

Izdavač:
Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Urednik:
doc. dr. sc. Igor Zorić, dipl. ing. el.

Recenzenti:
prof. dr. sc. Ognjen Bonacci, dipl. ing. građ.
prof. dr. sc. Marija Miletić, dipl. ing. fiz.
dr. sc. Dušan Trinić, dipl. ing. kult. tehn.
prof. dr. sc. Kosta Urumović, dipl. ing. geol.

Lektor:
Irena Jakelić

Naslovna stranica:
Oton Gliha, akad. slikar
Krčki pejzaž, 1998., ulje na platnu

Kompjutorska obrada teksta:
Ljiljana Šimec, dakt.
prof. Maja Žugaj

Slike u knjizi:
Jasenska Gregorina, tehn. crt.
Josip Kolar, građ. tehn.

Grafičko uređenje, priprema za tisak i tiskanje:
mtg-topgraf, Zagreb

Naklada:
1000 primjeraka

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb
UDK 556 (075.8)
ŽUGAJ, Ranko
Hidrologija / Ranko Žugaj. - Zagreb :
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2000. -
407 str. : ilustr. ; 24 cm - (Udžbenici
Sveučilišta u Zagrebu = Manualia
Universitatis studiorum Zagrabiensis)
Bibliografija: str. 383-392. - Kazala.
ISBN 953-96303-7-1
400224091

© Sva prava pridržava autor

Odlukom Senata Sveučilišta u Zagrebu br. 02-2150/3-1999. od 9. studenoga 1999. godine
odobrava se udžbeniku pod naslovom *Hidrologija*, autora dr. sc. Ranka Žugaja korištenje naziva
sveučilišni udžbenik (*Manualia universitatis studiorum Zagrabiensis*).

Prof. dr. sc. Ranko Žugaj, dipl. ing. građ.

HIDROLOGIJA



Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Zagreb, 2000.



GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

INV. BROJ

7029
556 (075.1)

SIGN.

FUG
u

)

mojim roditeljima

Zahvaljujemo svima koji su financijski pomogli i omogućili tiskanje udžbenika:

- MINISTARSTVO ZNANOSTI I TEHNOLOGIJE REPUBLIKE HRVATSKE, Zagreb
- HRVATSKE VODE, Zagreb
- HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA, Zagreb
- ZGO, Poduzeće za zaštitu okoliša i gospodarenje otpadom, Zagreb
- VODOVOD I KANALIZACIJA, Split
- HIDROPROJEKT - ING, Zagreb
- HIDROING, Zagreb
- GEOKON, Zagreb
- HIDROINŽINJERING, Zagreb

SADRŽAJ

	PREDGOVOR	11
1	PODRUČJE I RAZVOJ HIDROLOGIJE	13
1.1	Definicija i podjela hidrologije	13
1.2	Hidrološki ciklus	15
1.3	Povijest i razvoj hidrologije	18
1.4	Razvoj hidrologije u Hrvatskoj	35
1.5	Zadaci i primjena inženjerske hidrologije	42
1.6	Općenito o otjecanju vode u kršu	46
1.7	Pristup hidrološkim izračunima	48
2	OSNOVE MEHANIKE FLUIDA	51
2.1	Uvod	51
2.1.1	Mjerne jedinice u mehanici fluida	52
2.2	Glavne fizičke osobine tekućine	53
2.2.1	Pojam i svojstva tekućine	53
2.2.2	Gustoća	54
2.2.3	Elastična svojstva tekućina	55
2.2.3.1	Elastičnost	55
2.2.3.2	Stlačivost	55
2.2.4	Viskoznost	56
2.2.5	Tlak vodenih para	57
2.2.6	Kapilarnost	58
2.2.7	Tlak	58
2.2.8	Anomalije vode	60
2.3	Hidrostatika	60
2.3.1	Raspodjela hidrostatičkoga tlaka	60
2.3.2	Raspodjela potencijalne energije u tekućini	62
2.3.3	Sile hidrostatičkoga tlaka na bočne plohe	63
2.3.2	Plivanje tijela i Arhimedov zakon	66
2.3.3	Relativno mirovanje	67
2.4	Kinematika tekućina	68
2.4.1	Vrste strujanja s kinematičkoga stanovišta	69
2.4.2	Jednadžba kontinuiteta	71
2.4.3	Vrste stacionarnoga strujanja s kinematičkoga stanovišta	71
2.4.4	Vrste strujanja s obzirom na strujnu sliku	72

