

MERENJE PROTOKA U OTVORENIM TOKOVIMA METODOM RAZBLAŽENJA KONCENTRACIJE SOLI

Dušan PRODANOVIĆ¹, Rada IVANOVIĆ², Nemanja BRANISAVLJEVIĆ¹, Ana MIJIĆ¹

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

² Montera, Beograd

REZIME

Merenje protoka u otvorenim tokovima najčešće zahteva postojanje jasno uređene merne deonice. Kod brdskih neuređenih bujičnih tokova, u uslovima kada nije potrebno kontinualno merenje protoka i kada se ne zna tačan proticajni presek, merenje protoka je moguće obaviti metodom zasnovanom na merenju koncentracije trasera (obično kuhinjske soli). Jedini uslov koji se mora zadovoljiti je da postoji dobro mešanje trasera u vodi po poprečnom preseku. U radu se daje osnovna teorijska postavka, način merenja koncentracije trasera, rezultati nekoliko izvedenih merenja kao i prikaz vežbe koju izvode studenti na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Na kraju rada se daju i komentari o primenljivosti metode u različitim uslovima.

Ključne reči: Merenje protoka u otvorenim kanalima, traserska metoda, metoda soli, povremeno merenje protoka

1. UVOD

Merenje protoka u vodotocima predstavlja jedan od osnovnih hidrotehničkih zadataka. Pored standardnih, tradicionalnih metoda za merenje protoka (hidrometrijska krila, mernih objekata, itd.), poslednjih godina postaju popularne i nove, pre svega bezkontaktne ultrazvučne (ADCP i ADV) i radarske metode. Izbor metode zavisi najviše od uslova u kojima se merenje obavlja, zahtevane tačnosti i potrebe za kontinualnim podacima, ali neretko i od ekonomičnosti postupka i obučenosti kadra koji merenje sprovodi (Hershey, 1995).

U ovom radu je prikazana metoda merenja protoka u otvorenim tokovima bazirana na merenju koncentracije rastvorenog trasera u vodi. Za merenje u otvorenim tokovima najekonomičnije je koristiti kuhinjsku so, a njenu koncentraciju je najlakše odrediti iz podatka o provodnosti vode sondom za kontinualno merenje.

Prikazana metoda je primenljiva u uslovima gde je omogućeno da se kuhinjska so ravnomerno izmeša sa vodom u vodotoku u poprečnom pravcu, što je uglavnom slučaj sa manjim, brzim i turbulentnim planinskim vodotocima. Velika prednost navedene metode je što za određivanje protoka nije potrebno poznavanje geometrije vodotoka. Sa druge strane, ova metoda ne daje nikakve informacije o rasporedu brzina duž poprečnog preseka.

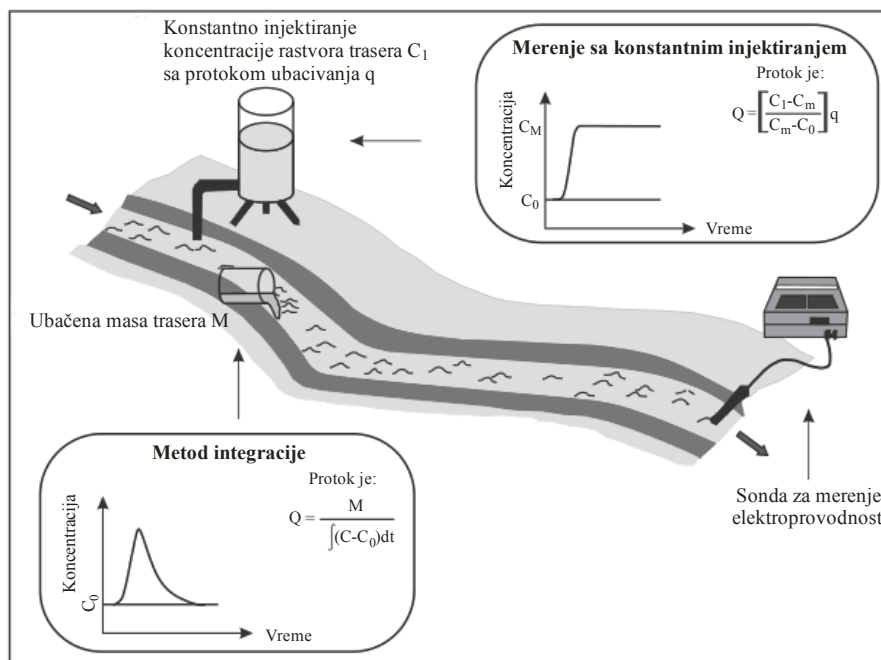
U radu su opisani teorijski principi metode, potrebna oprema, način pripreme merenja i komentarisana je tačnost i osetljivost metode. Takođe su opisana tri primera. Prvi primer predstavlja laboratorijsko merenje u kontrolisanim uslovima, koje je sastavni deo vežbi na kursu "Merenja u hidrotehnici" na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Drugi primer je merenje protoka na prirodnom vodotoku u Engleskoj, dok je treći primer pokušaj primene metode na vodotoku u kome se izliva fekalna kanalizacija i na kome ne postoje dobri uslovi mešanja vode po preseku, zbog čega je registrovana povećana varijabilna provodnost vode (bazna elektroprovodnost) i relativno velika greška merenja.

