

## PREDVIĐANJE KOEFICIJENTA UZDUŽNE DISPERZIJE U PRIRODNIM VODOTOCIMA NA OSNOVU MJERENJA ADCP UREĐAJEM

Hata MILIŠIĆ

Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, B&H

### REZIME

Zagađenje ispušteno u vodotok je podvrgnuto različitim fazama transporta i miješanja kao posljedice brzina riječne struje. Nakon postizanja potpunog poprečnog miješanja u rijeci, nastavak analize širenja oblaka zagađenja dovoljno je promatrati jednodimenzionalno. Jednodimenzionalni (1-D) numerički modeli transporta zagađenja u vodotocima oslanjaju se na advekcijsko-disperzijsku jednačinu, u kojoj je koeficijent uzdužne disperzije nepoznati parametar koji se kalibrira. Koeficijent disperzije općenito se procjenjuje pomoću empirijskih formula ili na osnovu terenskih istraživanja (traser test) koji daju najtačnije rezultate, ali su pri tom veoma skupi jer zahtijevaju velika ulaganja u planiranje, osoblje i analizu.

Trenutno, korištenje akustičnih uređaja ADCP-a (Acoustic Doppler Current Profilers) može poboljšati rezultate hidrometrijskih mjerenja u odnosu na one dobivene uobičajenim tehnikama (npr. hidrometrijskim krilom), iz razloga što je postignuta veća prostorna rezolucija i vremenski kraće mjerenje brzina i protoka, kao i tačnije izmjerena morfologija korita. Ove informacije (rezultati mjerenja) mogu se koristiti na način da se postigne, potpuno novo, dodatno razumijevanje fizikalnih mehanizama prisutnih u razmatranom dijelu vodotoka. Jedan od procesa koji se može proučavati detaljnije je disperzija zagađujućih materija na tom potezu.

Prema tome, fokus ovog rada je procjena koeficijenta uzdužne disperzije u rijeci Neretvi, a na osnovu mjerenja batimetrije i brzine strujnog toka ultrazvučnim ADCP uređajem. Pokazano je da se rezultati koji su dobijeni po metodi ADCP dosta dobro slažu s rezultatima traser testa, pogotovo pri visokim proticajima. Za razmatrani segment vodotoka, vrijednost koeficijenta disperzije dobivena na osnovu traser eksperimenta bila je bliska procjenjenoj srednjoj

vrijednosti dobivenoj na osnovu ADCP mjerenja, tako da ADCP metoda može biti odlična alternativa tradicionalnim metodama baziranim na traser testu.

**Ključne riječi:** koeficijent uzdužne disperzije, ADCP, traser test, 1D numerički model, rijeka Neretva

### 1. UVOD

Miješanje – transportni procesi zvani difuzija i disperzija, predstavljaju osnovni mehanizam koji određuje prijemni kapacitet nekog vodotoka u odnosu na stabilne parametre zagađenja. Kod nestabilnih parametara zagađenja, kao što je npr. biohemijska potrošnja kisika, pored smanjenja koncentracije usljed miješanja dolaze u obzir i drugi faktori samoprečišćavanja koji mijenjaju koncentraciju u toku vremena [1].

Mehanizam miješanja u rijekama i otvorenim tokovima je vrlo kompleksan i onemogućava kompletan matematički opis fizikalne pojave. Za njegovo opisivanje koriste se trodimenzionalne, parcijalne, diferencijalne, linearne jednačine drugog reda koje se ne mogu riješiti analitički, osim za nekoliko pojednostavljenih slučajeva. Prema tome, svi komercijalni programi pomenute jednačine rješavaju numerički.

U ranim fazama transportnog procesa nakon što je zagađivač ispušten u rijeku, advekcija igra važnu ulogu u pronosu zagađujućih materija. U kasnijim fazama, kada je proces poprečnog miješanja potpuno završen, uzdužna disperzija postaje važna i problem se može posmatrati jednodimenzionalno.

Teorija jednodimenzionalne – uzdužne disperzije zasniva se na poznatim, već ranije spomenutim difuzionim teorijama turbulentnog toka gdje se razmatra rasprostiranje (pronos) stabilne materije – obilježivača.

Za nestabilne obilježivače (koji se javljaju u samom toku usljed hemijskih, biohemijskih, termodinamičkih i drugih procesa) odgovarajući iznos izmjene obuhvaćen je izrazima ponora i /ili izvora u jednačini održanja skalarne veličine koja glasi [1][4]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC + C_2 q \quad (1)$$

gdje C, U i D predstavljaju veličine osrednjene po poprečnom presjeku (koncentraciju, brzinu i koeficijent uzdužne disperzije), K je koeficijent razgradnje prvog reda, C<sub>2</sub> je izvor/izljev koncentracije, a q je bočni dotok. Vremenska i uzdužna - prostorna koordinata predstavljene su sa t i x.

Za primjenu teorije uzdužne turbulentne disperzije traži se poznavanje koeficijenta uzdužne disperzije. Njegovo određivanje predstavlja ključni problem pri simulaciji pronosa i širenja ispuštenog zagađenja u vodotocima primjenom 1D numeričkih modela.

Koeficijent uzdužne disperzije najviše zavisi od geometrije korita (širine i dubine) te hidrauličkih karakteristika toka (proticaja i brzine). Njegova vrijednost razlikuje se od vodotoka do vodotoka, a i u samom vodotoku je promjenljiva od poteza do poteza, pri čemu je raspon značajan, tako da nepouzdana procjena koeficijenta uzdužne disperzije pri modeliranju transportnih procesa u prirodnim vodotocima može dovesti do velikih grešaka u rezultatima.

Koeficijent uzdužne disperzije je općenito skalar koji zavisi od rasporeda brzine u vodotoku. Za određivanje ovih koeficijenata, potrebno je mjeriti polje (brzina, širina, dubina, itd) na različitim poprečnim presjecima duž vodotoka. Za jedan uniforman tok pri datim uslovima toka, koeficijent disperzije je konstanta. Za prirodne vodotoke koeficijent disperzije se određuje preko parametara toka, čime se omogućuje obuhvatanje uticaja poprečnih varijacija brzine i geometrije toka, te obuhvatanje koeficijenta poprečne difuzije i disperzije [1][4].

