

Primeri provere tačnosti mernih suženja za merenje protoka otpadnih voda

Dušan Prodanović, Nemanja Branisljević, Ljiljana Janković, Željko Vasilić

Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Beograd

Rezime:

Merači protoka u otvorenim kanalima sa bočnim suženjem, koji se baziraju na merenju samo jedne dubine, su počeli masovnije da se primenjuju u industrijskim postrojenjima sedamdesetih godina prošlog veka. Zakon o zaštiti životne sredine i Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu definišu obaveze korisnika voda u smislu merenja količina i kvaliteta voda koje se zahvataju iz vodotoka i ispuštaju u iste, te samim tim postoji velika potreba za primenom predmetnih merača s obzirom na jednostavnost i ekonomičnost njihove primene. Da bi se ova, pristupačna i elegantna metoda mogla primeniti u praksi, neophodno je da budu ostvareni određeni, pre svega, hidraulički uslovi. Ukoliko neophodni uslovi nisu zadovoljeni, pouzdanost izmerenih podataka se može dovesti u pitanje. U ovom radu su prikazana su tri primera postojećih mernih suženja postavljenih u industrijskim postrojenjima koji se koriste za merenje protoka otpadnih voda. Na osnovu provere rada mernih suženja dato je mišljenje o ispravnosti korišćenja istih za merenje protoka otpadnih voda.

Ključne reči:

Merenje protoka u otvorenim kanalima, uslovi, primeri iz prakse

1. Uvod

Merenje količine otpadne vode koja se ispušta u prirodu je obavezna za sve korisnike voda na osnovu Zakona o zaštiti životne sredine [1] i Zakona o proceni uticaja na životnu sredinu [2]. Na osnovu izmerenih količina otpadnih voda koje se ispuštaju u prirodu zagađivač plaća naknadu za zagađivanje životne sredine.

Merenje protoka u otvorenim kanalima je sa hidrauličke strane veoma složen problem, jer ne postoji jednoznačna veza između protoka i srednje brzine. Jedno od mogućih rešenja je korišćenje činjenice da se u mirnom toku poremećaji prenose uzvodno i da je kritična dubina minimalna dubina toka koja se može javiti u mirnom režimu.

Ukoliko se u kanalu u kojem je miran režim lokalnim poremećajem izazove kritična dubina, i ako nizvodno od poremećaja ne dolazi do potapanja kritične dubine pri svim protocima koji se mogu javiti u kanalu, dubina vode uzvodno od lokalnog poremećaja je u direktnoj vezi sa protokom kroz kanal. Lokalni poremećaj (merno suženje) se obično izvodi bočnim sužavanjem kanala i, u nekim varijantama, izdizanjem dna (lokalni prag), tako da se u suženju javlja kritična dubina. Hidrauličkom analizom tečenja kroz postojeći objekat u kome postoji merno suženje, za date protoke i granične uslove može se dobiti jednoznačna veza između dubine ispred preлива (H) i protoka (Q) u kanalu. Ta zavisnost može da posluži za određivanje protoka na osnovu izmerene dubine pre suženja.

Nasuprot tome, ukoliko potrebni uslovi, koji se ogledaju u ostvarivanju kritične dubine i nepotopljenog tečenja nisu ispunjeni, neophodno je meriti dve dubine što značajno povećava cenu a smanjuje tačnost i elegantnost postupka merenja. Iako u literaturi postoje neophodne smernice kojima se projektant može voditi u procesu dizajna, nakon izgradnje često je neophodno da se rad suženja proveriti i da se na osnovu izmerenih dubina i protoka rekaliбриše.

Neretko se nakon puštanja u rad utvrdi da suženje ne daje tačne rezultate jer nisu poštavni prilično strogi zahtevi u pogledu tačnosti dimenzija suženja te je potrebno nakon puštanja mernog objekta, naknadnim kalibracionim merenjima utvrditi novu zavisnost dubine i protoka.

