

## MERENJE MALIH BRZINA U TERENSKIM USLOVIMA

Dr Dušan PRODANOVIĆ, docent  
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

### REZIME

Primena matematičkih modela dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog strujanja vode u otvorenim tokovima za proučavanje problema zasipanja ušća i rukavaca je postala redovna praksa. Da bi matematički modeli verno reprezentovali strujno polje, neophodna je njihova kalibracija prema postojećim uslovima. Merenje rasporeda relativno velikih brzina u toku se obično radi hidrometrijskim krilima ili savremenim ADCP uređajima i može se reći da spada u standardne poslove. Međutim, kada se modeliraju ušća rukavaca gde su brzine izuzetno male, standardna merna oprema ne može dati zadovoljavajuće rezultate. U ovom radu se prikazuje razvijena metoda za terensko merenje veoma malih brzina vode. Metoda koristi dvokomponentnu elektromagnetnu sondu i diferencijalni GPS uređaj. Ispitivanjima u laboratoriji je pokazano da je postignut prag šuma ispod 1 mm/s. U toku merenja na terenu, gde su merene brzine od par santimetara u sekundi, mala pomeranja elektromagnetne sonde su uspešno korigovana korišćenjem GPS uređaja, sa očitavanjem položaja na svaku sekundu i sa tačnošću u položaju boljom od jednog santimetra..

**Ključne reči:** merenje brzina, elektromagnetna sonda, GPS

### 1 Uvod

Projektom izgradnje novog mosta preko reke Save, u Beogradu, koji će spajati Banovo Brdo i Novi Beograd, predviđeno je da se postave dva stuba u koritu reke: jedan na samom špicu Ade Ciganlije a drugi uz obalu kod Čukaričkog potoka. Postavlja se pitanje koliko i na koji način se će se promeniti uslovi strujanja na ulazu u Čukarički rukavac izgradnjom ta dva stuba. Promena strujne slike može značajno da utiče na uslove zatrpavanja ulaza u rukavac.

Studijom [3] je predviđeno da se napravi matematički model Čukaričkog rukavca, sa delom Save uzvodno i nizvodno od rukavca. Na modelu je trebalo predvideti stepen zasipanja ulaza u rukavac kao i predložiti optimalan izgled nožica stuba kako bi se minimizirao efekat zasipanja.

Za kalibraciju matematičkog modela zasipanja Čukaričkog rukavca potrebno je raspolagati sa brzinama kako u reci Savi tako i u samom rukavcu. U toku oktobra 2005. godine obavljena je veća serija merenja rasporeda brzina i poprečnih preseka korita [1], [2]. Korišćena je savremena ADCP metoda (ADCP je skraćenica od Akustički Dopler uređaj za merenje rasporeda brzina) sa uređajem RDI WorkHorse [5] koji imaju u Republičkom Hidrometeorološkom Zavodu. ADCP metoda omogućava da se izmeri kompletan trodimenzionalni raspored brzina i kota dna u profilu prilikom samo jednog prolaska čamcem. Na žalost, korišćena oprema nije omogućavala merenja pri malim dubinama (manjim od 1 metra) kao ni pri malim brzinama (manjim od 10 cm/s), tako da nisu dobijeni upotrebljivi podaci za profile unutar Čukaričkog rukavca.

Da bi se obavilo merenje malih brzina na samom spoju Čukaričkog zaliva i reke Save, bilo je potrebno da se razvije drugačija metoda. Pri tome je uslov bio da se koristi postojeća merna oprema. U ovom radu se pokazuje kako je iskorišćena standardna dvokomponentna elektromagnetna sonda predviđena za merenja u vodovodnim sistemima sa brzinama koje su u rangu 1 do 2 m/s, ali kojoj je produženjem vremena integracije pušten merni šum na brzine ispod 1 mm/s. Pošto je trebalo obezbediti dugotrajno držanje sonde u jednoj tački (pomoću čamca), položaj sonde je praćen kroz vreme pomoću dvofrekventnog diferencijalnog GPS uređaja, sa santimetarskom tačnošću, tako da je nakon korekcije brzina kretanja sonde, dobijen čist vektor brzina vode.