Mnoge teorijske, empirijske i eksperimentalne metode su nastale kao rezultat nastojanja istraživača da se nađe jedna jednostavna i dovoljno tačna metoda za određivanje koeficijenta disperzije za otvorene vodotoke.

Teorijske metode na bazi lako pristupačnih parametara toka su najtraženije i najjeftinije. Međutim, takve metode je teško izvesti osobito za prirodne vodotoke sa izraženim neuniformnostima. Zbog toga se one

uglavnom izvode za uniformne vodotoke, a njihovom primjenom na prirodne vodotoke javlja se uvijek veća ili manja greška.

Empirijske ili poluempirijske metode se baziraju na velikom broju eksperimentalnih mjerenja i važe za date uslove toka pri kojima su izvedene. Osim toga što su dosta skupe, ove metode kod primjene daju velike greške [1][4].

Najbolje rezultate daju mjerenja disperzije na licu mjesta pomoću ubacivanja obilježivača – trasera (boja, radioaktivne supstance itd.). Prateći na datom potezu prolaz oblaka obilježivača, rješenja se dobiju direktno, u vidu krivih vrijeme – koncentracija ili razmak - koncentracija, obuhvatajući sve neuniformnosti na svom putu. Međutim, ove metode su skupe i dugotrajne zbog potrebe ponavljanja postupka za razne proticaje i vrijede samo za hidrološke uslove pri kojima su provedene [3].

Treba napomenuti da je kod nas ova problematika manje izučena i da joj se, na žalost, jako malo pridaje važnost. Vrijednosti koeficijenata uzdužne disperzije za većinu naših vodotoka nisu izračunate niti su poznate. Izuzetak su rijeke Miljacka, Vrbas i Bosna za koje su na određenim segmentima vodotoka dobivene vrijednosti koeficijenata disperzije, kao rezultat ranijih sveobuhvatnih eksperimentalnih istraživanja od strane Haše Bajraktarević – Dobran [1].

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Većina prethodnih istraživanja bila je usmjerena na razvijanje formule za procjenu koeficijenta uzdužne disperzije koristeći lako mjerljive parametre toka, kao što su srednja brzina i dubina, dok su razvijeni i empirijski izrazi koji uzimaju u obzir i druge značajne parametre prirodnih turbulentnih tokova.

Taylor (1954) uvodi pojam koeficijenta disperzije za podužno turbulentno miješanje u ravnoj okrugloj cijevi. Za osno simetričan tok, u pravoj okrugloj cijevi, za jednu empirijsku distribuciju brzine, dobio je jednačinu koja glasi [1] [4]:

$$D = 10,1 \cdot a \cdot u. \quad (2)$$

Taylor je jednačinu (2), teorijski izvedenu za prave cijevi, kao i kompletnu teoriju disperzije provjerio eksperimentalno. Proširenje Taylorovog koncepta koeficijenta uzdužne disperzije na otvorenim kanalima predstavljeno je i od strane mnogih drugih istraživača kao što su Elder, 1959; McQuivey i Keefer, 1974; Fischer, 1975; Liu, 1977 idr.

Elder (1959) je sljedeći Taylorov matematički prilaz, pretpostavljajući logaritamski raspored brzine za dvodimenzionalan tok u beskonačno širokom otvorenom kanalu izveo izraz za D koji glasi [1][4]:

$$D = 5,93 \cdot H \cdot u_* \quad (3)$$

Elderovo istraživanje, nakon Taylorovog, je veoma važno jer je ukazalo na teorijske i eksperimentalne mogućnosti primjene disperzije i difuzije teorije na otvorene kanale, prvo laboratorijske, a zatim i vještačke i prirodne otvorene vodotoke.

Fischer (1967 - 1979) je nakon Taylora i Eldera, sljedeći dao veliki teorijski i praktični doprinos za određivanje koeficijenta uzdužne disperzije i za cjelokupnu primjenu teorije uzdužne disperzije. Od posebnog značaja, sa praktične tačke gledišta, važni su njegovi radovi koji obrađuju problem disperzije u prirodnim otvorenim vodotocima. Budući da većina prirodnih vodotoka ima odnos B/H = 10 ili veći, (širina/dubina = 10 ili veći), a vrijeme miješanja između zona različitih brzina varira kao kvadrat odstojanja, to je primarni uzrok disperzije u njima promjena brzine u poprečnom pravcu. Polazeći od Taylorovog prilaza i koristeći Reynoldsovu analogiju, Fischer je dobio sljedeći izraz za proračun koeficijenta uzdužne disperzije koji glasi (jednačina 4) [1][4]:

$$D = -\frac{1}{A} \int_A u' f dA = -\frac{1}{A} \int_0^B q'(y) dy \int_0^y \frac{1}{D_y h(y)} dy \int_0^y q'(y) dy \quad (4)$$

gdje je B ukupna širina kanala, a  $u'$  predstavlja varijaciju u odnosu na osrednjene vrijednosti brzine  $\bar{u}$ , po poprečnom presjeku, dok je  $D_y$  – koeficijent turbulentne difuzije u poprečnom pravcu.

U jednačini (4)  $q'(y)$  predstavlja brzinu integrisanu po dubini  $z = d(y)$  kod tačke  $y$  u poprečnom presjeku:

$$q'(y) = \int_0^{d(z)} u'(y, z) dz \quad (5)$$

Koeficijent turbulentne difuzije u poprečnom pravcu  $D_y$  treba biti baziran na eksperimentima. Fischer je preporučio da je  $D_y = 0,23 d u_*^2$ , dat od Eldera koji je već provjeren u prirodnim vodotocima.