2. TEORIJSKE OSNOVE METODE

Metoda soli se može svrstati u klasu traserskih metoda merenja protoka, u kojoj se kao traser koristi obična kuhinjska so (NaCl). Metoda soli je posebno pogodna za korišćenje u brzim, bujičastim tokovima kod kojih je, uglavnom, veoma teško oceniti površinu poprečnog preseka zbog nepravilne geometrije kanala. Metoda se može koristiti samo za povremeno merenje protoka.

Postoje dva osnovna principa primene metode (slika 1):

- 1) trenutno injektiranje, kada se celokupna koncentracija trasera dodaje u vodotok istovremeno, i
- 2) konstantno injektiranje, kada se traser dodaje konstantnom brzinom tokom određenog perioda vremena.



Slika 1: Dva načina primene metode bazirane na traserima

Jedan od problema vezanih za metodu razblaženja koncentracije soli jeste „šum“ u izmerenim podacima, prouzrokovan varijabilnom baznom koncentracijom trasera: kod trenutnog injektiranja je teško precizno odrediti trenutak kada je traser stigao do mernog profila i kada ga je prošao, a u slučaju kontinualnog injektiranja, značajan šum u signalu imaće za posledicu nepreciznu procenu vrednosti koncentracije trasera u ustaljenom režimu tečenja.

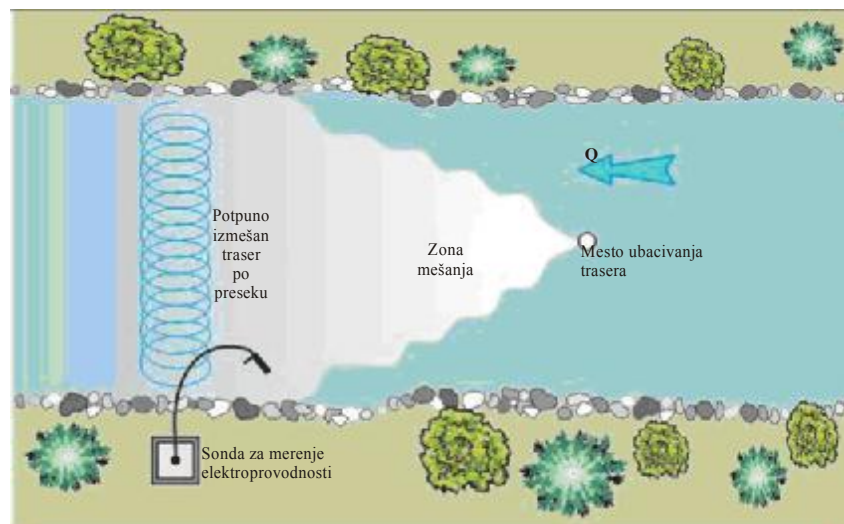
U ovom radu je detaljno prikazana metoda trenutnog ubacivanja soli u vodotok, obzirom da je znatno ekonomičnija i lakša za izvođenje od metode sa konstantnim injektiranjem. Pri tome, greške pri proračunu protoka mogu biti posledica: 1) šuma u signalu; 2) nekompletnog mešanja trasera i vodotoka; 3) kratkog vremena merenja koncentracije trasera; 4) degradacije ili absorpcije trasera; 5) nepotpunog rastvaranja trasera pre ubacivanja u vodotok; 6) greške pri merenju koncentracije trasera ili pri kalibraciji mernog uređaja; 7) dotoka ili oticaja u okviru merne deonice i 8) neustaljaenog tečenja.

2.1 Osnovni principi

Traserske metode se pretežno zasnivaju na dobrom mešanju trasera sa vodom iz vodotoka koje se postiže zahvaljujući konvekciji i difuziji, slika 2. U procesu

merenja određena količina trasera se ubacuje u tok uzvodno od mesta merenja, a nakon toga se, na odabranom nizvodnom profilu, meri promena njegove koncentracije uz pretpostavku da je na mernom mestu koncentracija trasera ista po poprečnom profilu.

Metoda se sastoji iz nekoliko sukcesivnih koraka. Prvo se tačno izmerena količina soli, rastvorena u vodi iz vodotoka, naglo ubacuje u vodotok na izabranoj lokaciji (uzvodnom poprečnom profilu). Nakon ubacivanja, rastvor soli se brže meša sa tokom po dubini vodotoka, a sporije po širini (slika 2). Može se očekivati da se, pošto su neki delovi toka brži od ostalih, oblak soli širi neravnomerno zahvaljujući procesu zvanom longitudinalna disperzija. Longitudinalna disperzija rezultira time da oblak ima krajnju ivicu sa relativno niskim koncentracijama soli, centralnu zonu sa visokim koncentracijama, a u ostalim tačkama koncentracija opada od centra ka spoljnim ivicama. To znači da je na početku oblak soli kompaktan i da je so neravnomerno raspoređena po poprečnom preseku. Sa povećanjem rastojanja od tačke ubacivanja, so postaje ravnomernije raspoređena i najzad dostiže optimalni i podjednak stepen rastvorenosti. Od tačke kada se dostigne ravnomerna koncentracija soli po poprečnom preseku moguće je nizvodno odabrati poprečni presek za merenje te koncentracije, slika 2.