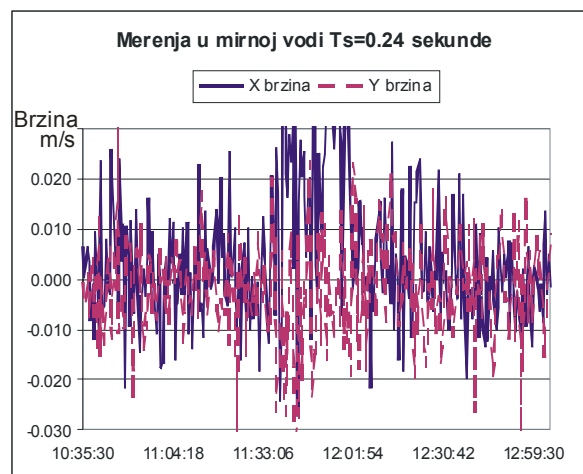
## 2 Merenje malih brzina pomoću EM sonde

Za potrebe merenja malih brzina, upotrebljena je elektromagnetna (EM) dvokomponentna sonda proizvođača «Svet Instrumenta», model LOG77XY [6] koja je originalno predviđena za merenja brzina i protoka u cevovodima pod pritiskom. Deklarisani raspon brzina je 0.01 m/s do 3.00 m/s pri čemu sonda obavlja 5 merenja u sekundi. Sonda je opremljena sa loggerom podataka i časovnikom realnog vremena.

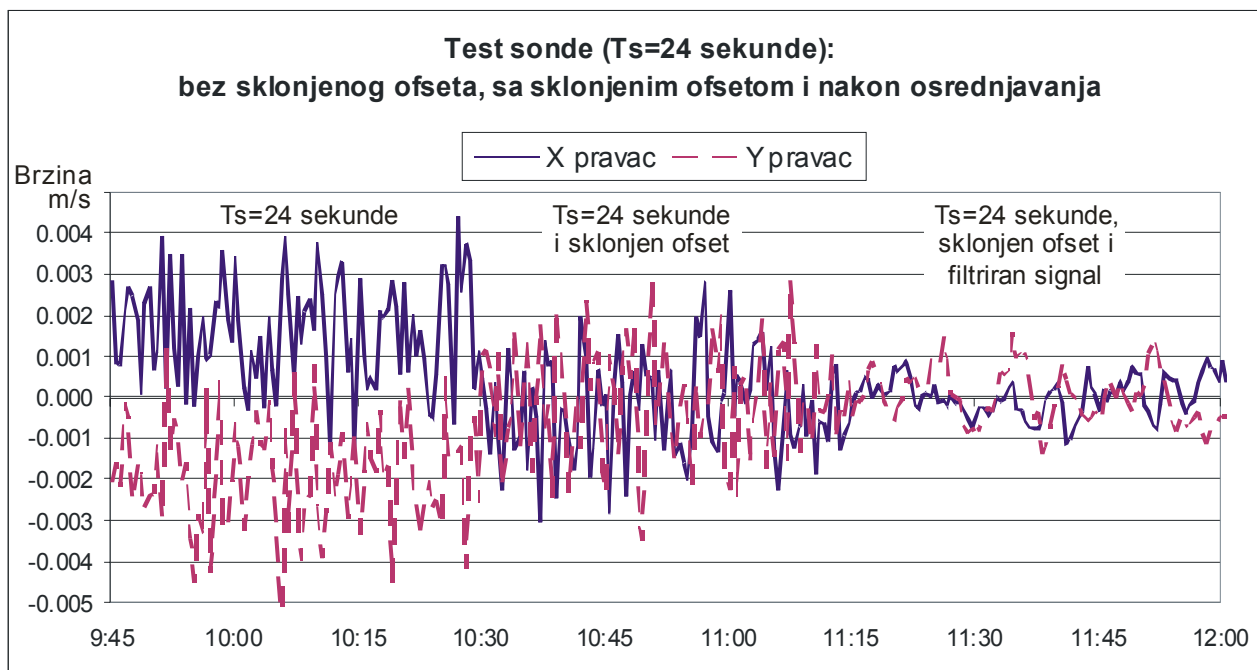
Da bi se proverio nivo šuma korišćene EM sonde, obaljena su ispitivanja u Laboratoriji. Na slici 1 je dat rezultat merenja brzine u vodi koja miruje (nulta brzina) sa standardnim vremenom osrednjavanja  $T_s=0.24$  s. Sa dijagrama se vidi da je praktičan prag merenja malih brzina oko 0.1 m/s jer je šum sonde 2 cm/s.

Ako se poveća vreme osrednjavanja sa 0.24 s na 24 s (100 puta), prema teorijskoj analizi slučajna komponenta šuma sonde treba da se smanji za kvadratni koren iz vremena povećanja osrednjavanja, odnosno za

10 puta. Na slici 2 su pokazani rezultati merenja istom sondom u mirnoj vodi, ali sa vremenom osrednjavanja  $T_s=24$  s.



