

FOTOELEKTRONSKI KOLORIMETAR ZA DINAMIČKO MERENJE DISPERZIJE TRASERA U OTVORENIM VODOTOKOVIMA

M.Simić, V.Georgijević, Č.Maksimović
S.Dorđević, J.Petrović

Građevinski fakultet, Beograd

REZIME

U radu je prikazan fotoelektronski kolorimetar za dinamičko merenje disperzije trasera u otvorenim vodotokovima, razvijen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Prikazani su namena, princip rada i kalibracija instrumenta. Uz osnovne pojmove o disperziji, istaknute su prednosti dinamičkog merenja sondom u odnosu na standardne metode uzorkovanja. Na kraju su, kao ilustracija primene, dati rezultati merenja u laboratorijskom kanalu.

PHOTOELECTRONIC COLORMETER FOR DYNAMIC MEASUREMENT OF TRACER DISPERSION IN OPEN CHANNEL FLOWS

The paper deals with a photoelectronic colormeter for dynamic measurement of dye concentration, which is applicable for measurement of dispersion in open channel flows. This device has been developed at the Faculty of Civil Engineering of the University of Belgrade. The purpose, operational principle and calibration of the instrument have been shown. The basic concepts of dispersion and the advantages of dynamic measurement in relation to standard sampling method have been pointed out. Finally, the results of the measurements obtained in a laboratory flume have been given.

1. UVODNI DEO

Prilikom prolaza kroz neku sredinu svetlosno zračenje se apsorbuje u iznosu koji zavisi od talasne dužine, od debljine sloja i od prirode sredine. Ako je dI promena svetlosnog intenziteta paralelnog snopa monohromatske svetlosti, koji prolazi kroz sloj debljine dx apsorbujuće sredine, važe zakoni:

$$\frac{dI}{dx} = -a I, \quad \text{odnosno} \quad I = I_0 e^{-ax} \quad (1)$$

gde je: a - koeficijent apsorpcije, I_0 - početni svetlosni intenzitet, a I - intenzitet na rastojanju x . Izrazi (1) predstavljaju Bužie-Lamberov zakon (Bouguer-Lambert), koji je primenjen pod uslovom da su refleksija i rasipanje zanemarljivi, ali da se u odnosu na ove pojave može izvršiti korekcija. Ovaj zakon se često prikazuje u eksponencijalnom obliku za osnovu 10 [1]:

$$I = I_0 10^{-bx} \quad (2)$$

gde je b koeficijent koji iznosi $b = 0,434$ a. Promene u koncentraciji tečnog rastvora imaju isti efekat kao promene u debljini apsorbujućeg sloja. Tako se može staviti da je koeficijent b srazmeran koncentraciji C materije koja je rastvorena i koja apsorbuje svetlost, odnosno $b = kC$, što smenom u izrazu (2) daje

$$I = I_0 10^{-kCx} \quad (3)$$

Ovaj se izraz obično naziva Lamber-Berov zakon (Lambert-Beer) [2]. Veličina k je koeficijent ekstinkcije apsorbujuće materije u rastvoru.

Ustanovljeno je da Lamber-Berov zakon važi pri niskim i umerenim koncentracijama. Pri višim koncentracijama mnogi rastvori se ne pokoravaju ovom zakonu, što je u vezi sa razlaganjem postojećih, ili stvaranjem novih, molekularnih agregacija, ako i u vezi sa drugim modifikacijama apsorbujućih molekula i rastvora. Izrazito odstupanje od ovog zakona primećeno je u slučaju nehomogenosti tečnosti, kao i zbog prisustva čestica koje rasipaju svetlost.

U spektrofotometrijskoj praksi se često određuju i sledeće veličine:

Transparencija T $T = \frac{I}{I_0} = 10^{-kCx}$ (4)

Opacitet O $O = \frac{1}{T}$ (5)

Logaritam opaciteta se naziva optička gustina.

Ekstinkcija E $E = -\lg T = kCx$.

