

gornjem toku Save (Bohinjsko jezero i dr.), koja svojim retardacijskim djelovanjem povećavaju male vode. Slično je i na većim pritocima Save. Na Drini specifični protoci opadaju s povećanjem površine sliva. U profilu Pive ( $F = 835 \text{ km}^2$ ) specifični protok s frekvencijom pojave od 95% iznosi  $10,81 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , u Bastasima ( $F = 3172 \text{ km}^2$ ) 8,2, a u Zvorniku ( $F = 17375 \text{ km}^2$ )  $2,81 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . U slivu Drine uzvodno od Zvornika nalaze se paleozojsko-mezozojske klastične stijene slabe propusnosti, još uzvodnije pojavljuju se karbonske naslage s ograničenim krškim pojavama, a u najvišem dijelu sliva visoko razvijeni krš. Idući uzvodno, sposobnost tla da prihvati vode postaje sve veća, što utječe na povećanje malih specifičnih protoka. To vrijedi za Krku, Kupu, Vrbas i Bosnu. Vrlo niski mali specifični protoci pojavljuju se na svim lijevim pritocima Save nizvodno od Sutle. Tako npr. na Česmi kod Bosiljeva (površina sliva  $2406 \text{ km}^2$ ) specifični protok s frekvencijom pojave od 95% iznosi samo  $15 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . To se područje sliva Save sastoji od stijena manje poroznosti i slabije sposobnosti akumuliranja vode.

Male se vode određuju statističkim metodama na bazi zakona razdiobe kao i velike vode. Za praksu, međutim, nemaju značenja male vode s vjerojatnošću pojave od 99% ili 99,9%, pa se obično obređuju mali protoci s vjerojatnošću pojave od 95%, jer duže trajanje malih voda može izazvati poteškoće za vodoopskrbu, plovidbu i sl.

Povećanje malih voda iziskuje regulaciju otjecanja, njegovo djelomično izravnjanje u skladu s potrebama poljoprivrede, vodoopskrbe, energetike itd.

LIT.: A. F. Meyer, The elements of hydrology. John Wiley, New York 1928. — M. Pardé, Fleuves et rivières. Collection Armand Colin, Paris 1933. — R. K. Linsley, M. A. Kohler, I. L. H. Paulhus, Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company, New York-Toronto-London 1949. — C. W. Thornthwaite, The measurement of potencial evapotranspiration. John P. Mather Seabrook, New Jersey 1954. — E. Nemet, Hidrológia és hidrometria. Tankönyvkiadó, Budapest 1954. — N. C. Matalas, B. Jacobs, A correlation procedure for augmenting hydrologic data. U. S. Geological Survey 1964. — A. P. Концаииниус, Испарение в природе. Гидр. метеор. издат. Ленинград 1968. — D. Srebrenović, Problemi velikih voda. Tehnička knjiga, Zagreb 1970. — V. Yevjevich, Stochastic processes in hydrology. Water resources publications, Fort Collins, Colorado 1972.

D. Srebrenović

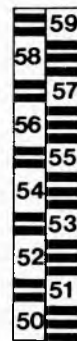
**HIDROMETRIJA**, znanstvena disciplina o metodama i tehnici mjerenja i osnovne obrade različitih karakteristika vezanih uz vodu u svim njenim oblicima pojavljivanja na Zemljinoj kugli. Smatra se još uvijek dijelom hidrologije iako sadrži mnogo elemenata hidraulike. Hidrologija naročito, a hidrotehnika u cjelini, sve svoje metode, zaključke i akcije temelji na podacima izmjerenim na terenu ili u laboratoriju, dakle na podlogama kojima se sakupljanjem i osnovnom analizom bavi hidrometrija. Osnovni su zadaci hidrometrije: razrada metoda i pribora za kvantitativno određivanje i proučavanje elemenata režima voda, obrada podataka mjerenja dobivenih na bazi različitih metoda i pribora, organizacija mreže opažaćkih stanica radi dobivanja optimalnih informacija. Dvije su osnovne metode hidrometrijskih radova: ekspedicijska metoda (povremena terenska mjerenja na proizvoljno odabranim točkama) i stacionarna metoda (mjerenja na stalnim hidrološkim stanicama ili stalnim mjernim točkama). S obzirom na pojavu voda u prirodi razlikuju se slijedeća uža područja hidrometrije: a) hidrometrija mora (oceanometrija), b) hidrometrija atmosferskih voda, c) hidrometrija površinskih voda: hidrometrija rijeka (potamometrija), hidrometrija leda (glaciometrija), hidrometrija jezera i akumulacija (limnometrija), te hidrometrija močvara, d) hidrometrija podzemnih voda.

Riječ hidrometrija veće korijen od dvije grčke riječi *hidros* hidor voda i *metreo* metreo mjerenje. Mjerenja na vodi i u vezi s vodom stara su kao i civilizacija ljudskog roda. Poticaji za mjerenje pojavili su se najprije radi održavanja egzistencije, obrane od poplave i prehrane. Budući da ne postoje otkriveni zapisi o razvoju hidrometrije u Kini i Mezopotamiji, za najstarije hidrometrijske podatke smatraju se oni koji se odnose na rijeku Nil. To su oznake visokih vodostaja uklesanih u stijeni oko 250 km uzvodno od Asuana. Otkriveno je 179 takvih oznaka, a smatra se da potječu iz  $\pm 1827$ . godine. Za mjerenje razine vode (vodostaja) služili su tzv. nilomjeri. Organizirana i uzvodno povezana mjerenja razine vode provodena su na najmanje 30 nilo-

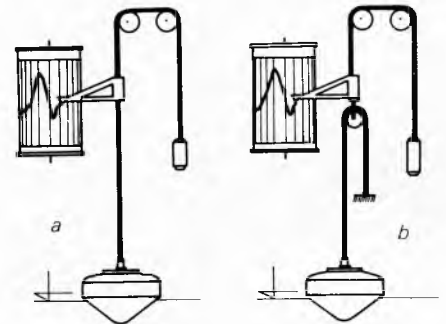
mjera smještenih ili u blizini hramova ili u njihovoj unutrašnjosti. Svećenici su registrirali vodostaje, a posebno uvježbani i vrlo brzi veslači prenosili su nizvodno informacije o porastu razine Nila na uzvodnom potezu. Mjerenja na Nilu bila su organizirana za potrebe obrane od poplave radi razvoja melioracijskih sustava. U Turkestanu je u XII vijeku postojala hidrometrijska služba. Budući da su korisnici vode plaćali porez prema isporučenoj količini, bila su potrebna vrlo precizna mjerenja razine vode. Zanimljivo je da se u doba Rimske Imperije, dakle u razdoblju kad su izgrađeni veliki akvadukti, nije znalo da protok vode ovisi o umnošku površine protjecajnog profila i brzine vode, iako je na to upozorio Heron iz Aleksandrije u II st. U srednjoj Evropi najstariji su hidrometrijski dokumenti oznake velikih voda Dunava na zidovima kuća uz obalu (Linz, 1501). U razdoblju renesanse razvila se i hidrometrija. Jedan od prvih uređaja za mjerenje brzine vode konstruirao je 1610. talijanski fizičar S. Santorio. Naziv hidrometrija uveo je profesor sveučilišta u Bologni D. Guglielmi (1655—1710). Oko 1870. godine R. Wolman uveo je hidrometrijsko kolo (krilo) za mjerenje brzine vode. To je instrument koji se i danas najčešće upotrebljava. Prvo međunarodno mjerenje protoka vode izvršeno je u mjesecu studenom 1867. na rijeci Rajni kod Bazela. Prva stanica za mjerenje razine vode u nas postavljena je 1817. na Savi kod Stare Gradiške.

**Mjerenja razine vode.** Razina vode mjeri se na vodenim tokovima (rijekama, jezerima i moru, kanalima, potocima i bujicama) za potrebe plovidbe, projektiranja i gradnje hidrotehničkih objekata, te da se odredi odnos između razine i protoka vode u protjecajnom presjeku vodenog toka. Vodostaj predstavlja razliku između razine vode u trenutku mjerenja i izabrane i fiksirane (nulte) razine. Svaki uređaj za mjerenje vodostaja mora imati određenu nultu kotu. Ta se kота povezuje s državnim geodetskom izmjerom visina i izražava se u apsolutnim jedinicama, metrima nad morem (m n. m.). Vodostaji se mogu opažati pojedinačnim očitavanjima ili neprekinutim bilježenjem na papirnatu traku, bušenu traku i sl. Danas se sve više upotrebljavaju uređaji za automatski prijenos podataka, njihovu obradu i prognoze razine vode.

Vodomjerna letva (sl. 1) najjednostavniji je uređaj za mjerenje razine vode. Izrađuje se od drveta, lijevanog željeza, čeličnog lima ili plastičnih materijala s podjelom po 2 cm. Način ugrađivanja vodomjerne letve zavisi od terenskih uvjeta (prije svega o nagibu i stabilnosti obala). Početak letve treba postaviti ispod najniže razine vode kako bi se omogućilo mjerenje cijele amplitude vodostaja. Vodostaji na vodomjernim letvama očitavaju se u nas ili jednom dnevno u 7,30 sati ili dva puta dnevno u 7,30 i 18,30 sati.



Sl. 1. Vodomjerna letva



Sl. 2. Princip mjerenja razine vode limnografom. a) mjerilo upisivanja 1:1, b) mjerilo upisivanja 1:2

Razina vode mjeri se i automatskim registratorima za koje se u nas uvriježio naziv limnografi (na rijekama) ili mareografi (na moru). Mjeri se uređajem koji ima plovak, građuirano uže, sustav kolotura i protuuteg (sl. 2). Razina vode bilježi se na papirnatu traku ili se buši na bušenu traku koja se kasnije obrađuje elektroničkim čitačima prema potrebi i neposredno elektroničkim računalima. Limnografi se izrađuju s horizontalnim i vertikalnim bubnjem (sl. 3 i 4) na koji se postavljaju papirnate trake s vremenskim i visinskim podjelama. Bubañ je spojen sa satnim mehanizmom. Standardizirana su mjerila registriranja vodostaja 1:5, 1:10, 1:20. Limnografi se mogu ugraditi na dva načina, kao bunarski i protočni tip (sl. 5). Uz limnografe se ugrađuje i vodomjerna letva (sl. 6) koja služi za kontrolu točnosti rada automatskog registratora.

Danas su sve češća mjerenja pomoću pneumatskih hidrostatičkih indikatora razine vode (sl. 7). Princip tog načina mjerenja osniva se na registriranju razlike tlakova komprimiranog plina

i hidrostatskog tlaka vode. Plak je plina stalan, a hidrostatski se plak mijenja s promjenom vodostaja, pa prema tome samo razina vode utječe na promjenu tlaka koji se mjeri manometrom.

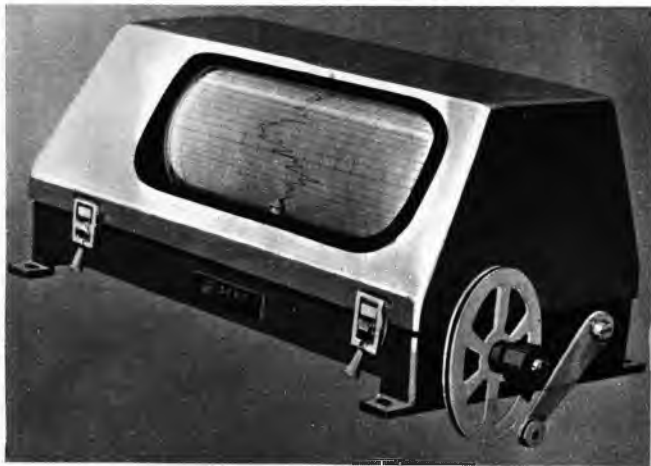
Mjerenje trenutačne razine vode uzduž prirodnog vodenog toka u nekom trenutku provodi se istodobnim fiksiranjem razine vode na više profila. U praksi se to obavlja istodobnim zabi-  
janjem kolčića tako da im vrh bude u razini vodene površine ili istodobnim označivanjem razine vode mjernim iglama.



