

Poglavlje 3

Hidraulički uslovi i načini merenja protoka u kolektorima sa slobodnim površinama

3.1 Vrste mernih stanica

Vrsta merenja, u zavisnosti od cilja, mogu se grubo svrstati u tri glavne kategorije kao što je prikazano na slici 11. To su: stalne merne stanice, privremene merne stanice i stanice za jednokratna ili specijalna ad-hoc merenja. Stalne merne stanice se uglavnom nalaze uz neke značajne objekte za sisteme za odvodjenje voda, kao na primer crpne stanice, retenzioni bazeni, prelive, postrojenja za prečišćavanje, stalne instalacije, istraživački poligoni itd. Oni svakako mogu da se postave i u samoj mreži na pogodnoj lokaciji.

Najbolji period za projektovanje i izgradnju stalnih mernih stanica je u isto vreme pri projektovanju i izgradnji celog sistema. U ovim slučajevima hidraulički uslovi za uklapanje stanice i njeno prilagodjavanje (da bi se dobila merenja najbolje tačnosti i pouzdanosti) su najpovoljniji. Sve naknadne adaptacije ili uklapanja nakon završetka izgradnje sistema su skuplje i teško je postići tačnost merenja i hidrauličku povoljnost. Merne stanice u ovom slučaju treba da imaju stalni pristup

za merenje, održavanje, čišćenje itd.

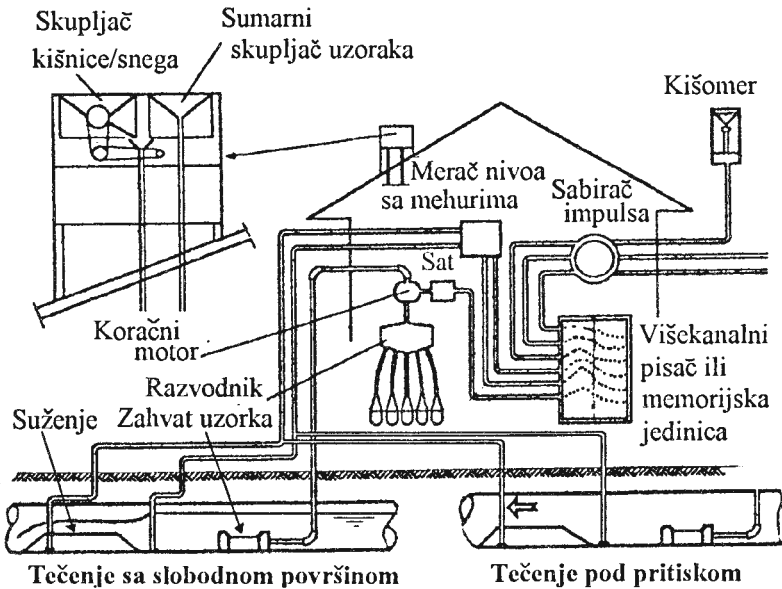
Br	Tip	Osobine	Oprema
I	Stalna stanica za merenje nivoa	<ul style="list-style-type: none"> - Suženja i ostali merni objekti - Stalni uticaj na strukturu mernog objekta - Stalni pristup meraču i obezbedjena zaštita 	<ul style="list-style-type: none"> - Fiksirana oprema - Prenos podataka putem radio talasa
II	Privremena stanica za merenje nivoa	<ul style="list-style-type: none"> - Mali uticaj na merni objekat - Pokretna suženja - Pokretna oprema 	<ul style="list-style-type: none"> - Pokretna ili delimično fiksirana oprema
III	Stanica instalirana za jednokratna merenja	<ul style="list-style-type: none"> - Ne menja strukturu objekta - Dopuna ostalim sistemima - Potpuna pokretnost 	<ul style="list-style-type: none"> - Pokretna oprema za merenje i unos podataka

Slika 11. Vrste stanica za merenje protoka

Registrowanje podataka se obično sprovodi sa lokalnim sistemom za akviziciju, mada se primenjuju i sistemi sa daljinskim prenosom i centralnom akvizicijom podataka koja zahteva kontinualno snabdevanje strujom, redovno održavanje itd. Uz stanicu za merenje protoka obično se dodaju i uređaji za merenje kvaliteta vode itd. Ako se korektno isprojektuje i izradi, stalna merna stanica može da posluži kao izvanredan izvor podataka za višenamensku upotrebu.

Standardna je praksa da se zaključci o fizičkim karakteristikama stohastičkih procesa izvode na osnovu analize dugih vremenskih serija. Savremene urbane sredine podložne su brzom urbanizaciji i tehnološkim promenama tako da je teško sačekati dovoljno dug period, a fizički uslovi na slivu će se i inače promeniti. Na taj način uloga takvih stanica je više u registrowanju podataka o postojećem stanju i omogućavanju analize efekata urbanizacije kao i uticaja promena u slivu. Na slici

12. dat je primer stalne merne stanice koja sadrži set instrumenata i za merenje protoka i za uzimanje uzoraka za merenja kvaliteta vode. Primer je dat sa jednog sliva u Floridi [8]. Ova stanica je u vreme pisanja izveštaja [8] bila opremljena klasičnim pisacem sa papirnim trakama. U modernim sistemima pisaci sa papirnim trakama se zamjenjuju sistemima za akviziciju podataka (*data logger*) ili sličnim uređajima za zapisivanje na magnetni medij koji je direktno prenosiv na personalni računar ili je povezan sa centralnom stanicom za prikupljanje podataka preko sistema za telemetrijski prenos podataka. Interesantno je napomenuti da je merenje protoka koncipirano tako da se može obavljati kako u uslovima slobodnog tako i u uslovima potopljenog tečenja.

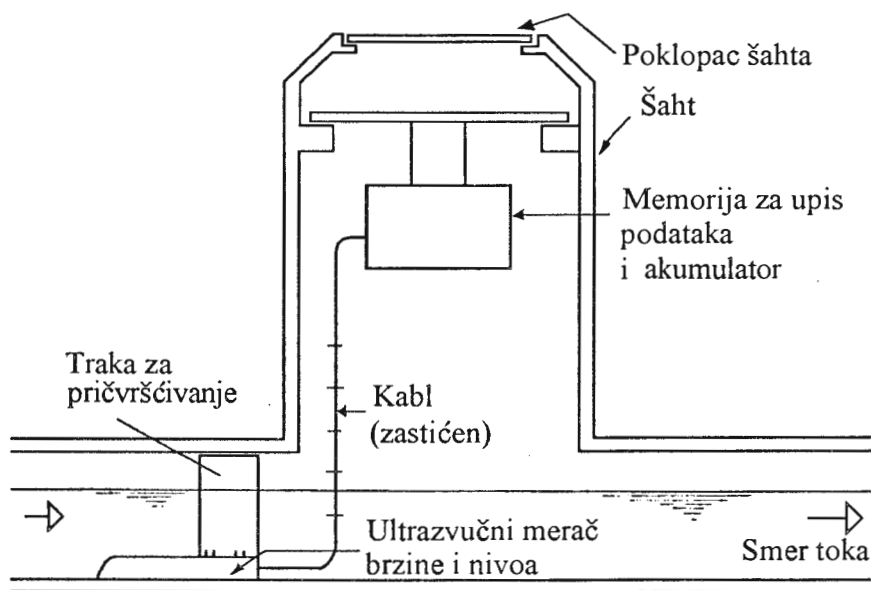


Slika 12. Stalna merna stanica

Privremene merne stanice su popularne iz nekoliko razloga:

- njima se najlakše dobijaju podaci za kompletne projekte rekonstrukcija jer se baziraju na primeni moderne senzorske tehnike i informatičke podrške.
- cena izgradnje ili prilagodjavanja objekta i instalacije opreme je mnogo niža nego kod stalne stanice pošto se merenja obično

sprovode tako što se senzori instaliraju u kolektor bez konstrukcijskih modifikacija. Instrumenti se ostavljaju da obavljaju merenja i akviziciju podataka za određeni period. Nakon kraćeg merenja i završnih radova instrumenti se mogu preneti na drugu lokaciju ili drugi sliv. Oprema mora da se podesi tako da je laka za montiranje u kolektor.



Slika 13. Primer privremene merne stanice postavljene u šaht

Primer takve stanice prikazan je na slici 13. Ona se sastoji od prenosivog senzora za merenje brzine i dubine koji se postavlja na unutrašnji zid kolektora pomoću metalne trake, podaci se zapisuju takodje na prenosivi "data recorder" i obično sa akumulatorskim napajanjem. Komplet se obično postavlja u šaht ili drugo pogodnije mesto. Poklopac i oprema su zaštićeni od negativnog uticaja vlažnosti, prljavštine, prašine, vibracija itd. U konkretnom slučaju prikazanom na slici 13. (tačkasto merenje) brzina se meri ultrazvučnim senzorom zajedno sa merenjem dubine sondom za pritisak. Dve pomenute veličine koriste se za procenu protoka. Treba napomenuti da se solidna tačnost merenja protoka na ovaj način postiže samo za slučaj kada je tečenje mirno, kada nema uspora sa nizvodne strane i kada se uticaj neustaljenosti

tečenja može zanemariti. Moguće je takodje primeniti i druga rešenja za merenje protoka bilo na privremenim ili stalnim stanicama. Druga moguća rešenja prikazana su u Poglavlju 6.

U trećoj grupi mernih stanica merenje se obično obavlja sa potpuno prenosivom opremom i obično se osoblje koje obavlja merenje nalazi svo vreme uz opremu za merenje.

Iako se za merenje u sve tri grupe stanica mogu primeniti isti ili slični tipovi senzora i sistema za akviziciju podataka, u trećoj grupi može se primeniti složenija oprema veće pouzdanosti jer je prisutan personal koji bi trebalo da je u mogućnosti da poboljša uslove merenja za vreme eksperimenta. U tom slučaju moguće je obaviti proveru i kalibraciju i rezultata i druge opreme koja je instalirana na stalnoj ili privremenoj stanici. Ova složenija oprema obično nije pogodna da se ostavi trajno na stalnoj mernoj stanici.

Pošto je oprema pokretna i kako je prisutno osoblje za merenje, moguće je, naprimer, obaviti merenje polja brzina u poprečnom preseku i protok dobiti integraljenjem tog polja po poprečnom preseku. Detaljan opis ovog načina merenja dat je u Poglavlju 6.

U ovu grupu merenja spadaju takodje i metode koje se baziraju na merenja propagacije i razblaživanja obeleživača (trasera) talasa.

3.2 Faktori koji utiču na izbor metode merenja i lokacije za mernu stanicu

Postoje mnoge mogućnosti da se izabere lokacija za merač i metod merenja i registrovanje podataka. Mnoge okolnosti u primeni mogu da utiču da izabrana lokacija i metod merenja budu potpun promašaj ukoliko se unapred ne predvide sve mogućnosti i slučajevi koji se mogu javiti u toku korišćenja uređaja. Stoga je potrebno unapred analizirati te mogućnosti. Sledeći faktori utiču na izbor lokacije:

1. Tip merenja (videti Poglavlje 3.3.), vreme, rezolucija i trajanje prikupljanja podataka koje se zahteva
2. Tip merne stanice (stalna, privremena ili kratkoročna)

3. Lokacija merne stanice u okviru mreže (videti podelu na zone na slici 6)
4. Geometrijski uslovi (dimenzije i oblik kolektora, mogućnost pristupa, postojanje nizvodne kaskade i nagib cevi)
5. Hidraulički uslovi (ekstremni protoci—minimalni i maksimalni, režim tečenja – burni ili mirni, prisustvo suspendovanog i vučenog nanosa, nizvodni uspor ili plima i oseka, bazni protok—procurivanje podzemnih voda itd.)
6. Raspoloživost priključka za snabdevanje na elektroenergijom
7. Raspoloživost pouzdane opreme na lokalnom tržištu
8. Iskustvo i predrasude donosioca odluke
9. Ekonomski faktori (koštanje izgradnje i opreme, cena rada, održavanja, prikupljanja i obrade podataka)
10. Ostali faktori

Pošto je verovatno da će se u bliskoj budućnosti broj mernih stanica za različite potrebe znatno povećati, gornji faktori se moraju detaljno analizirati, pre nego što se merna stanica locira ili izgradi, oprema za merenje i registraciju nabavi ili pozajmi i pre nego što se skupljeni podaci odbace zbog lošeg kvaliteta (slučaj koji se često dešava, čak i u vrlo razvijenim zemljama). U članku M. Grottker i W. Schilling [12] prikazani su neki problemi s kojima su se autori oni za vreme uspostavljanja merne stanice na eksperimentalnom slivu Fehraltorf u Švajcarskoj. Autori ovog članka analiziraju primenu decentralizovanog sistema za prikupljanje podataka i navode sledeće faze u analizi i stavljanje u pogon merne opreme:

- **Planiranje** (definisanje cilja, izbor eksperta, razvoj programa merenja, projektovanje merne stanice, specificiranje kriterijuma za opremu i prikupljanje podataka)
- **Izbor ponudjača** (raspisivanje oglasa, evaluacija ponuda, izbor izvodjača formulisanje posebnih zahteva itd.)