U ovom radu su analizirana i prikazana tri merna suženja koja su izgrađena sa ciljem da se njima pouzdano meri protok vode. U tri postrojenja – jedno industrijsko (US Steel Srbija) i dva postrojenja za prečišćavanje otpadne vode (JKP Bukulja Aranđelovac i JKP Vodovod i kanalizacija Subotica) obavlja se kontinuirano merenje protoka otpadnih voda u otvorenim kanalima sa bočnim suženjem koja se nalaze na izlazu iz postrojenja. Na primerima iz prakse dat je pregled funkcionisanja mernih suženja sa aspekta ispunjenja uslova za merenje protoka.

2. Neophodni uslovi za merenje mernim suženjima

Da bi merno suženje moglo da se koristi za merenje protoka ono mora biti tako oblikovano da je strujanje u njemu tačno definisano. Uzvodno od mernog suženja tečenje mora biti u mirnom režimu dok je u samom mernom suženju tečenje u kritičnom režimu. Uslovi nizvodno od suženja ne smeju da utiču na tečenje u samom suženju, tj. mora biti ostvareno nepotopljeno tečenje u samom suženju.

Rezultati obavljenih ispitivanja (Hajdin, 1980) pokazuju da razlika nivoa ispred i iza suženja mora biti veća od polovine razlike između dubine ispred suženja i kritične dubine u suženju, tj.

$$\Delta Z \geq \frac{1}{2}(h - h_{kr}) \quad (1)$$

da bi se ostvario uslov nepotopljenosti u suženju. Ukoliko su ispunjeni prethodni uslovi za preseke ispred i u samom suženju, pod pretpostavkom da se radi o idealnom fluidu, mogu da se postave dve osnovne jednačine za tečenje u otvorenim tokovima – energetska jednačina i jednačina kontinuiteta. Energetska jednačina za presek ispred suženja i presek u kome se ostvaruje kritična brzina glasi:

$$H + \frac{Q_{id}^2}{2gA_{id}^2} = h_{kr} + \frac{V_{kr}^2}{2g} \quad (2)$$

Sufiks "id" označava veličine koje se odnose na idealan fluid i na presek koji se nalazi uzvodno od suženja, dok se sufiks "kr" odnosi na presek u mernom suženju. Jednačina kontinuiteta za ova dva preseka glasi:

$$V_{id} \cdot A_{id} = V_{kr} \cdot A_{kr} \quad (3)$$

U mernom suženju se ostvaruje kritična dubina pri čemu mora biti ostvaren uslov da je Froud-ov broj jednak jedinici:

$$Fr = \frac{Q_{id}^2 B_{kr}}{gA_{kr}^3} = 1 \quad (4)$$

gde je:

B_{kr} – širina vodenog ogledala u mernom suženju

Gornje jednačine se odnose na idealan fluid pa se uvodi empirijski koeficijent protoka koji daje vezu između realnog i idealnog fluida:

$$Q = C_q \cdot Q_{id} \quad (5)$$

Na osnovu kalibracionog merenja za svaki konkretan slučaj određuje se vrednost koeficijenta protoka, C_q .

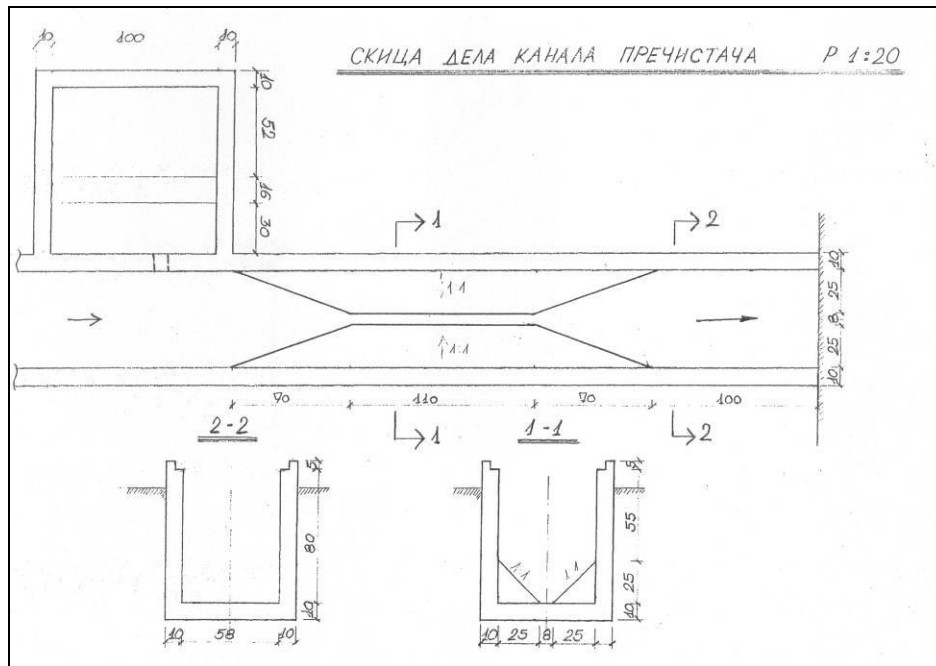
U ovako definisanim uslovima tečenja za određivanje protoka potrebno je da se izmeri dubina u preseku koji se nalazi neposredno uzvodno od samog suženja u delu kanala u kome se ostvaruje mirno tečenje.