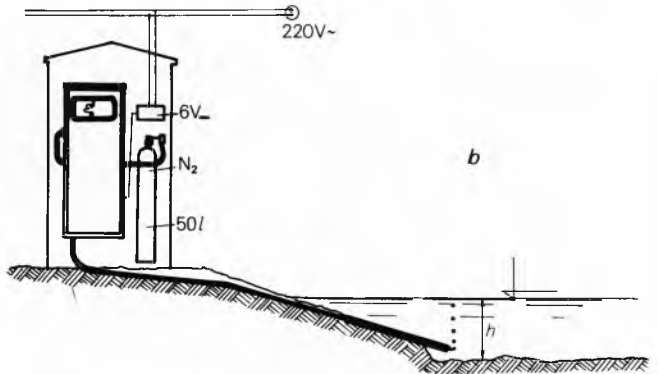
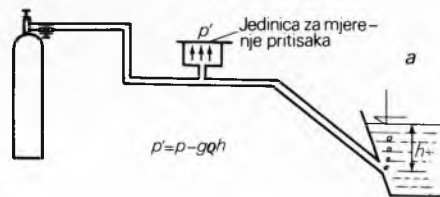
Sl. 3. Limnograf s vertikalnim bubnjem



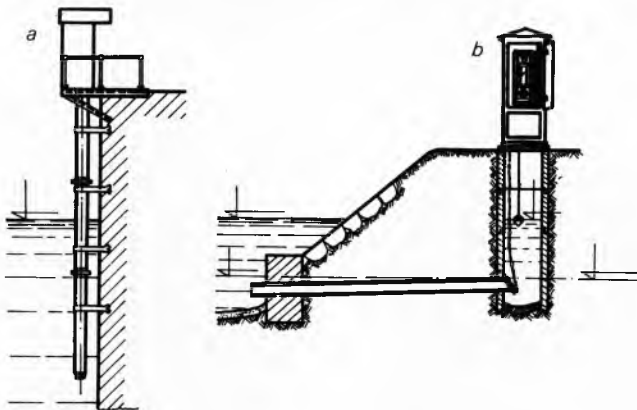
Sl. 6. Automatski registrator razine vode (protočni tip) s vodomjernom letvom



Sl. 4. Limnograf s horizontalnim bubnjem



Sl. 7. Pneumatski automatski registrator razine vode. a princip rada, b shema ugradnje

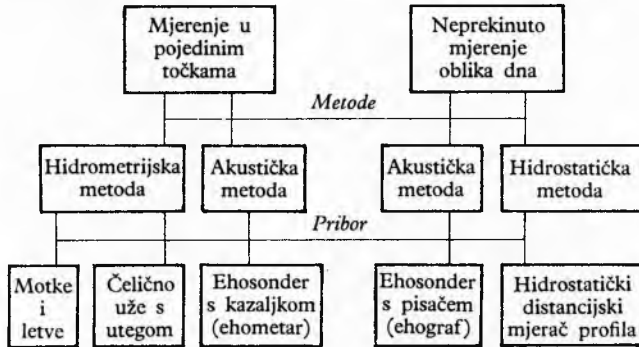


Sl. 5. Način montiranja limnografa. a protočni tip, b bunarski tip

**Mjerenje dubine vode.** Mjerenjem dubine vode želi se odrediti reljef dna rijeke, jezera ili bilo koje druge površine pod vodom. Rezultat mjerenja su planovi (situacije) korita rijeke, jezera, akumulacija itd., s izobatama ili izohipsama (slojnicama) te karakteristični poprečni i uzdužni presjeci. Mjerenje je dubine vode najtočnije za vrijeme niskih vodostaja. S povišenjem vodostaja, posebno tekućih voda, rastu i brzine voda, pa se smanjuje mogućnost postizavanja visoke točnosti mjerenja. Dubina vode mjeri se u pojedinim točkama ili se neprekidno snima

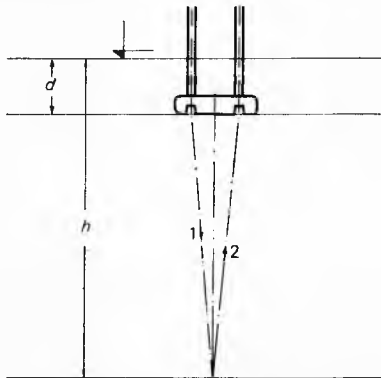
linija dna. Pri mjerenju dubine vode potrebno je u svakom trenutku poznavati razinu vode, odrediti točan položaj točke na kojoj se mjeri, te izmjeriti vertikalnu razliku od razine vode do čvrstog dna. Od izuzetnog je značenja neprekidno praćenje promjene razine vode za vrijeme mjerenja dubine kako bi se sve izmjerene vrijednosti mogle svesti na jednu unaprijed odabranu razinu.

Postoji mnogo metoda i pribora za mjerenje dubine vode i određivanje oblika dna (sl. 8).



Sl. 8. Pregled metoda i pribora za mjerenje dubina

Za mjerenje dubine vode hidrometrijskom metodom upotrebljavaju se različiti tipovi motaka i letvi, tzv. sondirki, obilježeni prema točnosti mjerenja, svakih 1, 2, 5 do maksimalno 10cm. S većih plovnih objekata mjeri se dubina vode čeličnim graduiranim užetom kojemu je na kraju obješen uteg do maksimalne težine 50kg, već prema brzini vode. Kad se mjeri užetom opterećenim utegom u tekućim vodama, voda zanosi uže, pa je potrebno korigirati (smanjiti) izmjerene dubine. Akustička metoda mjerenja dubine vode temelji se na odašiljanju ultrazvučnog signala i njegovog prihvaćanja nakon što se odbio od dna. Suština rada ultrazvučnog dubinomjera (ehosondera) sastoji se u mjerenju vremena proteklog od odašiljanja do prihvaćanja istog impulsa ultrazvuka (sl. 9). Brzina širenja ultrazvuka u vodi ovisi o temperaturi i gustoći (salinitetu) vode. U slatkoj vodi i pri temperaturi od 14°C brzina iznosi  $1462\text{ms}^{-1}$ . Na muljevitom dnu ehosonder pokazuje dubinu do površine mulja, ali se ultrazvuk probija i do čvrste podloge te se dobivaju dvostruki podaci o dubini. Prednosti su rada s ehosonderom pred svim ostalim priborima i metodama: visoka točnost mjerenja, velika brzina mjerenja ( $15\text{--}17\text{kmh}^{-1}$ ) te mogućnost mjerenja najrazličitijih oblika dna. Nedostaci su: nestabilnost održavanja smjera mjerenja i smanjenje točnosti mjerenja dubina kad je voda mutna ili zasićena zrakom te kad je dno pokriveno travom.

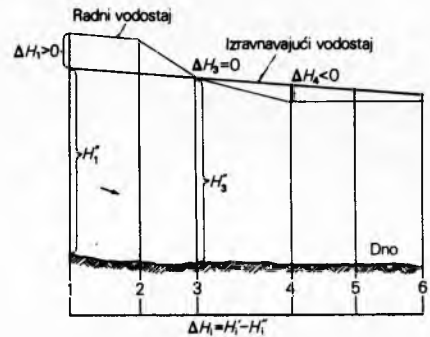


Sl. 9. Princip mjerenja dubine vode ehosonderom.  $d$  dubina ehosondera ispod razine vode,  $h$  dubina vode, 1 polazni signal, 2 povratni signal

Dubina vode na terenu mjeri se prema svrsi mjerenja, potrebnoj točnosti, mjesnim uvjetima i kretanju vode (voda stajačica ili tekućica): po poprečnim profilima, po kosim profilima,

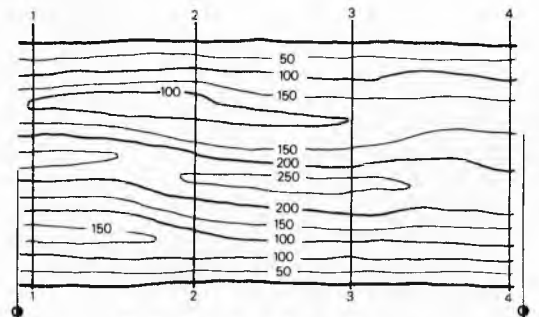
po mreži kvadrata ili kombiniranim načinom. Izbor smjera kretanja za vrijeme snimanja ovisi o upotrijebljenim geodetskim instrumentima i o tome gdje ih je najpovoljnije smjestiti na terenu.

Pri mjerenju i kasnijoj obradi dubina, kad se mijenja razina vode (posebno u rijekama), potrebno je podatke terenskih mjerenja dobivenih pri različitim vodostajima svesti na određenu razinu vode koja se naziva uvjetnom razinom ili razinom izravnavanja. To je potrebno kako bi se rezultati mjerenja dubine vode mogli međusobno uspoređivati jer su provedeni u različitim vremenskim razdobljima, a prema tome i pri različitim vodostajima. Najjednostavnije je preračunati izmjerenu dubinu vode na uvjetnu razinu tako da se na cijeloj dionici mjerenja u istom trenutku izmjeri i fiksira trenutni vodostaj, a niveliranjem se utvrdi apsolutna visina razine vode. Sva ostala mjerenja preračunavaju se jednostavnim zbrajanjem ili oduzimanjem razlike između tako fiksnog vodostaja i onoga koji je bio u trenutku mjerenja dubine (sl. 10).



Sl. 10. Određivanje vodostaja izravnavanja

Na osnovi mjerenja dubina vode određuju se poprečni i uzdužni profili, te se izrađuju situacije vodenih površina u izobatama (linije istih dubina) i izohipsama (linije istih apsolutnih visina). Za određivanje plana vodene površine u izobatama (sl. 11) potrebno je sva mjerenja dubina preračunati na vodostaj izravnavanja.