Istovremeno se brzina smicanja može predstaviti i kao,  $u_* = \sqrt{dSg}$ , gdje je  $d$  – dubina vodotoka,  $S$  – nagib linije energije i  $g$  – ubrzanje gravitacije. Preko Eulerove vremenske skale,

$$T' = \frac{l^2}{D_y} = \frac{l^2}{0,23 R u_*^2} \quad (6)$$

analizirajući dvodimenzionalan tok posmatran od strane Eldera i usvajajući isti odnos između Eulerove i Lagrangeove vremenske skale i za prirodne vodotoke, Fischer je izveo Lagrangeovu vremensku skalu [1][4]:

$$T = 0,30 \frac{l^2}{R u_*} \quad (7)$$

gdje karakteristična dužina  $l$  predstavlja razmak od tačke maksimalne brzine na površini do najudaljenije obale, a hidraulički radijus  $R$  je zamjenjen dubinom  $d$ . Da bi disperzija bila opisana jednačinom difuzije, potrebno je da vrijeme bude mnogo veće od Lagrangeove integralne vremenske skale  $t \gg T$ .

Za difuzioni period može se postaviti i kriterij u sljedećem obliku:

$$L > 1,8 \frac{l^2 \bar{u}}{R u_*} \quad (8)$$

gdje je  $l$  razmak od jednog tačkastog ili linijskog izvora niz tok. Imajući poteškoća u korištenju jednačine u integralnom obliku i nedostupnost detaljnih poprečnih profila brzine, Fischer (1979) daje pojednostavljenu jednačinu (4) u sljedećem neintegralnom obliku [1][4]:

$$D = 0,011 \frac{B^2 U^2}{u_* H} \quad (9)$$

Istraživanja na predviđanju koeficijenta uzdužne disperzije nastavljena su dalje i od drugih istraživača (Bajraktarević – Dobran, 1981; Chatwin i Sullivan, 1982; Iwasa i Aya, 1991; Jobson, 1997; Sukhodolov, 1997; Deng, 2001; Kashefipour i Falconer-a, 2002; Tayfur, 2006, 2009 idr.).

U novije vrijeme se za određivanje koeficijenta uzdužne disperzije primjenjuju i nove tehnike tzv. "vještačka inteligencija". Tayfour (2009) koristi Artificial Neural Network (ANN) model, a Hossien Riahi-Madvar et al. (2009) koriste Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model za procjenu koeficijenta uzdužne disperzije u prirodnim vodotocima. ANN i ANFIS su nove metodologije za predviđanje koeficijenta uzdužne disperzije, čiji rezultati imaju veoma dobro slaganje sa mjerenim vrijednostima.

Azamathulla i Ghani (2010) u svome radu primjenjuju genetičko programiranje (GP) za predviđanje koeficijenta uzdužne disperzije. Razvijajući novi izraz i testirajući ga sa drugim empirijskim metodama zaključuju da ovaj pristup daje puno bolje slaganje sa stvarno izmjerenim vrijednostima.

Meredith L. Carr and Chris R. Rehmann, M.Asce (2007), Chaopeng Shen, et al. (2010) i Dongsu Kim (2012) u svojim istraživanjima predviđaju koeficijent uzdužne disperzije na osnovu rezultata hidrometrijskih mjerenja primjenom ADCP- a uređaja. Oni zaključuju da ovaj metod procjene koeficijenta disperzije predstavlja odličnu alternativu skupim traser eksperimentima i da daje dosta bolje procjene u odnosu na empirijske formule [2][3][5].

### 3. TERENSKA ISTRAŽIVANJA NA RIJECI NERETVI

Novije mjerne tehnike (akustički uređaji) omogućavaju dobivanje ne samo protoka i strujne slike, za što su prvenstveno namijenjeni, već i kvalitetne baze podataka na osnovu koje je uz primjerenu tehnologiju moguće opisati disperzivne procese u vodotoku [2][3][5].

Za izradu prihvatljivog matematičkog modela transporta i disperzije zagađenja u vodotoku, potrebno ga je kalibrirati pomoću tačnih vrijednosti koeficijenta uzdužne disperzije. Kako traser eksperimenti zahtijevaju velika ulaganja u planiranje, osoblje i analizu, javila se potreba da se razvije alternativna metoda koja može na jednostavan način predvidjeti koeficijente uzdužne disperzije. Procjena koeficijenta disperzije implicira, kako je već rečeno, poznavanje rasporeda brzina po dubini i po poprečnom presjeku, tako da je taj zadatak teško ostvariti s tradicionalnim načinom mjerenja pomoću hidrometrijskog krila, pogotovo kada je riječ o velikim vodotocima [2][3][5].

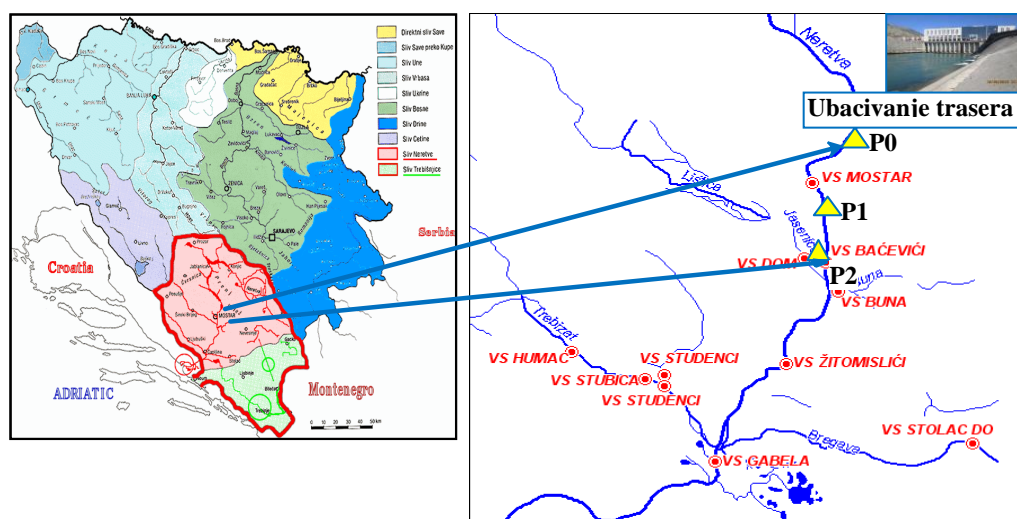
Sve popularniji ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) omogućava da se na brži i lakši način dođe do