2.5	Dinamika tekućina	72
2.5.1	Zakon održanja količine gibanja tekućine	73
2.5.2	Bernoullijeva jednadžba za tečenje idealne i realne tekućine pod tlakom	76
2.5.2.1	Venturimetar (Venturijev vodomjer)	90
2.5.3	Tečenje vode u otvorenim koritima	93
2.5.3.1	Jednoliko tečenje	94
2.5.3.2	Protočna krivulja i modul protoka	97
2.5.3.3	Koeficijent kinetičke raspodjele brzine po presjeku ili Coriolisov broj	98
2.5.3.4	Nejednoliko tečenje	99
2.5.3.5	Specifična energija presjeka, mirno i silovito tečenje, kritična dubina	101
2.5.3.6	Istjecanje kroz otvore	104
2.5.3.7	Preljevi	109
2.5.3.8	Vodni skok i slapište	111
2.6	Dimenzionalna analiza	115
3	OSNOVE METEOROLOGIJE	119
3.1	Uvod	119
3.2	Strujanja u atmosferi	124
3.3	Zračenje Sunca i Zemlje	128
3.4	Vlaga u atmosferi	136
3.5	Vjetar	139
3.6	Isparavanje - evapotranspiracija	141
3.7	Oborina	147
3.7.1	Postanak oborine	147
3.7.2	Vrste oborina	148
3.7.3	Tipovi oborina	150
3.7.4	Mjerenje oborina	150
3.7.5	Čimbenici koji djeluju na količinu oborine	154
3.7.6	Potreban broj kišomjernih stanica	155
3.7.7	Određivanje srednje količine oborine na slivu	156
3.7.8	Godišnji hod oborine	158
3.7.9	ITP i PTP krivulje	159
4	HIDROLOGIJA POVRŠINSKIH VODA	163
4.1	Osnovni pojmovi	163
4.2	Glavne karakteristike hidroloških pojava	164
4.3	Osnove statistike i računa vjerojatnosti u hidrologiji	168

4.3.1	Osnovni statistički parametri	168
4.3.2	Općenito o obradi podataka	170
4.3.3	Gaussova (normalna) raspodjela	182
4.4	Korelacijska analiza	186
4.4.1	Općenito o korelaciji	186
4.3.2	Linearna korelacija	188
4.5	Sliv	194
4.5.1	Oblik sliva	197
4.5.2	Srednja nadmorska visina sliva	198
4.5.3	Pad sliva	198
4.5.4	<u>Pad vodotoka</u>	200
4.5.5	Gustoća drenске mreže u slivu	201
4.5.6	Koeficijent otjecanja, specifični i sumarni specifični dotoci	201
4.6	Hidrometrija	204
4.6.1	Mjerenje razina vode	204
4.6.2	Mjerenje količina vode	211
4.6.2.1	Volumenska (obujmena ili volumetrijska) metoda	212
4.6.2.2	Mjerenje brzina vode u vodotoku	213
4.6.2.3	Mjerenje protoka preljevima i različitim uređajima	220
4.6.2.4	Mjerenje količine vode primjenom obilježivača	228
4.6.3	Mjerenje pada vodnoga lica	229
4.6.4	Mjerenje nanosa	232
4.7	<u>Protočna krivulja</u>	236
4.7.1	<u>Produljivanje protočne krivulje</u>	244
4.8	<u>Procesi otjecanja</u>	247
4.9	<u>Oblici pojavljivanja vode u tlu</u>	250
4.10	Pražnjenje podzemlja	252
4.11	Podjela vodotoka	254
4.12	Promjenljivost razina vode u vodotocima	255
4.13	<u>Hidrogram i njegovi sastavni dijelovi</u>	259
4.14	Hidrološke osnove reguliranja protoka	269
4.15	Protoci u modulnim koeficijentima	276
4.16	Velike vode	282
4.16.1	Općenito o velikim vodama	282
4.16.2	Određivanje velikih voda primjenom statističkih metoda	288
4.16.3	Metoda jediničnoga hidrograma	304
4.16.4	Metoda izokrona	317
4.16.5	Iskustvene (empirijske) formule	321
4.17	Male vode	340
4.18	Hidrološka suša	344