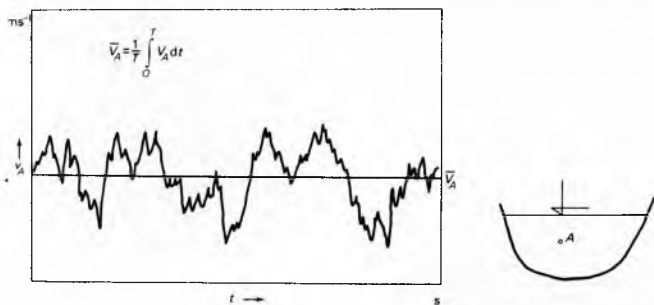


Sl. 11. Situacija rijeke u izobatama

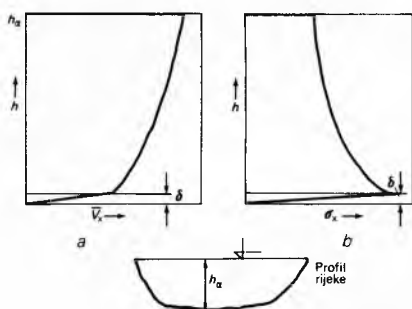
**Mjerenje brzine vode.** Brzina tijela  $\bar{v}$  definira se kao prva derivacija puta po vremenu  $\bar{v} = \frac{d\bar{s}}{dt}$ . Da bi se definirala

brzina tijela, potrebno je odrediti njenu apsolutnu vrijednost, pravac s obzirom na neki koordinatni sustav i smjer vektora brzine. Kad voda teče cijevima ili otvorenim vodenim tokovima, poznati su pravac i smjer vektora brzine pa je mjerenjem potrebno odrediti samo vrijednost brzine. Pri proučavanju strujanja vode u moru i jezera mjenjem je potrebno odrediti sva tri elementa. Prema vrijednosti brzine, viskoznosti vode i protoku, strujanje vode može biti laminarno ili turbulentno (v. *Mehanika fluida*). U prirodi se laminarno strujanje vode vrlo rijetko susreće, i to pretežno kad se radi o kretanju podzemnih i pukotinskih voda. Gotovo za sve prirodne i umjetne vodene tokove karakterističan je turbulentni režim. Za hidrometriju najbitniji je vid turbulentnog strujanja njegova neposredna povezanost s pulziranjem brzina u vremenu

u prostoru. U svakoj točki turbulentnog toka, naime, mijenja se s vremenom i vrijednost i smjer brzine vode. Zbog toga se uvodi pojam trenutačne brzine  $\vec{v}$ , koji se definira kao brzina u određenoj točki u točno preciziranom trenutku (sl. 12). Promjena brzina izražava se pomoću standardne devijacije  $\sigma$ . Dok srednja brzina u točkama na jednoj vertikali otvorenog riječnog toka opada s porastom dubine (sl. 13a), pulzacija raste s dubinom i dostiže maksimalnu vrijednost na udaljenosti  $\delta$  od dna (sl. 13b). Udaljenost  $\delta$  definirana je debljina graničnog sloja koji najviše ovisi o hrapavosti dna i obala.



Sl. 12. Kronološki dijagram pulzacija trenutnih brzina u turbulentnom toku

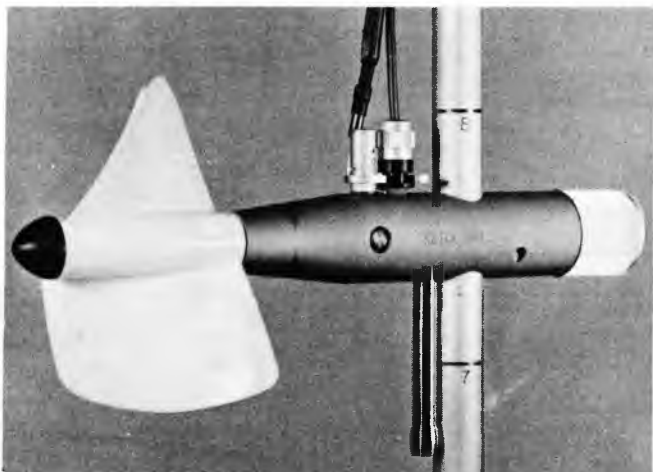


Sl. 13. Raspodjela srednjih brzina a i standardna devijacija pulzacije brzina b na vertikali otvorenog riječnog toka

U laboratorijskoj i terenskoj hidrometrijskoj praksi postoji niz metoda i pribora za mjerenje brzine vode.

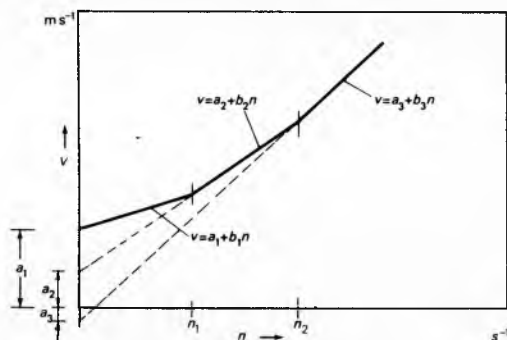
Mjerenja se zasnivaju na slijedećim metodama: mjerenje brzine tijela koje pliva, mjerenje brzine vrtnje uronjenog propelera, mjerenje visine brzine, mjerenje energije strujanja vode (mjerenje otpora tijela u vodi), mjerenje brzine izmjene topline, određivanje vremena punjenja posude uronjene u vodotok. Svako od navedenih metoda mjerenja pripada i određeni pribor za mjerenje: plovci, hidrometrijsko kolo, hidrometrijske cijevi, hidrodinamometri, termohidrometri i batometri tahimetri.

Hidrometrijsko kolo (sl. 14) upotrebljava se za mjerenje brzine vode u otvorenim tokovima i u cjevovodima. Mjerenje



Sl. 14. Hidrometrijsko kolo instalirano na motku

se osniva na jednoznačnom odnosu između brzine vode i broja okretaja propelera uronjenog u vodotok. Postoje brojni različiti tipovi hidrometrijskih kola. Razlike su u položaju osovine (horizontalna, vertikalna), u konstrukciji propelera i u konstrukciji kontaktnog mehanizma i brojača. Osnovni dijelovi hidrometrijskog kola jesu: propeler (rotor), osovina, tijelo kola, kontaktni mehanizam s brojačem i rep (kormilo, stabilizator). Promjer propelera iznosi 3...30cm kako bi se omogućilo mjerenje s istom točnošću cijelog raspona brzina od vrlo malih do izrazito velikih, te kako bi se mjerilo u svim uvjetima (cijevi, duboki i plitki vodeni tokovi). Kontaktni mehanizam s brojačem služi za bilježenje broja punih okretaja propelera. Za svako hidrometrijsko kolo i za svaki propeler posebno proizvođač izrađuje krivulju baždarenja, tj. krivulju ovisnosti broja okretaja propelera o brzini vode. Krivulja baždarenja dobije se postupkom baždarenja u dugim ravnim kanalima (80...100m) s nepomičnom vodom. Nad kanalom se kreću kolica na kojima se nalaze montirana hidrometrijska kola sa svim uređajima za registriranje broja okretaja svakog pojedinačnog kola. Kolica se kreću poznatom, jednolikom brzinom. Na osnovi mjerenja broja okretaja propelera u cijelom rasponu brzina kolica definira se krivulja baždarenja. Eksperimentalno je dokazano, a teoretski potvrđeno, da je krivulja baždarenja hiperbola. Budući da je zakrivljenost hiperbole vrlo mala, moguće ju je zamijeniti s nekoliko pravaca (sl. 15).



Sl. 15. Krivulja baždarenja hidrometrijskog kola (hiperbola aproksimirana sa tri pravca)

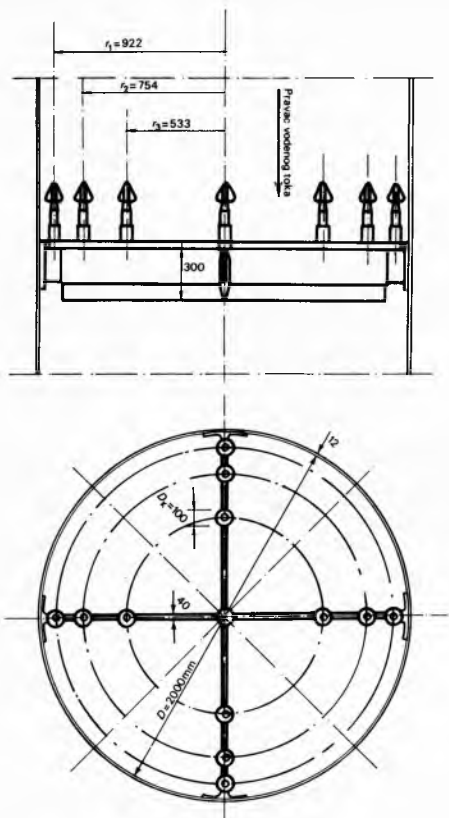
Hidrometrijskim kolom mjeri se brzina u jednoj točki (zapravo na određenoj površini, kojoj veličina ovisi o promjeru propelera). Kolo se unosi u vodu pomoću užeta opterećenog utegom ili na motki. Motke su oslonjene na dno (tzv. stojeće motke) ili montirane na plovni objekt (tzv. viseće motke). Ako se brzina mjeri u cijevima (tok pod tlakom), hidrometrijska kola montiraju se na šipke pod pravim kutom (sl. 16). Pulzacije brzina utječu na točnost mjerenja brzine vode. Da bi se odredila srednja brzina vode, a ne trenutna, hidrometrijskim kolom u jednom položaju mjeri se najmanje dvije minute. Za položaje u blizini dna potrebno je mjeriti i duže jer su tu pulzacije brzina najsnažnije (sl. 17). Kad se brzine mjere blizu površine, propeler mora uvijek biti potpuno uronjen u vodu, a kad se mjeri blizu dna, ne smije doći u kontakt s materijalom na dnu.

Lokalne brzine vode mjere se (naročito u laboratoriju) Pitotovom cijevi. Mjerenje se zasniva na principu transformacije dinamičkog (kinetičke energije vode) u statički tlak (potencijalnu energiju). Ako se u otvoreni vodeni tok stavi cijev savijena pod pravim kutom na donjem kraju i ako se taj otvor cijevi usmjeri prema strujanju vode (sl. 18a), u vertikalnom dijelu cijevi voda će se podići do visine  $h$  koja odgovara omjeru  $p/(qg)$ , gdje je  $p$  tlak na ulazu u cijev,  $q$  gustoća vode, a  $g$  ubrzanje gravitacije. Za mjerenje u zatvorenim tokovima pod tlakom potrebne su dvije cijevi (sl. 18b), od kojih je početak samo jedne usmjeren prema vodenom toku. Pomoću izraza

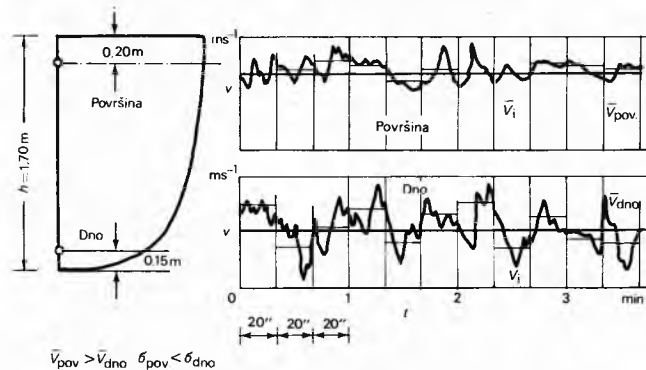
$$v = \varphi \sqrt{2gh} \quad (1)$$

određuje se brzina vode. Izraz je izveden iz Bernoullijeve jednadžbe (v. *Mehanika fluida*), gdje je  $\varphi$  korekcijski koeficijent

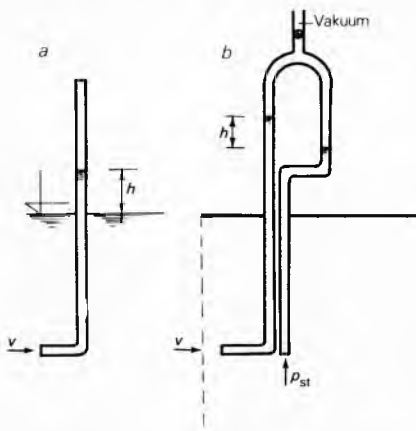
kojem je vrijednost 0,90...0,98. Za praktičnu upotrebu konstruirani su najrazličitiji oblici Pitotovih cijevi, diferencijalni živini