2. NAMENA FOTOELEKTRONSKOG KOLORIMETRA

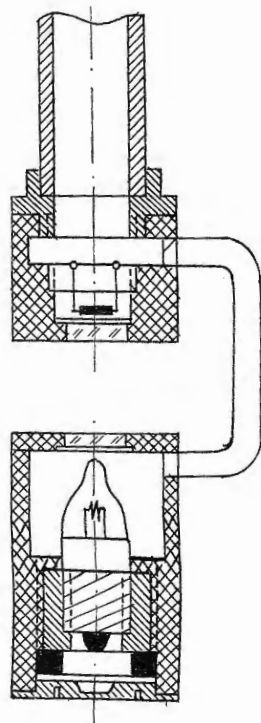
Za dinamička merenja disperzije trasera u otvorenim vodotokovima razvijen je fotoelektronski kolorimetar, koji radi na principu apsorpcije svetlosti. Ako se u prirodnom ili veštačkom vodotoku izazove trasersko impulsno bojenje vode, tada, merenjem transparencije i pomeranjem sonde kolorimetra, je moguće dobiti vremenski razloženu disperzionu sliku o prostiranju trasera u poprečnom preseku i duž pravca toka vode.

Metod merenja se zasniva na fotoelektronskoj detekciji promene intenziteta svetlosnog zraka na ekvidistantnom rastojanju između svetlosnog izvora i fotoelementa. Kolorimetar je kalibrisan između dve granične vrednosti: maksimalne transparencije od 100 % (minimalna apsorpcija) kada protiče bistra voda, i minimalne transparencije od 0% (maksimalna apsorpcija), za usvojenu referentnu maksimalnu obojenost primenjenog trasera. Za ova merenja je korišćen, kao traser, crveni Rodamin B, u koncentracijama od $C_{ref} = 2 \text{ g/m}^3$ i $C_{ref} = 5 \text{ g/m}^3$.

3. PRINCIP RADA INSTRUMENTA

Fotoelektronski kolorimetar se sastoji od sonde i elektronskog dela. Sonda je prilagođena za uslove rada na terenu u prirodnim i veštačkim vodotokovima i sastoji se od svetlosnog izvora, aktivne sredine, optičkog filtra i fotoelementa.