Slika 2: Fenomen mešanje soli u otvorenom toku procesima konvekcije i disperzije

Ukoliko je poznata masa ubačene soli i ukoliko je izmerena njena koncentracija u vodotoku, moguće je izračunati protok. Protok vode kroz neki poprečni presek se definiše kao zapremina vode koja prođe kroz taj presek u toku određenog vremena (jednačina 1):

$$Q = \frac{dV}{dt} \rightarrow dV = Q \cdot dt \quad (1)$$

gde su: Q – protok, dV – protekla zapremina zapremine, a dt – interval vremena. Masena koncentracija supstance rastvorene u vodi definiše se kao:

$$C(t) = \frac{dm}{dV} \rightarrow dm = C(t) \cdot dV \quad (2)$$

gde su vrednosti u izrazu (2): $C(t)$ – koncentracija rastvorene supstance u određenom vremenskom trenutku, dm – deo mase rastvorene supstance i dV – deo zapremine vode (fluida). Kada se promena zapremine u izrazu (2) zameni izrazom (1), dobija se sledeća jednačina:

$$dm = Q \cdot C(t) \cdot dt$$

Integracijom ove jednačine se dobija:

$$\int_0^M dm = \int_0^T Q \cdot C(t) dt,$$

gde Q predstavlja protok kroz poprečni profil, a $C(t)$ prosečnu koncentraciju u profilu (pretpostavlja se da je koncentracija traserera na lokaciji mernog mesta prosečna

za celu širinu toka). Rešavanjem ovog integrala u navedenom izrazu, uz pretpostavku da je protok konstantan, tj. tečenje ustaljeno, mogu se izračunati masa soli i protok:

$$M = Q \cdot \int_0^T C(t) dt \quad Q = \frac{M}{\int_0^T C(t) dt}$$

2.2 Merenje koncentracije traserera

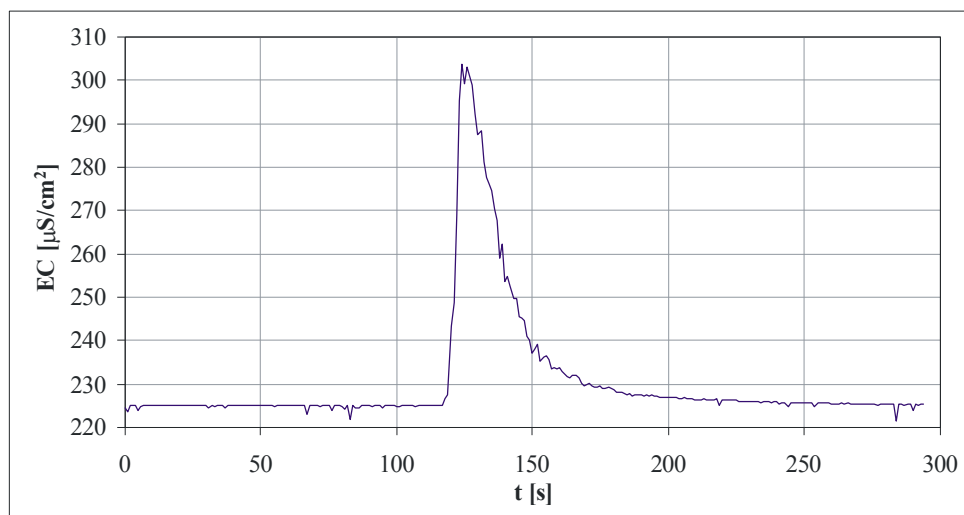
Prema izvedenoj jednačini (3) potrebno je kontinualno registrovati i integrisati talas promene koncentracije rastvorene soli u toku vremena. Kontinualnu promenu koncentracije soli najlakše je meriti preko elektroprovodnosti. Veza elektroprovodnost-koncentracija soli se određuje u procesu kalibracije, na samom mernom mestu koristeći vodu iz vodotoka koji se meri. Veza između ove dve veličine je linearna, što olakšava obradu rezultata.

Povećana elektroprovodnost izazvana rastvorenim jonima soli natrijuma i hlora predstavlja relativnu vrednost u odnosu na elektroprovodnost koju voda u vodotoku poseduje pre ubacivanja traserera. Relativna elektroprovodnost se određuje na taj način što se, prvo, sa instrumenta očitava bazna elektroprovodnost (EC_{baz}) koja se, uglavnom, dalje koristi kao konstantna veličina, a zatim se meri i beleži promena elektroprovodnosti sa prolaskom talasa soli. Relativna elektroprovodnost se

dobija kada se, u svakom vremenskom trenutku za vreme trajanja prolaska oblaka rastvorene soli, od očitane elektroprovodnosti oduzme bazna elektroprovodnost.

Ukoliko poprečni presek za merenje koncentracije ispravno odabran (traser u potpunosti izmešan po širini toka) elektroprovodnost, snimljena u nekoj tački

nizvodno, će dostići svoj maksimum (pik) u trenutku kada jezgro oblaka prođe kroz tačku u kojoj se meri. Nakon toga, elektroprovodnost ponovo opada na vrednost bazne (početnu vrednost). Na taj način je moguće dobiti dijagram vreme–elektroprovodnost, koji se može, uz pomoć kalibracione krive, preračunati u dijagram vreme–koncentracija (primer na slici 3).



Slika 3: Merena elektroprovodnost na reci Studenici (10.09.2006.)

Što je merni profil pomeren nizvodnije, longitudinalna disperzija smanjuje pik i izmereni talas povećanja elektroprovodnosti dobija "razvučeniji" oblik. Vreme potrebno da pik talasa prođe kroz osmatranu tačku biće obrnuto srazmerno prosečnoj brzini vodotoka, dok će trajanje prolaska soli zavisiti od toga koliko su promenljive brzine u vodotoku.