Sl. 16. Baterija hidrometrijskih kola instaliranih u cijevi na dvije motke



Sl. 17. Pulziranje brzina pri dnu i uz površinu vertikale otvorenog riječnog toka (mjerenje izvršeno hidrometrijskim kolom)

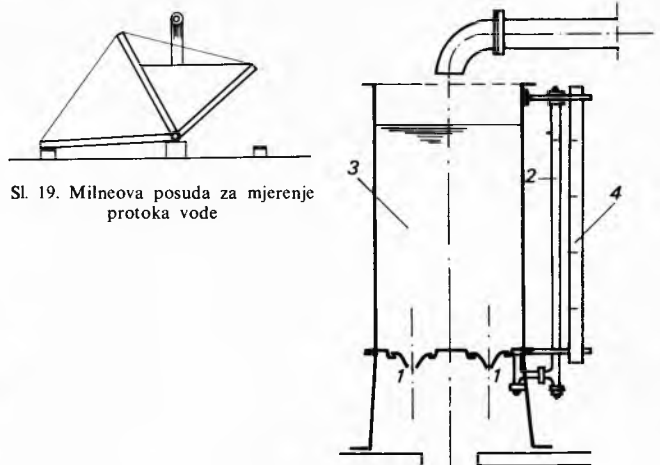


Sl. 18. Princip mjerenja brzine vode pomoću Pitotove cijevi: a u otvorenim tokovima, b tokovima pod tlakom

manometri itd., koji svi rade na navedenom principu mjerenja brzine. Pitotove cijevi primjenjuju se za mjerenje brzina vode iznad  $7 \dots 8 \text{ ms}^{-1}$ , dakle tada kada mjerenja hidrometrijskim kolom nisu pouzdana, a često nisu niti moguća.

**Mjerenje protoka.** Protok vode  $Q$  je količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodenog toka u jedinici vremena. Prema veličini vodenog toka protok se izražava u  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $\text{l s}^{-1}$ ,  $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ , pa sve do  $\text{lh}^{-1}$ . Protok je jedan od osnovnih i najvažnijih hidrauličkih i hidroloških podataka. Poznavanje protoka potreban je preduvjet za sve projektantske i izvedbene radove na vodenom toku ili u vezi s njim, bez obzira radi li se o hidrotehničkim objektima ili objektima kojima je za djelovanje potrebna određena količina vode. Postojeće metode za mjerenje protoka vode čine dvije osnovne grupe: neposredne i posredne metode mjerenja.

**Neposredna metoda mjerenja protoka.** Za neposredno mjerenje pogodne su samo volumenske metode koje se osnivaju na mjerenjima pomoću mjernih posuda. Taj način mjerenja primjenljiv je samo za mjerenje protoka malih izvora i manjih vodenih tokova do protoka od  $10 \text{ l/s}$ . Postoji određen broj različitih tipova mjernih posuda. Najprimitivnije su menzure, baždareni kablčići i bačve. Najčešće se upotrebljava Milneova posuda (sl. 19). Ona djeluje kao automatski regulator, a sastoji se od dvije posude jednakog volumena i oblika. U trenutku kad je jedna od posuda napunjena ona se prevrće zbog položaja njenog težišta i prazni i počinje punjenje druge posude. Milneova posuda služi i za automatsko registriranje intenzivnosti oborina. Protok se volumenskom metodom može mjeriti i pomoću danaida (sl. 20). Danaida je posuda s jednim ili više otvora na dnu, kroz koje istječe voda. Svaki otvor normiran je i oblikovan kao sapnica. Voda se u posudu ulijeva preko posebnog sustava za smirenje valova u posudi.



Sl. 19. Milneova posuda za mjerenje protoka vode

Sl. 20. Danaida: 1 izljevni otvori, 2 pokazivač razine vode, 3 rezervoar, 4 mjerna skala

Ako u danaidu dotječe konstantni protok, razina će se vode u posudi stabilizirati na određenoj visini kad je postignuta jednakost dotoka i istjecanje kroz otvore. Budući da je istjecanje moguće regulirati zatvaranjem određenog broja sapnica, protok se određuje iz jednadžbe istjecanja

$$Q = \mu n f \sqrt{2gh}, \quad (2)$$

gdje je  $\mu$  koeficijent istjecanja,  $n$  broj otvora kroz koje istječe voda,  $f$  površina otvora sapnice,  $h$  visina vode u posudi i  $g$  ubrzanje sile teže.

**Posredne metode mjerenja protoka.** Ima više posrednih metoda mjerenja protoka. Njihova je opća karakteristika da se ne mjeri protok već se mjere druge veličine pomoću kojih se izračunava protok. Principijelno postoje tri metode posrednog mjerenja. Prva metoda površina—brzina osniva se na mjerenju brzina i površine živog presjeka. Ta se metoda najčešće upotrebljava u svijetu, a u nas je skoro jedina za mjerenja na srednjim i većim riječnim tokovima te za određivanje protoka u većim cjevovodima. Druga je metoda mješavine. Jedino je tom metodom moguće mjeriti protoke bujica, potoka s nepravilnim profilima korita, silovitim tokom i snažno izraženom turbulentnošću. Treći način posrednog mjerenja protoka osniva se na upotrebi mjernih uređaja i hidrauličkih kanala.

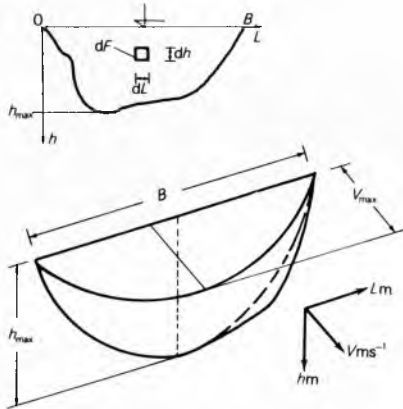
Metode mjerenja protoka u otvorenim vodenim tokovima slične su metodama mjerenja u cjevovodima.

**Metoda površina—brzina.** Najčešći način određivanja protoka u otvorenim vodenim tokovima i u većim i velikim cjevovodima obavlja se mjerenjem brzina hidrometrijskim kolom u nizu točaka poprečnog presjeka (metoda površina—brzina). Suština metode sastoji se u određivanju volumena vode (sl. 21) koji odgovara trenutnom protoku vode kroz poprečni presjek. Taj se volumen određuje mjerenjem srednjih brzina u nizu točaka poprečnog presjeka. Elementarni protok vode  $dQ$  kroz diferencijalnu površinu  $dF$  izražava se formulom

$$dQ = v_{dF} \cos \alpha dF, \quad (3)$$

gdje je  $v_{dF}$  srednja brzina vode kroz elementarnu površinu  $dF$ , a  $\alpha$  kut koji zatvara okomica na poprečni presjek vodotoka s glavnim smjerom strujanja vode. Mjerni profil potrebno je orijentirati tako da kut  $\alpha$  bude jednak nuli. Ako je taj uvjet ispunjen, protok kroz cijeli poprečni presjek određuje se izrazom

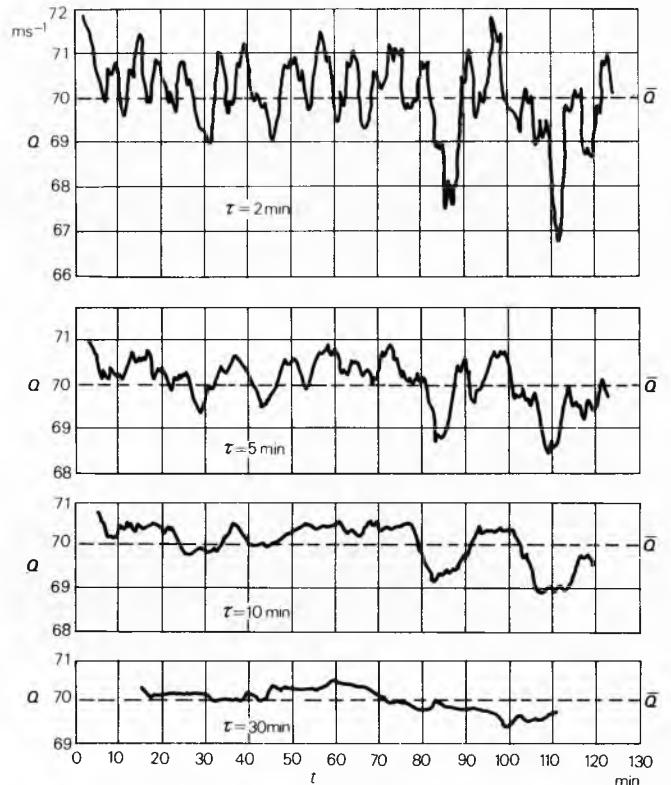
$$Q = \int_F v_{dF} dF. \quad (4)$$



Sl. 21. Princip mjerenja protoka metodom površina—brzina

Osnovni je problem mjerenja protoka metodom površina—brzina u pravilnom izboru položaja točaka na vertikali u kojoj se mjeri brzina te u izboru broja i položaja tzv. mjernih vertikala u poprečnom presjeku. Broj točaka na vertikali funkcija je dubine vertikale i karakteristike vodotoka (pravilnosti raspodjele po dubini). Broj i položaj mjernih točaka mora biti tako odabran da se na osnovi njih može što točnije odrediti kako raspodjela brzina na vertikali tako i srednja brzina strujanja vode na vertikali. Iskustvo je pokazalo da zbog relativno pravilne raspodjele brzina nije potrebno mjeriti više od 5 točaka. Samo pri izuzetno dubokim vodotocima (dubljim od 7 m) potrebno je više od 5 mjernih točaka, ali nikada više od 7. Problem određivanja dovoljnog broja i pravilnog položaja mjernih vertikala povezan je s oblikom poprečnog presjeka i raspodjelom brzina u njemu. Potrebno je da bude ispunjen uvjet da svaka vertikala nosi približno jednaki protok. Broj je vertikala od 5 za male potoke do 20 za velike rijeke. Mjerenje protoka u prirodi nije nikada potpuno točno. Razloga ima vrlo mnogo: turbulentno strujanje, nestacionarni tok vode, pogreška mjerenja hidrometrijskim kolom

itd. Što se tiče točnosti mjerenja protoka vrlo je znatan utjecaj pulzacije brzina. Mjeri li se brzina istodobno i kontinuirano u nizu točaka poprečnog presjeka te se na temelju tih podataka proračuna protok, osnivajući proračune na različitim vremenskim razdobljima za izračunavanje srednjih vrijednosti, može se definirati utjecaj pulzacije brzina u pojedinim točkama na pulziranje brzina vode u cijelom poprečnom presjeku. Takav eksperiment izvršen je na rijeci Varzav kod Dagan Ate (sl. 22). Pulziranje protoka ovisi o vremenu za koji se računaju srednje vrijednosti i smanjuje se s produljenjem toga vremena. Važno je, međutim, napomenuti da se ono nikada potpuno ne gubi. U hidrometrijskoj praksi mjeri se tako da se svaka brzina mjeri posebno i uzastopno vremenski jedna za drugom, ili se eventualno istodobno mjere samo brzine na jednoj vertikali.