Da bi merno suženje moglo da se koristi, podrazumeva se da je dno kanala fiskno, tj. da nema zasipanja dna čvrstim česticama koje tok nosi tako da je neophodno redovno održavanje prilaznog kanala i samog suženja.

3. Primeri iz prakse

3.1. Arandjelovac

Objekat je namenjen za obezbeđenje uslova za pouzdano merenje količine oticaja (protoka) prečišćenih otpadnih voda iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda za koje je nadležno JKP Bukulja iz Arandjelovca. Na izlazu iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda postoji merni objekat sa bočnim suženjem koji je prikazan na skici dobijenoj od JKP Bukulja (Slika 3.1.1).



Slika 2.1. Skica dela kanala sa mernim suženjem

Objekat za merenje protoka se sastoji iz tri dela:

- deo za umirenje toka – voda se u merni objekat dovodi iz postrojenja za prečišćavanje vode betonskim kanalom pravougaonog poprečnog preseka širine u dnu oko 58 cm i visine 80 cm. Kanal je pravolinijski sa jednom horizontalnom krivinom koja se nalazi približno 3.7 m uzvodno od mernog suženja;
- deo u kome se vrši merenje protoka – neposredno pre mernog suženja nalazi se komora u kojoj će biti postavljen merni uređaj za merenje protoka. Komora u kojoj se meri nivo vode je postavljena neposredno uz kanal i sa istim je povezana otvorima koji postoje u razdelnom zidu.
- merno suženje – se nalazi nizvodno od preseka u kome će biti postavljen merač protoka. Merno suženje je složenog poprečnog preseka i prema dostavljenoj skici u donjem delu je trapeznog oblika sa bočnim stranama u nagibu 1:1 i širinom osnove od 8 cm, a u gornjem delu je pravougaonog poprečnog preseka;
- komora za prihvatanje vode – nalazi se nizvodno od suženja u objektu koji je predviđen za postavljanje hlorne stanice, a koji se ne koristi u te svrhe. Dno komore je spuštено 145 cm u odnosu na dno mernog suženja i kanala.

Voda se iz prihvatne komore dalje odvodi u obližnji prirodni vodotok.

Fotografije snimljene na samom postrojenju su prikazane na slici 3.1.2.