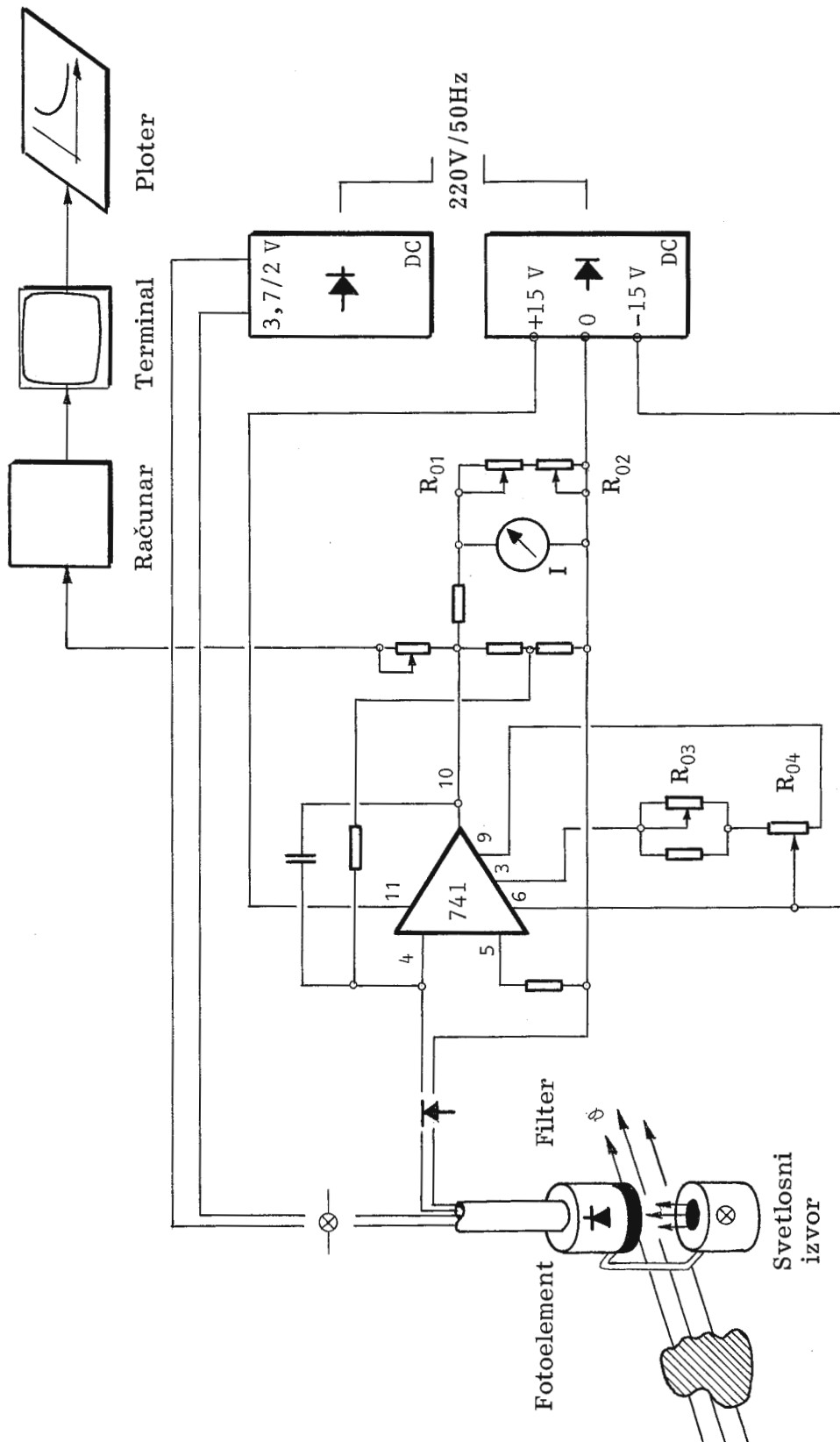
čnog filtra i fotoelementa.



Slika 1. Skica i fotografija sonde

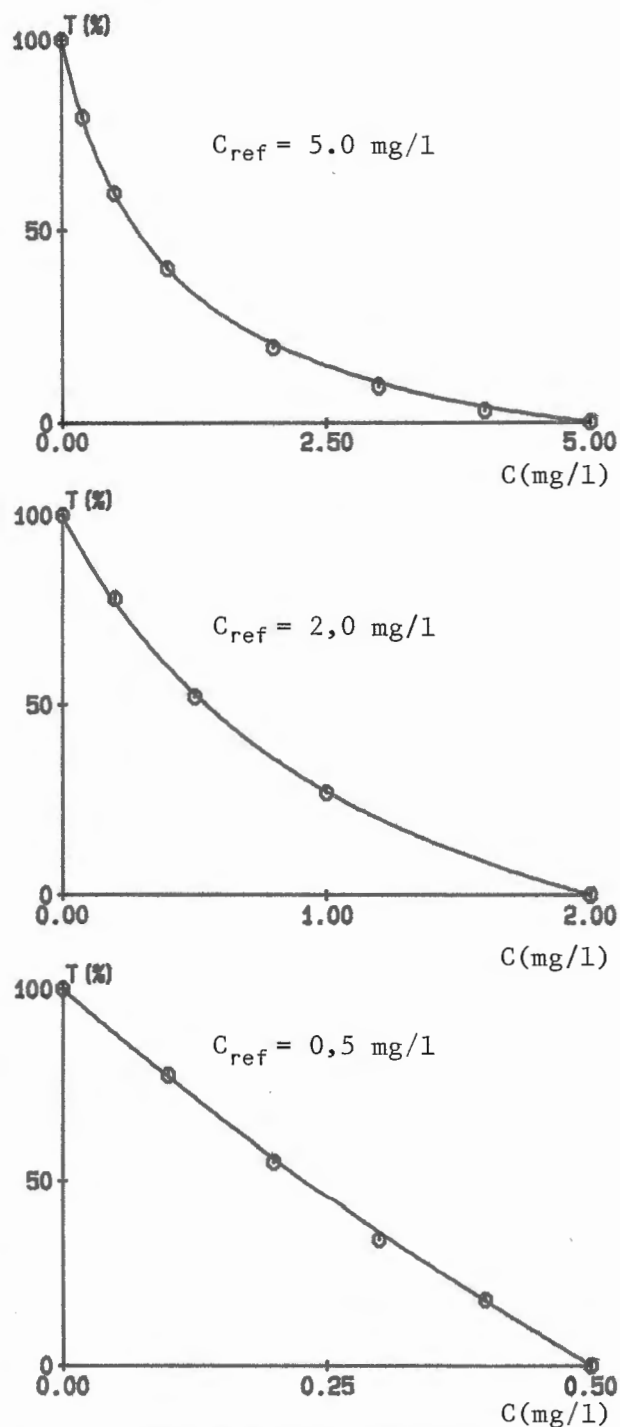
Na slici 1. prikazana je fotografija i skica kolorimetrijske sonde u preseku. Svetlosni izvor je minijaturna sijalica sa ugrađenim sočivom, nominalnog napona 3,7 V/300 mA. Da bi se što duže održala karakteristika metalnog vlakna sijalice, ista se predgreva pri naponu od 2V, dok se napon od 3,7 V koristi samo pri merenju.