Slika 1: Šum standardne EM sonde



Slika 2: Smanjenjem ofseta i šuma sonde osetljivost se spušta na 1mm/s

U periodu od 9:45 do 10:30 merenja su obavljena u mirnoj vodi, sa  $T_s=24$  s i bez uklanjanja ofseta sonde. U periodu od 10:30 do 11:15 je od izmerenog signala oduzet ofset (1.71 mm/s za X pravac i -1.86 mm/s za Y

pravac). Sa dodatnim osrednjavanjem (5 vrednosti) koje je obavljeno nad signalom u periodu od 11:15 do 12:00 dobija se praktičan nivo mernog šuma od 1 mm/s. Dalje spuštanje mernog praga bi zahtevalo nerealno dugačka

merjenja i/ili promenu u konstrukciji EM sonde (veća merna glava i veća struja pobude).

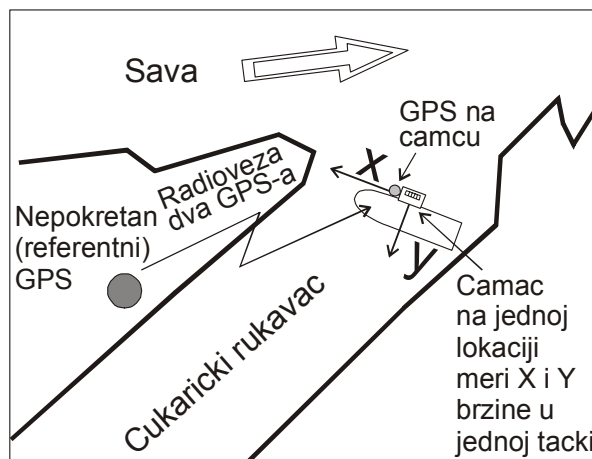
### 3 Merenja na Čukaričkom rukavcu

Za potrebe merenja na Čukaričkom rukavcu usvojeno je sledeće setovanje merne sonde: interno vreme osrednjavanja  $T_s=24$  s, akvizicija mernih podataka na 30 s i vreme stajanja u jednoj mernoj tački oko 30 minuta, što daje oko 3600 parova podataka na jednoj mernoj poziciji.

Način realizacije merenja je prikazan na slici 3. Merna EM sonda je montirana na čamac. Merna zona je na 20 cm ispod površine vode. Čamac se sidri na jednoj lokaciji oko 30 minuta i dobijaju se podaci o dve komponente brzine u lokalnom koordinatnom sistemu sonda – čamac. Na slici 4 je prikazana oprema montirana na ribarski čamac.

Pomoću dva dvofrekventna GPS uređaja kontinualno je praćen položaj čamca na svaku sekundu, sa tačnošću od

1.5 do 2 cm (u zavisnosti od trenutnih uslova). Jedan GPS uređaj je montiran na čamac, dok je drugi, referentni GPS uređaj postavljen na obali, u neposrednoj blizini mernih lokacija.



Slika 3: Organizacija merenja



Slika 4: GPS antena (žuta kutija) i dvikomponentna EM sonda (vidi se samo gornji deo, sa elektronikom i displejom) montirani na ribarski čamac

### 3.1 Uticaj brzine čamca na merenja brzine vode

Podaci koji su prikupljeni sa GPS-a su u standardnom Istok/Sever koordinatnom sistemu. U tabeli 1 je dat

primer skupljenih podataka, kao i izračunatih trenutnih relativnih položaja čamca i brzina a na osnovu sekundnih merenja sa GPS logera.

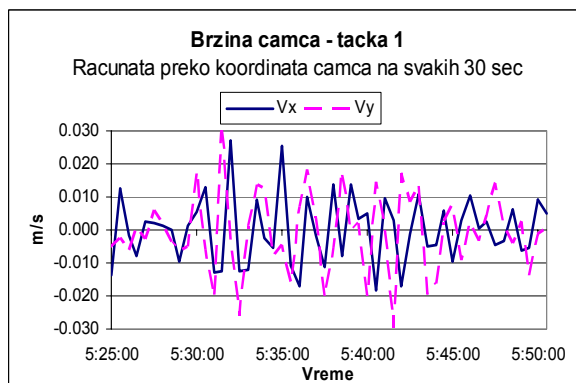
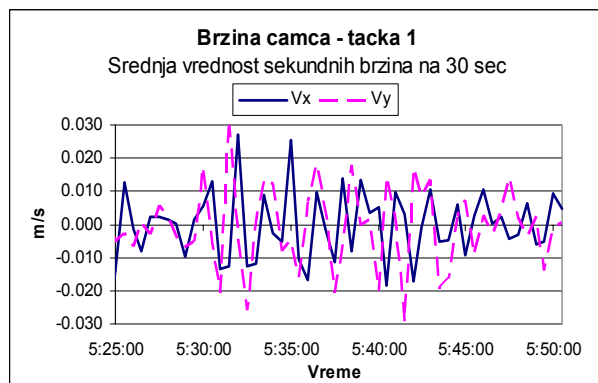
Tabela 1: Sirovi podaci sa GPS-a (levi deo tabele) i izračunate brzine čamca