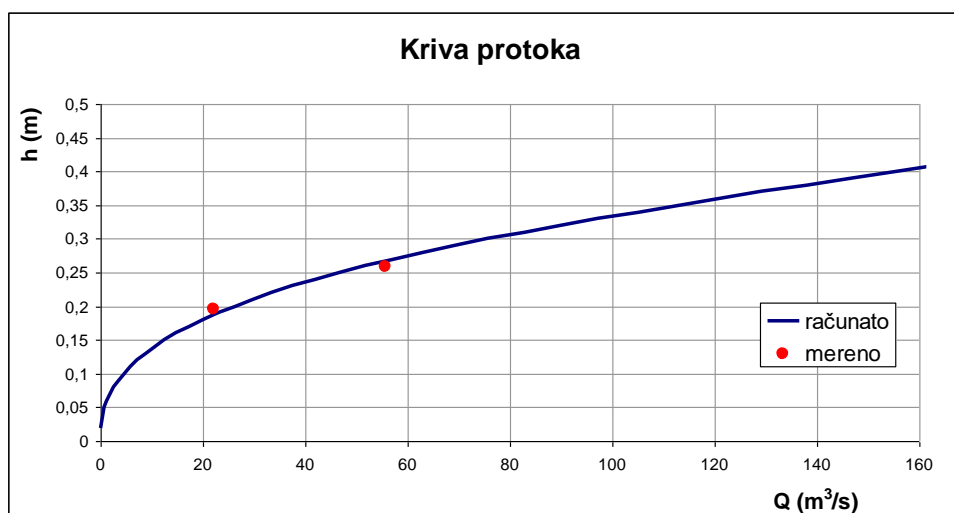
Slika 3.1.2. Odvodni kanal iz postrojenja za prečišćavanje vode sa mernim suženjem u PPOV JKP Bukulja Aranđelovac

Izmerene vrednosti nivoa vode i izračunate vrednosti protoka u posmatranom preseku su date u Tabeli 3.1.1.

Tabela 3.1.1. Izmerene vrednosti nivoa i izračunati protoci na mestu mernog profila

Merenje	Nivo vode (m)	Srednja brzina [m/s]	Srednji protok u preseku [l/s]
1	0.258	0.4412	55.54
2	0.195	0.2331	22.16

Na osnovu rezultata merenja protoka kalibrisana je Q/H kriva dobijena hidrauličkim proračunom. Na slici 3.1.3. prikazana je računaska Q/H kriva uz izmerene vrednosti protoka i nivoa za kanal na izlazu iz PPOV JKP Bukulja Arandjelovac.



Slika 3.1.3. Kriva protoka za računске i izmerene vrednosti protoka i nivoa za kanal na izlazu iz PPOV JKP Bukulja Arandjelovac

Kontrolno merenje protoka je pokazalo da se u mernom suženju ostvaruje kritična dubina i da postoji jednoznačna veza između dubine vode u kanalu i protoka. Nizvodni uslovi obezbeđuju nesmetano oticanje čime je sprečena pojava uspora i omogućava se nepotopljeno oticanje iz mernog suženja.

3.2. Merno suženje u fabrici US Steel

Deo otpadnih voda iz procesa proizvodnje u fabrici U.S.Steel Serbia u Smederevu se tretira lokalnim postrojenjem za prečišćavanje. Na izlazu iz postrojenja za prečišćavanje izgrađen je merni objekat sa bočnim suženjem.

Objekat za merenje protoka se sastoji iz dela za umirenje „U“ prečnika 30 cm i visine 105 cm, dugačkog 215 cm, i mernog suženja dužine 125 cm, poprečnog preseka koji se menja od „U“ preseka prečnika 30 cm do trapezoidnog sa dnom širine 5 cm, nagibom kosina 1:0.625 i visinom 20 cm. Nizvodno od suženja dno je spuštено tako da je obezbeđeno nepotopljeno tečenje kroz suženje. Na slikama u nastavku (3.2.1. i 3.2.2.) je prikazana osnova kanala i presek preuzeti iz projekta kao i fotografija kanala u toku redovnog rada, snimljena 2008. godine.