3. MERNI OPREMA I POSTUPAK MERENJA

Iako se celokupni postupak merenja može obaviti direktno na terenu, deo pripreme merenja je najbolje sprovesti u kontrolisanim uslovima u laboratoriji pre izlaska na teren. Priprema merenja se sastoji iz provere instrumenata za merenje i pripreme rastvora kuhinjske soli koji će biti korišćen za kalibraciju merača elektroprovodnosti. Ostali deo priprema se mora organizovati na mernoj lokaciji jer zahteva upotrebu vode iz vodotoka u kom se meri protok.

3.1 Priprema u laboratoriji

U laboratoriji je potrebno napraviti rastvor koji će biti korišćen prilikom kalibracije sonde za elektroprovod-

nost. Na vagi se mere jako male količine soli, pa treba koristiti vage preciznosti od $\pm 0,1$ g. U većini slučajeva za proces kalibracije treba rastvor soli od 3 g/L destilovane vode. Neophodno je koristiti istu so koja će kasnije biti korišćena na terenu.

Prilikom merenja treba biti posebno pažljiv kako se ne bi napravile velike greške usled nepreciznog merenja potrebne količine soli ili zapremine destilovane vode. Kao što je već pomenuto, te greške se prenose na određivanje kalibracionog faktora, pa tako direktno utiču na tačnost merenja protoka.

3.2 Priprema za teren i potrebna oprema

Pre odlaska na teren treba pripremiti određenu količinu soli koja će biti upotrebljena za merenje protoka. Ukoliko se ne poseduje neka mala vaga koja je najmanje tačnosti ± 10 g, onda se odmeravanje potrebne količine soli može izvršiti pre odlaska na teren. Takođe, potrebno je pripremiti i svu mernu opremu (slika 4) za određivanje kalibracionog faktora (posuda odnosno menzura od 500 ml, 1 ml-ska pipeta, rastvor soli od 3 g/L destilovane vode, i sonda za merenje

elektroprovodnosti) kao i opremu za merenje protoka (sonda za merenje elektroprovodnosti, držač za sondu, kofa od 10 L ili 20 L, vaga za merenje soli, ukoliko ona



Slika 4: Merna oprema i postupak bacanja soli u vodotok

3.3 Priprema na terenu

Na terenu je neophodno kalibrirati sondu za merenje elektroprovodnosti koristeći rastvor soli od 3 g/L destilovane vode. Iz vodotoka treba uzeti tačno 500 ml vode koja se stavlja u čistu posudu zapremine veće od 500 ml (na primer 1L). Zatim se ubacuje sonda u tu posudu i meri se početna vrednost elektroprovodnosti EC_b (kada nema dodate soli). Pipetom se dodaje 1 ml pripremljenog rastvora (3 g/L), izmeša se rastvor i izmeri se elektroprovodnost. Ova procedura se ponavlja 10 puta, odnosno treba dodati ukupno 10 ml rastvora soli.

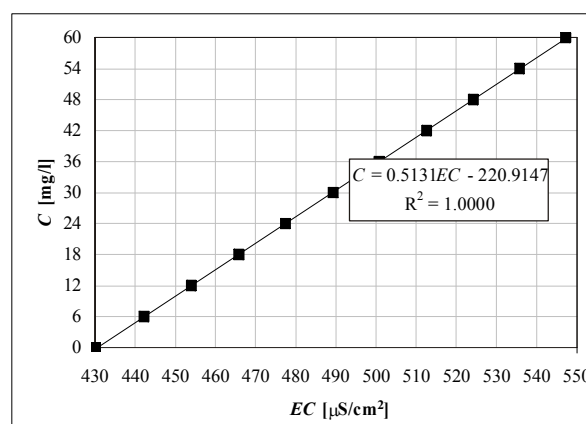
Kada se završi kalibracija, crta se kriva zavisnosti i određuje se kalibracioni faktor k u jednačini $C = k \cdot EC + n$ (slika 5). Oznake su: C – koncentracija dodate soli u mg/L; EC – elektroprovodnost u $\mu\text{S}/\text{cm}^2$; k – kalibracioni faktor (nagib kalibracione krive). Do nekih 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ ovaj odnos je uglavnom linearan, sa nagibom 0,4 – 0,6.

Sledeće šta treba uraditi jeste određivanje merne daljine, odnosno treba odrediti deo vodotoka duž koga će biti meren protok. Dužina toka (L) od tačke ubacivanja soli do tačke u kojoj se postaje potpuno izmešana kroz profil toka naziva se dužina mešanja. Jednostavno pravilo je da se uzme dužina koja iznosi 20 – 50 prosečnih širina vodotoka ili 100 širina najužeg dela toka. Način na koji se može proveriti da li je izabrana dužina jednaka dužini mešanja jeste merenjem sa dve sonde istovremeno (ili ponovljenim merenjem sa jednom sondom) koje su postavljene na različitim mestima u koritu. Vrednost protoka izračunata u dve merne tačke trebalo bi da bude

već ranije nije izmerena, kuhinjska so, instrument za snimanje podataka, metar, varjača ili nešto slično za mešanje vode u kofi i kašičica za sipanje soli).



ista, iako se oblik krive razlikuje. Ako se rezultati razlikuju, to je znak da je izabrana dužina manja od dužine mešanja.