potrebnih informacija bilo mjerenjem u fiksnoj tački ili pomoću čamca koji se kreće. U ovome kontekstu bitno je istaknuti da se prosječna brzina u vertikali, kao i u poprečnom presjeku ne pretpostavlja (kao kod konvekcionalnog načina mjerenja) već je to stvarna raspodjela brzine koju je ADCP registrovao tokom mjerenja. Ovaj aspekt je važan jer uzima u obzir sve neuniformnosti vodotoka, a time i stvarno odstupanje brzine u profilu od uprosječene [2][3][5].

Cilj ovoga rada su eksperimentalna (terenska) istraživanja koeficijenta uzdužne turbulentne disperzije u rijeci Neretvi, odnosno razvoj novih metoda za njegovo predviđanje. U tu svrhu provedena su simultana mjerenja i to hidromorfološka sa ADCP uređajem (SonTek – RiverSurveyor S5) i traser eksperiment sa trenutnim ubacivanjem stabilnog obilježivača (otopljene kuhinjske soli - NaCl) u rijeku Neretvu [6].

Terenska istraživanja obavljena su u oktobru 2013. god. na potezu nizvodno od HE Mostar do mjerne stanice Bačevići. Dužina razmatranog poteza vodotoka iznosi cca 14 km. Mjerenja su obavljena na tri mjerna profila i to mjerni profili P0 (Raštani – nizvodno od HE Mostar), P1 (Begića most – nizvodno od VS Mostar) i mjerni profil P2 (Bačevići - nizvodno od Mostara) – Slika 1.

Koeficijent uzdužne disperzije dobiven terenskim mjerenjima poslužit će dalje za kvalitetnu kalibraciju 1D modela transporta zagađenja rijeke Neretve (numerički model MIKE 11). Validirani transportni model rijeke Neretve koristit će se za simuliranje iznenadno ispuštenog (incidentnog) zagađenja i njegov uticaj na kvalitet vode u rijeci Neretvi.



Slika 1. Područje istraživanja - rijeka Neretva (mjerni profili P0, P1 i P2)

### 3.1 Princip rada akustičnih mjerača protoka

Mjerenje protoka na vodotocima jedna je od osnovnih aktivnosti kojima se bavi praktična hidrologija. U kombinaciji s korektnim mjerenjima vodostaja, mjerenje protoka uvijek pruža cjelovitu sliku o stanju voda na nekom vodotoku. Iako su se za mjerenje brzine strujanja vode tokom vremena razvili i različiti drugi instrumenti, tek se hidrometrijsko krilo pokazalo dovoljno robusnim, a istovremeno i dovoljno preciznim instrumentom za mjerenje brzina strujanja vode u vodotocima u kojima se uslovi tečenja, sasvim sigurno, ne mogu smatrati laboratorijskim [7].

Početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća počeli su se sporadično javljati prvi pokušaji mjerenja brzina strujanja primjenom akustičkih uređaja, ali je takva oprema, u to vrijeme, svoju inicijalnu primjenu ipak našla tek u okeanografskim mjerenjima.

Zbog svoje jednostavnosti mjerenje protoka primjenom ADCP uređaja uzima danas sve više prostora u mjeriteljskoj praksi. Jedinstvena sposobnost ADCP-a se sastoji u tome da uređaj ima mogućnost kontinuiranog mjerenja i registrovanja kako podataka o brzinama strujanja vode u vodenom stubu, preko čitavog proticajnog presjeka vodotoka, tako i podataka o brzini kretanja čamca, mjereno relativno prema čvrstom dnu vodotoka. Na osnovu izmjerenih podataka o brzinama strujanja vode, po visini vodenog stuba na svakoj pojedinoj mjernoj vertikali, kao i na osnovu izmjerene brzine kretanja čamca, računaju se najprije parcijalni protoci za svaku mjernu vertikalu, a potom i ukupni protok na vodotoku integracijom parcijalnih protoka preko širine vodotoka. Prilikom ovog proračuna se brzine strujanja i brzina kretanja čamca posmatraju kao vektorske veličine. Ova činjenica dodatno pojednostavljuje cjelokupni proračun protoka, budući da se pokazuje da takav pristup praktično omogućuje da čamac preplovljava vodotok po trajektoriji proizvoljnog oblika [7].

Znači, ako raspoložemo sa čamcem na kojemu je instaliran ADCP za određivanje protoka vodotoka, protok je moguće odrediti već samim preplovom čamca s jedne obale vodotoka na drugu, po proizvoljnoj trajektoriji. Takvo mjerenje u praksi obično traje 15 do 20 minuta. Opća jednačina za određivanje protoka, preko proticajne plohe  $s$  proizvoljnog oblika, glasi [7]:

$$Q_t = \int_s \vec{v}_f \cdot \vec{n} ds \quad (10)$$

gdje je:  $Q_t$  – ukupni protok vodotoka;  $m^3/sec$

$\vec{v}_f$  - vektor srednje brzine strujanja vode;  $m/sec$

$\vec{n}$  - jedinični vektor u smjeru normale na proticajnu plohu  $s$

$ds$  – diferencijalna površina proticajne plohe  $s$ ;