Aktivnu sredinu predstavlja element zapremine, između svetlosnog izvora i fotoelementa, koji je ispunjen bistrom ili bojenom vodom. Na taj način aktivna sredina se ponaša kao optički filter sa promenljivom transparentnošću. Međutim, primenjeni zeleni optički filter, ispred fotoelementa, ima stalnu spektralnu karakteristiku. Pri prolasku svetlosti iz svetlosnog izvora, najpre kroz aktivnu sredinu, pa zatim kroz filter, dolazi do gubitka svetlosne energije, jer svaki filter oduzima deo energije od energije upadne svetlosti. Takav superaktivni proces, ostvaren sa komplementarnom bojom, je veoma pogodan za favorizovanje apsorpcije svetlosti u aktivnoj sredini, na talasnoj dužini crvenog Rodamina B. Kao fotoelement je primenjen silicijumski fotoelement BP104 (Siemens).



Slika 2. Principijelna šema kolorimetra

Na slici 2. je prikazana principijelna šema razvijenog fotoelektron-skog kolorimetra. Izlazni signal sa fotoelementa BP104 se pojačava



Slika 3. Kalibracione krive za različite referentne koncentracije

preko operacionog pojačivača 741. Podešavanje nultog skretanja pokaznog instrumenta I (maksimalna apsorpcija, odnosno $T = 0$ %) se vrši pomoću dva potenciometra za grubo i fino podešavanje, R_{03} i R_{04} , dok se podešavanje maksimalnog skretanja (minimalna apsorpcija, odnosno, $T = 100$ %) obavlja pomoću potenciometra R_{01} i R_{02} . Elektronski deo sadrži i dva ispravljačka stepena; jedan za napajanje vlakna sijalice, napona 3,7 V/300 mA, sa mogućnošću redukcije na vrednost od 2 V (predgrevanje vlakna), i drugi ± 15 V za napajanje operacionog pojačivača.

Kao što je već pokazano, veličine transparenacija i koncentracija su u logaritamskoj zavisnosti. Stoga se pri linearno kalibriranoj skali pokaznog instrumenta I, za promenu transparenacije od 0% do 100 %, dobija nelinearno izražena koncentracija. Pri usvajanju manjih iznosa referentne koncentracije trasera (slika 3) postiže se bolja linearizacija skale pokaznog instrumenta kolorimetra. Međutim, s druge strane, manje referentne koncentracije trasera zahtevaju veću osetljivost mernog elektronskog dela instrumenta, ili veće rastojanje između svetlosnog izvora

i fotoelementa. Stoga se prilikom razvoja fotoelektronskog kolorimetra morao iznaći kompromis između ovih suprotnih početnih uslova.