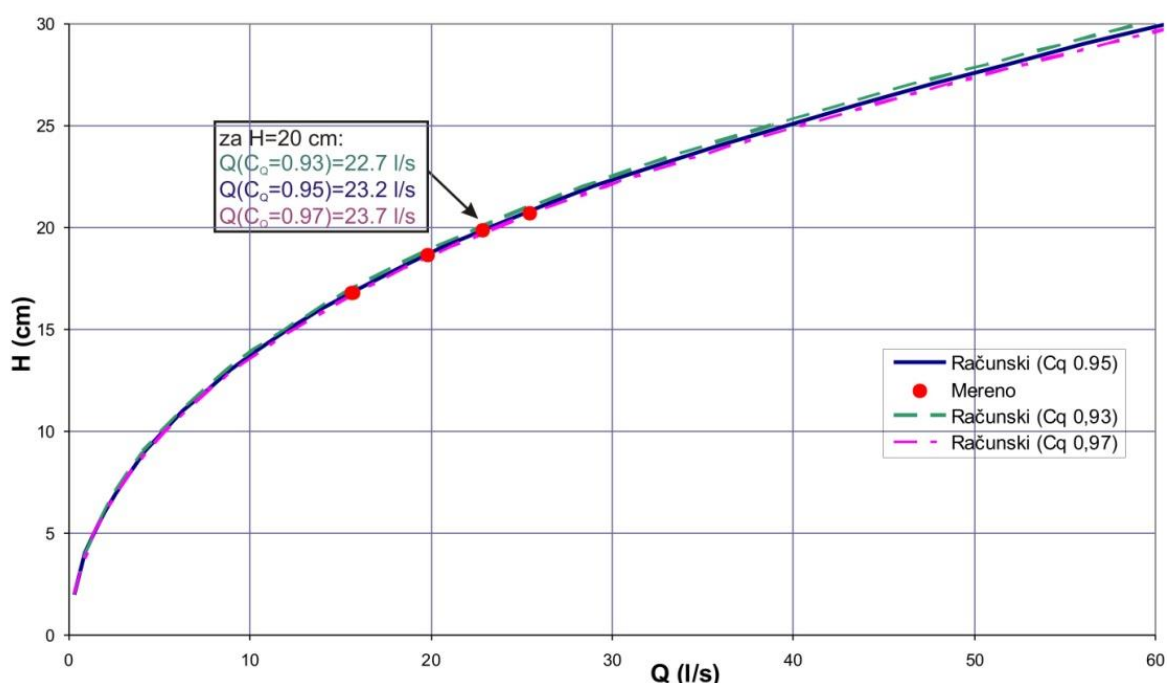
Verifikacija protoka u mernom kanalu, dobijenog računskim putem korišćenjem navedenih jednačina, je izvršena kalibracionim merenjem ultrazvučnim meračem koje je obavljeno na terenu (Tabela 3.2.1).

Tabela 3.2.1. Izmerene vrednosti nivoa i protoka na mestu mernog profila

Nivo [cm]	Nivo (m)	Brzina [cm/s]	Protok [l/s]	Protok [m ³ /s]	Temperatura [°C]
20.715	0.20715	48.385	25.396	0.025396	38.1
19.89	0.1989	45.591	22.83	0.02283	39.6
18.657	0.18657	42.685	19.774	0.019774	39.2
16.8	0.168	38.372	15.634	0.015634	39.9

Na osnovu rezultata merenja protoka i hidrauličkog proračuna usvojen je koeficijent protoka 0.95. Na slici 3.2.3. prikazane su merene vrednosti, kao i krive protoka za različite koeficijente protoka,