Slika 5: Primer kalibracione krive

3.4 Način merenja protoka

Kada su početne pripreme izvršene, potrebno je postaviti mernu opremu na izabrana mesta. Sondu treba postaviti na mestu gde se očekuju najveće brzine. Sonda mora imati držač i tako je postaviti ne dolazi do nagomilavanja vazduha na elektrodama.

Pre ubacivanja soli treba neko vreme snimati baznu elektroprovodnost i beležiti njenu vrednost, a ukoliko se uoči da se ona menja u velikoj meri za kratko vreme, onda ova metoda nije preporučljiva. Da bi merenja bila ponovljiva potrebno je zabeležiti i nivo vode kao i lokaciju na kojoj se meri.

Potrebna količina soli varira u zavisnosti od dužine na kojoj se postiže mešanje i protoka. Kao generalno pravilo, između 1 i 2,5 kg soli trebalo bi ubaciti za protok od oko 1 m³/s. Da li je upotrebljena količina bila dovoljna može se videti po snimljenom dijagramu promene koncentracije. Izmerenu so treba potpuno rastvoriti u kofi sa vodom iz vodotoka i sadržaj kofe sipati u vodotok na odgovarajućem mestu polako i bez okolnog prskanja.

Ukoliko se u toku merenja promeni bazna elektroprovodnost, merenja treba odbaciti ili pokušati primeniti linearnu interpolaciju njene promene.

4. PRIMERI

4.1 Vežbe na predmetu *Merenja u hidrotehnici na Građevinskom fakultetu u Beogradu*

Na Građevinskom fakultetu u Beogradu se na vežbama u okviru kursa *Merenja u Hidrotehnici* obavlja merenje protoka ovom metodom na improvizovanoj laboratorijskoj instalaciji u dvorištu instituta. Instalacija se vodom snabdeva iz sabirnog rezervoara laboratorije i odvodi u kanalizacioni sistem. Protok je kontrolisan elektromagnetnim meraćem protoka (registrovano je 3L/s), a merenje se ponavlja nekoliko puta sa različitim količinama soli ubačenim u vodu. Elektroprovodnost se meri u konstantnim vremenskim intervalima od $\Delta t = 0,1$ sekundi. Na slici 6 je dat jedan rezultat merenja za ubačenih 10, 30 i 50 grama soli.

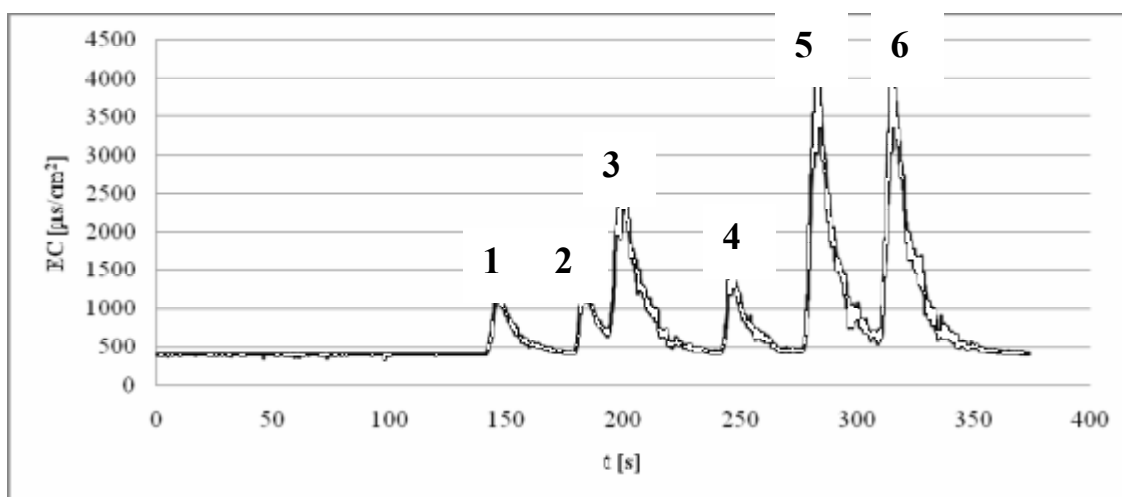
Na vežbama se analizira najbolji način bacanja soli u tok vode (u kristalnom obliku kada postoji opasnost da deo nerastvorene soli ostane zalepljen za posudu - merenje broj 4, ili prethodno rastvorena u vodi).

Rezultati su prikazani za merenja 1, (2 i 3), 5 i 6 u tabeli 2. Iako je se kod merenja 2 i 3 preklopio talas povećane koncentracije, oba merenja se mogu posmatrati kao jedan talas sa zbirnom ukupnom ubačenom masom soli. U toku proračuna je pretpostavljena konstantna vrednost bazne elektroprovodnosti $EC_b = 400 \mu\text{S}/\text{cm}^2$, koja odgovara ekvivalentnoj koncentraciji soli od 17 mg/L.

Tabela 2: Rezultati merenja i proračuna protoka

Мерење [l]	EC _b [mS/cm ²]	Маса NaCl [gr]	Q [L/s]
1	400	10	2.866
2,3	400	10+30	2.894
5	400	50	2.725
6	400	50	2.923
		$\mu_Q =$	2.852

Rezultati merenja pokazuju dobro slaganje sa protokom izmerenim elektromagnetnim meraćem na dovodu vode ($Q = 3 \text{ L/s}$).