- **Izgradnja i opremanje** (izgradnja infrastrukture, izgradnja ili instaliranje mernih uređaja, instaliranje sistema za prenos podataka itd.)
- **Testiranje** mernih uređaja i opreme za prenos podataka, kalibracija sistema, obuka operatera, konačna provera i primopredaja, itd.
- **Primena** (korišćenje sistema, prikupljanje podataka, održavanje merne stanice i opreme, formiranje baza podataka i primena rezultata merenja)

Autori su izneli vrlo interesantne zaključke o svim fazama i problemima sa kojima su se susreli, potrebnim finansijskim sredstvima i problemom koordinacije za pojedine faze izgradnje i korišćenja merne stanice.

3.3 Hidraulički i konstrukcijski zahtevi

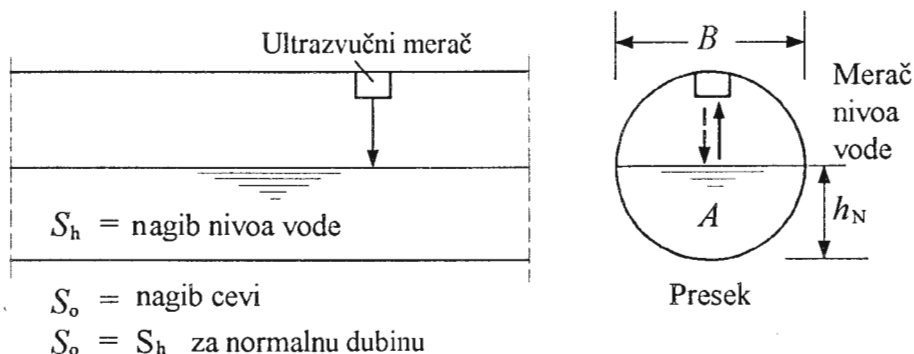
U nameri da se postigne jednostavnost, a u isto vreme da se sačuva pouzdanost merenja protoka potrebno je analizirati hidrauličke uslove u kolektoru koji postoje i bez prisustva merne stanice ili se modifikuju ugradnjom elemenata mernog sistema. Jedna od najjednostavnijih metoda za merenje protoka je merenje jedne dubine koja bi trebalo da jednoznačno odredjuje protok na lokaciji merenja. Određjivanje protoka na osnovu merenja jedne dubine biće objašnjeno po mogućim varijantama:

1. Varijanta I– merenje protoka bez konstrukcijskih izmena i bez postavljanja senzora u fluidnu struju

Ovo je najverovatnije najjednostavniji metod merenja protoka u kome nema nikakvih izmena u konstrukciji ni unošenja senzora u fluidni tok. Ovaj cilj se može postići merenjem neporemećene (normalne) dubine u cevi (slika 14). On se bazira na pretpostavci da postoji jednoznačna veza između normalne dubine h_n i protoka Q .

U stvarnosti ovaj metod nije uvek najjednostavniji i najpouzdaniji. Jedan od problema je da veza $Q(h_N)$ nije jednoznačna za

vreme neustaljenog tečenja pri kome se nagib slobodne površine (S_h) promeni u odnosu na nagib dna cevi S_o . Ova situacija se pogoršava ukoliko se u toku nalazi značajnija količina nanosa, a potpuno se poremeti kada tok dodje pod uspor sa nizvodne strane.



Slika 14. Varijanta I- verovatno najjednostavniji metod merenja protoka

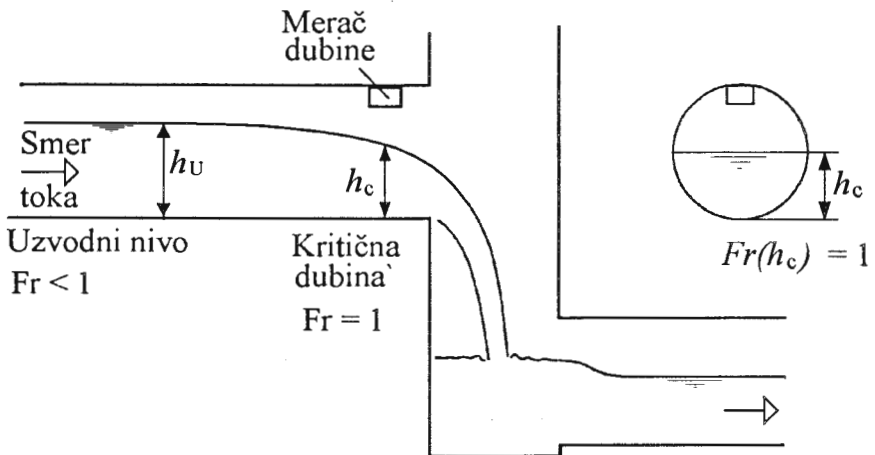
2. Varijanta II—korišćenje postojeće kaskade u kolektoru

Ako u kolektoru postoji kaskada nameće se kao rešenje uspostavljanje merne stanice za protok neposredno uzvodno od kaskade (slika 15). Ako je u uzvodnom delu kolektora tok miran (Frudov broj¹ manji od jedinice, $Fr < 1$).

Kritična dubina će se formirati neposredno uzvodno od kraja cevi (na rastojanju $2 - 3 h_{kr}$ uzvodno od kraja cevi). Poznato je da kritična dubina ne zavisi od nagiba cevi te ovakvo rešenje na prvi pogled izgleda jednostavno ostvarljivo. Problem se pojavljuje zbog toga što je lokacija (rastojanje od kraja cevi) poprečnog preseka u kome se javlja kritična dubina promenljiva sa protokom tako da senzor koji se postavi za merenje kritične dubine ne meri uvek nju nego neku drugu dubinu koja je nešto manja ili veća od kritične u zavisnosti od protoka. Rastojanje senzora od kraja cevi se obično bira tako da se na toj lokaciji kritična dubina pojavi pri maksimalnom protoku (Q_{max}) a linija protoka se onda koriguje zbog toga što je pri manjim protocima

¹Frudov broj, $Fr = Q^2 B / g A^3$

merna dubina različita od kritične. Ovaj metod merenja protoka korišćenjem kaskade se znatno poboljšava ukoliko se umesto direktnog merenja kritične dubine, u kolektor neposredno uzvodno od kaskade, ugradi suženje koje će izazvati tečenje kroz suženje sa kritičnom dubinom (videti varijantu III i uputstvo "WRC guide" [1]).

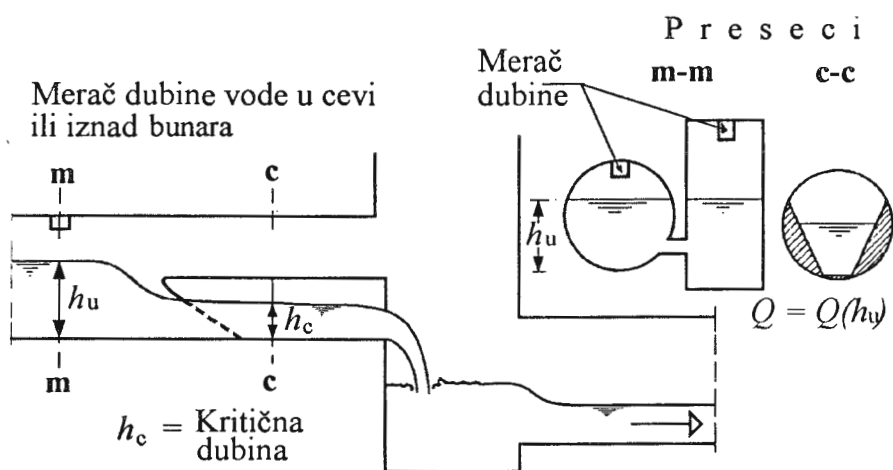


Slika 15. Varijanta II odredjivanje protoka merenjem dubine neposredno uzvodno od kaskade (kritične dubine)

3. Varijanta III – traženje stabilne veze $Q = Q(h)$

Kao što je već napomenuto, ugradjivanjeM suženja u kolektor na kraju cevi kroz suženje će se formirati kritična dubina a uzvodno od suženja će se zadržati mirno tečenje. Na ovaj način veza između uzvodne dubine h_u i protoka je stabilna i može se postići pouzdano merenje. U ovom slučaju radi se dakle o *konstrukcijskim modifikacijama* tj. unošenju novih konstrukcijskih elemenata u cev (fiksni ili prenosivi – videti slika 16). Najpovoljnije je ukoliko se ove konstrukcijske modifikacije urade za vreme ugradnje cevovoda. Nivo vode uzvodno od suženja može se meriti direktno u kolektoru ili u mernom bunaru koji se postavlja pored poprečnog preseka u kome se obavlja merenje. Gornji koncept merenja protoka je jednostavan i pouzdan. Razlog zbog

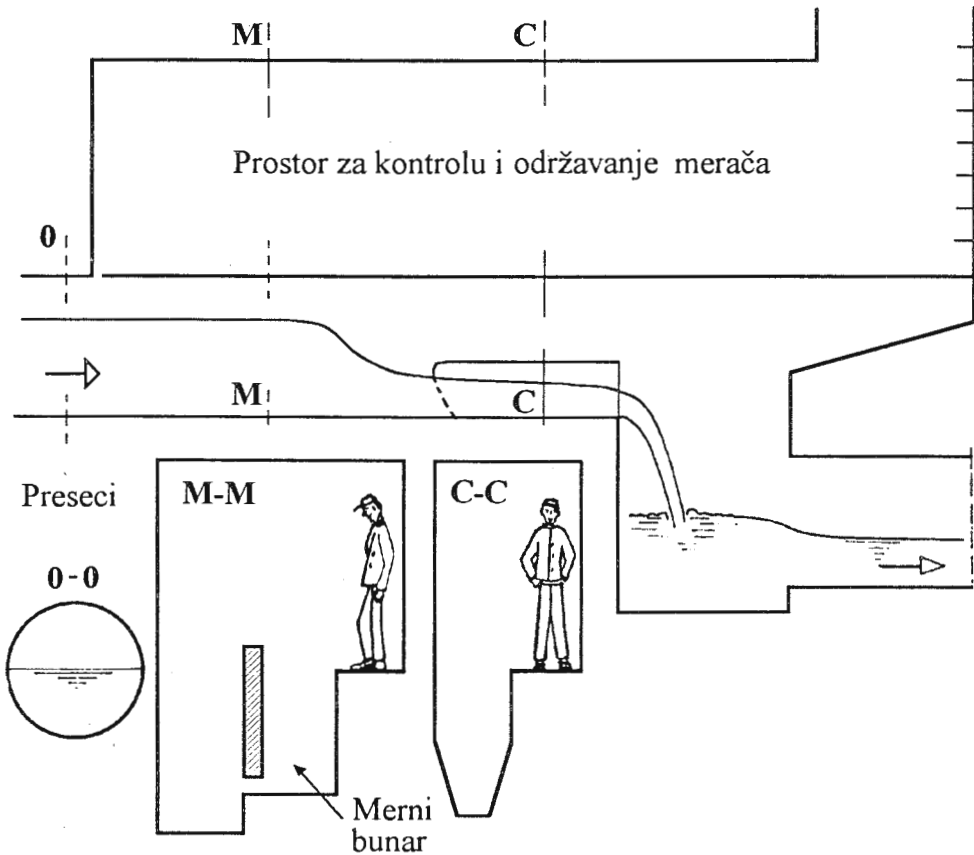
•koga ga često izbegavaju je zato što je na postojećem sistemu potrebno obaviti rekonstrukcije što nije ni jednostavno ni jeftino ako se radi naknadno a ne u isto vreme kada se i konstrukcija gradi. Postoji čitav niz rešenja pri kojima se ovo suženje posebno proizvodi i kao prenosivo montira u cevi. Jedan od problema koji se pri tome javlja je korektno uskladjivanje dimenzija prenosivih ("tipskih") merača sa postojećim kolektorom i uskladjivanje hidrauličkih uslova.



Slika 16. Kritična dubina u suženju kao princip za merenje protoka

4. Varijanta IV – potpuno prohodna merna stanica

Ova varijanta se primenjuje kod značajnijih i stalnih mernih mesta. Zahteva se da merno mesto u kolektoru bude potpuno pristupno radi postavljanja i održavanja instrumenata, kalibracije funkcije $Q(h)$, za održavanje i čišćenja mernog mesta itd. Ovo rešenje prikazano je na slici 17, a može se poboljšati dodatnim merama. Glavna prednost ovog rešenja je pristupnost (slika 4 i slika 17) i prohodnost, koje povećavaju pouzdanost merenja, jer se veliki broj nepravilnosti koje mogu kompromitovati merenja (zaprljanost senzora, neregularni hidraulički uslovi, istaložavanje nanosa, loše funkcionisanje senzora, promene u geometriji suženja, obavljenjena neprecizno ili ne obuhvata ceo opseg protoka, itd.)



Slika 17. Pristupna merna stanica sa suženjem za kritičnu dubinu

možu relativno lako otkriti i ukloniti. Stepen tačnosti i pouzdanosti na ovaj način se višestruko povećava. Nepovoljna strana ovog rešenja je visoka cena izgradnje koja je često ograničavajući faktor za njegovu širu primenu. Sa druge strane cena izgradnje ovakve stanice, mernog bunara se kompenzira povećanom hidrauličkom pouzdanošću, tačnošću itd.