Pnt	Easting	Northing	Height	Time	Xrelative	Yrelative	Vx (m/s)	Vy (m/s)
311	7455226.16	4961339.84	72.34	5:24:28	0.00000	0.00000		
312	7455226.13	4961339.84	72.34	5:24:29	-0.02995	-0.00180	-0.0299	-0.0018
313	7455226.09	4961339.85	72.33	5:24:30	-0.06820	0.00933	-0.0383	0.0111
314	7455226.05	4961339.86	72.32	5:24:31	-0.10354	0.02331	-0.0353	0.0140
315	7455226.02	4961339.87	72.32	5:24:32	-0.13587	0.02861	-0.0323	0.0053
316	7455225.98	4961339.86	72.31	5:24:33	-0.17318	0.02320	-0.0373	-0.0054

Da bi merenje položaja čamca bilo u saglasnosti sa merenjem brzina vode (i čamca), izvršeno je osrednjavanje sekundnih brzina na 30 sekundi (prikazano na levom delu slike 5). Druga mogućnost je da se brzine računaju na osnovu položaja čamca u trenutku kada EM sonda meri brzinu (prikazano na desnom delu slike 5), pri čemu se dobijaju, naravno, isti rezultati.

Dobijene 30-sekundne brzine čamca su osrednjene istim postupkom kao i merene brzine, sa «klizajućom» srednjom vrednošću od 5 podataka. Na slici 6 je prikazan finalni dijagram brzina čamca, koji je kasnije korišćen za korekciju merenja brzina vode.

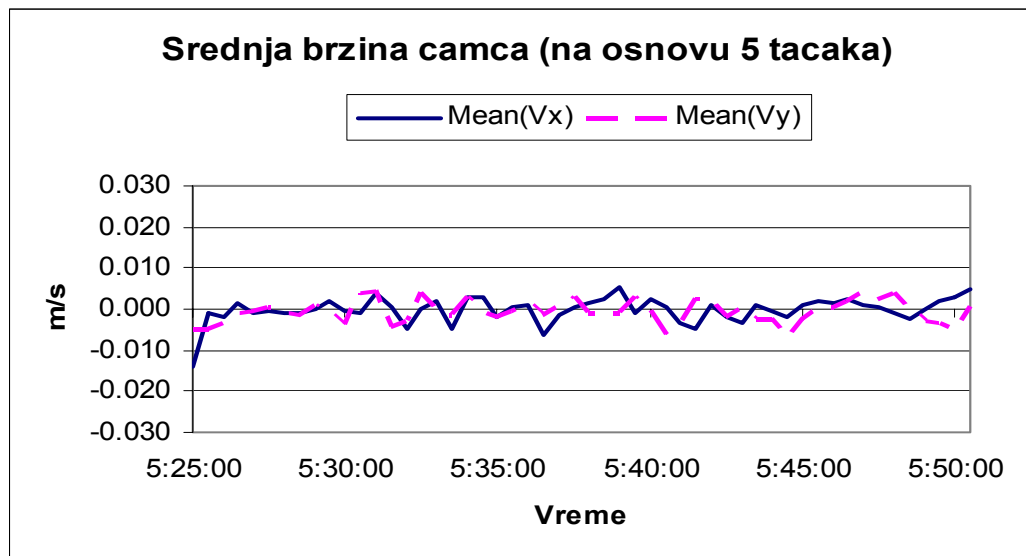
Opisanom metodologijom su obrađeni i rezultati sa ostalih 5 mernih lokacija [3].



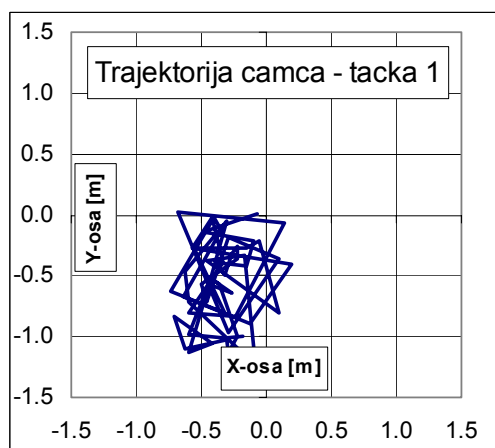
Slika 5: Brzina čamca računata kao srednja vrednost sekundnih brzina (leva slika) i kao brzina na osnovu lokacija čamca na svakih 30 sekundi (desna slika)

Pored komponenti brzina čamca, za svaku od mernih pozicija se mogu nacrtati i trajektorije čamca (slika 7), put koji je prešao za vreme dok je trajalo merenje

brzine u jednoj mernoj tački. Na slici 7 početna tačka (0,0) odgovara početnoj poziciji kada je započelo merenje brzina u jednoj tački.