Kriva protoka



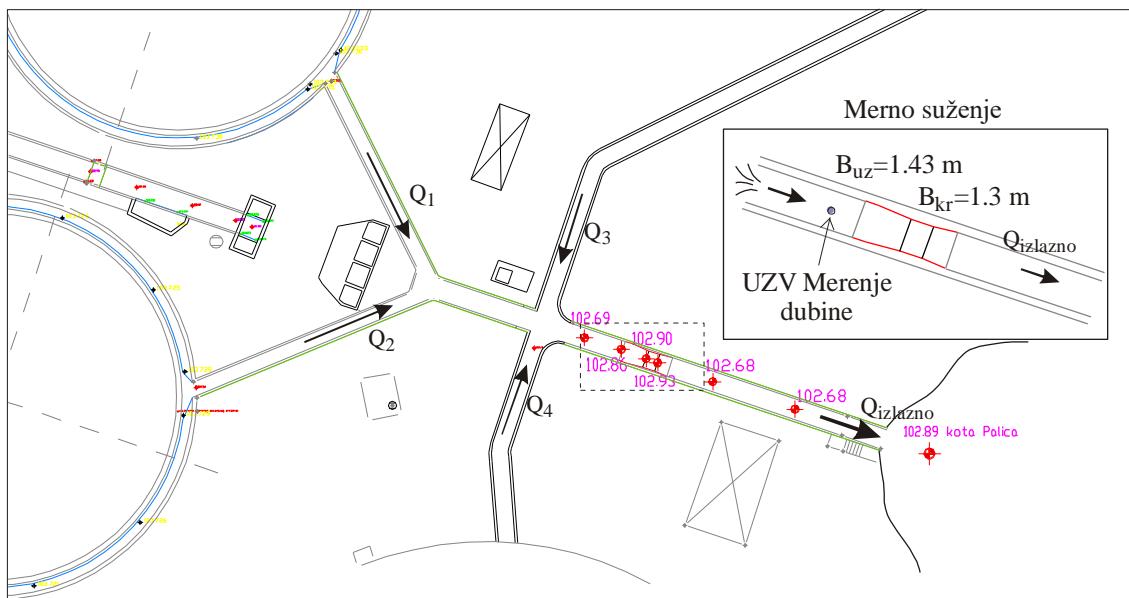
Slika 3.2.3. Kriva protoka za računске i izmerene vrednosti protoka i nivoa u fabrici U.S.Steel Serbia

Na gornjem dijagramu pokazano je da se računska kriva protoka računata sa koeficijentom protoka C_q 0.95 veoma dobro slaže sa merenjima obavljenim na samom kanalu. Na osnovu podataka iz literature i eksperimentalnih istraživanja u Laboratoriji na Građevinskom fakultetu (Hajdin, 1980), izračunata kriva protoka može da se koristi za dubine veće od 10 cm, što znači da ova kriva protoka može da se koristiti za protoke 5-40 L/s kako bi se zadovoljila potrebna tačnost merenja protoka.

Merni objekat ispunjava uslove neophodne za ostvarenje kritične brzine u samom suženju. Nizvodno od mernog suženja je obezbeđeno nepotopljeno tečenje što omogućava ispunjenje uslova za merenje protoka u mernom suženju.

3.3. Subotica

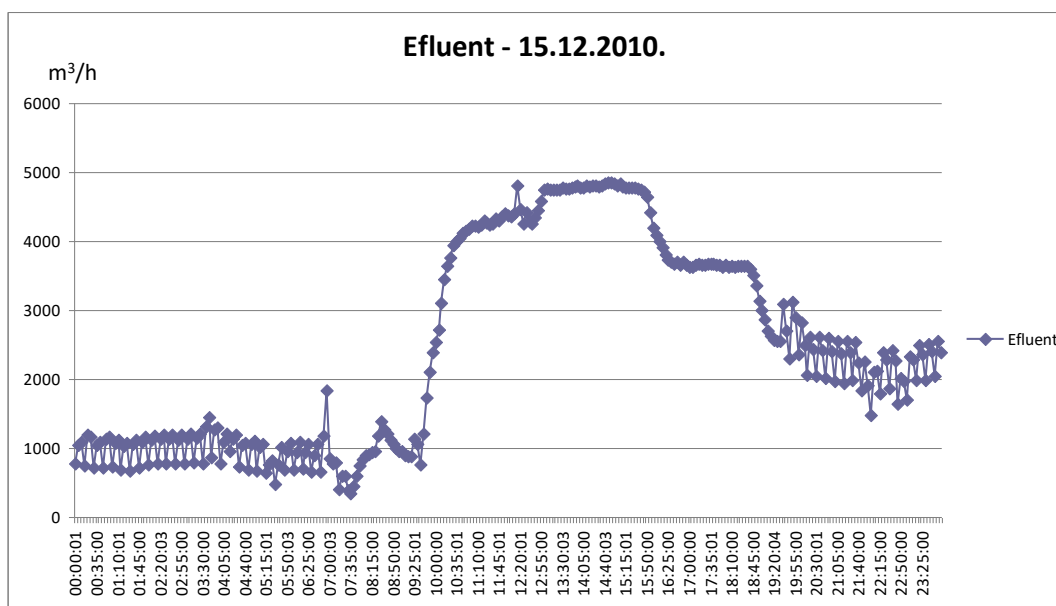
Subotica je izgradila savremeno postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, koje se ispuštaju u jezero Palić. Na samom izlazu iz postrojenja, postavljen je merač protoka vode, sa kritičnom dubinom. Merni objekat je nestandardnog tipa, sa relativno malim bočnim suženjem i sa relativno malim izdizanjem dna. Hidraulički, merni objekat je kombinacija praga i bočnog suženja (slika 3.3.1). Protok se merio u preseku uzvodno od praga, merenjem dubine ultrazvučnim senzorom.