5. Varijanta V – merenje pri nepovoljnim hidrauličkim uslovima

U mnogim slučajevima hidraulički uslovi ne omogućavaju da se

primeni bilo koje rešenje sa slika 4, 14, 15, 16 i 17. To su sledeće situacije:

- Strm nagib cevi – velike brzine, burno tečenje
- Cev dolazi često pod pritisak
- Često se javlja uspor sa nizvodne strane
- Tok opterećen nanosom
- Ostali problemi

U ovim slučajevima cena merne stanice se najčešće ne povećava zbog troškova izgradnje nego zbog dodatnih senzora i opreme koja treba da omogući merenje i u takvim uslovima.

6. Opšta procedura pri projektovanju

Postoje mnogi priručnici za projektovanje mernih uređaja. Jedna od obuhvatnih knjiga je *Weirs and Flums for Flow Measurements* Ackers-a i koautora [13]). Iako je knjiga namenjena projektovanju mernih uređaja u rečnim tokovima i otvorenim kanalima, izneta razmatranja mogu se primeniti i za kolektore sa slobodnom površinom. Na našem jeziku ovaj problem obradjen je u publikaciji Instituta za hidrotehniku Gradjevinskog fakulteta u Beogradu, pripremljenoj za seminar MEPROKS'80 u Zorniku radova [35]).

3.4 Principi merenja protoka i veze izmedju protoka i dubine

3.4.1 Grupe merenja

U prethodnom poglavlju pomenute su metode merenja protoka zavise od hidrauličkih uslova, a ovde će se iste detaljnije obraditi. U primeni su sledeće grupe metoda merenja protoka:

1. Merenje neporemećene dubine u kolektoru

Ova grupa obuhvata sve metode u kojima se protok odredjuje merenjem neporemećene dubine. Najpovoljnije je da se meri

neporemećena–normalna dubina. Ukoliko se dubina koja se meri razlikuje od normalne neophodno je da se obavi kalibracija veze od $Q(h)$ dopunskim merenjem. Jedan od pogodnih metoda da se to uradi je merenje rasporeda brzina i njegova integracija po poprečnom preseku za nekoliko različitih protoka.

2. Prelivi

Ovaj metod merenja protoka je pogodan za primenu ukoliko preliv već postoji na nekoj konstrukciji. Moguće ga je i posebno ugradjivati u tokove sa slobodnom površinom. U sistemima kanalizacije prelive nisu povoljni zato što dolazi do taloženja uzvodno od njih, ali se i primenjuju, posebno kao privremeni merači protoka.

3. Merni kanali i suženja

Postoji vrlo veliki broj različitih geometrija suženja koji se mogu koristiti kao merači protoka na ovom principu. Određivanje protoka se ponovo bazira na merenju dubine uzvodno od suženja, pretpostavljajući da je tečenje u suženju nepotopljeno sa donje strane (*modular flow*). U ovom slučaju ostvaruje se kritično tečenje u suženju i, konsekvntno, tečenje uzvodno od suženja je bez nepovoljnih nizvodnih uticaja. Detaljnije razmatranje uslova nepotopljenosti odnosno potopljenosti sa nizvodne strane prikazano je u Poglavlju 3.4.3.

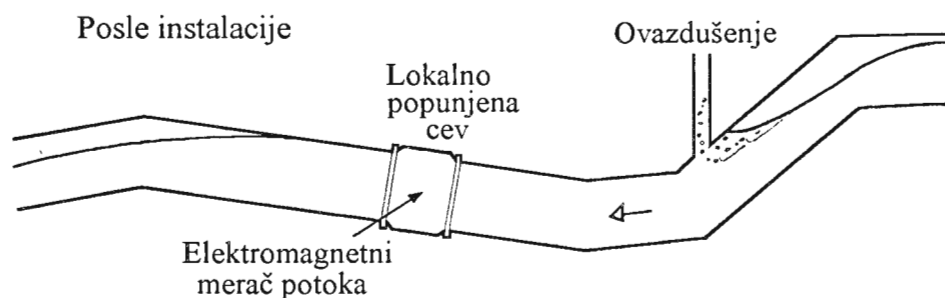
4. Metode koje se baziraju na merenju brzine u tački ili na merenju neke druge veličine

Kada se meri brzina u jednoj ili više diskretnih tačaka koje predstavljaju odredjene male elementarne površine, dobijeni podaci mogu se osrednjiti bilo duž vertikale bilo po elementarnim površinama. Dobijena informacija može se iskoristiti za odredjivanje protoka. Obično se, paralelno sa merenjem brzina, meri i dubina vode. Na ovaj način protok se dobija množenjem poprečnog preseka struje sa "prosečnom" brzinom u poprečnom preseku dobijenom na osnovu integracije polja brzina.

5. Integralno merenje protoka

Tipičan predstavnik ove metode je elektromagnetni merač protoka, koji se često koristi za merenje protoka kroz cevi pod pri-

tiskom. Pošto, u većini slučajeva u kolektorima sa slobodnom površinom vode, cev retko dolazi pod pritisak, primena ovog merača zahteva posebnu rekonstrukciju cevi (kao što je naprimer prikazano na slici 18). U ovom slučaju cev se lokalno spušta naniže i ponovo vraća na prvobitni nivo, kako bi se na uzlaznom delu cevi ugradio elektromagnetni merač. Pri tome je potrebno da se iz cevi odstrani uvučeni vazduh u preseku uzvodno od elektromagnetnog metrača.



Slika 18. Elektromagnetni merač protoka u kolektoru sa slobodnom površinom vode

6. Metode obeleživača (trasera) i metode razredjivanja

Ova metoda se, zbog svoje jednostavnosti, često koristi u otvorenim tokovima za merenje protoka. Za merenje u sistemima kišne kanalizacije nije pogodan zbog toga što je proces tečenja u ovim sistemima prekidan. Značajni protoci dešavaju se samo za vreme pljuskova, relativno kratko traju i teško je predvideti kada će se pojaviti, da bi se obavila solidna priprema za merenje ovom metodom.

Metode kalibracije

Pošto se većina od gore pomenutih metoda bazira na principu merenja jedne ili više dubina vode, kalibracija merača protoka mora se uraditi pre ugradnje merača protoka a zatim se u toku eksploatacije može redovno obnavljati. Najčešće se za kalibraciju merača sa normalnom dubinom, preliva i mernih kanala kao i merača koji se baziraju na merenju jedne brzine u tački obavlja posebnim merenjem rasporeda brzina i njegovom integracijom. Kalibracija se takodje može obaviti na

prototipu ili na meraču u stvarnoj veličini u hidrauličkoj laboratoriji. Za neke od standardnih preliva kalibracija nije potrebna jer je veza protoka i dubine dobro poznata na osnovu principa sličnosti, vodeći pri tom računa da se pri ugradnji takvih merača strogo ispoštuju uputstva za montažu i hidraulički uslovi koji obezbeđuju primenu principa sličnosti i pouzdana merenja.

3.4.2 Merač sa normalnom dubinom – prednosti i nedostaci

Po definiciji, kada je dubina u pravolinijskoj deonici kanala ili cevi sa slobodnom površinom konstantna tečenje je jednoliko i dubina se naziva normalnom. Nagib slobodne površine tečnosti je jednak nagibu dna kanala. Protok zavisi od dubine i hrapavosti zida cevi i pretpostavlja se da se može primeniti Šezi-Maningova (Chezy-Manningova) formula

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_o^{1/2}$$

u kojoj je

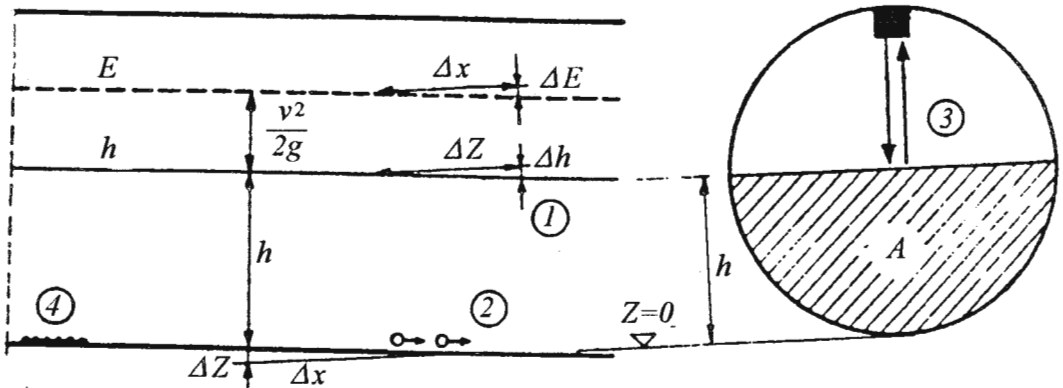
$1/n$ – Maningov koeficijent hrapavosti

A – poprečni presek

R – (A/O ; O = okvašeni obim) hidraulički radijus

S_o – nagib dna cevi (pri normalnoj dubini nagib cevi je jednak nagibu linije energije – S_e).

Protok se može odrediti merenjem normalne dubine pod uslovom da je koeficijent hrapavosti određen posebnim kalibracionim merenjima, pri kome su dubina i protok mereni na neki drugi način. Uslovi od 1–5 prikazani na slici 19. moraju biti ispunjeni da bi se pri merenju sa normalnom dubinom ostvarila zadovoljavajuća tačnost.

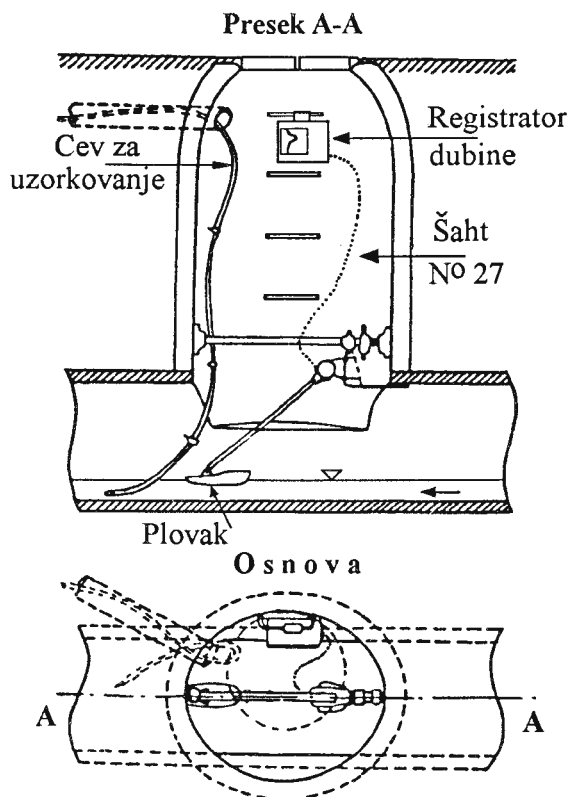


Slika 19. Određivanje protoka merenjem normalne dubine – uslovi za pouzdano merenje

Uslovi od 1 do 5 prikazani na slici 19. su sledeći:

1. U kolektoru nema uspora sa nizvodne strane,
2. Nema taloženja i odnošenja istaloženog nanosa,
3. Dubina se meri bez značajnijih poremećaja u toku – preporučuje se beskontaktno merenje,
4. Koeficijent hrapavosti određen posebnom kalibracijom,
5. Zanemarljiv uticaj neustaljenosti tečenja.

U sistemima kišne kanalizacije, ako je tok buran, normalna dubina se formira na relativno kratkom rastojanju nizvodno od mesta poremećaja. Za cevi sa mirnim tečenjem i značajnom hrapavošću normalna dubina se, ponovo, uspostavlja na relativno kratkom rastojanju uzvodno od mesta poremećaja. Tečenje bez uspora je pri tom neophodan uslov da bi se ostvarilo pouzdano merenje na ovaj način. Na slici 20. prikazan je jedan ovakav uređaj za merenje protoka pomoću normalne dubine na eksperimentalnom slivu *Fiedaker strasse* [12] u Cirihu. Normalna dubina se u ovom slučaju meri plovkom.

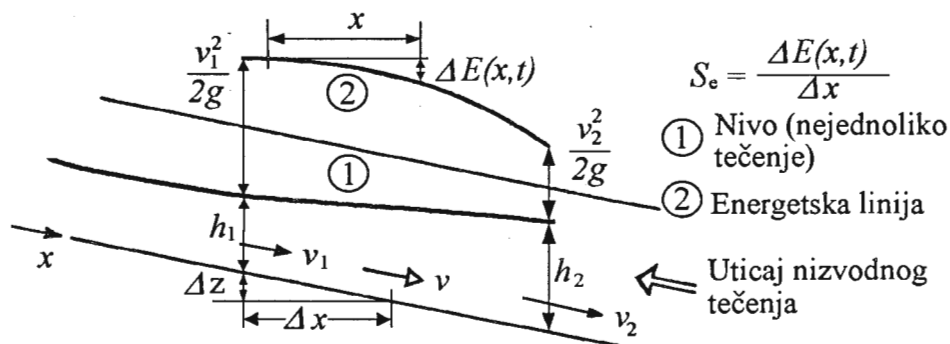


Slika 20. Primer merenja protoka pomoću merenja normalne dubine

U sistemima za odvođenje kišnih voda, protok se brzo menja i neustaljenost izaziva različitost nagiba linije energije S_e od nagiba dna kanala S_o i ta razlika se menja tokom konkretnog događaja (oticanja nakon pljuska). Blaga poboljšanja tačnosti mogu se dobiti ukoliko se uticaj neustaljenosti uzme u obzir. Jedan od načina da se dobije korigovani protok je sledeći:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} \sqrt{S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}}$$

gde je v – prosečna brzina za poprečni presek.