Izraz (10) je, u stvari, poznati izraz za izračunavanje protoka  $Q$  kao proizvoda površine proticajnog presjeka  $A$  i brzine strujanja vode  $v$ , dakle  $Q = Av$ , ali ovdje dat u integralnom obliku. Podintegralna funkcija  $\vec{v}_f \cdot \vec{n}$  je pritom skalarni, vektorski **in** proizvod koji kao rezultat daje jednu skalarnu veličinu (protok), a budući da je jedan od faktora ovog **in** proizvoda vektor normale na proticajnu plohu  $s$ , to znači da se pri izračunu protoka kroz tu plohu, u obzir uzima samo ona komponenta brzine strujanja vode koja je normalna (okomita) na razmatranu plohu. To je, dakako, jedini ispravan način proračuna protoka preko neke plohe, dok je u svemu tome posebno dobro to što se nigdje ne kaže da proticajna ploha mora biti nekog specijalnog oblika, odnosno ona može biti proizvoljnog oblika, pa i zakrivljena. Ovo saznanje pruža mogućnost da, prilikom određivanja protoka, čamac preplovljava vodotok po trajektoriji proizvoljnog oblika, a da izmjereni protok kod više ponovljenih preplova, bude uvijek isti (Sl. 2).



Slika 2. Prepliv čamca preko vodotoka (Profil - P0) [6]

Iako fizikalno i matematički sasvim korektan, izraz (10) nije i sasvim prikladan za proračun protoka prilikom upotrebe ADCP-a. Izraz (10) vrijedi u općem koordinatnom sistemu, a budući da se ADCP-om mjeri brzina strujanja vode i brzina čamca iz čamca, to je prikladnije izraz (10) transformisati u koordinatni sistem vezan za čamac. Ovakva transformacija izraza (10) vodi do sljedećeg izraza [7]:

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d \left( (\vec{v}_f \times \vec{v}_b) \cdot \vec{k} \right) dz dt \quad (11)$$

gdje je:  $Q_t$  – ukupni protok vodotoka;  $m^3/sec$

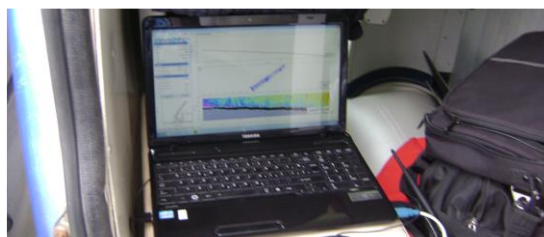
$T$  – vrijeme preplova vodotoka;  $sec$

- $d$  – dubina vodotoka; m
- $V_f$  - vektor srednje brzine strujanja vode;
- $V_b$  - vektor srednje brzine plovidbe čamca;
- $k$  - jedinični vektor u smjeru vertikalne osi;
- $dz$  – diferencijalna dubina; m
- $dt$  – diferencijano vrijeme; sec

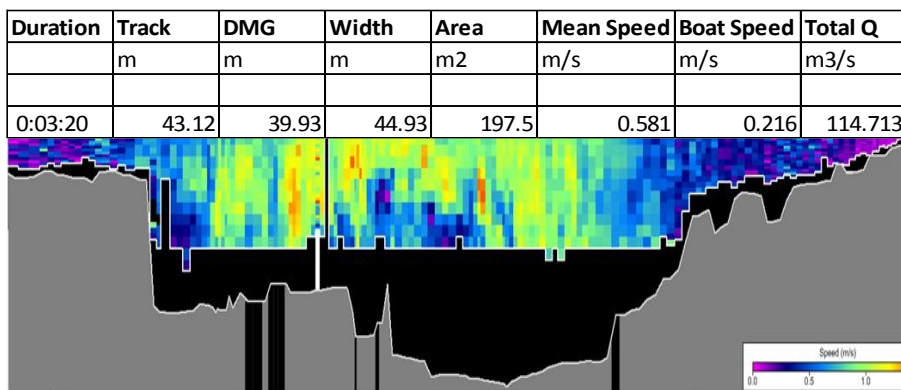
Podintegralna funkcija u izrazu (11) je na prvi pogled malo složenija od one u izrazu (10) ali je takav oblik puno pogodniji za primjenu kod sistema ADCP-a. Kako je već rečeno, izraz (11) vrijedi u koordinatnom sistemu čamca i u sebi uključuje kako brzinu strujanja vode tako i brzinu kretanja čamca. Fizikalno značenje izraza (11) svodi se na to da se na osnovu mjerenja ovih dviju brzina najprije računaju parcijalni protoci preko dubine vode, a potom i ukupni protok na vodotoku integracijom ovih parcijalnih protoka [7].

#### 4. REZULTATI TERENSKIH ISTRAŽIVANJA

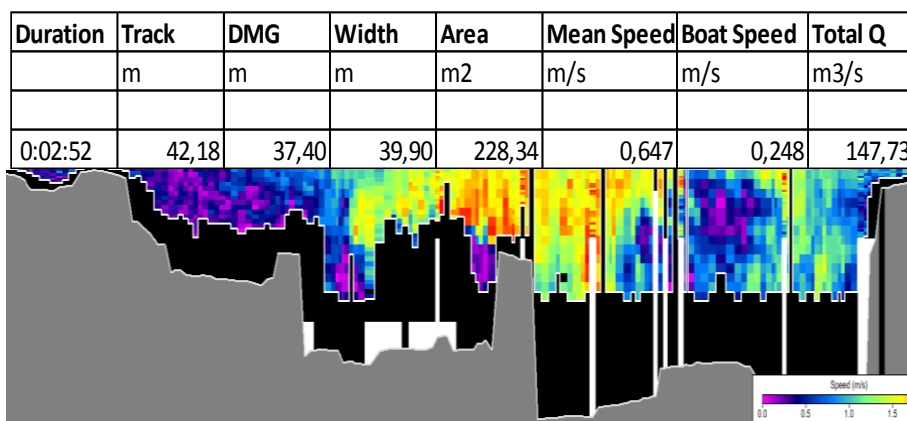
Terenskim mjerenjima sa ADCP uređajem prikupili su se podaci o protocima, detaljnim profilima brzina, oblicima korita te nivoima vode. Da bi se procijenio proticaj u nemjerenim područjima i područjima u kojima su "lažni" podaci uklonjeni (na površini, dnu i uz obale), brzine i batimetrija su aproksimirani (ekstrapolirani). Obrada podataka ADCP mjerenja urađena je u softverskom programu RiverSurveyor S5.