4.19	Problem biološkoga minimuma	347
4.20	Nanos u vodotocima	351
4.20.1	Postanak i vrste nanosa	351
4.20.2	Pronos nanosa	355
4.20.3	Nanos u akumulacijskim jezerima	362
4.21	Jednadžba hidrološke bilance vode u općem obliku	365
4.22	Regionalna hidrološka analiza	367
4.22.1	Općenito o regionalnoj analizi	367
4.22.2	Analize osnovnih podloga	368
4.22.3	Karakteristični parametri	369
4.22.4	Ispitivanje međusobnih veza i definiranje zakonitosti veza	370
4.22.5	Primjeri regionalnih istraživanja u svijetu i Hrvatskoj	371
5	LITERATURA	383
6	KAZALO IMENA	393
7	KAZALO POJMOVA	397

PREDGOVOR

U ovoj su knjizi opisane glavne značajke hidroloških pojava, te prikazani pristupi i metode kojima se nastoji što realnije opisati te pojave. Hidrološki su zadaci vrlo složeni, a njihovu rješavanju hidrologiji doprinose različite znanstvene discipline (matematika, vjerojatnost i statistika, mehanika fluida, meteorologija, fizika, itd.). Budući da je za ispravno shvaćanje osnovnih fizičkih svojstava otjecanja naročito važno poznavanje mehanike fluida i meteorologije, one su na odgovarajući način obrađene u zasebnim poglavljima.

Kako se hidrologija u novije vrijeme izvanredno razvila, pojedina poglavlja ove knjige obuhvaćaju gradivo koje prelazi okvire dodiplomskoga studija, a dijelom pripada i poslijediplomskome studiju. Nastojalo se cjelovito obuhvatiti područje inženjerske hidrologije, definirati glavne pojmove, opisati bitne značajke otjecanja i prikazati praktične inženjerske postupke izračunavanja hidroloških parametara. Studenti će vidjeti da je hidrologija zanimljiv kolegij, koji se znatno razlikuje od ostalih praktičnih predmeta. Razlika je u tome što prirodne pojave koje proučava hidrologija ne podliježu tako strogim analizama, uobičajenima u inženjerskoj mehanici. U hidrologiji je područje razmišljanja vrlo široko, u hidrološkim se analizama rabe različite metode, a često se tek ocjenjuje realnost rezultata hidroloških izračuna.

Područja hidrologije obrađena u knjizi te ulaženja u druge znanstvene discipline koje su nezaobilazne za razumijevanje hidrološke problematike, zahtijevala su od recenzenata cjelovito sagledavanje obrađenoga gradiva i vrlo temeljite recenzije.

Recenzentima prof. dr. sc. Mariji Miletić, prof. dr. sc. Ognjenu Bonacciju, prof. dr. sc. Kostu Urumoviću i dr. sc. Dušanu Trniniću zahvaljujem na pažljivome pregledavanju rukopisa te korisnim primjedbama i sugestijama koje su doprinijele poboljšanju knjige. Zahvaljujem doc. dr. sc. Slavki Pfaff na primjedbama na poglavlja u kojima je obrađena statistika, a mr. sc. Janji Milković na primjedbama na poglavlje Osnove meteorologije.

Akademskom slikaru gospodinu Otonu Glihi zahvalan sam na uređenju naslovne stranice.

Gospodici Ireni Jakelić zahvaljujem na lekturi rukopisa.

Gospođi Ljiljani Šimec i prof. Maji Žugaj zahvaljujem na kompjutorskoj obradi teksta, a gospođi Jasenki Gregorini i građ. tehn. Josipu Kolaru zahvaljujem na izradi crteža u knjizi.

Pri radu na ovom udžbeniku veliku mi je pomoć pružio Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu i unutar njega Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, čiji sam član. Stoga zahvaljujem dekanu prof. dr. sc. Darku Mayeru, predstojniku zavoda prof. dr. sc. Ivanu Dragičeviću i uredniku udžbenika doc. dr. sc. Igoru Zoriću.

Zahvaljujem svima koji su novčano potpomogli izlaženje ovoga udžbenika.