Sl. 22. Pulziranje protoka izmjereno na profilu rijeke Varzav kod Dagan Ate;  $\tau$  vremensko razdoblje za izračunavanje srednje vrijednosti

Ni tada nije u cijelosti izbjegnut utjecaj pulzacija brzina na pulziranje protoka. Može se konstatirati da pogreške mjerenja protoka u prirodi iz navedenih razloga iznose 2...5%. Protoci u kružnim cijevima najčešće se određuju simultanim mjerenjem brzina pomoću baterije hidrometrijskih kola (sl. 16). Broj kola i njihov raspored mora biti tako izabran da izmjereni podaci brzina dadu dovoljnu informaciju za precizno određivanje protoka. Pri mjerenju pomoću baterije hidrometrijskih kola promjer cijevi u kojoj se mjeri ne treba da bude manji od 0,8m, a srednja brzina vode mora biti veća od  $0,4\text{ms}^{-1}$ . Mjeriti se mora uz stacionarni tok vode duže od 5 minuta. Osovine kola moraju biti paralelne s osi cijevi, a hidrometrijska kola moraju biti baždarena zajedno s motkama držačima.

**Metoda mješavine.** Do sada opisane metode mjerenja protoka vode ne mogu se primjenjivati na bujične tokove, na tokove s mnogo kaskada, vrtloga i promjena smjera strujanja vode, sa snažno izraženom turbulentnošću i brzinama većim od  $4\text{ms}^{-1}$ . Tada se za mjerenje protoka primjenjuje metoda mješavine. U vodotok se na određenom mjestu ubacuju određene količine obilježivača (indikatora, trasera)  $Q_0$  ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ). Koncentracija rastopine obilježivača iznosi  $C$ . Određivanje protoka temelji se na činjenici da je protok obilježivača s koncentracijom  $C$  koja se upušta u vodeni tok na ulaznom uzvodnom profilu jednak protoku obilježivača na nizvodnom (mjernom)

presjeku ali s manjom koncentracijom  $c$ . Omjer protoka  $Q$  u nizvodnom presjeku prema protoku obilježivača (mješavine)  $Q_0$  jednak je omjeru koncentracija obilježivača u njima, pa vrijedi razmjernost

$$Q:Q_0 = C:c, \quad (5)$$

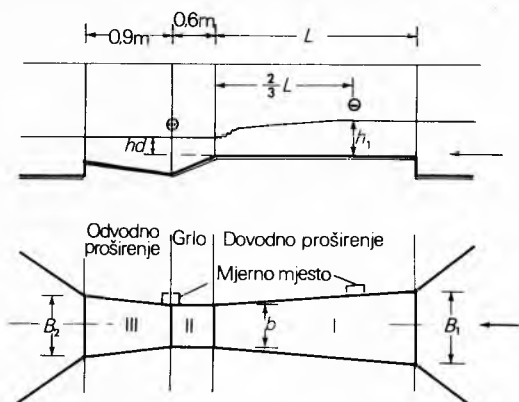
iz kojega slijedi da se traženi protok  $Q$  može odrediti mjerenjem koncentracije  $c$  na izlaznom mjernom profilu jer su veličine  $Q_0$  i  $C$  poznate.

Pri primjeni metode mješavine bitno je osigurati potpuno miješanje ubačenog obilježivača s masom vode na cijelom poprečnom presjeku. Miješanje treba da bude potpuno, a važno je da to bude na što kraćem potezu kako ne bi došlo do kemijskih reakcija, taloženja ili raspadanja obilježivača. Za mjerenje protoka metodom mješavine nije potrebno poznavati ni oblik ni površinu poprečnog presjeka. Obilježivači koji su do sada upotrebljavani za mjerenje metodom mješavine jesu kemijski indikatori, boje i radioaktivni traseri. Od kemijskih indikatora najčešće se upotrebljavaju natrij-klorid, kalcij-klorid i natrij-bikromat, a od boja fluorescein, eozin i kongo-crvenilo te metilensko i anilinsko modro bojilo. Za određivanje koncentracije boje u vodi služe spektrofotometri, filtarski fotometri i kolorimetri. Radioaktivni obilježivači su vrlo brzo, iako tek od nedavno, ušli u upotrebu. Pri radu s njima potreban je poseban oprez i stručno osoblje. Potrebni su posebni uređaji za njihovu detekciju. U praksi se najčešće upotrebljavaju radioaktivni izotopi brom-82, jod-131 i tricij.

Indikator se u vodeni tok ubacuje na dva načina: trenutno i postepeno. Kad se trenutno ubacuje, cijeli se volumen rastopljenog indikatora odjednom izručuje u vodeni tok. Pri postepenom ubacivanju mješavina se ubacuje u vodeni tok s konstantnim protokom  $Q_0$  i stalnom koncentracijom  $C$ . Za postepeno ubacivanje potrebni su posebni dozatori.

Mjerni objekti su uređaji za mjerenje protoka u kojima postoji funkcionalna veza između protoka i jedne ili dvije razine vode. Uređaji za mjerenje ugrađuju se u cijevi kad je potrebna stalna kontrola protoka, a mjerenje se obavlja na suženjima cijevi određivanjem piezometarske razlike (v. *Mehanička fluida*). U otvorenim tokovima mjerni se objekti ugrađuju najčešće na melioracijskim, kanalskim sustavima i na malim vodenim tokovima. Tu se mjeri jedna visina ako je režim vodotoka nepotopljen ili dvije visine ako na vodotok utječu nizvodni uvjeti. Postoje dva osnovna tipa mjernih objekata: preljevi i hidraulički kanali. Preljevi se mnogo grade za mjerenje protoka vode u hidrauličkim laboratorijima. U prirodnim uvjetima njihova je upotreba ograničena na vodene tokove koji ne pronose nanos. U suprotnom, preljev će s uzvodne strane biti zasut nanosom pa više neće djelovati kao mjerni objekt. Preljeva ima najrazličitijih oblika i izvedbi. Za mjerenje malih količina vode s visokom točnošću pogodni su oštrobrubni trokutni preljevi, dok se za mjerenje većih protoka preporučuju preljevi pravokutnog profila.

Mjerni kanali (kanali sa suženjem, Venturijevi i Paršalovi kanali) (slika 23), naročito ako pri svim protokama rade kao nepotopljeni, idealni su mjerni objekti za male prirodne vodene

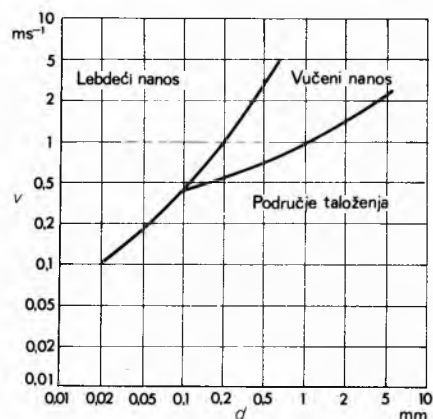


Sl. 23. Standardni tip mjernog kanala

tokove. Bez obzira koliko je u izvedbi postignuta sličnost s projektiranim mjernim kanalom, potrebno je izgrađeni kanal baždari radi potvrđivanja ili definiranja novog odnosa vodostaja i protoka.

Projektiranje i izvedba mjernih objekata u prirodnim vodenim tokovima složen je zadatak jer treba osigurati točno mjerenje protoka pri svim vodostajima. Prije svega je potrebno lokalno regulirati korito, tj. uravniti, formirati i učvrstiti obale, te raščistiti korito na duljini od najmanje deset širina vodenog lica. Vrlo se često ne instalira kompletan mjerni objekt, nego se uredi i učvrsti korito i tako omogućiti uspostavljanje trajnijeg i, kao najvažnije, jednoznačnog odnosa između vodostaja i protoka. Već gradnjom običnih kontrolnih pragova moguće je postići željeni cilj.

**Mjerenje riječnog nanosa.** Krute čestice koje je voda pokrenula u koritu, ili su s okolišnog zemljišta dospjele u vodeni tok i koje se njima dalje transportiraju, nazivaju se riječnim nanosom. Postoji niz prijedloga za klasifikaciju nanosa s obzirom na dimenzije čestica u pokretu. Prema krupnoći čestica i brzini vode riječni se nanos prenosi u obliku lebdećeg (suspendiranog) nanosa i vučenog nanosa. Lebdeći nanos se pronosi u čitavom poprečnom presjeku vodenog toka kao suspenzija. Kreće se zajedno s vodom (dvofazni fluid), pri čemu je brzina kretanja čestica jednaka brzini vode. Vučeni nanos kreće se po dnu korita klizanjem, kotrljanjem i skakanjem s razdobljima mirovanja i kretanja pojedinih zrna. Između ta dva oblika prenošenja nanosa ne postoje strogo odvojene granice. Istodobno s kretanjem sitnijih čestica u suspendiranom stanju kreću se teže čestice pri dnu. S povećanjem brzine i naročito njene vertikalne pulzacijske komponente pojedine frakcije materijala s riječnog dna prelaze u suspenziju, a s njezinim smanjenjem ponovo se vraćaju na dno. Grubo se može reći da se obluci (20...200mm) i šljunak (2...20mm) uvijek kreću kao vučeni nanos, pijesak (0,2...2mm) kreće se povremeno kao suspendirani a povremeno kao vučeni nanos, a ilovača (2...20μm) i glina (0,2...2μm) uvijek se kreću u lebdećem stanju. Postoje granične brzine dobivene u laboratorijskim uvjetima iznad kojih se materijal s dna počinje kretati ili vučeni nanos prelazi u suspendirani (slika 24). Te granice u prirodnim uvjetima nisu stabilne iz niza razloga pa se ne može definirati stalni funkcionalni odnos između promjera zrna u pokretu i brzine vode. Razlozi su: nejednolika raspodjela brzina u poprečnom presjeku, složena smjesa nanosa različitih dimenzija itd.



Sl. 24. Pojave transporta i taloženja nanosa u turbulentnom toku

Količina nanosa koja se pronosi kroz poprečni presjek vodotoka u jedinici vremena naziva se protokom vučenog nanosa, a izražava se u  $\text{kg s}^{-1}$ . Ukupna količina nanosa u većoj vremenskoj jedinici (dan, mjesec, sezona, godina) izražava se u tonama. Krupnoća nanosa i zastupljenost pojedinih frakcija zrna u prirodnoj smjesi određuje se prosijavanjem na osnovi kojeg se definira i granulometrijska krivulja. Za suspendirani nanos uveden je i pojam koncentracije nanosa, a izražava se u  $\text{g l}^{-1}$  ili  $\text{kg m}^{-3}$ . Količina nanosa koju tok može ponijeti u lebdećem stanju mnogo je veća od količine vučenog nanosa. Mjerenja

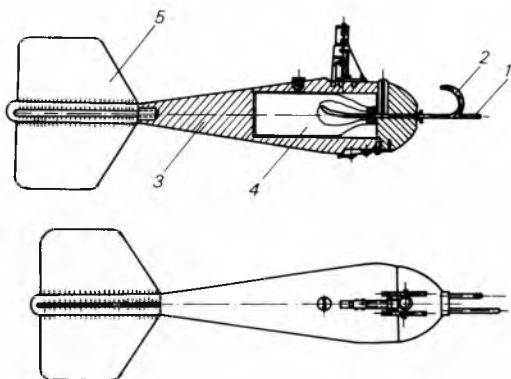
na našim prirodnim tokovima pokazala su da je količina vučenog nanosa tek 6-10% od ukupne količine nanosa.