S obzirom da je ekstinkcija linearne funkcije od koncentracije, skala pokaznog instrumenta se može kalibrisati i prema ovoj veličini.

4. KALIBRACIJA INSTRUMENTA

Kalibracija instrumenta je izvršena sa rastvorima crvenog trasera (Rhodamin B) u različitim tečnostima:

- vodovodska voda (voda sa česme),
- destilovana voda,
- tehnička voda (voda iz laboratorijskog rezervoara).

Pri kalibrisanju za maksimalnu transparentiju ($T=100\%$) uvek je uzimana čista voda, a za minimalnu transparentiju ($T=0$) uzimane su različite referentne koncentracije (od 0,5 do 10 mg/l).

Na osnovu obavljenih merenja pokazalo se sledeće:

- vodovodska voda, neposredno uzeta sa česme, je nepovoljna za pravljenje rastvora i merenja, jer hlor u većim količinama reaguje sa rodaminom smanjujući obojenost rastvora u kratkom vremenskom roku;
- destilovana voda ne reaguje sa rodaminom, kao ni tehnička voda iz laboratorijskog rezervoara koja je oslobođena hlora usled kruženja vode kroz sistem kanal-rezervoar. Stoga su ove vode pogodne za kalibraciju i merenja;
- kao što je u uvodnom delu pokazano, manje referentne koncentracije daju povoljniju kalibracionu krivu, bližu linearnoj. Na slici 3 su date kalibracione krive - zavisnost transparentije (čitanja na instrumentu) od koncentracije, za referentne koncentracije od 0,5, 2 i 5 mg/l.

5. OSNOVNI POJMOVI O DISPERZIJI U OTVORENIM VODOTOKOVIMA

Zakon održanja mase, napisan za elementarnu zapreminu fluida, glasi [3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_i}{\partial x_i} = D_M \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

gde je D_M - koeficijent molekularne difuzije, a C i u_i - trenutne vrednosti koncentracije neke materije i brzine, koje se, u uslovima turbulentnog strujanja razdvajaju na veličine osrednjene po vremenu i fluktuacije, pa jednačina postaje:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{C}'u'_i}{\partial x_i} = D_M \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_i \partial x_i} \quad (8)$$

gde su \bar{C}, \bar{u}_i - osrednjene vrednosti, a C', u'_i - fluktuacije. Analogno Fickovom (Fick) zakonu molekularne difuzije, može se pretpostaviti:

$$\bar{C}'u'_i = D_{ii} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \quad (9)$$

gde je D_{ii} - tenzor koeficijenta turbulentne difuzije.

Zamenom u (8) i uz zanemarivanje molekularne difuzije (pošto je $D_M \ll D_{ii}$), dobija se tzv. jednačina turbulentne difuzije:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