Slika 3. Obrada podataka ADCP - RiverSurveyor S5

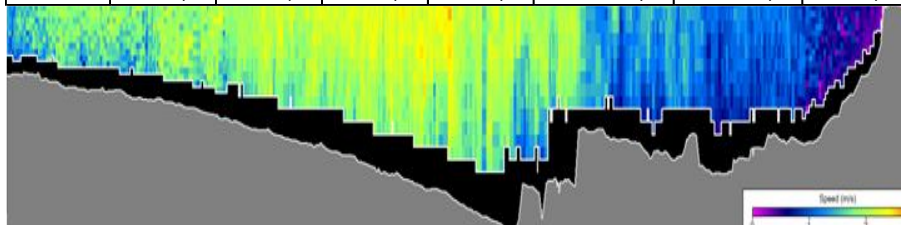


Slika 4. Rezultati mjerenja ADCP uređaja na P0

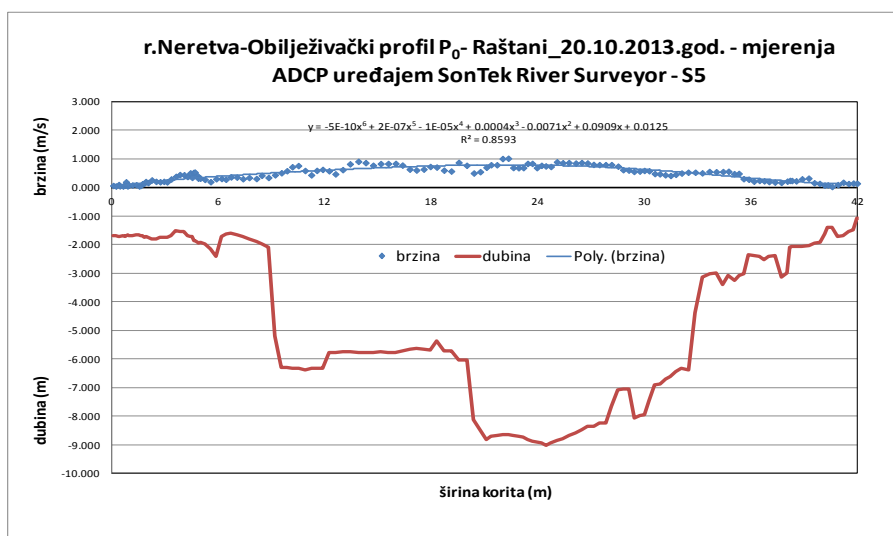


Slika 5. Rezultati mjerenja ADCP uređaja na P1

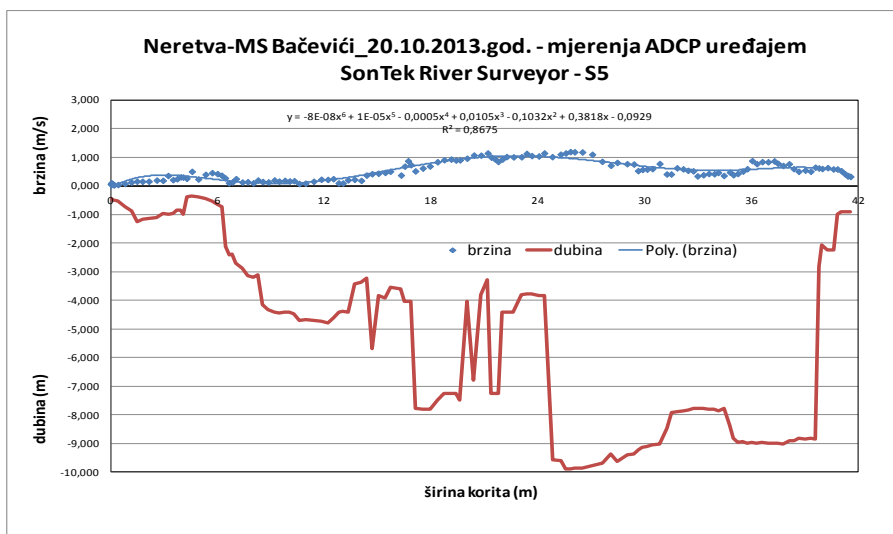
Duration	Track	DMG	Width	Area	Mean Speed	Boat Speed	Total Q
	m	m	m	m <sup>2</sup>	m/s	m/s	m <sup>3</sup> /s
0:07:18	78,86	71,17	75,30	144,20	1,05	0,18	151,56



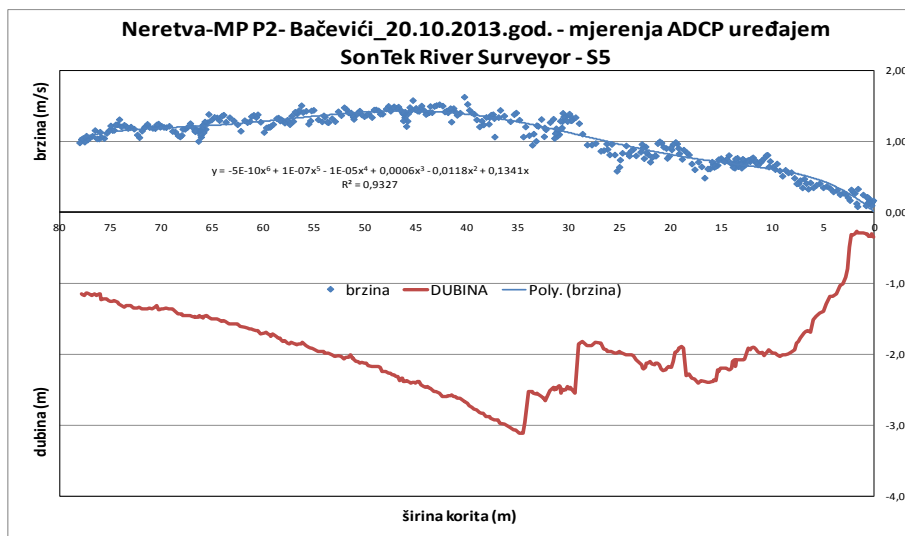
Slika 6. Rezultati mjerenja ADCP uređaja na P2