Slika 6: Dijagram komponenti brzina čamca



Slika 7: Trajektorija čamca

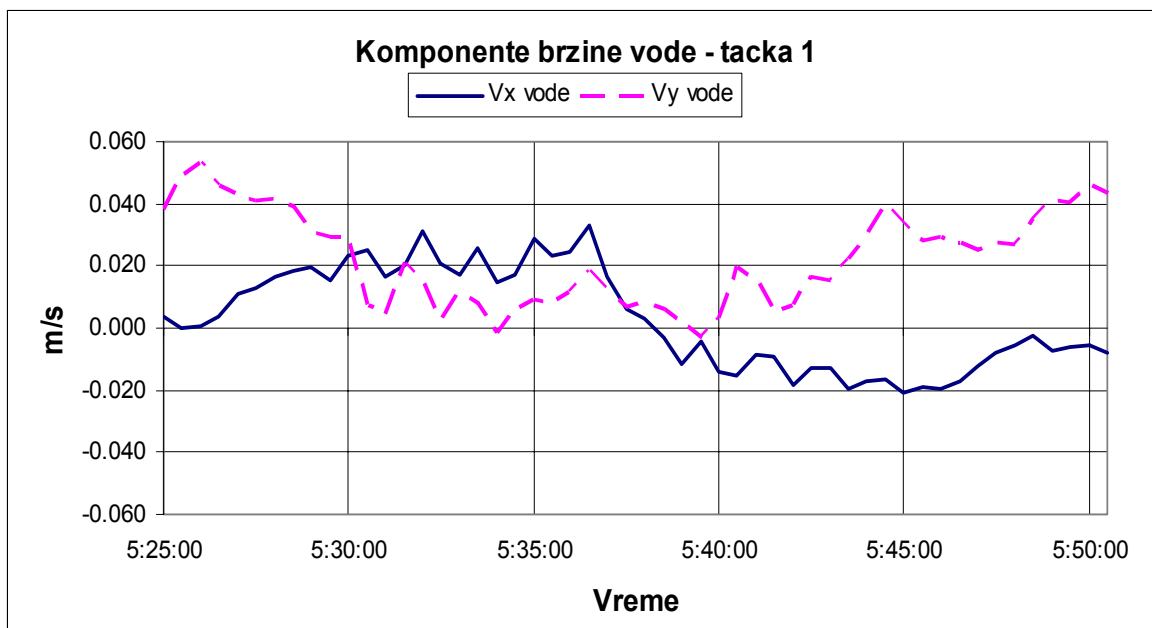
Na većini mernih mesta će se videti da se čamac kretao u radijusu od 1 do 2 metra, u periodu od 20 do 30 minuta. Ova slika kao i prethodna, pokazuju da je uticaj brzine čamca na merenja brzine vode bio relativno mali (tipično ispod 10% u svim mernim pozicijama). Prema preporukama iz literature, u sličnim aplikacijama ne treba ići na korekcije veće od 100%, odnosno,

dozvoljeno je da brzina čamca bude istog reda veličine kao i brzina merene vode. Iz ovih uslova se vidi da je u merenjima postignut znatno povoljniji odnos relativnih brzina, te da je obavljena korektna korekcija mernih rezultata oduzimanjem brzine čamca od izmerene brzine vode.