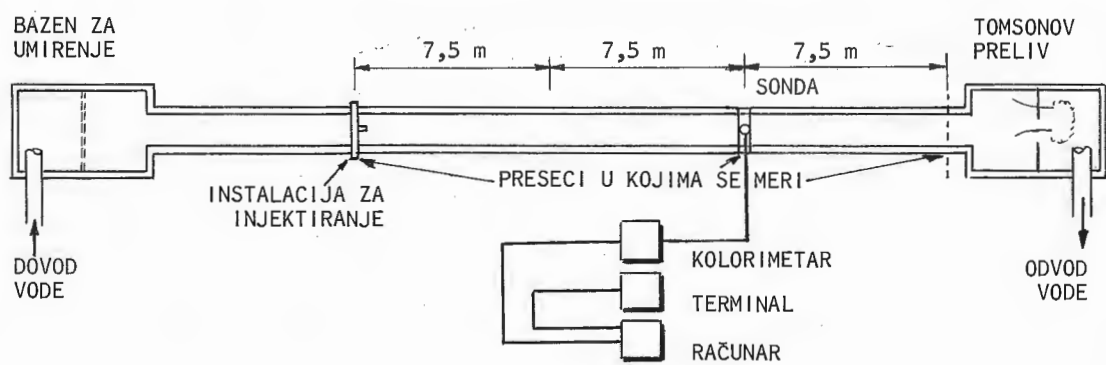
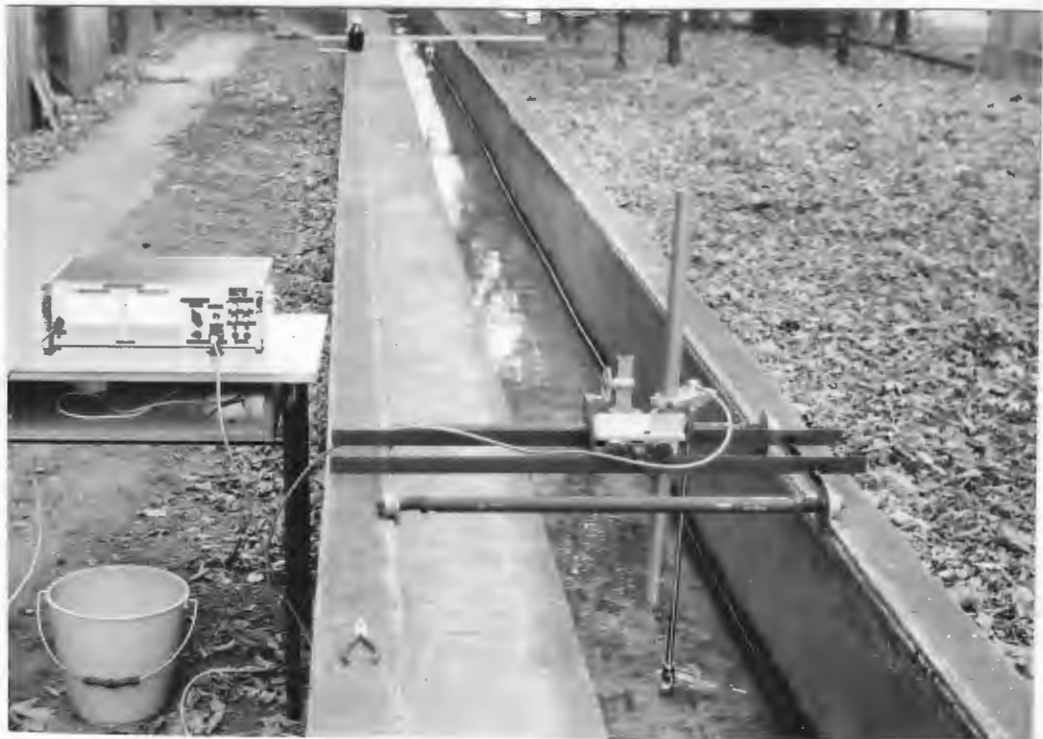
Kovarijansa $\bar{C}'u'_i$ je teško direktno merljiva. Merenjem samo koncentracija (i brzina), te prilagođavanjem izmerenih vrednosti rešenjima jednačine (7), mogu se proceniti vrednosti koeficijenta turbulentne difuzije. Na ovaj način se indirektno mogu odrediti i vrednosti $\bar{C}'u'_i$. Ovo je moguće primenom prostornih računskih modela, dok se kod primene jednostavnijih (ravanskih ili linijskih) modela određuju vrednosti tzv. koeficijenta disperzije, koji objedinjuju mešanje turbulentnim fluktuacijama i sekundarnim strujanjima.

