sonda, koja je i predložena zbog nešto niže cene i mogućnosti za nabavkom opreme domaće proizvodnje.

Za izabranu metodu merenja pomoću niza EM sondi, predloženo je pravljenje rama, koji bi omogućio merenje protoka bez zaustavljanja agregata. Postojećim kranom bi se spuštao ram sa sondama uzvodno od rešetke, kroz vodice za grajfer. U zavisnosti od toga da li postoji mogućnost da se ram „mirno” i sporo spušta, predloženi sistem bi se koristio za kontinualo merenje ili bi se postepeno premeštao sa jedne dubine na drugu, a merenja bi se obavljala dok ram miruje. Naravno, za sve vreme merenja brzina, neophodno je pratiti i režim rada agregata, te naknadno korigovati neustaljenosti u radu.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju HE „Đerdap 2” koji je omogućio da se napravi ova studija mogućnosti merenja protoka, kao i terenska merenja na objektu kao i unutar samog agregata.

LITERATURA

[1] Benišek M., B. Ignjatović, M. Nedeljković (1994): *Uticao kosog dostrujavanja vode na karakteristike cevni turbina*. 11. Savetovanje Hidrauličara i Hidrologa, Beograd.

- [2] Branislavljević N., D. Prodanović (2006): *Large Scale Particle Image Velocimetry – Merenje urbanog oticaja*. Vodoprivreda, Vol. 38, No. 222-224, strane 233-238.
- [3] Đorđević B. (2008): Objektivno vrednovanje obnovljivih energija. Vodoprivreda, godina 40, broj 1-3, strane: 19-38.
- [4] Figliola R., D. Beasle (2006): *Theory and Design for Mechanical Measurements*. John, Wiley and Sons, USA
- [5] HE Đerdap (2011): Sajt <http://www.djerdap.rs>
- [6] IEC - International Electrotechnical Commission (1991): *IEC 41 - Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines*. International standard, third edition
- [7] Institut Jaroslav Černi (2006): *Hidraulički model Hidroelektrana „Đerdap 2” - Izveštaj o hidrauličkim modelskim ispitivanjima doticanja vode ka agregatima*. Beograd
- [8] Lemon D. D. (2006): *Recent Advances in Resolving Bias in Discharge Measurement by Acoustic Scintillation*. IGHEM 2006, Portland, Oregon.
- [9] Prodanović D. (2006): *Merenje malih brzina u terenskim uslovima*. Vodoprivreda, Vol. 38, No. 222-224, strane 205-214.
- [10] Prodanović D. (2010): *Studija mogućnosti merenja protoka na HE „Đerdap 2”*. Interni dokument HE „Đerdap 2”, Beograd.
- [11] Stanković D. (1997): *Fizičko tehnička merenja – Senzori*. Univerzitet u Beogradu.
- [12] Staubli T. (2000): *Flow Field Upstream of a Trash Rack Measured with an Acoustic Doppler Probe*. IGHEM 2000, Kempten, Germany.
- [13] Shin D., C. Seo, J. Park (2008): *Comparison of ASFM Test Result as an Alternative Measuring Method & Performance Improvement Case*. IGHEM 2008, Milano
- [14] Walsh J., S. D. Spain (2000): *Index Test Comparisons Using Ultrasonic Flowmeters at Wells Hydroelectric Project*. IGHEM 2000, Kempten, Germany
- [15] Zindović B., M. Jovanović, R. Kapor, D. Prodanović, D. Djordjević (2010): *Numerička simulacija strujnog polja u blizini vodozahvata*. Vodoprivreda, godina 42, broj 246-248

FLOW MEASUREMENT AT THE SHORT STRUCTURES IN HYDRAULIC COMPLEX CONDITIONS - HE „DJERDAP 2“ CASE STUDY

by

Dušan PRODANOVIĆ, Dragutin PAVLOVIĆ, Nemanja BRANISAVLJEVIĆ
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Summary

Hydraulic conditions at short structures in most cases prevents the existence of cross sections with parallel streamlines and fully developed turbulent flow profile. In such conditions the flow measurement is rather challenging. In spite of recent developments in flow measuring methods, there is no universal device that can be used in inappropriate hydraulic conditions with adequate accuracy. This paper gives the overview of the contemporary flow measuring methods with the focus on its usability in hydraulically difficult conditions. As a case study, the problem of flow measurements at the intake of the aggregates of Hydroelectric Power Plant (HE) “Djerdap 2” is presented. Due to its position in Danube and leftovers of preconstruction works in river bed, there is a significant incoming angle of the water to the HE “Djerdap” turbines. The streamlines angle is

larger at the Serbian side then at the Rumanian side, resulting the worse efficiency of the Serbian turbines. To analyze the effect of the curved incoming stream to the turbine performance, the true flowrate has to be measured. Since the Kaplan’s short turbines were used and no regular cross section where flow can be measured using standard methods exists, available measuring methods for velocity field measurement were analyzed in this paper. For selected method based on electromagnetic velocity measurement devices, the field check was performed and presented. The paper concludes with the assessment of accuracy and total costs for selected flow measurement method.

Keywords: flow measurement, accuracy, turbine

Redigovano 30.09.2011.