Ranko Žugaj



Slap Krčića

1 PODRUČJE I RAZVOJ HIDROLOGIJE

1.1 Definicija i podjela hidrologije

Prema UNESCO-vu i WMO-vu Međunarodnome rječniku hidroloških pojmova iz 1992. godine hidrologija je definirana na dva načina:

1. **Hidrologija** je znanost koja se bavi vodama iznad, na i ispod Zemljine površine; pojavljivanjem, otjecanjem i raspodjelom vode u vremenu i prostoru; biološkim, kemijskim i fizikalnim svojstvima vode i djelovanjem vode na okoliš, uključujući i utjecaj na živa bića.

2. **Hidrologija** je znanost koja se bavi procesima upravljanja, mijenjanja i nadopunjavanja vodnih zaliha na Zemljinoj površini i tretira različite faze u hidrološkome ciklusu.

Ako se izuzmu biološke i kemijske osobine vode, može se postaviti definicija hidrologije u užem smislu: **hidrologija** je znanost koja proučava pojave vode na Zemlji i zakone njezina stalnoga kruženja.

Unutar toga, hidrološka razmatranja najčešće se odnose na površinsko otjecanje vode. Otjecanjem se naziva onaj dio oborina koji se pojavljuje kao dotok. Površinsko otjecanje definira se dovođenjem u vezu količina vode s promjenama razina vode (odnos protoka vode prema vodostaju).

Hidrologija se dijeli na pet osnovnih disciplina:

1. **Hidrometeorologija** je znanost o vodi u atmosferi. Ona povezuje probleme hidrologije i meteorologije u hidrološkome ciklusu, odnosno u kruženju vode u prirodi.

2. **Potamologija** je grana hidrologije koja proučava površinske tokove i njihove vodne režime. Ona uključuje hidrodinamiku te elemente ispiranja (erozije) i taloženja nanosa u vodotocima. U potamologiji se posebno ističu **hidrografija**, koja opisuje površinske vodene tokove i **hidrometrija**, odnosno tehnika mjerenja površinskih i podzemnih voda.

3. **Limnologija** je znanost o jezerima i slatkim vodama stajaćicama. U izučavanje voda koje miruju uključeni su hidrološki fenomeni, a naročito su naglašene analize utjecaja na okoliš.

4. **Kriologija** proučava vodu u njezinim čvrstim oblicima, npr.: led, tuču, snijeg i soliku.

5. **Hidrologija podzemnih voda** je grana hidrologije koja se bavi podzemnim vodama, njihovim pojavama i kretanjima u različitim uvjetima u litosferi. Ova se

interdisciplinarna znanost sastoji pretežno od hidrologije i geologije, a bavi različitim pojavama i ponašanjem vode u podzemlju. Koriste se još i nazivi **hidrogeologija**, **geohidrologija** ili jednostavno **podzemne vode**, a rabe se ovisno o tome koji se vid proučavanja želi naglasiti (D. F. Lapidus, 1990.). Kod nas se najčešće koristi naziv hidrogeologija.

Prema tome, hidrologija je znanost koja se bavi analizama i studijama brojnih utjecaja vode u vezi s njezinim gibanjem i djelovanjem na živu i mrtvu prirodu. Ona proučava režime vode u atmosferi, na površini i ispod površine Zemlje, bez obzira na agregatno stanje vode. U to su uključena motrenja, opažanja, bilježenja pojedinih veličina u prirodi te razrade i analize tih podataka. Na temelju tih podataka i analiza izvode se mjerodavni zaključci o raspoloživim vodnim količinama i njihovoj raspodjeli u vremenu i prostoru.

Zbog složenosti hidroloških problema potreban je interdisciplinarni pristup njihovom izučavanju i rješavanju. Stoga velik doprinos hidrologiji daju sljedeće znanstvene discipline: matematika, vjerojatnost i statistika, geologija, hidrogeologija, geografija, fizika, kemija, biologija, mehanika fluida, meteorologija, pedologija s poljoprivredom, šumarstvo i informatika.

Matematičkim se izrazima određuju odnosi između dviju i više veličina, a pojedina bitna svojstva u vezi s otjecanjem (npr.: ovisnost protoka o vodostaju - protočna krivulja, ovisnost specifičnih dotoka o veličini sliva - krivulja specifičnih dotoka) opisuje se parametrima. Osim u određivanju odnosa među hidrološkim parametrima, matematički postupci sadržani su u svim hidrološkim izračunima, opisima hidroloških procesa i simulacijama na modelima. Primjenom vjerojatnosti i statistike na nizove hidroloških podataka, izvode se statističke analize i zaključci o vjerojatnosti pojavljivanja budućih hidroloških događaja.