6. PREDNOSTI DINAMIČKOG MERENJA U ODNOSU NA UZORKOVANJE

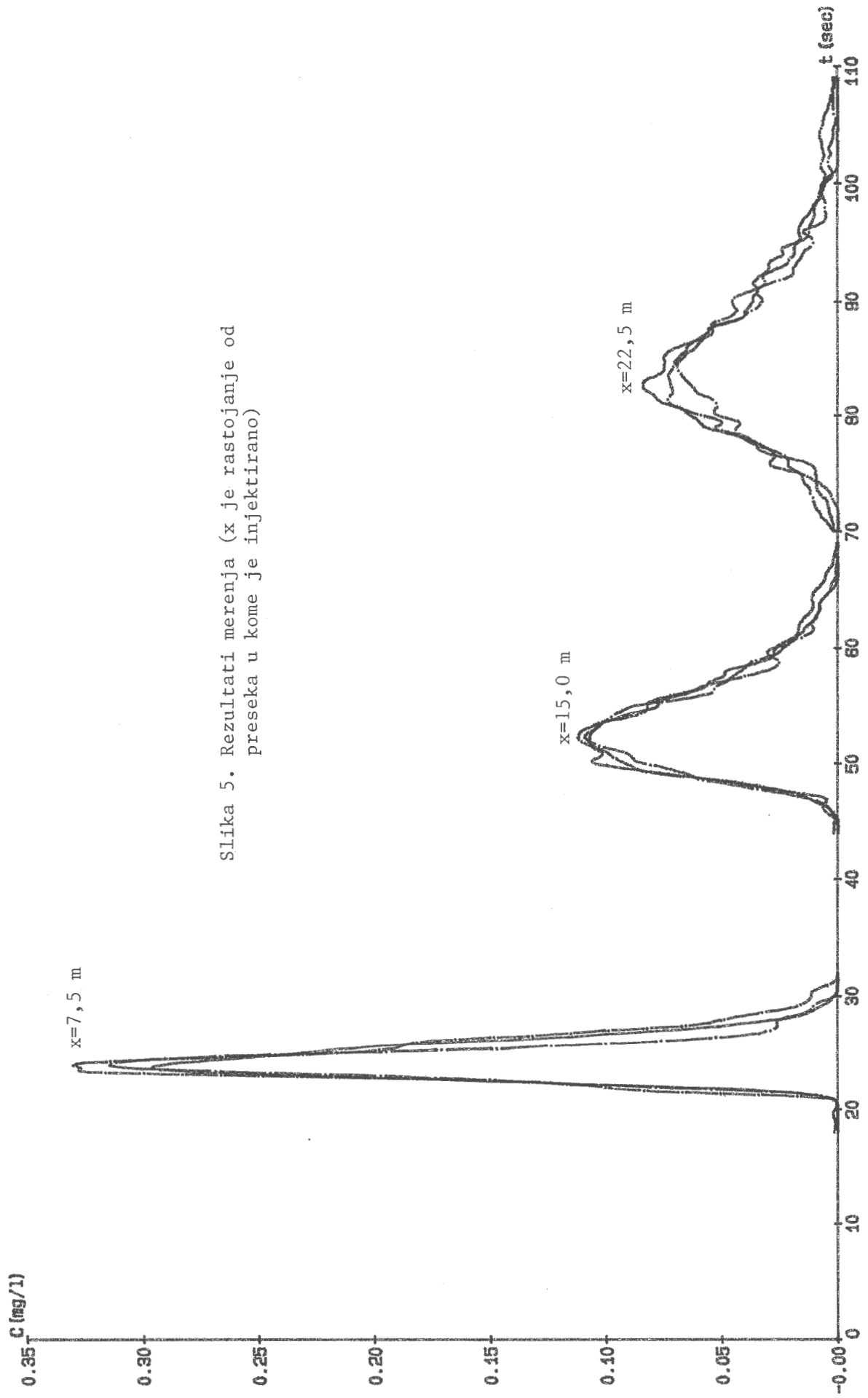
Merenje koncentracije se standardno vrši uzimanjem uzoraka, te njihovom naknadnom analizom na kolorimetru. Prednosti dinamičkog merenja u odnosu na ovaj postupak su višestruke.