**Suspendirani nanos.** Kad su čestice vrlo sitne ( $d < 1 \mu\text{m}$ ), njih u suspenziji drže molekularne i električne sile, pa su neke suspenzije stabilne čak i u mirnoj vodi (koloidalne suspenzije). Krupnije čestice do 50 $\mu\text{m}$  talože se vrlo sporo tako da u suspenziji ostaju i pri malim brzinama vode. Zrna krupnija od 50 $\mu\text{m}$  održavaju se u suspenziji samo uz veće turbulencije. Koncentracija suspendiranog nanosa u nekoj točki vodenog toka mijenja se zbog pulziranja brzine i turbulentnosti toka. Ako se produži vrijeme uzimanja uzoraka nanosa, razlika koncentracije među uzorcima postaje manja.

Za analizu i proučavanje režima nekog vodenog toka potrebno je sakupiti informaciju o količinama nanosa koji tok pronosi u određenom vremenskom razdoblju. Do ovih podataka dolazi se analizom reprezentativnih uzoraka vode koji se uzimaju u određenim točkama poprečnog presjeka. Uobičajeno je da se paralelno s mjerenjem brzina hidrometrijskim kolom mjeri na istim položajima i koncentracija suspendiranog nanosa. Postoje brojne konstrukcije hvatača suspendiranog nanosa. Principijelno se mogu razvrstati u dvije grupe: na hvatače s trenutnim zahvatanjem uzoraka vode i na hvatače s laganim punjenjem.

Hvatači s trenutnim zahvatanjem sastoje se od jedne cilindrične cijevi promjera 10-15 cm i volumena 1-5 l. Kad se cilindar postavi u željeni položaj, naglo ga se zatvori i na taj se način uhvati volumen vode s nekom trenutnom koncentracijom.

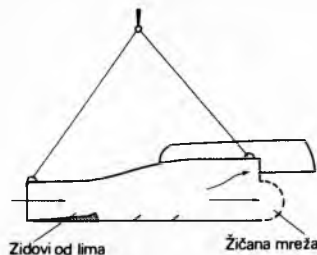
Postoje dvije različite izvedbe hvatača s laganim punjenjem. Prvi su hvatači koji u tijelu hidrodinamičkog oblika imaju instaliranu bocu volumena 0,5-2 l, pa se zbog toga i zovu hvatači s bocom (sl. 25). Drugi tip su tzv. vakuumski hvatači s posudom za uzorke izvan vode. Puni se pomoću elastične cijevi koja je uronjena u vodu. Voda u cijevi kreće se prema gore zbog vakuuma u komori za uzorak. Obujam komore iznosi i do 40 l, pa se taj tip hvatača primjenjuje tamo gdje su potrebna točna mjerenja i kad je mala koncentracija suspendiranog nanosa. Hvatači s bocom mogu biti izvedeni kao hvatači integratori i kao hvatači za uzimanje uzoraka u samo jednoj točki. Hvatači integratori služe za uzimanje uzoraka vode na cijeloj vertikali vodenog toka.



Sl. 25. Hvatač integrator suspendiranog nanosa. 1 vodozahvatna cijev, 2 cijev za zrak, 3 tijelo batometra, 4 boca volumena 1 l, 5 rep batometra (stabilizator)

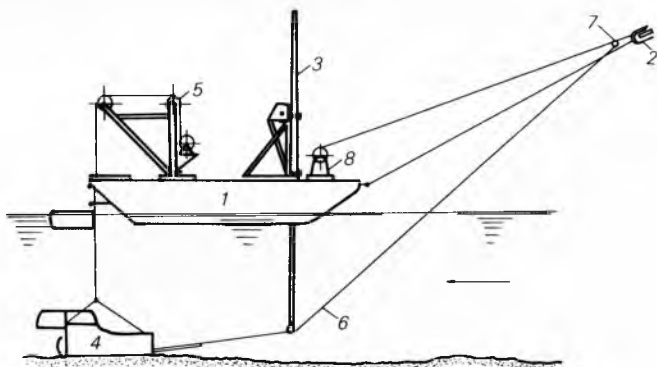
**Vučeni nanos** se kreće na području između turbulentnog toka vode i nepomičnog materijala od kojeg je formirano korito (tzv. nanosa s dna). Osnovni činioci složenog procesa kretanja vučenog nanosa nisu još uvijek dovoljno poznati. Pri malim brzinama vode riječni nanos ostaje nepokretan na dnu. Kao početak kretanja vučenog nanosa označuje se stanje kad se može konstatirati odvajanje s dna i pokretanje pojedinih zrna. Od tog sporadičnog kretanja pa do pokretanja cijelog sloja na dnu pojavljuju se formacije pokretnog dna, poznate pod nazivima brazde, dine, antidine itd. Tehnički ispravni i upotrebljivi protok vučenog nanosa moguće je odrediti samo mjerenjem na terenu. Upotreba brojnih formula pokazala je niz

vrlo ozbiljnih slabosti. Pronašanje vučenog nanosa mjeri se na tri načina: pomoću mehaničkih hvatača, pomoću radioaktivnih i obojenih trasera te mjerenjem sprudova i pokretnih formi dna. U našoj i u svjetskoj praksi najviše su upotrebljavaju mehanički hvatači. Ima ih različitih izvedbi, a najčešće se sastoje od kutije s otvorom na uzvodnoj strani kroz koji u hvatač ulazi vučeni nanos. U unutrašnjosti hvatača, koji se polaže na dno rijeke, brzina se vode smanjuje pa se u hvataču, zahvaljujući tome, zadržava nanos. Na kraju mjerenja hvatač se podiže s dna i iz vode, a zahvaćeni nanos se analizira.



Sl. 26. Hvatač vučenog nanosa tipa Karoly (modifikacija O. Colarić)

U našoj praksi najčešće se upotrebljava hvatač vučenog nanosa tipa Karoly (modifikacija O. Colarić) (sl. 26), koji se u vodu unosi posebnom dizalicom pomoću užadi i kolotura montiranih na pontonima (sl. 27). Rad s mehaničkim hvatačem vučenog nanosa zahtijeva stabilni hidrometrijski profil i specijaliziranu i iskusnu ekipu. Kad su brzine vode veće od  $3 \text{ms}^{-1}$ , rad s mehaničkim hvatačem znatno je otežan. A upravo u tim situacijama, kad naiđu valovi velikih voda, protječe poprečnim presjekom najveća količina od ukupne godišnje količine vučenog nanosa. Nerijetko se dešava da na Savi, Dravi, Dunavu i Moravi za vrijeme velikih voda tokom 2-3 dana protječe i do 90% od ukupnoga godišnjega vučenog nanosa. Mjerenjem vučenog nanosa pomoću obilježivača dobivaju se kinematske karakteristike vučenog nanosa, određuju se razdoblja stajanja i kretanja, srednja brzina putovanja, smjer širenja, širina dna po kojoj se nanos kreće itd.



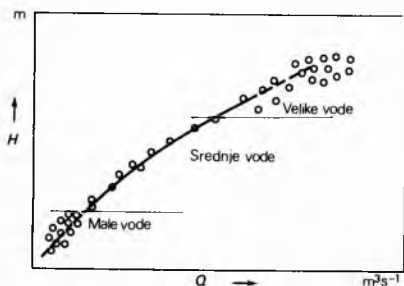
Sl. 27. Hvatanje vučenog nanosa. 1 dva pontona spojena platformom, 2 kolotur na nosećem užetu, 3 motka s vitlom kojim se uže 6 pritišće na dno, 4 hvatač vučenog nanosa, 5 dizalica, 7 kolotur za uže 6, 8 vitlo za zatezanje užeta

**Ovisnost između vodostaja i protoka.** Najvažnijom ovisnošću u hidrotehnici uopće, a u hidrometriji posebno, smatra se ovisnost između vodostaja  $H$  i protoka  $Q$ . Dok je mjerenje razine vode posao koji se svakodnevno jednom ili dva puta, a često i neprekidno obavlja na nizu vodomjernih stanica, dotle se protok na nekom profilu mjeri tek nekoliko (5-10) puta godišnje. U nas se samo na trećini vodomjernih stanica mjeri i protok, tako da je jedino na tim stanicama moguće definirati krivulje protoka na temelju podataka mjerenja. Mjerenje je protoka na terenu skup i složen posao, a posebno u teškim uvjetima prolaza valova velikih voda. Jednom definirani odnos protoka i vodostaja (krivulja protoka) podložan je stalnim promjenama iz više razloga, a posebno zbog promjen-



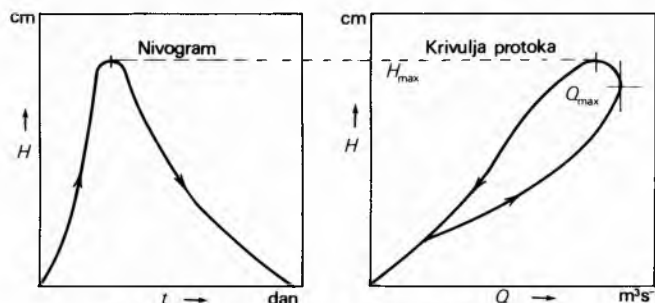
ljivosti oblika prirodnog korita i hidrotehničkih radova na vodenom toku. Zbog toga je potrebna stalna kontrola navedenog odnosa, a prema potrebi i njegova korekcija. U hidrometriji se definira odnos protoka kao funkcija vodostaja. U prirodi je obrnuto. Nezavisna je varijabla protok, a vodostaj je njegova funkcija. Zbog mnogo jednostavnije i jeftinije organizacije opažanja razine vode hidrometrija je prihvatila drukčiji odnos. Krivulja protoka je prema tome u najjednostavnijem slučaju odnos između protoka i vodostaja. Krivulja protoka može se definirati grafički, analitički i tabelarno. Definiranje analitičkog odnosa teži se zbog lakše praktične primjene. Grafički pak prikaz daje zornost analiziranom odnosu. Točnost toga odnosa ne ovisi o tome na koji je način krivulja protoka definirana.

Iako je suština odnosa između vodostaja i protoka stohastička, uvijek se za potrebe hidrotehničke prakse u prvom redu teži definiranju jednoznačnog odnosa protoka i vodostaja. Složenost i nejednoznačnost odnosa protoka i vodostaja uvjetovana je nestacionarnim kretanjem vode, formiranjem leda, obrašćenostu korita, nestabilnošću obala i dna itd. Kad je taj odnos izrazito nejednoznačan, potrebna su mjerenja dodatnih elemenata. Pri malom rasipanju točaka (do reda veličine od 10%) zadovoljava se s jednoznačnim odnosom vodostaja i protoka. Lako je rastumačiti što je najviše uzrok rasipanju mjernih podataka u području malih i velikih voda (sl. 28). Kad



Sl. 28. Rasipanje podataka mjerenja protoka vode u području malih i velikih voda

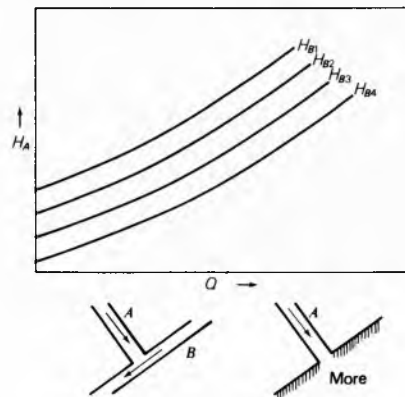
su male vode, rasipanje točaka nastaje zbog stalne izmjene lokalnih karakteristika korita. Te promjene onemogućuju usporu protoka za jednake niske vodostaje. Područje srednjih voda ograničeno je izlivanjem voda iz glavnog korita u poplavne površine. Na tom području, kad je tok vode stacionarni ili barem kvazistacionarni, rasipanje mjernih podataka nije značajno. U zoni velikih voda rasipanje točaka pojavljuje se zbog nekoliko razloga. Radi se prije svega o nestacionarnosti kretanja valova velikih voda, uslijed čega se formira petlja u dijagramu protok – vodostaj (sl. 29) zbog razlike padova pri jednakim vodostajima za vrijeme porasta i padanja valova velikih voda. Pri porastu vala pad je veći pa je i protok veći, a pri opadanju vala pad je manji pa je prema tome i protok manji uz isti vodostaj. Osim toga, rasipanje točaka mjerenja u području velikih voda nastaje zbog izlivanja vode na poplavne površine. Ta pojava u fazi poplavljanja površina identična je pojavi tečenja pri malim vodama. Utjecaj hrapavosti korita vrlo je velik, pa se znatno smanjuju srednje brzine vode. Zbog toga se preporuča odvojeno tretirati tok vode u glavnom koritu od toka u svakoj od poplavnih površina, tj. potrebno



Sl. 29. Formiranje petlje za vrijeme vala velikih voda

je definirati posebnu krivulju protoka za glavno korito i posebne krivulje za svaku od poplavnih površina.