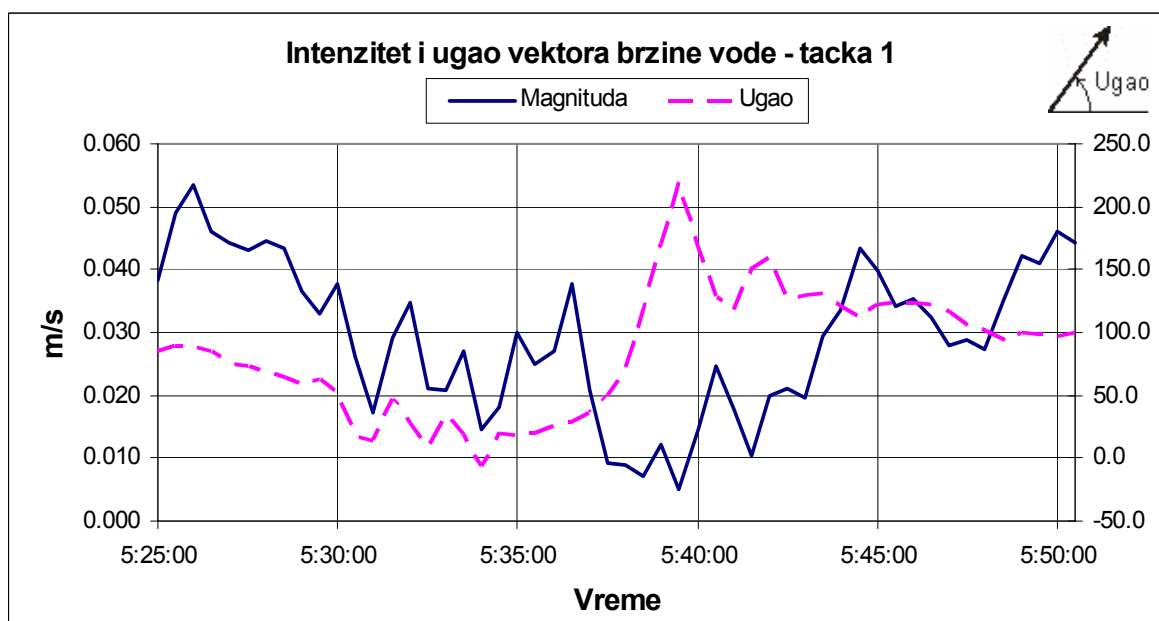
### 3.2 Merenje brzine vode

EM sonda je postavljena na bok čamca, tako da je merna glava bila 20 cm ispod površine vode. Sonda je merila brzine na svakih 30 sekundi, u svom lokalnom koordinatnom sistemu: +X u pravcu čamca a +Y upravno na čamac. Za svaku mernu poziciju su merene brzine prebačene u globalni X/Y sistem, gde je X pravac istoka a Y pravac severa.

Transformisane brzine su osrednjavane sa klizajućom srednjom vrednošću na bazi 5 merenja. Nakon toga su oduzimate brzine čamca, tako da se na kraju dobijaju X/Y brzine vode (slika 8). Na osnovu tih brzina izračunat je intenzitet vektora brzine (magnituda) i njen ugao u odnosu na pravac istoka, pozitivan ugao je suprotna pravac okretanja kazaljke na satu (slika 9).



Slika 8: Obradene X i Y komponente brzine vode za prvu mernu lokaciju



Slika 9: Izračunat intenzitet i ugao vektora brzine za prvu mernu lokaciju

### 3.3 Merne lokacije

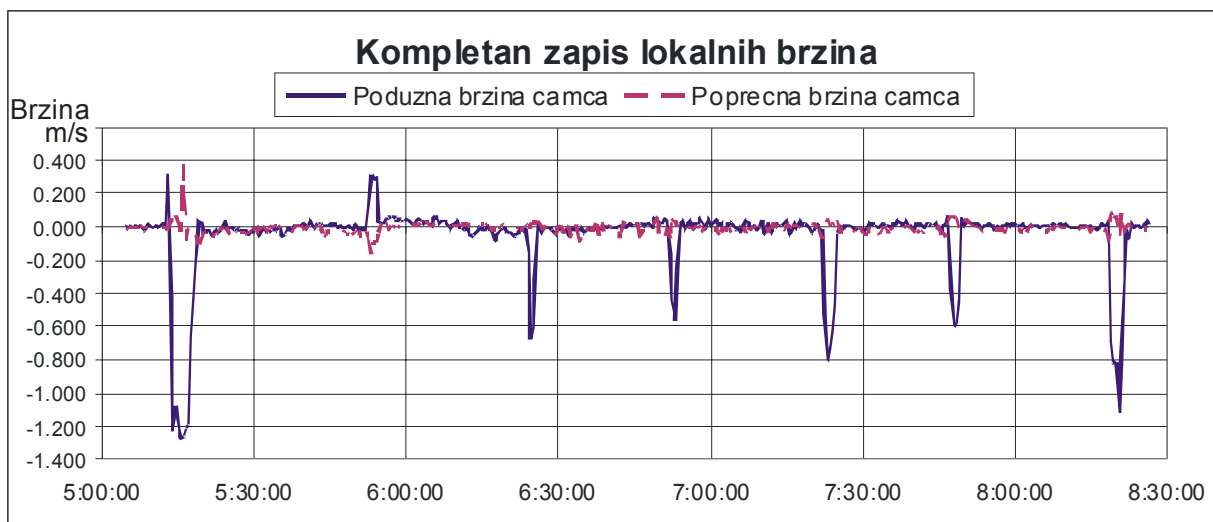
Merenja na spoju Čukaričkog rukavca i reke Save su obavljena 22-06-2006. u ranim jutarnjim časovima, kako bi se izbegle smetnje čamaca koji

ulaze i izlaze iz rukavca. Merne tačke su odabrane tako da ne budu zahvaćene glavnom strujom reke Save. Urađeno je 6 merenja, u ukupnom trajanju od 3.5 sata.