Kod eksperimenata sa ustaljenim ispuštanjem trasera, uzimanje uzoraka u nekoj tački se vrši tokom nekog vremena, npr. jedan minut, pa se tako praktično meri srednja vrednost tokom tog intervala. Apsolutnu ustaljenost injektiranja, a pogotovu procesa mešanja, nije lako obezbediti ni u laboratorijskim uslovima, a dinamičkim merenjem se ovaj problem može lakše prevazići. Dalje, svaka materija je u manjoj ili većoj meri razgradiva, pa ako od uzimanja do analize uzoraka protekne značajan period vremena, gubi se na pouzdanosti rezultata.

Pri ustaljenom injektiranju gradijenti koncentracije u dominantnom pravcu strujanja su zanemarivi u odnosu na gradijente u poprečnim pravcima, pa se ne može dobiti informacija o koeficijentima disperzije u pravcu toka. Ovo je značajno pošto je praktično većina ispuštanja otpadnih voda neustaljena.



Slika 4. Fotografija i skica laboratorijskog kanala



Slika 5. Rezultati merenja (x je rastojanje od preseka u kome je injektirano)

Kod neustaljenog, a naročito trenutnog injektiranja, merenjem koncentracije se indirektno proverava i računski model za raspored brzina, poređenjem vremena nailaska maksimalnih vrednosti, što kod ustaljenog injektiranja nije moguće.

Konačno, merenjem prikazanom sondom vrši se trenutni prenos podataka na računar, čime se postiže maksimalna efikasnost u njihovoj obradi.

7. PRIMER

Kao ilustracija mogućnosti sonde navode se prvi rezultati merenja izvršenih u laboratorijskom kanalu Instituta za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Beogradu, čija su skica i fotografija dati na slici 4.

Pomoću sistema koji se sastoji od nosača (držača) i dvoja kolica moguće je pomeranje sonde u sva tri pravca, te njeno jednostavno i precizno fiksiranje u proizvoljnoj tački u kanalu.

Kanal je pravougaonog poprečnog preseka, širine oko 35 cm. U prikazanom primeru, injektiranje je vršeno u preseku na 10,5 m od uzvodnog kraja kanala, u sredini preseka. Trenutno je izručivano 20 ml rastvora Rodamina B, koncentracije 500 mg/l. Na slici 5. prikazane su koncentracije izmerene u sredinama preseka (postavljanjem sonde na dno) na jednakim rastojanjima od po 7,5 cm, za svaki položaj ponovljeno po tri puta. U ovim presecima merene su brzine vode hidrometrijskim krilom, i iznosile su do 0,30 m/s. Dubine su merene laboratorijskom iglom tačnošću 0,1 mm i iznosile su do 8 cm. Proticaj, meren pomoću Tomsonovog preliva, iznosio je 5,5 l/s.

8. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan fotoelektronski kolorimetar razvijen na Građevinskog fakultetu u Beogradu.

Zahvaljujući velikom elektronskom pojačanju i primenjenoj povratnoj sprezi pojačivača, moguće je opseg instrumenta menjati u širokim granicama, kako pri transparentiji 0% tako i pri transparentiji 100%. Na taj način moguća su precizna merenja i pri niskim i pri visokim koncentracijama.

Pri dugotrajnom radu, zbog mogućeg zaprljanja staklenih površina sonde, neophodno je njihovo redovno čišćenje, pa stoga sonda nije pogodna za rad na dugotrajnoj instalaciji.

Na osnovu opita obavljenih u laboratorijskom kanalu, može se zaključiti da prikazani instrument pouzdano funkcioniše u realnim uslovima primene, i da obezbeđuje kvantitativne pokazatelje disperzije sa brzim odzivom.

BIBLIOGRAFIJA

1. Bouguer, P. (1729). Essai d'optique sur la gradation de la lumiere, Paris, Claude Tombert.
2. Beer, A. (1852). Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten, Ann. Phys. Chem., 86(2), 78.
3. Raudkivi, A.J., Callander, R.A. (1975). Advanced Fluid Mechanics, Edward Arnold, London.