Osnovni je preduvjet za definiranje krivulje protoka da se raspolaze određenim brojem mjerenja protoka određene (visoke) točnosti. Kao analitički izrazi često se upotrebljavaju troparameterska jednadžba parabole drugog stupnja i eksponencijalne dvoparameterske jednadžbe (v. *Hidrologija*). Izraz se definira (parametri izraza) uz uvjet minimalne sume kvadrata razlika (metoda najmanjih kvadrata). Postoje razrađene metode za računanje otezanja kad veza između protoka i vodostaja nije jednoznačna zbog, npr., deformabilnosti korita. Kad je potrebno definirati krivulje protoka u zoni ušća nekog pritoka ili rijeke u more, dakle kad su jedna ili obje rijeke pod usporom, najčešće je potrebno formirati familiju krivulja (sl. 30).

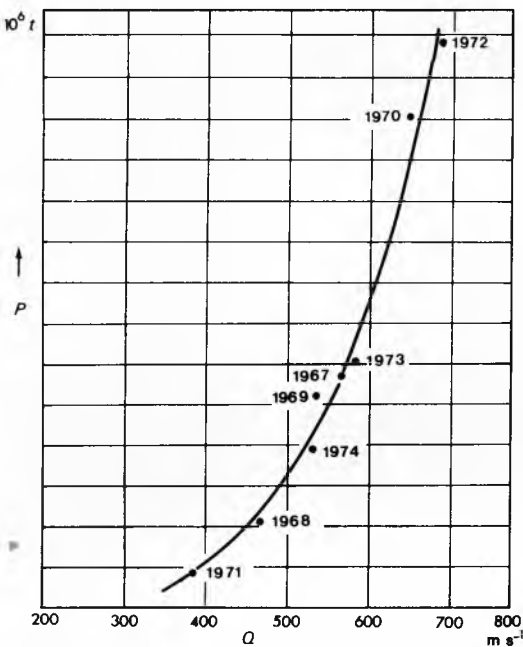


Sl. 30. Familija krivulja protoka za ušće rijeke A u rijeku B, odnosno u more

Budući da mjerenja protoka rijetko obuhvaćaju cijelo područje stvarnih vodostaja, a uvijek je potrebno definirati kompletnu krivulju protoka, pa i za onaj dio za koji nema mjernih podataka, nužna je ekstrapolacija krivulje protoka. Ekstrapolacija može biti prema velikim ili malim protocima, već prema tome za koje područje nedostaju podaci. Mnogo češće potrebna je ekstrapolacija u području velikih voda. Protok vode u vodenom toku ovisi o nizu hidroloških, hidrauličkih i geometrijskih karakteristika. Geometrijske karakteristike najčešće su poznate u svim situacijama ili se mogu bez većih problema odrediti neposrednim mjerenjem u bilo koje vrijeme. Hidraulički i hidrološki parametri najčešće se mogu izmjeriti samo u određenim trenucima. Ti se elementi nastoje ekstrapolirati pa se na osnovi njih i onih dobivenih mjerenjem računski određuju protoci za određene vodostaje. Točnost ekstrapolacije nije velika, pa se njena primjena preporuča samo kad iznos za koji treba ekstrapolirati krivulju protoka nije velik, tj. kad nije veći od 10-15% amplitude vodostaja u poprečnom presjeku.

**Ovisnost između pronošenja riječnog nanosa i protoka.** Faktori koji uvjetuju stupanj erozije, odnosno režim nanosa riječnog toka, mogu se podijeliti na one koji se u toku nekoliko godina znatno ne mijenjaju i na faktore koji su u toku godine podložni promjenama u funkciji od meteoroloških prilika na slivu. U prvu grupu ulaze faktori koji karakteriziraju tlo na slivu (reljef, topografija terena, geološki sastav, vegetacija), a u drugu grupu spada, prije svega, režim padavina i temperatura. Promjenljivi faktori uzrokuju vrlo znatne oscilacije koncentracije obiju vrsta nanosa u riječnom koritu, ali oni uzrokuju i promjenu protoka u istom vodenom toku. Ta konstatacija upućuje na mogućnost i opravdanost uspostavljanja veze između pronošenja nanosa i protoka. Ta veza, ako je dovoljno čvrsta, omogućit će da se dođe do podataka koji su za hidrotehničku praksu vrlo interesantni, a to su pronošenja nanosa u dužem vremenskom razdoblju (prije svega u godini) i prosječna višegodišnja vrijednost pronošenja nanosa u promatranom riječnom toku. Mnogobrojna mjerenja i proračuni dokazali su da se najčešće dobre veze dobivaju između srednjih godišnjih protoka i ukupne godišnje količine suspendiranog nanosa (sl.

31). Pri prolasku valova velikih voda koncentracija nanosa najčešće prethodi vrhu poplavnog vala. Koncentracija suspendiranog nanosa nije konstantna pri istim protocima, a razlikuje se od sezone do sezone već prema stanju tla u slivu (vegetacija, snijeg). Te okolnosti pokazuju da je veza između protoka i koncentracije nanosa izrazito stohastička. Pri traženju čvršćeg odnosa između protoka i koncentracije suspendiranog nanosa treba prije svega istražiti podrijetlo otjecanja vode. Ako je ono posljedica topljenja snijega, koncentracije su obično manje nego ako je posljedica kiša. Otjecanje od pljuskova, naročito u ljetnim mjesecima, praćeno je visokim koncentracijama nanosa. Radi dobivanja pouzdane i za praksu primjenljive veze između srednjih godišnjih protoka vode i nanosa potrebno je raspolagati podacima mjerenja od najmanje desetak godina. Ako su, osim koncentracija, dovoljno često uzimani i uzorci za granulometrijsku analizu, moguće je za zadani profil konstruirati odnos između koncentracije i procentualnog sudjelovanja pojedinih frakcija u ukupnom pronosu suspendiranog nanosa. Takve su analize vrlo važne kao podloga za proračunavanje zapunjavanja izgrađenih akumulacija i prirodnih jezera.



Sl. 31. Odnos između srednjega godišnjeg protoka  $Q$  i godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa  $P$  na rijeci Dravi kod Botova

Odnos između protoka i količine pronesenog vučenog nanosa u jednoj godini mnogo je nestabilniji od svih do sada spomenutih veza. Razlog je u tome što ogromna većina (do 90%) vučenog nanosa proteče u vrlo kratkom vremenu vala velike vode. Tada je, međutim, terenska mjerenja nemoguće provesti zbog velikih brzina vode. Svi do danas poznati pokušaji ekstrapolacije nisu dali zadovoljavajuće rezultate.

**Obrada hidroloških podataka.** Cilj je hidrometrijskih mjerenja i opažanja da se svi podaci prikažu u obliku koji je najpovoljniji za čuvanje, publiciranje i analizu. Zbog mnogobrojnih podataka, koje treba obraditi da bi se dobile osnovne informacije o hidrološkim procesima, najuspješnije je da se podaci obrađuju elektroničkim računalom. Obrada podataka može se svrstati u tri osnovne kategorije: a) obrada opaženih veličina za svaku točku posebno na određenom slivu, b) određivanje varijacija karakterističnih hidroloških veličina uzduž slivova, c) tabeliranje opaženih podataka i rezultata obrade u formi koja je najpogodnija za publiciranje, razmjenu i upotrebu.

Obrada podataka mjerenja i opažanja u pojedinim točkama sliva obuhvaća prvi pregled i obradu prikupljenih podataka, zatim provjeru i kontrolu podataka pa tek onda tabeliranje. Forme i formati tablica ili karata moraju biti jednostavni, pregledni i unificirani. Točnost hidroloških podataka ovisi kako

o pogreškama opažanja i mjerenja tako i o pogreškama obrade. Ukupna pogreška može se odrediti tek analizom svih mogućih slučajnih i sistematskih pogrešaka koje se mogu pojaviti tokom opažanja, mjerenja i obrade. Sistematske greške otkrivaju se pažljivom provjerom podataka ili, npr., testiranjem homogenosti vremenskih nizova. Metode matematičke statistike, posebno korelativna i regresivna analiza, vrlo su uspješne za otkrivanje grubih i sistematskih pogrešaka. Ocjena slučajnih pogrešaka također se provodi metodama matematičke statistike.

Metode obrade ovise o karakteristikama i načinu mjerenja hidrološke veličine. Standardne obrade podataka površinskih voda ubuhvaćaju obrade vodostaja i protoka. Njihova standardna obrada obuhvaća: određivanje srednjih dnevnih vodostaja, dnevnih ekstrema i trenutaka njihove pojave, određivanje srednjih mjesečnih i godišnjih vodostaja, mjesečnih i godišnjih ekstrema, datuma pojave, određivanje krivulje učestalosti i trajanja vodostaja u godini, te konstrukciju nivograma kolebanja vodostaja. Protoci se obrađuju za one vodomjerne stanice na kojima se mjere. Njihova standardna obrada identična je standardnoj obradi vodostaja uz prethodno definiranje krivulje protoka.