Slika 21. Dve merene dubine za određivanje protoka pri uslova neustaljenog ili nejednolikog tečenja

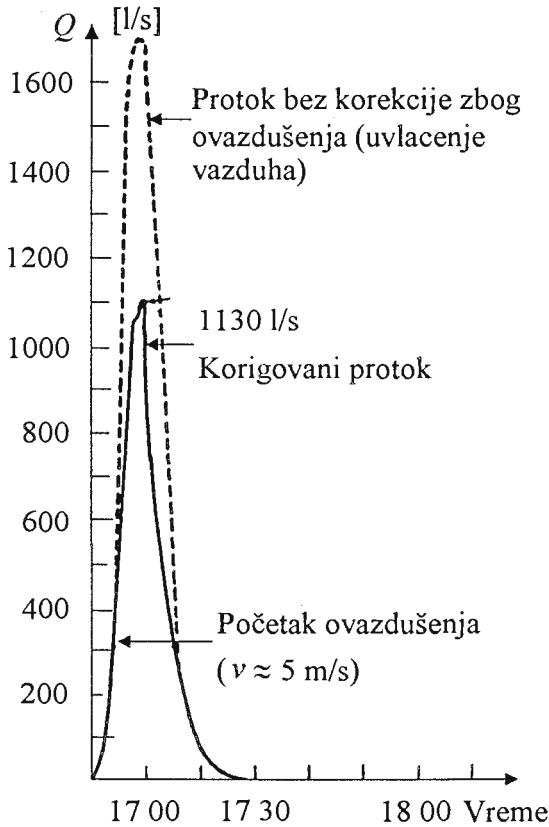
Ova korekcija može se obaviti samo ukoliko se kontinualno mere dubina vode i brzina u dva poprečna preseka na način kako je to prikazano na slici 21. Na žalost, ova vrsta merenja se retko primenjuje, tako da se korekcije koje je potrebno, obaviti obično ne rade.

Zbog uticaja uspora sa nizvodne strane kod mirnog tečenja, neustaljenosti i teškoća sa kojima se suočavamo kad merimo dve dubine (slika 21), merenje protoka pomoću normalne dubine (ili pomoću dve dubine) nije preterano pouzdano, sem ako se ne preduzmu posebne mere da se izbegne negativan uticaj neustaljenosti.

Odredjivanje hrapavosti cevi na terenu je neizbežno i potrebno je da povremeno ponovi jer se ista menja. Na primer, na kolektorima za kišnu kanalizaciju dolazi do abrazije na dnu cevi vučenim šljunkom. Pri ovakvom načinu merenja pojavljuju se i ostale greške posebno u slučaju kada je nagib dna kanala strm što izaziva velike brzine-buran režim. Pri tim uslovima često dolazi do uvlačenja vazduha u vodni tok i, ukoliko se ne obave korekcije zbog sadržaja vazduha, moguće je da se načine značajne greške u merenju. Kao primer prikazana je slika 22. na kojoj je dat hidrogram oticanja sa eksperimentalnog sliva *Fridacker strasse* za dva slučaja i to:

1. bez uzimanja u obzir prisustva vazduha u toku – isprekidana linija na slici 22,

2. uzimanjem u obzir prisustva vazduha – puna linija sa slike 22. (videti L. Dauber i B. Novak [15])



Slika 22. Uticaj uvlačenja vazduha na protok odredjen merenjem normalne dubine

3.4.3 Prelivi i merni kanali – nepotopljeno tečenje

Hidraulika preliva i mernih kanala detaljno je obradjena u mnogim knjigama (naprimer Ackers i koautori [13]) tako da se ovde neće detaljno ponavljati nego će se samo prikazati neki karakteristični problemi zbog toga što je o njima neophodno voditi računa pri izboru metode merenja i projektovanju merača. Opšti principi koji važe za prelive i merne

kanale sa slobodnom površinom mogu se primeniti i za zatvorene cevi ukoliko se u njima tečenje sa slobodnom površinom. Kada cev dodje pod pritisak nastaju velike razlike u odnosu na tečenje sa slobodnom površinom koje utiču na tačnost merenja. Povremeni dolazak cevi pod pritisak može se, sa stanovišta merenja, razmatrati na dva različita načina:

1. Merni objekat se projektuje i merna oprema bira na takav način da se mogu obaviti merenja za sva tri tipa tečenja: "sa slobodnom površinom– nepotopljeno, sa slobodnom površinom– potopljeno i tečenje pod pritiskom" (videti Poglavlje 3.4.4. i sliku 12).
2. Merenje obavljati kontinualno, ali koristiti podatke samo za slučaj kada je tok sa slobodnom površinom i bez uspora, a odbaciti ostale podatke za vreme potopljenosti ili za vreme dejstva uspora. Ovo zahteva poznavanje vremena početka i kraja neregularnosti tj. uspora i potopljenosti, za šta su potrebne dopunske informacije..

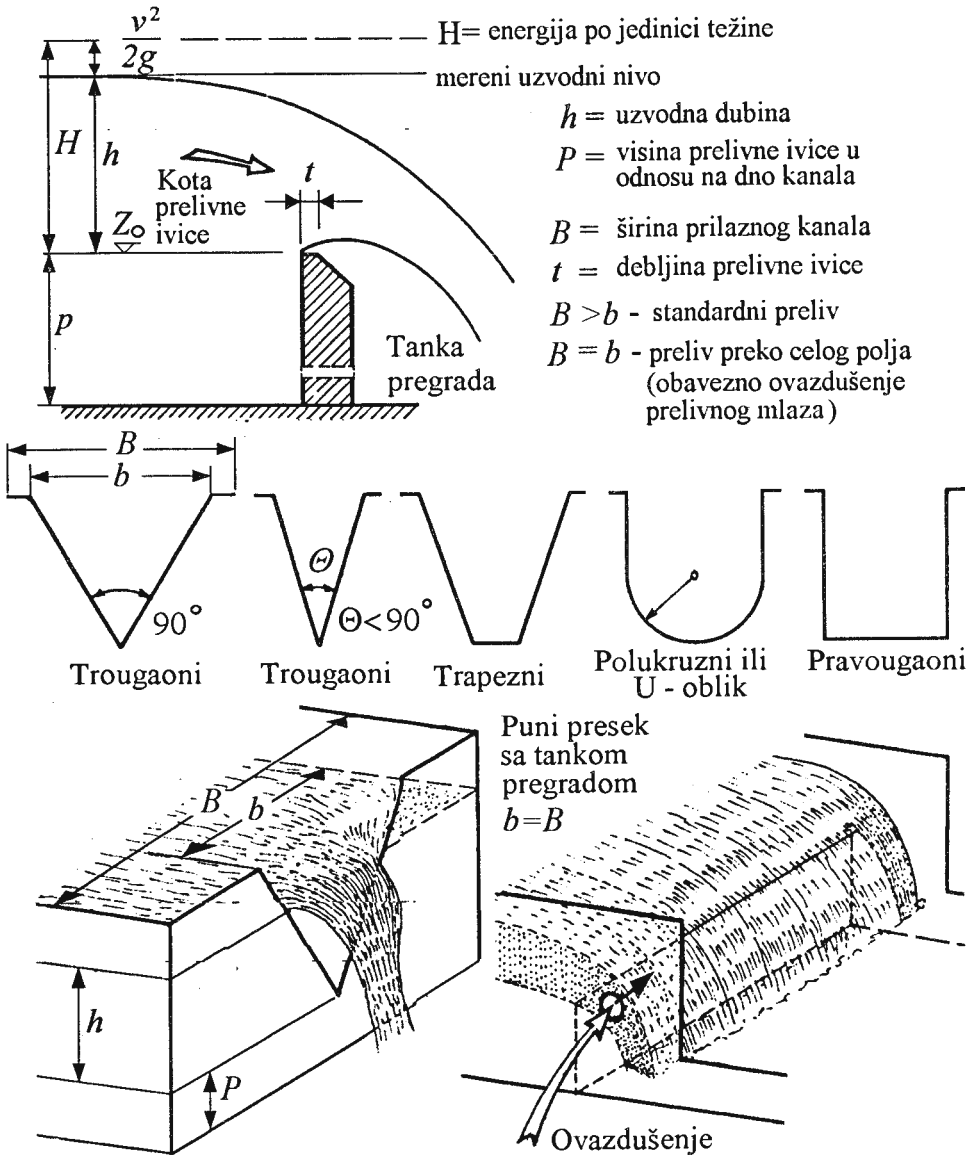
Prvi način je skuplji, jer zahteva kompleksniji merni objekat, kao i složeniju mernu opremu i obradu podataka. Drugi način je jeftiniji ali se gube značajne informacije o protocima za vreme "neregularnog tečenja". Postoji još jedan problem sa ovakvim merenjem, a to je da se mora poznavati vreme početka i kraja "neregularnosti", što zahteva merenje bar još jedne dubine vode, što ceo sistem poskupljuje.

Postoji svakako i treći način (koji se, na žalost, često javlja u praksi) a to je da se merenje obavlja kao da je nepotopljeno ignorišući, činjenicu da se tok povremeno nalazi pod usporom ili da je cev pod pritiskom. U ovom slučaju mogu da se pojave značajne greške nepredvidive veličine. Alternativno rešenje, koje se može primeniti za slučaj kada često dolazi do potapanja je korišćenje metode brzina–presek koja je opisana u Poglavlju 3.4.5.

Dve grupe uredjaja koje se mogu koristiti za merenje protoka su sledeće:

- Prelivi (tankozidni–oštroivični i sa širokim pragom)
- Merni kanali

Opis ovih metoda merenja koji se daje u nastavku je skraćen i obraćena je posebna pažnja na one aspekte koji se mogu javiti pri merenju u sistemima kišne kanalizacije.



Slika 23. Tankozidni oštroični prelivi – oblici i definicije

1. Prelivi

Glavna razlika između ove dve grupe je u tome što prelive čine prepreku u dnu toka ili dela kanala dok merni kanali ostavljaju dno slobodnim tako da se može obaviti transport čvrste faze, nanosa itd. Preporučuje se korišćenje preлива i mernih kanala u otvorenim tokovima gde se i uzvodni i nizvodni nivo nalaze u povoljnim uslovima. U kolektoru kišne kanalizacije uslovi nisu uvek povoljni tako da pri obavljanju merenja mora da se obrati posebna pažnja da bi obezbede zahtevani uzvodni i nizvodni granični uslovi. Najčešće varijante oštroičnih preлива su prikazani na slici 23. i to:

- (a) Oštroični trougaoni preliv (centralni ugao 90° ili manje)
- (b) Oštroični preliv pravougaonog preseka
- (c) Prelivi drugih geometrijskih preseka (trapezoidni, polukružni itd.)
- (d) Oštroični preliv cele širine pravougaonog kanala.

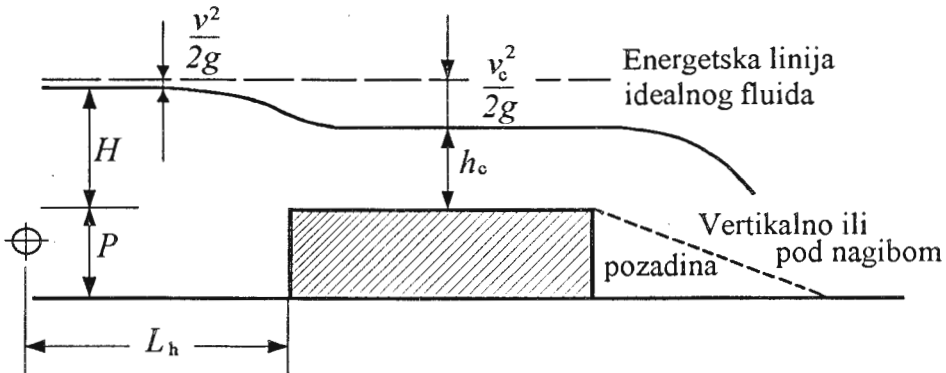
Na slici 24. prikazan je preliv sa širokim pragom. On se dakle postavlja po dnu kanala celom širinom upravno na pravac tečenja. Iako je on najpovoljniji za kanale pravougaonog poprečnog preseka, oni se nekad koriste i u kolektorima drugih geometrijskih oblika napr. u polukružnom kanalu. U oba gornja slučaja sa zahtevanom dužinom L relativno se lako formira kritična dubina preko preлива i to omogućuje da se dobije pouzdana veza između protoka i dubine.

Sem gore pomenutih preлива koji su manje ili više "klasični", u sistemima kišne kanalizacije, koriste se i njihove modifikovane verzije koje se uklapaju u relativno ograničen prostor kojim se raspolaže u šahtovima ili drugim pomoćnim konstrukcijama u sistemu. Modifikacije se primenjuju u slučajevima kada prilazni (uzvodni) uslovi nisu sasvim adekvatni. Neki od primera prikazani su na slici 25.