Slika 7. Rezultati mjerenja brzina i batimetrije na P1



Slika 8. Rezultati mjerenja brzina i batimetrije na P1



Slika 9. Rezultati mjerenja brzina i batimetrije na P2

#### 4.1 Određivanje koeficijenta uzdužne disperzije primjenom ADCP uređaja

Na osnovu mjernih podataka dobivenih ADCP uređajem u navedena tri mjerna profila (Slike 7., 8. i 9.) analizirane su mogućnosti određivanja koeficijenta uzdužne disperzije. Na osnovu pregleda navedenih metoda za predviđanje koeficijenta uzdužne disperzije, izabrane su Fischerove metode kao najprikladnije jer su bazirane na teoriji, tačnije su od drugih odgovarajućih metoda, i što je veoma važno ispitane su dobro i u laboratoriji i na terenu.

Za tipičan poprečni presjek vodotoka određena je geometrija presjeka, smičuća brzina  $u_* = \sqrt{gRS}$  i raspored brzina po presjeku (na osnovu hidromorfoloških mjerenja sa ADCP uređajem), a integral u jednačini (4) zamjenjen je sumom, tako da se dobije sljedeća jednačina za proračun koeficijenta  $D[1]$ :

$$D = -\frac{1}{A} \sum_{k=2}^n q'_k \cdot \Delta y \left[ \sum_{j=2}^k \frac{\Delta y}{D_{y_j} d_j} \left( \sum_{i=1}^{j-1} q'_i \cdot \Delta y \right) \right] \quad (12)$$

gdje je:

$$q'_i = \frac{1}{2} (d_i + d_{i+1}) \cdot u'_i$$

$$u'_i = u_i - \bar{u}$$

$u_i$  - srednja brzina u i-toj vertikalnoj kriški;

$\bar{u}$  - srednja brzina toka za cijeli poprečni presjek;

$d_i$  - dubina na početku vertikalne kriške;

$\Delta y$  - širina vertikalne kriške;

$D_y$  - koeficijent poprečne turbulentne difuzije;

$n$  - broj vertikalnih kriški.

Mana metode je što traži poznavanje koeficijenta poprečne turbulentne difuzije  $D_y$  - kojeg za prirodne vodotoke nije lako dobiti. Vrijednosti koeficijenta poprečnog mješanja se u zavisnosti od tipa korita (Rutherford, 1994) kreću u sljedećim granicama:

$$D_y \approx \begin{cases} (0.13 \div 0.3) u_* H & \text{- pravo korito} \\ (0.3 \div 0.4) u_* H & \text{- pravo sa meandrima} \\ (0.3 \div 0.9) u_* H & \text{- meandrirano korito} \end{cases}$$

Koeficijent poprečne turbulentne difuzije usvojen za proračun u ovome radu iznosi  $D_y = 0,6d_i u_*$  (preporuka Fischera) [4].

Upotrebom modifikovane jednačine (12), a koristeći mjerenja ADCP –a, izračunati su koeficijenti uzdužne disperzije za tri razmatrana mjerna profila (Tabela 1.).

Na ovaj način dobila se analitička metoda za određivanje koeficijenta uzdužne disperzije u prirodnim otvorenim vodotocima, bazirana na uobičajeno mjerenim parametrima toka primjenom savremenih ADCP uređaja [2] [3] [5].



Tabela 1. Proračunati koeficijent D na osnovu mjerenja ADCP –a

Prof.	Q	H	A	B	U	U*	D <sub>ADCP</sub>
	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>2</sup>	m	m/s	m/s	m <sup>2</sup> /s
P0	114,7	3,6	197,5	44,9	0,58	0,092	238,8
P1	147,7	5,8	228,3	39,9	0,65	0,175	211,9
P2	151,5	2,9	144,2	75,3	1,05	0,087	297,3

Za provjeru dobijenog koeficijenta D, Fischer je predložio obaveznu upotrebu jedne integracione procedure bazirane na teoriji difuzije i proučavanju rasprostiranja obilježivača [4].

U tu svrhu proveden je traser test trenutnim ubacivanjem 2 tone rastvorene kuhinjske soli – NaCl na obilježivačkom profilu P0 i praćenjem koncentracije (elektroprovodljivosti) oblaka obilježivača nizvodno na dva mjerna profila P1 i P2. Za mjerenje elektroprovodljivosti korišteni su terenski konduktivimetri tipa HACH CO150 and HACH HQ14d.

Mjerene krive koncentracija – vrijeme poslužile su za proračun koeficijenta uzdužne disperzije po metodi promjene varijanse (tzv. metoda momenta). Vrijednost koeficijenta uzdužne disperzije dobivena ovom metodom iznosi  $D = 206,28 \text{ m}^2/\text{s}$  [6].

Međutim, postoji nekoliko pitanja koja treba razmotriti prije usporedbe rezultata za koeficijente disperzije dobivene primjenom jednačine (12) koristeći mjerenja ADCP i koeficijenata disperzije dobivenih na osnovu analize traser testa. Naime, koeficijent disperzije procijenjen po metodi momenata, a na osnovu traser mjerenja, često se koristi kao "tačna" vrijednost iako vrijedi samo za taj potez i za hidrološke uvjete pod kojima je proveden eksperiment.