**Hidrometrija podzemnih voda.** Mjerenja podzemnih voda služe da se ustanove vodene rezerve i njihova raspodjela u prostoru i vremenu. U nizu situacija podzemne vode su jedina mogućnost opskrbe naselja kvalitetnom pitkom vodom ili vodom za industrijske potrebe. U SFRJ mnogo velikih gradova, kao npr. Beograd i Zagreb, gotovo sve svoje potrebe kaptiraju i koriste se podzemnom vodom. Najvažniji podatak, koji ujedno nosi i najbitniju informaciju o podzemnoj vodi, jest njena razina. Razina podzemne vode može se očitavati diskontinuirano ili stalno bilježeći pomoću automatskih registratora. Razina podzemne vode mjeri se za tu svrhu posebno izrađenim piezometrima ili u bunarima. Piezometar je čelična cijev, najčešće promjera 25-50 cm. Donji kraj cijevi treba da bude zabijen do ispod najniže razine podzemne vode da bi se moglo mjeriti cijelo područje od najniže do najviše razine. Pri dnu je piezometarska cijev perforirana i najčešće zapunjena filterskim slojem. Pomoću piezometra moguće je mjeriti ne samo razinu podzemne vode već i piezometarsku razinu arteških i subarteških voda, dakle voda koje se nalaze pod tlakom. U takvim slučajevima perforirani dio cijevi potrebno je zabiti isključivo u sloj podzemne vode koja se pod tlakom nalazi između dva nepropusna sloja tla. Za povremeno mjerenje razine podzemne vode u bunarima ili piezometrima upotrebljavaju se laki prijenosni čekrci s broječanicima. Danas se proizvode vitla sa čeličnom žicom kojoj je na slobodnom kraju pričvršćen plovak. Donedavno su se za povremeno mjerenje razine podzemnih voda isključivo upotrebljavale pištaljke koje bi u kontaktu s vodom proizvele zvuk. Za neprekidno mjerenje razine podzemne vode instaliraju se automatski registratori (limnografi) u bunare ili na piezometre. Budući da su promjene razine podzemnih voda mnogo sporije od promjena razine površinskih voda, u najviše slučajeva dovoljno informacija za sve obrade može se sakupiti i sa dva do tri mjerenja razine podzemne vode tjedno. Svaki piezometar ili bunar mora imati visinski definiranu stalnu točku od koje se odmjera razlika do razine podzemne vode. Ta točka treba da bude definirana i u apsolutnim kotama kako bi se razina podzemne vode mogla također proračunati u apsolutnim kotama. To je potrebno zbog toga da bi se na osnovi niza mjerenja piezometrima i u bunarima na širem području mogle definirati trenutne i srednje hidroizohipse. Hidroizohipse su linije istih apsolutnih visina podzemne vode. Na temelju njih određuju se smjerovi kretanja podzemne vode koji se najčešće mijenjaju s vremenom prema stanju vodnosti u nekom području.

Za određivanje brzine toka podzemne vode primjenjuju se metode upuštanja obilježivača (boja, soli ili radioaktivnih tvari) u jedan piezometar ili bunar i detekcije njihove koncentracije u drugom piezometru ili bunaru. Na temelju određivanja težišta difuznog vala (vala promjene koncentracije obilježivača u vremenu) te na osnovi poznatog smjera i duljine puta proračuna se i brzina podzemne vode. Razina, smjer i brzina podzemne vode najčešće ovise o razinama vode u otvorenim

vodenim tokovima nekog područja. Ponekad podzemne vode prihranjuju vode površinskih tokova, dok pri nailasku valova velikih voda vode iz otvorenih riječnih tokova prihranjuju podzemne vode. Potrebno je naglasiti da su pri analizama vodenih zalaha u kršu veoma važni upravo podaci o piezometarskim razinama koji pokazuju utjecaje viših i nižih kraških horizonata na otjecanje (posebno kroz ponore i estavele) u analiziranom kraškom polju.

Na mreži stanica hidrometeorološke službe u SFR Jugoslaviji razine podzemnih voda opažaju se jednom u tri, pet ili čak deset dana, već prema brzini kolebanja razine podzemne vode. Osnovna obrada ovih podataka gotovo da je identična s obradom vodostaja u otvorenim riječnim tokovima. Razlikuje se samo u dva elementa. Za podzemne vode određuju se korelacijske ovisnosti između razine u piezometrima međusobno i s razinom vode u rijeci. Osim toga, crtaju se karte s hidroizohipsama.

**Mreža hidroloških stanica.** Hidrološki i s njima vezani klimatološki podaci opažaju se, mjere, prikupljaju i publiciraju radi što kvalitetnijih informacija koje služe za gospodarenje vodama. Najvažniji podaci koji se prikupljaju mrežom organiziranih stanica jesu: padavine i snježni pokrivač, vodostaji i protoci, isparivanje, evapotranspiracija, transport suspendiranog i vučenog nanosa, kvaliteta vode, temperatura vode, led, razine podzemne vode i vlažnost tla. Budući da se svi ne mogu mjeriti i opažati na istoj stanici, organizirana je posebna mreža stanica za padavine, posebna za vodostaje itd. Vrlo je važno da se sve mreže stanica projektiraju i organiziraju tako da odgovore zajedničkom zadatku, a taj je da dadu najveću moguću informaciju o hidrološkim procesima koji se odvijaju na pojedinim slivovima. Zbog stohastičkog karaktera hidroloških veličina potrebno je da se na mreži stanica podaci prikupljaju neprekinuto u dužem vremenskom razdoblju. Posebno je nužno da mreže kišomjernih i snjegomjernih stanica budu usklađene s mrežom vodomjernih stanica kako bi se mogla određivati vodena bilanca sliva.

Hidrološka mreža stanica ima osnovnu i dopunsku mrežu stanica te mrežu stanica za posebne potrebe. Stanice osnovne mreže imaju duže i homogenije nizove opažanja, a njihovi se podaci publiciraju u hidrološkom godišnjaku. Stanice dopunske mreže obično imaju kraće nizove podataka mjerenja i s vremenom se ili ukidaju ili prema potrebi pretvaraju u stanice osnovne mreže. Ako se stanice uspostavljaju za specifične potrebe projektiranja i izvedbe nekog hidrološkog objekta, tada se one i ukidaju s prestankom razloga njihovog postavljanja.

U hidrološkom godišnjaku SFR Jugoslavije publiciraju se, osim navedenih, i sljedeći podaci: o suspendiranom nanosu, o pojavi leda na rijekama, o temperaturi vode i kvaliteti vode. Svi spomenuti podaci služe kao osnovni polazni materijal za više hidrološke analize i za projektiranje i izvođenje hidrotehničkih objekata.

LIT.: H. Addison, Hydraulic measurements. Chapman and Hall Ltd., London 1946. — A. T. Troškolanski, Theorie et pratique des mesures hydrauliques. Dunod, Paris 1962. — Г. В. Железников, Теоретические основы гидрометрии. Гидрометеиздат, Ленинград 1968. — W. H. Graf, Hydraulics of sediment transport. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York 1971. — В. В. Орлова, Гидрометрия. Гидрометеиздат, Ленинград 1974. — Guide to hydrological practices. WMO publication, Geneva 1974. — S. Jovanović, O. Bonacci, M. Anđelić, Hidrometrija. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 1977.

O. Bonacci

proturječne zahtjeve. Tako krila u horizontalnom letu moraju omogućiti što manje otpore uz zadani uzgon, pri slijetanju minimalne brzine i staze slijetanja, a pri polijetanju što bolje penjanje uz ograničenu stazu polijetanja letjelice. Takvi složeni zahtjevi, koji su istodobno i proturječni jer su krila dobrih karakteristika u horizontalnom letu loša za slijetanje odnosno polijetanje i obrnuto, rješavaju se ugradnjom uređaja za hiperpotisak. Za tu se svrhu krilo gradi s konstrukcijskim dodacima koji se pri slijetanju i polijetanju aktiviraju radi iskorišćivanja. Povećanje uzgona potrebno pri polijetanju ili slijetanju proizvodi se upotrebom vrlo različitih uređaja za hiperpotisak. Konstrukcijskim elementima postižu se kompromisna rješenja koja zadovoljavaju sve režime leta, ne umanjujući u većoj mjeri zahtijevane sposobnosti letjelice.

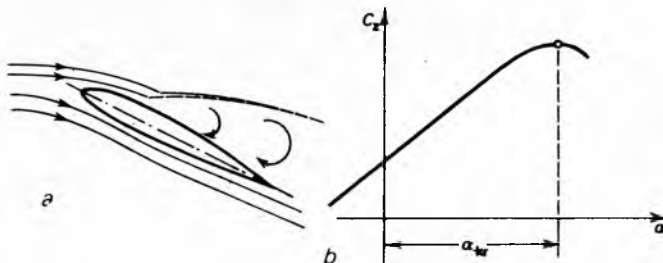
Prema tome, osnovni su zadaci uređaja za hiperpotisak: a) postizavanje što većeg dijapazona brzina, b) poboljšanje stabilneta i manevarskih karakteristika pri malim brzinama, c) povećanje kuta planiranja bez povećanja brzine pri slijetanju, d) smanjenje dužine zaleta i povećanje kuta penjanja u polijetanju.

Krilo koje je povoljno za režime maksimalnih brzina letjelice obično nije dobro za polijetanje i slijetanje. Takvo krilo ne posjeduje zadovoljavajući odnos uzgona prema otporu, odnos koji određuje kut planiranja pri slijetanju, a u istim uvjetima ne može ostvariti dovoljno visok uzgon koji određuje minimalnu brzinu slijetanja. Da bi se u primjeni postigle sve potrebne odlike krila, često je potrebno izmijeniti aerodinamički koeficijent maksimalnog uzgona  $C_{z_{max}}$ , vrijednost kuta planiranja pri maksimalnom uzgonu  $(C_x/C_z)_{C_{z_{max}}}$ , i faktor penjanja  $(C_z^3/C_x^2)$ . Istodobno treba nastojati umanjiti djelovanje svih uzroka koji stvaraju aerodinamički otpor pri velikim brzinama, i uvećati i kontrolirati otpore za smanjenje brzina slijetanja.

Brzina slijetanja praktično je jednaka minimalnoj brzini horizontalnog leta i određena je izrazom:

$$V_{min} = \sqrt{\frac{2}{\rho C_{z_{max}}} \left( \frac{G}{S} \right)} \quad (1)$$

gdje je  $\rho$  gustoća zraka,  $G$  masa letjelice,  $S$  površina krila, a  $C_{z_{max}}$  maksimalna vrijednost aerodinamičkog koeficijenta uzgona. Za zadanu se letjelicu poznate mase brzina slijetanja može smanjiti povećanjem površine krila  $S$  (što je moguće, ali u vrlo ograničenoj mjeri), ili povećanjem maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona. Povećanje je maksimalne vrijednosti, u stvari, promjena aerodinamičkih svojstava krila koja se može realizirati mijenjanjem geometrijskih karakteristika. Za praktične primjene hiperpotisak se ostvaruje dodatnim konstrukcijskim rješenjima koja mijenjaju osnovni oblik poprečnog presjeka, ili aeroprofila krila.



Sl. 1. Krilo pri kritičnom napadnom kutu. a odvajanje strujnica na gornjaci krila, b krivulja  $C_z = f(\alpha)$

**HIPERPOTISAK**, povećanje uzgona dobiveno dodatnim uređajima, tj. pomoćnim konstrukcijama koje mijenjaju osobine osnovnog aerodinamičkog tijela (prema grč. *ἕπερ* hiper preko, nad, iznad; riječ potisak upotrebljena je kao sinonim za uzgon).

Najčešći razlog zbog kojeg se koristi hiperpotisak jest nedovoljna sposobnost krila letjelica da bez dodatnih uređaja proizvedu potrebnu veličinu uzgona pri slijetanju i polijetanju. Aerodinamička tijela, odnosno površine koje imaju funkciju da proizvedu uzgon, moraju redovno zadovoljiti složene i često

Prekoračenje maksimalne vrijednosti aerodinamičkog uzgona, za konvencionalne oblike aeroprofila koji zadovoljavaju zahtjeve u putnim režimima letenja (krstarenja) uzrokuje odvajanje strujanja na gornjaci krila pri kritičnim napadnim kutovima. Povećavanje napadnih kutova iznad kritičnih vrijednosti, kao što je poznato, dovodi do opadanja uzgona uz nelinearne ovisnosti uzgona o napadnom kutu (sl. 1).

**Procijepi — kanali za stvaranje hiperpotiska.** Odvajanje je zračnih strujnica od površine aerotijela složeno zbivanje, pra-