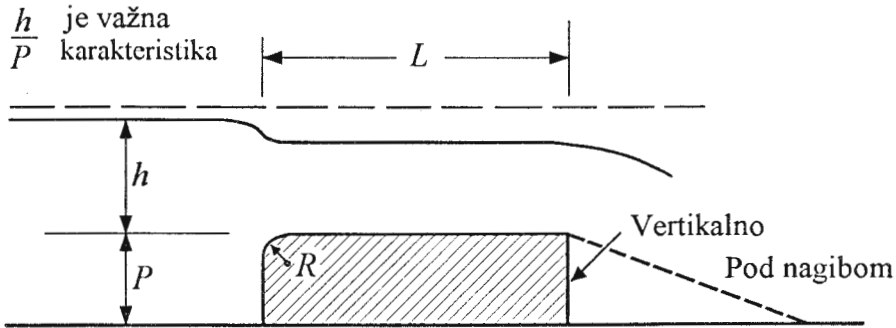
Pragovi i prelive kao merni objekti nisu najpovoljniji za merenje protoka u kolektorima kanalizacije. Glavni nedostatak je što izazivaju taloženje uzvodno od njih, i ukoliko se istaloženi materijal

ne čisti redovno, hidraulički uslovi u takvim mernim objektima neće biti odgovarajući, što može prouzrokovati velike netačnosti u merenju. Zbog toga što prilazni uslovi nisu uvek odgovarajući, funkcionalna nezavisnost izmedju protoka i dubine mora se uspostaviti bilo posebnim laboratorijskim ispitivanjem ili kalibracionim merenjima na terenu koja se moraju redovno obnavljati.

a) Pravougaoni (oštroivični) preliv



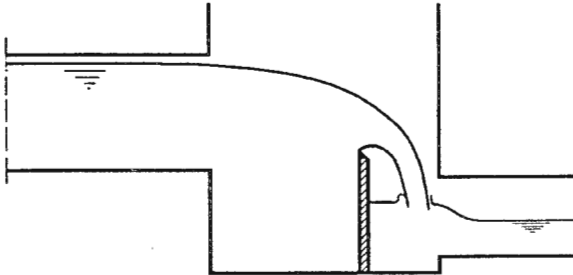
b) Zaobljeni - u pravcu toka



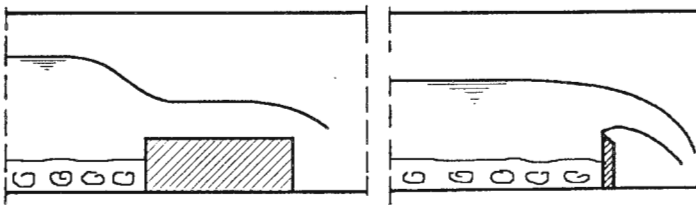
Slika 24. Preliv sa širokim pragom - geometrijski oblici

Od vrlo velikog značaja je da se testira, ili bar vidi, kako se ponaša merni sistem pri ekstremnim protocima. Često se dešava da su vrlo velike razlike izmedju pretpostavljenog režima tečenja i onoga što se u praksi stvarno dešava.

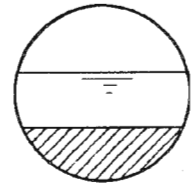
a) Trougaoni i "V" preliv u šahtu



b) Preliv preko širokog praga u kružnoj cevi



c) Preliv po punom preseku u kružnoj cevi



Slika 25. Neke od mogućnosti primene preлива za merenje protoka u cevima sa slobodnom površinom

U slučaju pravougaonog poprečnog preseka, ako se pretpostavi da je fluid idealan, veza između uzvodne energije u odnosu na kotu gornje ravni praga – (H) – (videti sliku 24.) i kritične dubine (h_c) je

$$H = h_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

Znajući da je za pravougaoni poprečni presek širine B , kritična dubina h_c jednaka

$$h_c^3 = \frac{Q^2}{g B^2} \quad \text{i} \quad \frac{h_c}{2} = \frac{v_c^2}{2g}$$

za protok idealnog fluida (Q_{id}) dobija se izraz

$$Q_{id} = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{2}} B \sqrt{2g H^3}$$

ili

$$Q_{id} = 0.386 B \sqrt{2g H^3}$$

U praksi se u uzvodnom poprečnom preseku meri dubina vode (h) a ne energija po jedinici težine u odnosu na prag (H). Veza između njih dve je:

$$h = H - \frac{v^2}{2g}$$

Pošto fluid nije idealan moraju se uzeti u obzir i gubici energije. Za realan fluid, protok se izražava u funkciji dubine vode h :

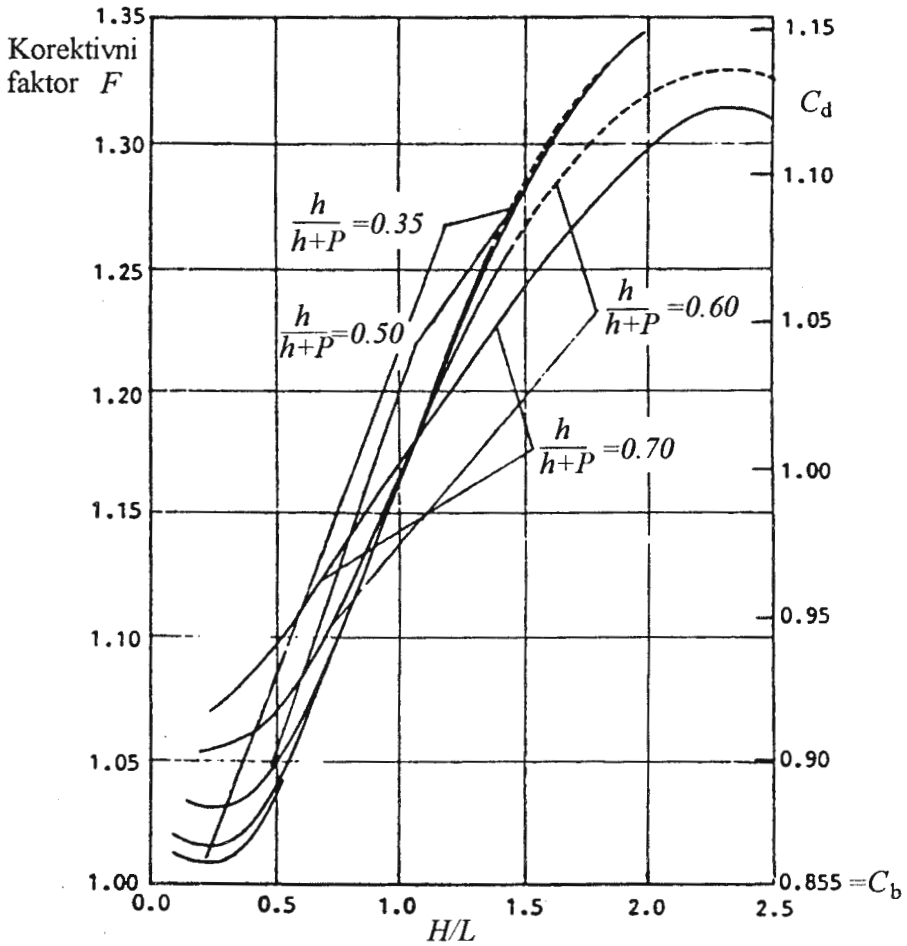
$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{2/3} C_v C_d B \sqrt{h^3}$$

Koeficijent C_v obuhvata uticaj brzine u prilaznom kanalu i jednak je $(H/h)^{3/2}$. Koeficijent C_d obuhvata gubitke energije koji uglavnom zavise od dva bezdimenzionalna geometrijska odnosa ili parametra, $\frac{h}{h+P}$ i $\frac{h}{H}$, a takodje i od hrapavosti i oblika uzvodnog lica praga (oštrovični ili zaobljeni). Koeficijent protoka C_d je približno konstantan za određeni opseg merenih dubina h tj. za $0.08 < h/L < 0.33$, i $0.16 < h/(h+P) < 0.36$. Eksperimentalnim istraživanjima J. Singer [36] je utvrdio njegovu osnovnu (baznu) vrednost na 0.848. Tu vrednost prihvatili su i britanski standardi.

Na osnovu svojih eksperimentalnih istraživanja A.D. Crable [15] preporučuje nešto veću vrednost. Za baznu vrednost za C_d ($C_d^b =$ bazni koeficijent protoka) uzima se 0.855 (tj. $C_d^b = C_b = 0.855$). Ta vrednost može se iskoristiti za izražavanje njene zavisnosti od $h/(h+P)$ i od h/L uvodeći korekcionni faktor F , tako da je

$$C_d = C_b \cdot F = 0.855 F$$

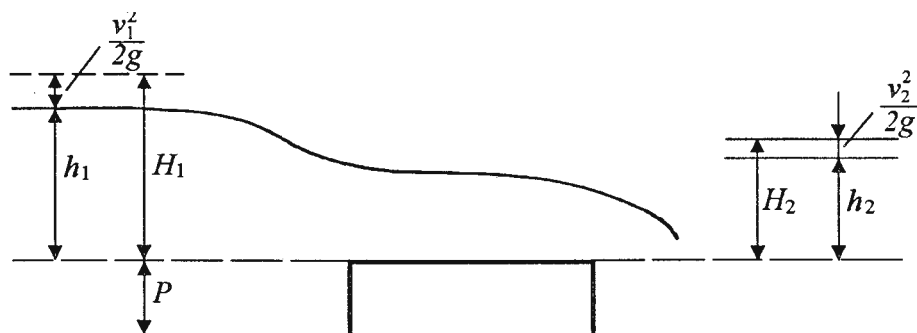
Uticaj odnosa h/L i $h/(h+P)$ na korekcionni faktor F prikazan je na slici 26.



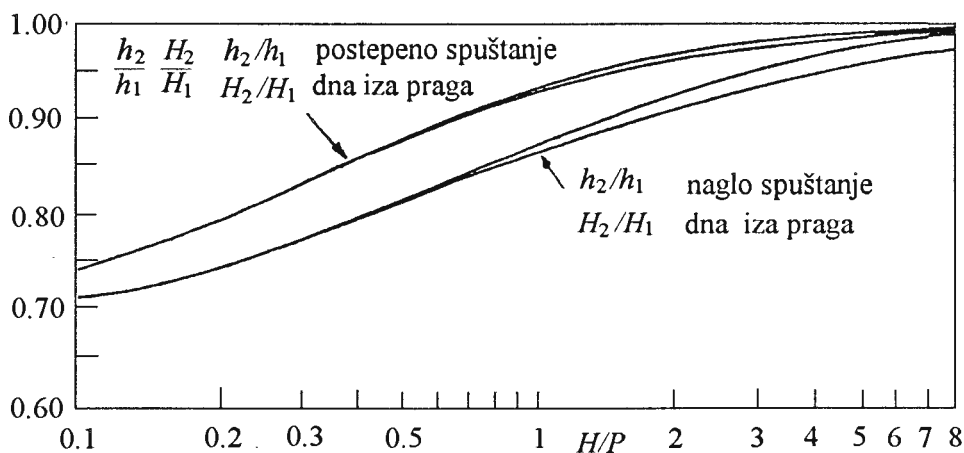
Slika 26. Koeficijent protoka C_d i korekcionni faktor F u funkciji od članova h/L i $h/(h+P)$, za preliv s širokim pragom na osnovu eksperimenata A.D. Crable-a [15]

Potrebno je napomenuti da je gornja veza izmedju koeficijenta protoka i h/L i $h/(h+P)$ primenjiva samo dok je tečenje preko preliva bez uticaja nizvodnih uslova (tj. tok nije potopljen –

tečenje je "modularno").



Slika 27. Definicije za granicu potapanja za preliv sa širokim pragom



Slika 28. Podaci o granici potapanja za široki prag sa zaobljenom uzvodnom ivicom, A.J.M. Harrison [18]. (videti sl.24 b)

Na osnovu rezultata G.W. Hall-a [16] potapanje nastaje kada faktor potopljenosti H_2/H_1 padne između 0.73 za niske Reynoldsove², brojeve i 0.83 za turbulentno tečenje preko glatkih površina

²Reynoldsov broj se ovde definiše kao $Re = U_c l / \nu$ gde je ν kinematski koeficijent viskoznosti, a U kritična brzina

tj.:

$$\text{faktor potopljenosti } \frac{H_2}{H_1} = \begin{cases} 0.73 & \text{za niske Re brojeve} \\ 0.83 & \text{za glatke površine} \end{cases}$$

U slučaju kada je gornja ivica čela uzvodnog praga zaobljena, gubici energije su niži, koeficijent protoka je viši i granica potopljenosti se menja. Podaci o koeficijenti protoka u zavisnosti od H/L mogu se naći u članku C.D. Smith-a [17]. Slični podaci o granici potapanja koji je objavio A.J.M. Harrison [18] za ovaj tip praga prikazani su na slici 28. i za prag sa vertikalnom i sa nagnutom nizvodnom stranom.