S druge strane, koeficijent disperzije dobiven na osnovu hidrauličkih parametara i rasporeda brzina u jednom poprečnom presjeku, predstavlja "tačkastu procjenu" koja vrijedi za taj poprečni presjek, a ne za cijeli segment rijeke. Ako je poprečni presjek prilično ujednačen duž vodotoka, tada jedan transekt predstavlja uslove u čitavom potezu, onda je takva procjena korektna.

Ako je riječ o neuniformnom vodotoku, onda se može izračunati prosječna vrijednost koeficijenta disperzije

koristeći dobivene vrijednosti za pojedine poprečne presjke (transekte) kao što je predložio Rutherford [3]:

$$\bar{D} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n D_i \cdot \Delta x_i \quad (13)$$

gdje je  $\bar{D}$  osrednjeni koeficijent disperzije za određeni segment vodotoka,  $\Delta x_i$  je dužina poteza do ADCP transekta na lokaciji  $x_i$  ( sa vrijednošću  $D_i$ ) i L je ukupna dužina razmatranog segmenta vodotoka.

Srednji koeficijent uzdužne disperzije određen prema jednačini (13), a na osnovu rezultata ADCP mjerenja za razmatrani potez, dobijen osrednjavanjem koeficijenta D za pojedine karakteristične profile poteza iznosi  $\bar{D} = 248,83 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Uparednom analizom dobivenih koeficijenata uzdužne disperzije za razmatrani potez rijeke Neretve od HE Mostar do MS Bačevići, a na osnovu analitičke metode bazirane na ADCP mjerenjima i metode traser testa, uočava se da su se dobile relativno bliske vrijednosti.

## 5. ZAKLJUČCI

Uzdužni koeficijent disperzije, D, je ključni parametar pri kalibraciji jednodimenzionalnih numeričkih modela transporta - modela advekcije-disperzije (AD). Budući da se koeficijent uzdužne disperzije ne može mjeriti direktno, a kako je kalibracija pomoću traser eksperimenata vrlo skupa i nije uvijek dostupna, istraživači su razvili različite metode, teorijske i empirijske, za procjenu koeficijenta D na osnovu lakše dostupnih hidromorfoloških i hidrauličkih mjerenja. Procjena koeficijenta disperzije implicira kako je već rečeno poznavanje rasporeda brzina po dubini i po poprečnom presjeku, tako da je taj zadatak teško ostvariti s tradicionalnim načinom mjerenja pomoću hidrometrijskog krila, pogotovo kada je riječ o velikim vodotocima. Primijenjene savremene mjerne tehnike (ADCP) omogućavaju prikupljanje velikog broja kvalitetnih podataka, neophodnih za brže i pouzdanije procjene koeficijenata uzdužne disperzije. Iako se provedene analize u ovome radu odnose na rijeku Neretvu, one mogu poslužiti kao metodološki pristup za rješavanje adekvatne problematike i na drugim prirodnim vodotocima. Rezultati istraživanja izneseni u ovome radu bi trebali unaprijediti i proširiti razumijevanje procesa jednodimenzionalne uzdužne disperzije u otvorenim vodotocima.

## LITERATURA

- [1] Bajraktarević-Dobran, H. (1980): "Pregled metoda za određivanje koeficijenta uzdužne turbulentne disperzije", II Jug. simpozijum o hemijskom inženjerstvu, Beograd, str. 221-249
- [2] Carr, M.L., Rehmann, C.R., (2007): Measuring the dispersion coefficient with acoustic Doppler current Profiler. *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (8), 977-982
- [3] Chaopeng Shen, Jie Niu, Eric J. Anderson, Mantha S. Phanikumar, (2010): Estimating longitudinal dispersion in rivers using Acoustic Doppler Current Profilers, *Advances in Water Resources* 33 615-623
- [4] Fischer H.B, et al. (1979): *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc, San Diego, pp 104-138
- [5] Kim, D., (2012): Assessment of longitudinal dispersion coefficients using Acoustic Doppler Current Profilers in large river, *Journal of Hydro-environment Research* 6, 29-39
- [6] Milišić H., (2015): "Transport processes in rivers modelling using field experimental data", 7th IWA, Belgrade, Serbia
- [7] Terek, B., (2003): Mjerenje protoka otvorenih vodotoka uporabom ADCP-a, *Hrvatska vodoprivreda*, 125- 126, 12, 10-14

PREDICTION OF LONGITUDINAL DISPERSION COEFFICIENT IN NATURAL STREAMS BASED ON ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILERS (ADCP) MEASURING

by

Hata MILIŠIĆ

Faculty of Civil Engineering University of Sarajevo, BiH

Summary

The pollution discharged into the river is exposed to different phases of transport and mixing, as a result of the velocity of the river stream. After a full cross-mixing in the river the spread of clouds of pollution is one-dimensional analysed. A one-dimensional (1-D) numerical models of pollution transport in streams, based on the advection-dispersion equation, in which the longitudinal dispersion coefficient of the unknown parameters to be calibrated. The dispersion coefficient is generally estimated using empirical equations, or by tracer studies, but the method can be expensive because it requires large investments in planning, staffing and analysis. Currently, the use of acoustic instrument ADCP's (Acoustic Doppler Current Profilers) can improve the results of hydrometric measurements compared to those obtained by conventional techniques (eg. Hydrometric wing), because higher spatial resolution and short measurement time and flow rate, as and precisely measured riverbed morphology is achieved.

This information (results of measurements) can be used in a way to achieve a completely new, further understanding of the physical mechanisms involved in the observed part in the streams. One of the processes that can be studied in more detail is the dispersion of pollutants on this reach. The focus of this paper is on to estimate the dispersion coefficient from velocity measurements obtained using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) based. Results based on the ADCP method were found to be in good agreement with the tracer method, especially at high flows. For the river sites examined in this paper, the tracer estimates of dispersion were close to the median values of the ADCP estimates obtained from multiple datasets within a reach. The ADCP method appears to be an excellent alternative to the traditional tracer-based method.

Keywords: longitudinal dispersion coefficient, ADCP, tracer test, 1D numerical model, the Neretva River

Redigovano 21.11.2015.