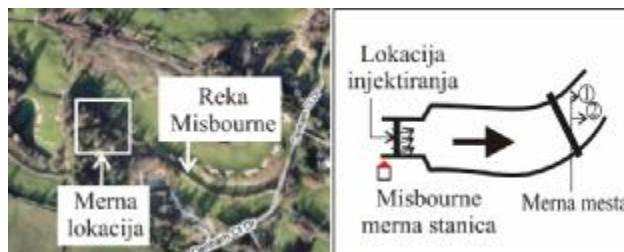
Slika 6: Izmerena elektroprovodnost nakon nekoliko ubacivanja soli

4.2 Merenje protoka u terenskim uslovima - Reka Misbourne – London, UK

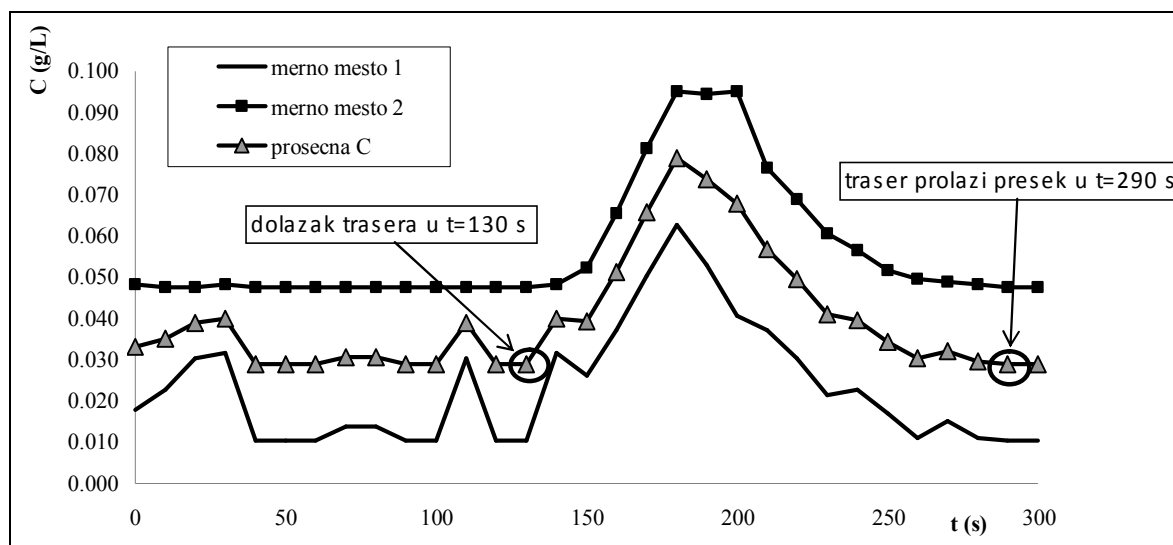
Metoda razblaženja koncentracije soli je primenjena za merenje protoka u okviru praktičnih vežbi na predmetu Hidrometrija Master kursa na Imperial College-u u Londonu. Merenja su obavljena na reci Misbourne u Londonu nizvodno od stalne merne stanice (slika 7).

Za potrebe merenja, 754 grama soli je bilo razblaženo u 20 litara vode podeljene na 2 kofe. Rastvoreni traser je trenutno ubačen u vodotok. Provodljivost je merena na dve nizvodne lokacije u okviru istog mernog preseka (slika 7). Vrednosti su prevedene u koncentraciju pomoću date kalibracione krive (McIntyre, 2008).

Na osnovu izmerenih podataka procenjeno je da ekvivalent koncentracije soli u reci Misbourne iznosi 0.029 g/L. Protok je izračunat na osnovu vrednosti prosečne koncentracije u prfilu. Izmerene koncentracije su prikazane na slici 9, a proračun protoka u tabeli 2.



Slika 7. Merna lokacija



Slika 9: Merni profili koncentracije soli za reku Misbourne

Tabela 2: Proračun protoka za reku Misbourne

$C_{0,av}$ (g/L)	-0.171
A (gs/L)	2.962
M (g)	754
Q (m³/s)	0.2546

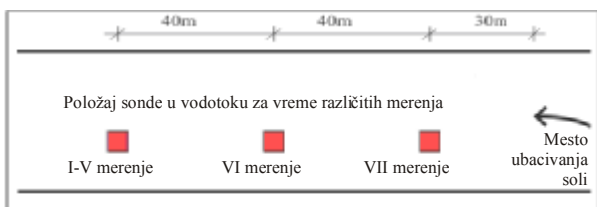
Na slici 8 može se videti da oba izmerena profila pokazuju očekivanu reakciju na prolazak trasera kroz merne lokacije. Rezultati sa mernog mesta 2 su veoma stabilni dok drugi set podataka (merno mesto 1) ima veliki šum signala. Kako su obe grupe podataka korelisane u pogođu vremena dolaska i prolaska trasera, svi podaci su iskorišćeni za proračun prosečne koncentracije u mernom profilu (slika 8). Konačno, na

osnovu vrednosti prosečne koncentracije trasera u mernom profilu dobijena je vrednost protoka od 0,255 m³/s. Ova vrednost je veoma bliska vrednosti protoka izmerenog na stalnoj mernoj stanici koja je iznosila 0,22 m³/s.