Za oštroične prelive veza između protoka i merene dubine teorijski se uspostavlja za prelivanje celom širinom sa sledećim pretpostavkama:

- Nema kontrakcije mlaza
- Po celoj konturi mlaza uspostavlja se atmosferski pritisak (hidrostatički pritisak jednak nuli)

Kad se primeni energetska jednačina, sa gore pomenutim uslovima, dobija se sledeća jednačina za prelivanje:

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[\left(h_1 + \frac{v_o^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_o^2}{2g} \right)^{3/2} \right]$$

Ako se uzme u obzir kontrakcija mlaza mora se uvesti koeficijent kontrakcije (C_c). Ovaj koeficijent je u vezi za uzvodnom kinetičkom energijom na sledeći način:

$$C_c \left[\left(1 + \frac{v_o^2}{2gH} \right)^{3/2} \right] = C_d \quad (\text{gde je } C_d \text{ koeficijent protoka}).$$

Iz toga proizlazi:

$$Q = C_d b \sqrt{g h_1^{3/2}}$$

Posmatrani koeficijent protoka zavisi od relativne uzvodne dubine ($\frac{H_1}{P}$). pri malim dubinama prelivnog mlaza mora se takodje uzeti u obzir i efekat površinskog napona. Kad se ova dva faktora uzmu u obzir dobija se sledeća modifikovana jednačina:

$$Q = C_d \left(\frac{h}{P} \right) \cdot b \sqrt{g (h_1 + h_\delta)}$$

Relativna uzvodna dubina uzima u obzir uticaj dolazne brzine i širine b tako da se protok može izraziti na sledeći način:

$$Q = C_o b \sqrt{g (h_1 + h_\delta)^3}$$

gde je h_δ korekciona dubina kojom se uzima u obzir efekat površinskog napona. Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja i za oblast $h_1 > 0.085m$ i $h/P < 1.8$, modifikovana jednačina W.R. White-a [19] za oštroični preliv preko cele širine pravougaonog kanala glasi:

$$Q = 0.564 \left(1 + \frac{0.15 h_1}{P} \right) b \sqrt{g (h_1 + h_\delta)^3}$$

pri čemu je za h_δ uzeta vrednost od 1 mm.

Gornja jednačina važi ukoliko se uzvodna dubina meri na relativnom rastojanju $L_h/P = 2.67$. Van ovog opsega tačnost se smanjuje. Za slučaj merenja u sistemima kišne kanalizacije, pošto se maksimalni očekivani protok teško precizno ocenjuje, mogu se pojaviti i značajne greške, ukoliko kapacitet preliva nije dobro dimenzionisan.

Ako se koristi tankozidni priliv sa trougaonim otvorom jednačina za protok glasi:

$$Q = C_d \tan \left(\frac{\Theta}{2} \right) \sqrt{g h_1^5}$$

gde koeficijent protoka uzima u obzir geometriju, prilaznu brzinu, kontrakciju i površinski napon. U bezdimenzionalnoj formi, uticaji viskoznosti i površinskog napona se izražavaju Reynolds-ovim (Re) i Weber-ovim (We) brojem, tj. $C_d = f(Re, We)$ i za velike vrednosti Re i We broja postaje konstantan.

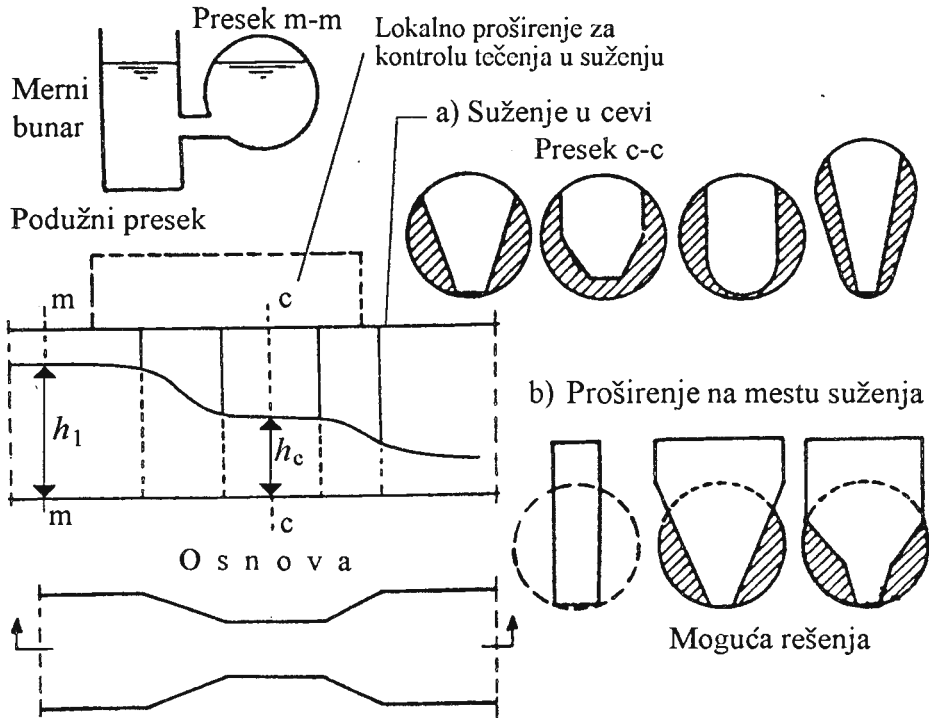
Potrebno je napomenuti da većina empirijskih veza koje definišu koeficijent protoka C_d zanemaruje uticaj prilazne brzine kao da se radi o isticanju iz rezervoara. Za primenu u sistemima kišne kanalizacije preporučljivo je da se urade laboratorijska ispitivanja, da bi se na osnovu konkretne geometrije i prilaznih uslova pouzdanije utvrdila veza $Q(h_1)$. Većina merenja u prirodi je vrlo sumnjive tačnosti za vreme ekstremnih protoka, kada se obično desi da je on izvan opsega za koji je preliv testiran i kada su prilazni uslovi različiti od onih za koje su obavljani eksperimenti. Ako se takav slučaj desi, potrebno je preispitati adekvatnost tog merača i eventualno ga prepraviti i prekalibrisati.

2. Merni kanali – suženje za merenje protoka

Glavni nedostatak preliva je, kao što je već rečeno, izazivanje taloženja na uzvodnoj deonici. U kanalizacionim sistemima taloženje je vrlo nepovoljno i treba ga izbeći kad god je to moguće. Alternativni način za merenje protoka u otvorenim kanalima je konstrukcija mernih kanala (mernih suženja). On se sastoji od suženja u kanalu ili u cevi. Uzvodno od suženja tok je miran ($Fr < 1$) a kroz suženje voda teče sa kritičnom dubinom ($Fr = 1$). Pomenuti hidraulički uslovi omogućavaju uspostavljanje jednoznačne veze između protoka i dubine. Povoljnije je da se mere dubine uzvodno od suženja. Merenje kritične dubine u suženju je manje povoljno, jer položaj kritične dubine zavisi od protoka – videti sliku 29.).

U principu, suženje se ne može proizvoljno postaviti u cevi. Izbor lokacije za postavljanje, izgradnja i uklapanje moraju se bazirati na kriterijumima tačnosti i pogodnosti za merenja – videti

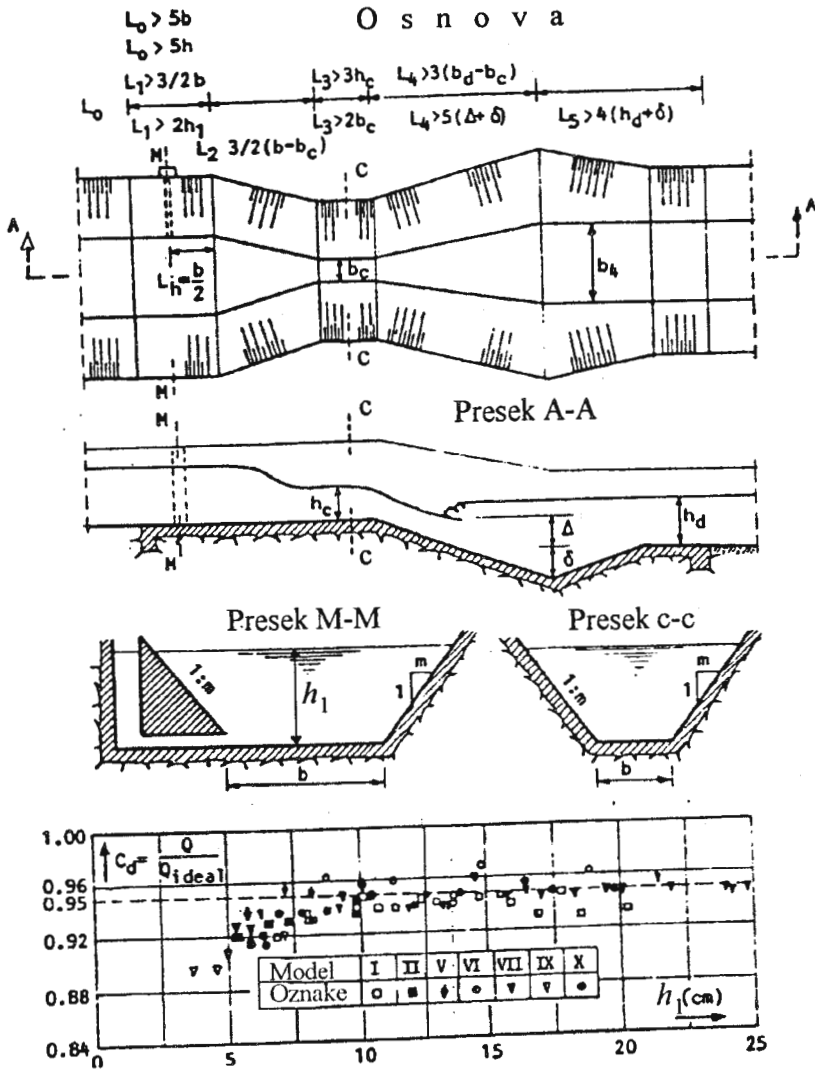
Poglavlje 3.3. Poprečni presek u suženju može biti proizvoljan: pravougaoni, trapezni, trougaoni, kombinovani itd. (slika 29).



Slika 29. Merni kanali sa kritičnom dubinom u suženju – strujna slika i poprečni preseci

Radi poboljšanja uslova merenja i održavanje preporučljivo je obezbediti pristup mernom preseku. Za tu svrhu se projektuje komora u koju se može ući. Geometrija suženja može da bude takva da ima dovoljnu dužinu za ceo opseg mernog protoka ili da ima skraćenu dužinu suženja (kao npr. Parshall, "skraćeno suženje" – (*cut-throat*, itd.).

U principu, za oba tipa veza između merene dubine i protoka je jednoznačna ali za merne kanale sa dovoljnom dužinom suženja, koeficijent protoka je skoro konstantan u celoj oblasti mernog opsega osim za oblast malih protoka (za dubine do 10 cm). U



Slika 30. Koeficijent protoka u zavisnosti od uzvodne dubine za seriju mernih kanala trapeznog preseka sa dovoljnom dužinom suženja (G. Hajdin i koautori [20])

Napomena: Principi sličnosti ovde važe – Legenda i objašnjenje su dati u Tabeli 1

Model	Uzvodni presek		Širina dna u suženju b_c [cm]	$\frac{b_c}{b}$	Spuštanje dna Δ [cm]
	Sirina dna [cm]	Nagib kosine m			
I	40	0 pravou- gaoni	32	0.8	4
II	20		16		4.1; 0
III	10		8		2.1; 0
IV	20		6		2
V	10		6		2
VI	20	1	10	0.5	2.3
VII	20		5.3; 1		
VIII	10		0	0	1.5
IX	5		trougaoni	0.5	
X	20		1.5	2	0.1
XI	20	2	10	0.5	2
XII	13		2.6	0.2	1
XIII	10		0	0	0

Tabela 1: Tipovi ispitivanih modela (G. Hajdin i koautori [20] i [21])

skraćenom suženju položaj kritične dubine se menja zbog zakrivljenosti strujnica, pa je stoga koeficijent protoka zavisn od dubine. Zbog toga su narušeni principi sličnosti i svaki pojedinačni tip mora se pojedinačno kalibrisati. Kada se energetska jednačina za idealni fluid primeni za uzvodni presek ($m - m$ na slici 29) i za presek u suženju $c - c$, dobija se:

$$\left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right)_{id} = \left(h_c + \frac{v_c^2}{2g} \right)_{id}$$

Kombinovano sa jednačinom kontinuiteta

$$v_1 A_1 = v_c A_c$$

dobija se:

$$Q_{id} = \sqrt{2g(h_1 - h_c) \frac{A_2^2 A_c^2}{(A_1^2 - A_c^2)}}$$

Pošto je tečenje u suženju sa kritičnom dubinom, može se napisati dopunska jednačina

$$\frac{Q^2 b_c}{g A_c^3} = 1$$

gde je b_c širina vodnog ogledala za presek u suženju, a A_c odgovarajući poprečni presek.