Slika 3.3.1. Osnova izlaznog dela postrojenja sa mernim suženjem – u desnom gornjem uglu je data uveličana slika samog suženja

Sam merni objekat je malo „nesrećno“ pozicioniran. Uzvodno od objekta se susište četiri kanala, tako da voda nema dovoljno prostora da se umiri pre nailaska na merni objekat. Takođe, relativno malo izdizanje dna u zoni samog objekta, čini tečenje u kanalu podložno usporima iz jezera Palić.

Rezultat merenja protoka na loše uklopljenom mernom objektu se može videti na sledećoj slici 3.3.2. U noćnom periodu, kada je protok relativno mali, dubina u kanalu je takođe mala pa postoji znatan uticaj jezera Palić. Voda počinje da „osciluje“, kritična dubina se „šeta“ duž menrog suženja, a to se na mernom uređaju pokazuje kao fluktuacija protoka (period od 00:00 do 7:00 i od 20:00 do 24:00).



Slika 3.3.2. Rezultati merenja protoka

Ovo je primer neispunjenosti neophodnih uslova za primenu mernih suženja za merenje protoka u tokovima sa slobodnom površinom vode. Da bi se poboljšao rad mernog uređaja, neophodno je eliminisati uticaj jezera Palić na tečenje u suženju. To se može postići formiranjem brzotoka nakon suženja spuštanjem dna a zatim njegovim podizanjem: povećanom kinetičkom energijom toka postiglo bi se pomeranje hidrauličkog skoka nizvodno od suženja. Ova mera mogla bi se postići i izdizanjem preseka u kom se nalazi suženje ali bi to uticalo na režim rada uzvodnih objekata, taložnika, tako da to verovatno nije prihvatljivo.

4. Zaključci

Merenje protoka u objektima sa suženjem dovoljne dužine u kojima se ostvaruje kritična dubina i u uslovima kada nizvodno od suženja ne dolazi do potapanja toka su veoma pouzdana. U tim slučajevima veza između protoka i dubine je jednoznačna i potrebno je izmeriti samo jednu dubinu u preseku uzvodno od suženja na osnovu koje će se odrediti protok.

S obzirom na jednostavnost i pouzdanost merenja u objektima sa suženjima takvi objekti imaju veliku praktičnu primenu u svakodnevnoj praksi. Naravno, ukoliko se mernom objektu omoguće pravilni hidraulički uslovi: miran tok ispred suženja i nepotopljeno tečenje u samom suženju.

Na primerima provere rada mernih objekata u U.S.Steel Serbia u Smederevu, JKP Bukulja Arandjelovac i JKP Vodovod i kanalizacija Subotica pokazani su slučajevi kada su ispunjeni neophodni uslovi za merenje mernim suženjima, kao i primer kada zbog postojanje nizvodnog uspora merenje samo jedne dubine u preseku uzvodno od suženja ne daje tačne rezultate.

5. Zahvalnost

Rezultati istraživanja prezentovani u ovom radu su finansirani u okviru naučnog projekta Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije broj TR 37010 "Sistemi za odvođenje kišnih voda kao deo urbane i saobraćajne infrastrukture".

6. Reference

1. Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 135/2004
2. Zakon o zaštiti životne sredine, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 135/2004
3. Hajdin G. (1980): Određivanje proticaja merenjem jedne ili dve visine, Merni objekti za određivanje proticaja u otvorenim tokovima MEPROKS 80, Građevinski fakultet Univerzitetu u Beogradu