Na slici 11 su prikazane merne lokacije kao i položaj referentnog GPS uređaja. Uglovi lokalnih koordinatnih sistema su određeni na osnovu aerofotogrametrijskih

snimaka i fotografisanjem sa samog čamca u pozitivnim X i Y pravcima.



Slika 10: Vremenski zapis lokalnih brzina (čamac i voda). Vide se jasno epizode pomeranja čamca sa jedne na drugu mernu lokaciju (negativna poduzna brzina predstavlja kretanje čamca u napred)



Slika 11: Svih 6 mernih lokacija sa položajima čamaca i korišćenim lokalnim koordinatnim sistemima

Tabela 2: Lokacije 6 mernih mesta u zvaničnom državnom koordinatnom sistemu

	Tacka	X	Y	Z-GPS-a	Ugao čamca (stepeni)
Pozicija1	311	7455226.163	4961339.845	72.348	164.000
Pozicija2	1955	7455253.647	4961349.603	72.296	236.000
Pozicija3	3391	7455225.149	4961318.955	72.273	159.000
Pozicija4	4681	7455203.503	4961297.141	72.358	151.000
Pozicija5	6044	7455113.683	4961302.549	72.290	219.000
Pozicija6	7030	7455093.918	4961282.950	72.297	144.000

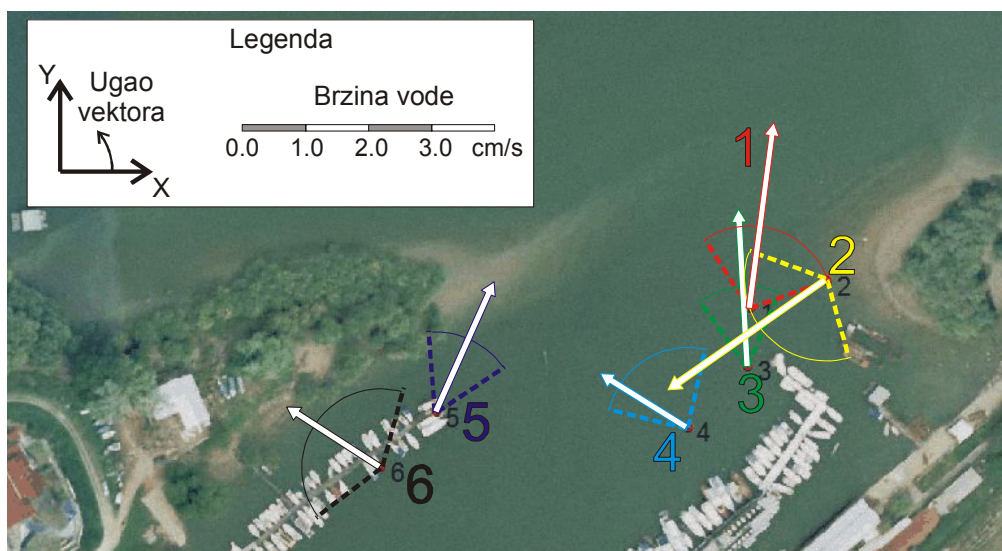
### 3.4 Dobijeni rezultati merenja

kompletni podaci, dok su u narednoj tabeli i na narednoj slici dati samo sumarni podaci.

Obradom svih izmerenih podataka, dobijene su brzine vode u 6 merenih tačaka. U izveštaju [3] su dati

Tabela 3: Srednje vrednosti izmerenih brzina i odstupanja vektora od srednje vrednosti

Pozicija	Magnituda brzine mm/sekundi	Ugao stepeni	Min. ugao	Maks. ugao
1	29.4	82	20	120
2	30.2	214	160	285
3	24.8	93	65	126
4	16.0	148	77	166
5	22.4	66	33	94
6	17.1	147	74	216



Slika 12: Grafički prikaz izmerenih vektora brzina i njihovih odstupanja. Nivo vode prilikom merenja je bio znatno viši od prikazanog na fotografiji!