U gornje dve jednačine postoje dve nepoznate veličine, protok Q i kritična dubina u suženju h_c . Širina b_c u suženju kao i poprečni presek A_c mogu se izraziti u funkciji od h_c . Određivanje protoka pri nepotopljenom tečenju bazira se na merenju uzvodne dubine h_1 . Proračun protoka za idealni fluid Q_{id} obavlja se iterativnim rešavanjem gornje dve jednačine. Realan protok se dobija množenjem dobijenog Q_{id} koeficijentom protoka C_d . Za male uzvodne dubine (približno manje od 5 – 10 cm) koeficijent C_d zavisi od površinskog napona tako da se on menja sa dubinom, dok za veće dubine on je približno konstantan za prelive sa dugačkim suženjem.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja za kanal sa dugačkim suženjem sa trapeznim poprečnim presekom (G. Hajdin i koautori [20]) prikazani su na slici 30. i u Tabeli br. 1.

U slučaju da je suženje kratko ili potpuno izostavljeno kao što je slučaj kod R.I. Parshall-a [22], skraćenog suženja [23], HS kanala [24] itd. jednoznačna veza između protoka i dubine mora se uspostaviti za svaki kanal posebnim laboratorijskim testovima. Za neke tipove kanala moraju se sprovesti i ispitivanja na terenu.

Pošto su kanali sa kritičnom dubinom laki za izvodjenje mnogi proizvođači opreme za merenje protoka razvili su njihov sopstveni produkt u okviru pokretne merne stanice i oni se relativno lako mogu naći na tržištu.

3.4.4 Potopljeno prelivanje

Za vreme eksploatacije sistema dešava se da merni preliv ili merni kanal bude potopljen sa nizvodne strane – videti sliku 31. Ako se uređaj za merenje protoka potopi, veza izmedju protoka i dubine koja je uspostavljena za nepotopljene uslove više ne važi. U uslovima potopljenosti merenje protoka je mnogo manje pouzdano i mnogo manje tačno nego u slučaju nepotopljenog tečenja.

U uslovima potopljenog tečenja moraju se meriti najmanje dve dubine (uzvodna i nizvodna). U literaturi nema mnogo podataka o eksperimentima sa potopljenim prelivanjem. Navešće se neki eksperimenti izvedeni za ovu oblast strujanja kada važe sledeća razmatranja:

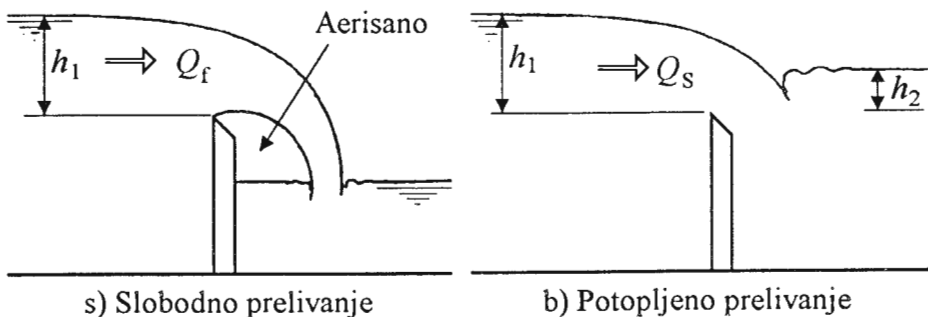
1. Tankozidni (oštroivični) prelivi (J.R. Villemonte [25]). Nizvodni nivo vode h_2 treba da se meri nizvodno od zone talasanja izazvanim prelivnim mlazom. Na osnovu eksperimenata Vilemonte-a primenjuje se sledeća jednačina:

$$\frac{Q_s}{Q_f} = \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n \right]^{0.385}$$

gde je

Q_f = protok za slobodno prelivanje sa uzvodnom dubinom h_1

Q_s = protok pri potopljenom prelivanju sa dubinom h_2 nizvodno od preliva



Slika 31. Nepotopljeno i potopljeno prelivanje preko tankozidnog-oštroivičnog preliva

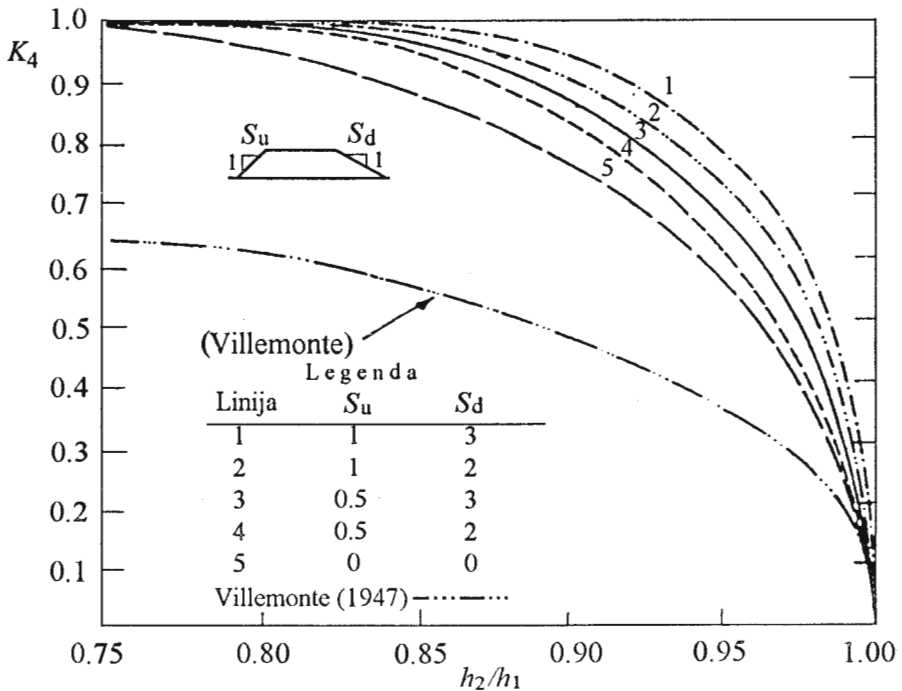
$n = 1.5$ za pravougaoni preliv

$n = 2.5$ za trougaoni preliv

2. Prelivi sa širokim pragom

Kad se dostigne granica potapanja protok zavisi od uzvodne (h_1) i nizvodne (h_2) dubine, ili bolje rečeno od uzvodne i razlike ili odnosa između uzvodne i nizvodne dubine tj. $Q = Q(h_1, h_1 - h_2)$ ili

$$Q = Q(h_1, h_2/h_1).$$



Slika 32. Uticaj potopljenosti na dopunski koeficijent protoka preko širokog preliva (K.G. Ranga Raju i koautori [26]).

Za preliv sa širokim pragom i sa vertikalnim i sa nagnutim licem K.G. Ranga Raju i koautori [26], prikazali su njihove rezultate zajedno sa rezultatima drugih autora za potopljeno prelivanje. Oni su jednačinu za potopljeno prelivanje izrazili na sličan način kao za nepotopljeno tj.:

$$Q_s = C \cdot K_1 K_2 b \sqrt{g h_1^{3/2}} K_4$$

Pri ovome su korišćene sledeće oznake:

$C = f(h_1/(h_1+P))$ uzima u obzir uticaj uzvodnih prilaznih uslova slično kao kod nepotopljenog preliivanja

K_1 uzima u obzir efekat površinskog napona

K_2 uzima u obzir gubitke na trenje preko preliiva i

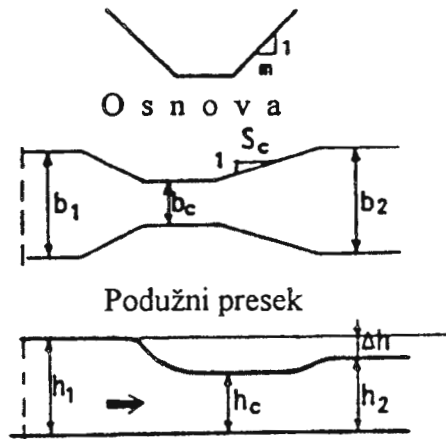
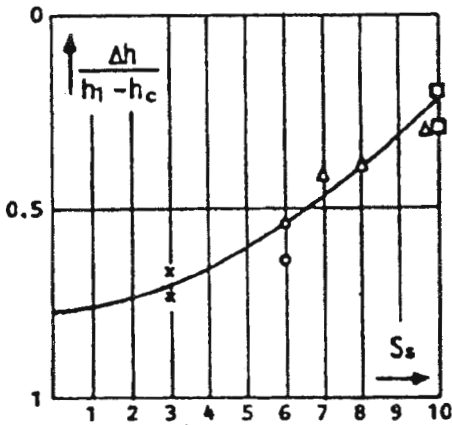
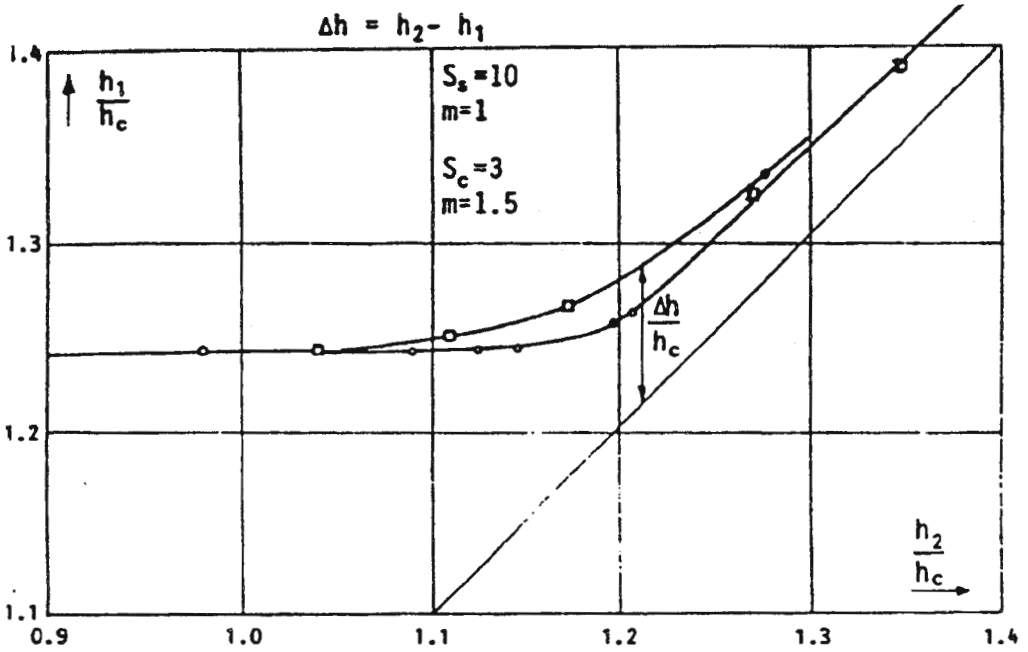
$K_4 = f(h_2/h_1)$ uzima u obzir uticaj potopljenosti.

Koeficijenti K_1 i K_2 se pojavljuju i u slučaju slobodnog nepotopljenog preliivanja. Za preliv sa nezaobljenom ivicom kao i za prelive sa različitim nagibima uzvodne i nizvodne rampe funkcije K_4 od h_2/h_1 su prikazani na slici 32.

Merenje protoka pod ovim uslovima je manje tačno jer je razlika $h_1 - h_2$ relativno mala i moguće je da se pojave velike greške, sem ako se ne preduzme posebna predostrožnost da se one smanje.

3. Kanali sa kritičnom dubinom

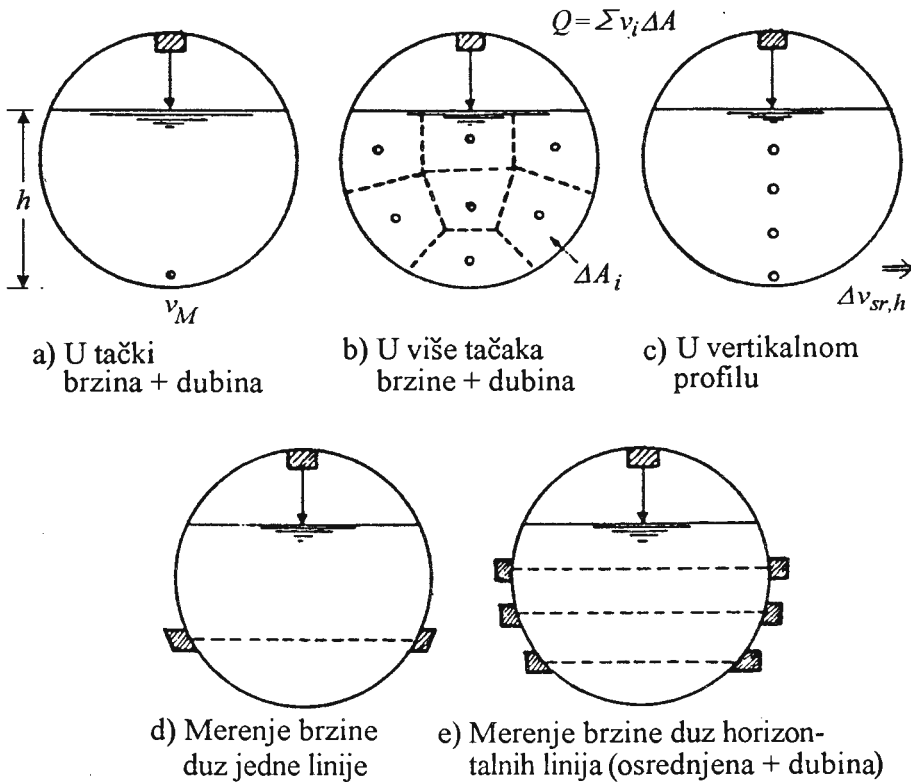
U hidraulici je poznato da su kanali sa kritičnom dubinom u suženju i dovoljnom dužinom suženja otporniji na potapanje sa nizvodne strane. Potapanje će nastupiti kasnije ako je prelaz sa suženja na nizvodne poprečne preseke postepen, na koji način se omogućava da se veći deo kinetičke energije u suženju pretvori u potencijalnu. Uticaj bočnog nagiba poprečnog preseka kanala S_s na granicu potapanja prikazan je na slici 33. zajedno sa uslovima potapanja (G. Hajdin i koautori [20]). Na toj slici je sa Δh označena razlika uzvodne i nizvodne dubine pri početku potapanja.