4.3 Merenje protoka u terenskim uslovima - Reka Topčiderka

Reka Topčiderka prolazi kroz grad Beograd u dužini od 13 kilometara pri čemu se u nju poslednjih decenija izlivaju fekalne kanalizacione cevi iz mnogih nelegalno podignutih naselja u okolini (Ivanović, 2008). Merenja su obavljena na pravoj deonici toka, pri čemu je obacivanje soli bilo uvek na istom mestu a sonda je u

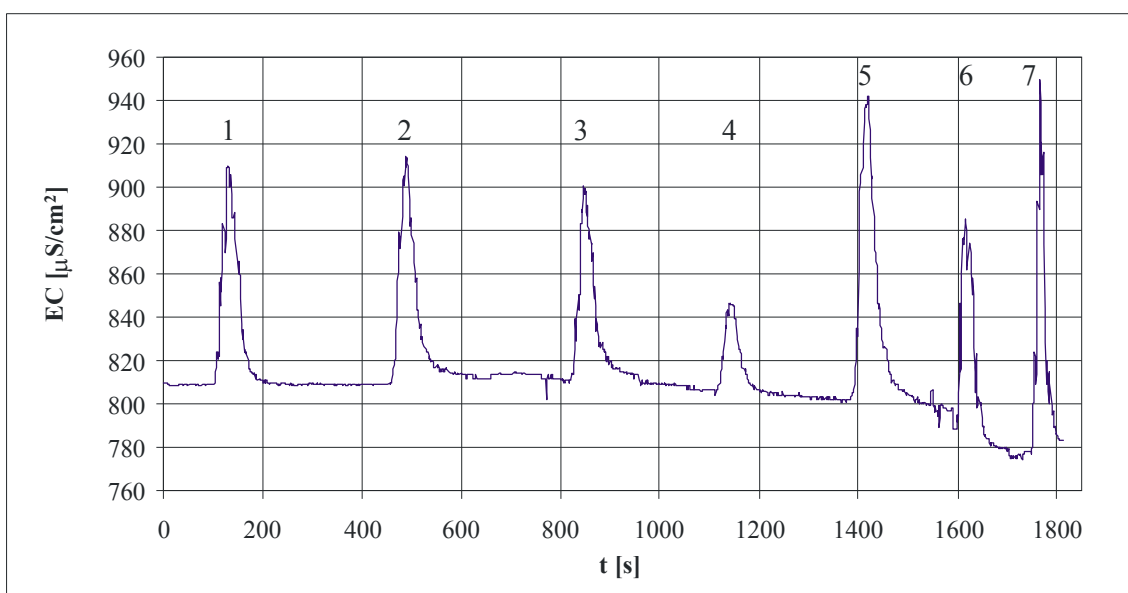
različitim eksperimentima bila pomerana uzvodno i nizvodno, pri čemu je uvek stajala bliže levoj obali (slika 9).



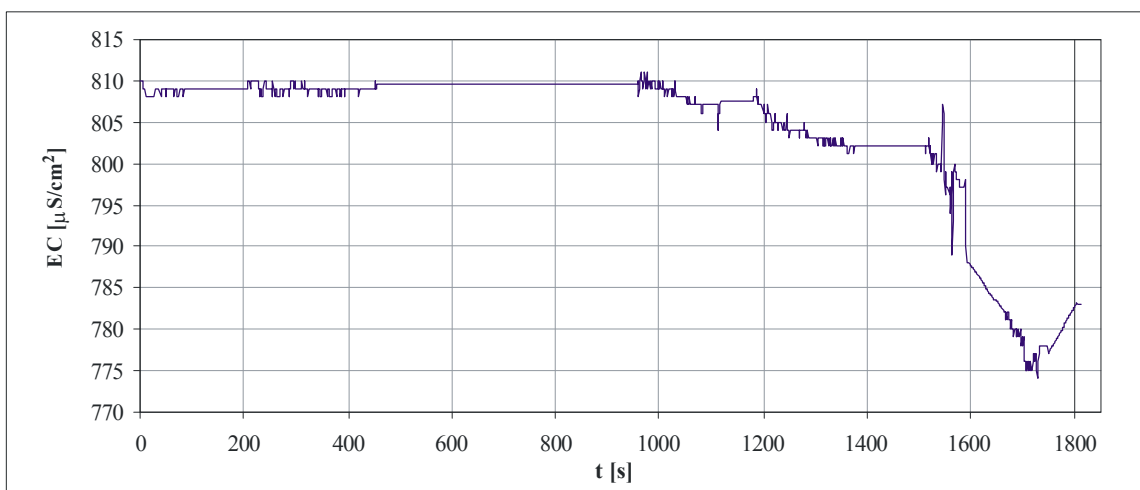
Slika 9: Dispozicija mernog mesta januara 2007. godine

Kalibracija je urađena pre početka merenja na način na koji je opisano u jednom od prethodnih odeljaka. Korišćena je voda iz Topčiderke, a dobijen je nagib prave $k = 0.5689$. Na grafiku (slika 10) dat je prikaz svih 7 merenja obavljenih tog dana sa vremenskim intervalom od 1 sekunde.

Svaki talas koji se vidi je jedno merenje. Pri različitim merenjima bila je bacana nejednaka količina soli. Ona je uvek sipana na istom mestu, ali je sonda povremeno pomerana (pozicije sonde su prikazane na slici 10). To su mogući razlozi zbog kojih se oblici talasa razlikuju.



Slika 10: Prikaz celokupnog merenja (januar 2007.)