#### 4 Komentar dobijenih rezultata merenja

Kako su prvi put obavljena merenja malih brzina na reci primenom EM sonde i GPS načina pozicioniranja, mogu se izvući sledeća iskustva i zaključci:

- Dobro je što su merenja obavljena u periodu kada neme veće aktivnosti na vodi. U letnjem periodu je realno merenja obavljati do 9 sati pre podne.
- Za dobra merenja treba obezbediti mala pomeranja čamca – problem koji je postojao je ljuljanje čamca (zbog toga su dodatno osrednjavani rezultati) jer je korišćen relativno uzak ribarski čamac. Bolje bi bilo da se napravi poseban čamac tipa „katamaran“ – sa dva trupa i sa ugrađenim sistemom za sidrenje u dve tačke (na pramcu i na krmi). U toku merenja na čamcu ne bi trebalo da se nalazi posada – treba koristiti dva čamca.
- Kako je korišćen čamac bio nestabilan, par mernih mesta je tako izabrano da je čamac mogao da se veže za obližnje plovne objekte. Na žalost, upravo zbog toga su i rezultati merenja brzina na lokacijama 3 i 6 pod izrazitim uticajem okolnih objekata.
- Metoda merenja bi bila znatno bolja da je postojao još jedan GPS na čamcu (ili, još bolje je elektronski kompas) kako bi se merio i ugao čamca.
- Sa malim modifikacijama EM sonde, moguće je podići osetljivost mernog sistema za 5 do 10 puta. Za to je potrebno napraviti novu mernu glavu, sa nešto većim elektromagnetima.

Dobijeni rezultati merenja brzina na 6 lokacija ukazuju na postojanje očekivanih (na osnovu matematičke simulacije) intenziteta brzina. Analizom izmerenih rezultata se može zaključiti da postoje dva dominantna vrtloga na spoju Čukaričkog rukavca i reke Save: jedan lokalni u blizini spruda (merne tačke 1, 2 i 3) i jedan glavni (merna tačka 5). Iz vremenskih dijagrama magnitude i ugla vektora izmerenih brzina, vidi se da se radi o neustaljenom strujnom polju, sa periodama od 10-tak do 20 minuta.

Merna mesta 3 i 6 su bila u blizini usidrenih čamaca, tako da su oscilacije brzina bile diktirane i pomeranjem tih okolnih čamaca. Da su merene neke dublje brzine, koje su izvan zone uticaja čamaca, verovatno bi se dobili „bolji“ rezultati.

Analizom dijagrama magnituda i uglova vektora kroz vreme, može se zaključiti da su merno mesto 1 i 2 u donekle „stabilnim“ uslovima vrtloženja, dok je merno mesto 4 u zoni „sukoba“ dva vrtloga. Takođe, i merno mesto 5 je u zoni „stabilnog“ izlaznog vrtloga, koji je pod znatnim uticajem reke Save, dok je merno mesto 6 u veoma nestabilnom delu toka.

#### LITERATURA

- [1] Jovanović, M., R. Kapor, D. Prodanović i B. Zindović (2005): *Hidraulička studija spoja Čukaričkog rukavca i reke Save*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet Beograd, izveštaj broj 43336
- [2] Jovanović, M., R. Kapor, D. Prodanović i B. Zindović (2006): *Studija uticaja ispuštanja izbagerovanog materijala iz Čukaričkog rukavca u reku Savu*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet Beograd, izveštaj broj 43337
- [3] Jovanović, M., R. Kapor, D. Prodanović i B. Zindović (2006): *Studija uticaja mosta na donjem špicu Ade Ciganlije na strujno polje i morfologiju korita reke Save na ulazu u Čukarički zaliv*, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet Beograd, izveštaj broj 43611
- [4] Jovanović, M., R. Kapor, D. Prodanović i B. Zindović (2006): *Upgrading Environmental Projects by CFD Modelling*, 23. Konferencija podunavskih zemalja o hidrološkim prognozama i hidrološkim osnovama vodoprivrede, Beograd.
- [5] RD Instruments (2002): *WorkHorse Installation and User Guide*.
- [6] Svet Instrumenata (2003): *Dvokomponentna elektromagnetna sonda, model LOG77XY, Uputstvo za korišćenje*.

## FIELD MEASUREMENT OF SMALL VELOCITIES

by

Dr Dušan PRODANOVIĆ  
Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

## Summary

The application of 2D and 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling in open river flow is gaining in its popularity, especially in the field of sediment deposition on the river confluences and bay entrances. The computational model has to be calibrated based on the existing flow conditions. Measurements of large river velocities are one of common tasks. On the other hand, modeling of bays needs the measurement of extremely small velocities, that can't be done using standard equipment. The used method for measurement of small velocities is presented in this paper. The

method was based on the standard 2D Electromagnetic (EM) probe and one differential GPS receiver. The laboratory tests of equipment showed that the achieved noise level was bellow 1 mm/s. During field measurements, where velocities are in the range of few centimeters per second, small movements of EM probe were compensated using GPS readings, acquired at second interval with sub-centimeter accuracy.

Key words: velocity measurement, electromagnetic probe, GPS

Redigovano 19.12.2006.