Slika 33. Granica potapanja i tečenje u uslovima potopljenosti za trapezni kanal sa velikom dužinom suženja (G. Hajdin i koautori [20])

3.4.5 Metode sa integrisanjem polja brzina

Merenje protoka pomoću preliva i suženja kao što je opisano u prethodnim poglavljima je relativno tačno i zahteva konstrukciju, ili bar montiranje merača ili suženja u cev, a nekada i konstrukciju specijalne merne gradjevine. Alternativa ovom rešenju je grupa metoda po kojima se, sem dubine vode, meri brzina u poprečnom preseku. Brzina se može meriti na jedan od sledećih načina (videti sliku 34.):



Slika 34. Različite varijante za metod integrisanja brzina za merenje protoka

Napomena: senzoru za merenje brzina može biti pridodat senzor za dubinu tako da sačinjavaju jedinstvenu celinu

- (a) U jednoj tački poprečnog preseka
- (b) U jednoj tački na površini vode

- (c) U nekoliko tačaka poprečnog preseka
- (d) Duž jedne linije (prosečna brzina duž te linije)
- (e) Duž nekoliko linija
- (f) Prosek za ceo poprečni presek

Poslednji slučaj f) je pogodniji za merenje tečenja u punoj cevi (videti napr. sliku 18. za elektromagnetni merač protoka).

Protok se dobija integraljenjem polja brzina preko celog poprečnog preseka:

$$Q = \int_A v \, dA$$

Posmatrani integral približno je jednak sumi proizvoda:

$$Q = \sum v_i \Delta A_i$$

videti sliku 34 (b) ili

$$Q = A v_{sr}$$

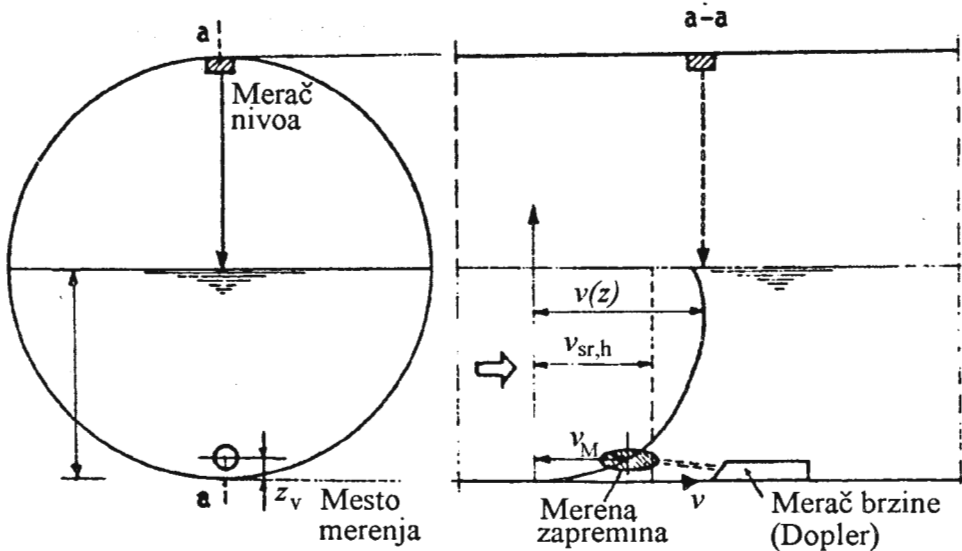
Ako se brzina meri u jednoj tački ili u više tačaka duž vertikalne centralne linije, pretpostavlja se da postoji jednoznačna veza izmedju brzina u toj tački (v_M) ili brzine osrednjene duž te vertikalne linije ($V_{sr,h}$) i prosečne brzine za ceo poprečni presek v_{sr} .

$$v_{sr} = c_1 v_M \quad \text{odnosno} \quad v_{sr} = c_2 v_{sr,h}$$

Na osnovu izmerene dubine može se sračunati poprečni presek struje i tada se protok dobija množenjem prosečne brzine sa poprečnim presekom (metod brzina presek). Potrebno je da se uoči razlika izmedju tri različite brzine koje se tu javljaju:

- v_m – brzina koja se meri u tački ili osrednjena brzina u maloj elementarnoj zapremini kao što je to prikazano na slici 34 (b) i na slici 35. Potrebno je takodje napomenuti da ta kontrolna zapremina fluida u kojoj se obavlja merenje ne mora da se podudara sa zapreminom u kojoj se nalazi senzor. Na primer, ako se za merenje brzine koristi ultrazvučni senzor sa doplerovim efektom, te dve zapremine se razlikuju.

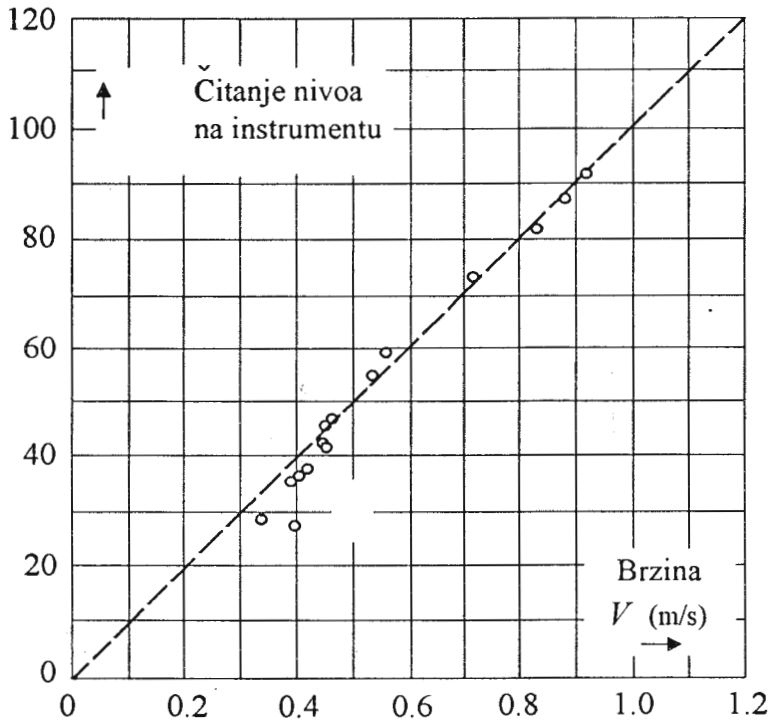
- $v_{sr,h}$ – prosečna brzina u jednoj vertikalnoj ravni (preseku a-a na slici 35.
- v_{sr} – prosečna brzina za ceo poprečni presek



Slika 35. Mogući principi merenja protoka metodom brzina-površina sa jednim senzorom za brzinu

Kod mnogih proizvođača opreme senzori za brzinu i dubinu su uklopljeni u jedno kompaktno kućište. U svakom slučaju, pre nego što se pristupi merenju po bilo kojoj od gornjih metoda, preporučljivo je da se iskalibrišu uređaji za merenje brzine u tački ili duž linije ili da se kalibracija obavi alternativnom metodom za merenje protoka u laboratoriji.

Jedan primer kalibracije senzora za merenje brzine sa dvostrukim ultrazvučnim zrakom koje je obavio R.H.J Sellin [27] prikazan je na slici 36. U ovom testu ultrazvučni senzor je kalibrisan pomoću mikrokriila.



Slika 36. Rezultat kalibracije ultrazvučnog senzora pomoću mikrokriila³ (R.H.J. Sellin [27])

U slučaju kada se primenjuje serija ultrazvučnih senzora prosečna brzina duž jedne horizontalne linije dobija se pomoću para ultrazvučnih glava postavljenih ukoso u odnosu na pravac strujanja (slika 37). Senzori rade naizmenično u dva moda, slanja i primanja signala.

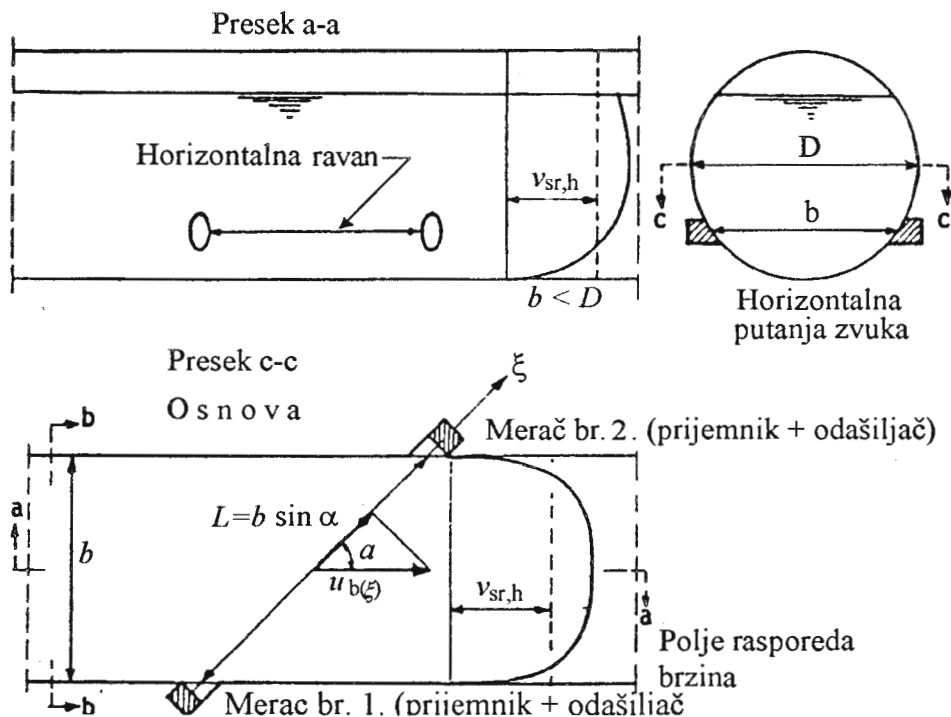
Kada jedan senzor radi u modu slanja signala, meri se vreme putovanja signala u nizvodnom smeru (t_d). Slično tome, kada drugi senzor radi u modu slanja (senzor jedan u modu prijema), meri se vreme putovanja u uzvodnom smeru (t_u). Prosečna brzina fluida duž ovih horizontalnih putanja (u ovoj horizontalnoj ravni) može se izračunati na osnovu poznavanja ova dva vremena:

$$v_{sr,b} = \frac{b \sin \alpha}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right)$$

³Mikrokriplom je obavljena kontrolna kalibracija - merenje brzine u istoj tački. Dobijena je linearna zavisnost za ultrazvučni senzor.

$v_{sr,b}$ – prosečna brzina fluida u horizontalnoj ravni (b) duž ultrazvučnog zraka

$$v_{sr,b} \neq v_{sr,h} \quad v_{sr,b} \neq v_{sr}$$



Slika 37. Princip merenja prosečne brzine duž jednog horizontalnog ultrazvučnog zraka

Ako postoji samo jedan par senzora izmerena brzina ($v_{sr,b}$) koristi se za nalaženje prosečne brzine u preseku (v_{sr}). Ta veza se uspostavlja posebnom kalibracijom. Pod uslovom da je, na osnovu izmerene dubine, poznat poprečni presek, moguće je izračunati protok. Primer primene više parova ultrazvučnih senzora u merenju protoka u sistemu kišne kanalizacije prikazan je u članku A. Guillon [5] i A. Guillon i koautori [28].

Visoka pouzdanost merenja pomoću izmerene brzine u tački može se postići samo ako je veza između protoka i jedne izmerene dubine stabilna i ako se obavi korektna kalibracija veze između te merene brzine i prosečne brzine u poprečnom preseku. U protivnom može se očekivati veliko rasipanje rezultata (videti poglavlje o tačnosti). Pošto senzor nije osetljiv na pravac

brzine mogu se pojaviti velike greške u slučaju kada dodje do povratnog strujanja.

U Velikoj Britaniji u velikoj primeni su senzori sa kombinovanom ultrazvučnim meračem brzina i sensorom za dubinu zbog toga što ih je relativno lako postaviti u tok kolektora i takodje premestiti na drugu lokaciju. Priručnik WRC (Water Resources Center) [1] sadrži dovoljno informacija i instrukcija za merenje koja se skoro isključivo baziraju na ovom principu merenja protoka.