Slika 11: Promena bazne elektroprovodnosti

Sa slike 10 se vidi da se bazna elektroprovodnost drastično menjala tokom ovih merenja. Na slici 11 prikazana je pretpostavljena promena bazne elektroprovodnosti koja se koristila pri proračunu protoka. U tabeli 3 date su vrednosti ubačene količine

soli, udaljenosti mernog mesta od mesta ubacivanja soli, vrednost bazne elektroprovodnosti sa kojom je računat protok, kao i vrednosti protoka koje su dobijene za svako pojedinačno merenje obavljeno tog dana.

Tabela 3: Rezultati merenja

Merenje [/]	EC _b [mS/cm ²]	Masa NaCl [kg]	L [m]	Q [L/s]	Način ubacivanja soli [/]
1	808.75	1	110	482.5	rastvor
2	808.89	1	110	356.6	kristal
3	809.8	1	110	530.9	kristal
4	808.19	0.5	110	722.8	kristal
5	803.06	2	110	707.7	kristal
6	menjala se	1	70	644.6	kristal
7	menjala se	1	30	besmisleno	kristal

Kao što se vidi iz tabele, vrednosti izračunatih protoka se jako razlikuju. Prva vrednost je najbliža protoku dobijenom hidrometrijskim krilom, ali je i ona za oko 5% veća od nje. Jedan od mogućih razloga je taj što je jedino tu so bila rastvorena u vodi, ali je, ipak, neka količina ostala na dnu kofe. Zna se da za koliko se procenata pogreši u ubačenoj količini soli za isto toliko procenata se greši u vrednosti dobijenog protoka, odnosno da je stvarna masa ubačene soli za 5% manja od napisane, dobio bi se i protok za oko 5% manji, a to bi bila tražena vrednost.

Razlog zbog koga su vrednosti u ostalim merenjima toliko loše leži, možda, u tome što so prethodno nije rastvorena u vodi i potrebno je mnogo veće rastojanje da bi se ona dobro izmešala sa vodotokom i u svim tačkama posmatranog poprečnog preseka pokazivala iste vrednosti elektroprovodnosti. Pretpostavka o dovoljnoj dužini mešanja zbog ubrzanog dela toka nije bila tačna, tako da se najverovatnije desilo da je sonda bila postavljena u delu toka u kome su bile veće koncentracije soli nego u nekim drugim delovima.

Takođe, tokom merenja je duvao vetar, pa se događalo da određena količina soli odleti na obalu. Količina ubačene soli je bila manja od pretpostavljene, pa su dobijeni veći protoci nego što je realno. Kod poslednja dva merenja sonda je svesno bila postavljena preblizu da bi se videlo kako u tom slučaju izgledaju grafici i dobilo se ono što je bilo očekivano.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana metoda određivanja protoka pomoću traseru koji se rastvara u vodi, posebno pogodna za brze planinske vodotoke kada se merenja sprovode povremeno. Prikazani primeri dokazuju primenljivost metode u raznim uslovima: od laboratorijskih kontrolisanih uslova do merenja u kanalizacionim kolektorima gde se elektroprovodnost neprestano menja. Ipak, ono što bi izdvojilo opisanu metodu iznad ostalih tradicionalnih i savremenih postupaka određivanja protoka je njena jednostavnost i ekonomičnost. Takođe, moraju se izdvojiti i jednostavne teorijske osnove, koje vode ka lakoj obuci kadrova koji ovu metodu žele da primene.

Primer korišćenja merne metode u neodgovarajućim uslovima (velika i varijabilna bazna promena elektroprovodnosti, nedovoljno mešanje traseru) međutim pokazuju da su moguće velike greške u merenju protoka. Zbog toga je neophodna pravilna priprema merenja, izbor odgovarajućeg mernog profila i kalibracija sonde za elektroprovodnost na samom mestu merenja.

LITERATURA

- [1] Hershey, R.W. (1995) *Streamflow Measurement*. 2nd edition. London, E&FN Spon, an Imprint of Chapman & Hall.

- [2] Ivanović R. (2008): *Merenje protoka pomoću razblaženja soli*, Diplomski rad, Građevinski fakultet u Beogradu
- [3] McIntyre, N. (2008) *Hydrometry. Presented at the HEM7 Hydrometry Module Lecture*, Imperial College, London.
- [4] Prodanović D. (2009): Skripte za predmet „Merenja u hidrotehnici“. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu (http://hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/Merenja/Glavna.htm)

DILUTION GAUGING METHOD FOR STREAMFLOW MEASUREMENT

by

Dušan PRODANOVIĆ¹, Rada IVANOVIĆ², Nemanja BRANISAVLJEVIĆ¹, Ana MIJIĆ¹

¹ Faculty of Civil Engineering, Belgrade

² Montera, Belgrade

Summary

Streamflow measurement often requires clearly structured measurement reach. Velocity distribution can then be measured using a current meter or by constructing a hydraulic section control (weirs or flumes). However, in turbulent hilly streams such methods are difficult to implement. This paper presents a measuring method suitable for a spot flow gauging in natural streamflows. It is based on the measurement of a tracer concentration (usually common table salt). The method enables accurate flow measurement without determining the cross-section area. The only condition

that has to be fulfilled is the uniform mixing of a tracer across the downstream measurement section. The paper describes theoretical basis and a procedure for tracer concentration measuring. The results of the method implementation are presented as well as the tutorial carried out by the students of the Civil Engineering Faculty in Belgrade. Finally, suitability of the method in different flow conditions is commented.

Key words: Streamflow measurement, tracer method, dilution gauging, spot flow measurement

Redigovano