Budući da su oborine najvažniji faktor koji uzrokuje otjecanje, meteorologija je nezaobilazna znanstvena disciplina u hidrološkim analizama. Pedologija, poljoprivreda i šumarstvo prvenstveno su važni zbog uvjeta otjecanja vode i stvaranja nanosa. Za određivanje baza hidroloških podataka te uporabe odgovarajućih hidroloških programa i matematičkih modela za simulacije otjecanja neophodna je primjena informatike.

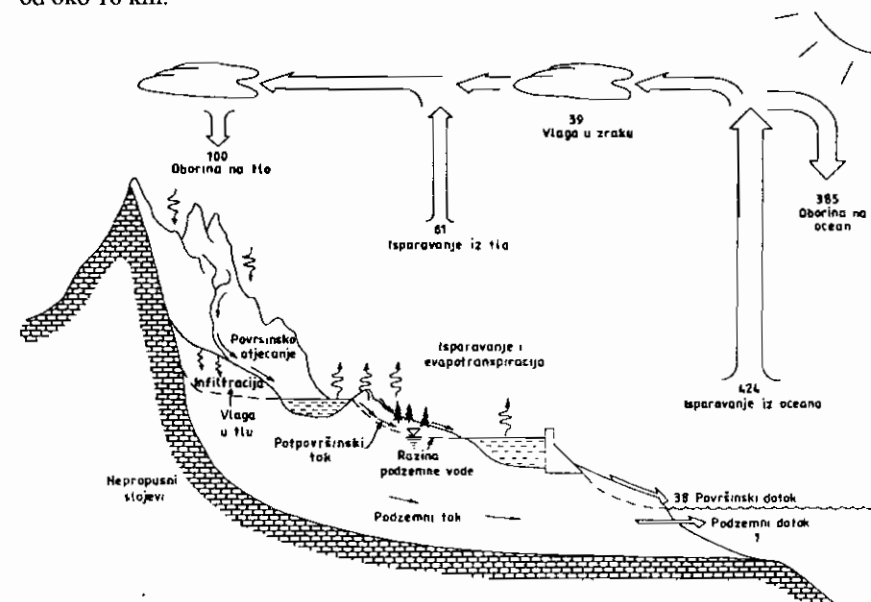
Poznavanje geološke građe slivnoga područja predstavlja preduvjet za donošenje zaključaka o uvjetima otjecanja vode, dok je hidrogeologija neizostavna u proučavanju podzemne komponente otjecanja kod kruženja vode u prirodi. Zemljopisne su osobine općenito značajne u opisivanju slivnoga područja i određivanju mreže vodotoka (hidrografska mreža). Na osnovi topografske sličnosti, a uzimajući u razmatranje i ostale značajke bitne za otjecanje vode - prvenstveno geološke i klimatološke - moguće je izvoditi zaključke o sličnosti različitih slivnih područja u pogledu otjecanja vode. Na taj se način može ocijeniti ima li smisla hidrološke zakonitosti izvedene za sliv o kojemu postoji više podataka primijeniti na područja o kojima je prikupljeno malo hidroloških podataka ili ih uopće nema.

Fizika pak, a posebice mehanika fluida, odnosno hidraulika, bitne su zbog proučavanja temeljnih zakonitosti otjecanja vode i nanosa u vodotocima, dok je u proučavanju kakvoće vode osobito značajan doprinos kemije.

1.2 Hidrološki ciklus

Hidrološki ciklus je kruženje vode kroz atmosferu i na Zemljinoj površini. To je slijed prelaženja vode iz atmosfere na Zemlju i njeno vraćanje u atmosferu; isparavanje iz oceana, mora, jezera i rijeka te s kopna, pri čemu dolazi do izražaja isparavanje vode iz biljaka. U oblacima dolazi do kondenzacije pa se stvaraju oborine koje padaju natrag u oceane i na kopno. U oceanima, morima, jezerima, vodenim tokovima i na kopnu voda se potom akumulira, te opet isparava.

Hidrološki ciklus zbiva se u Zemljinoj sustavu: u atmosferi, hidrosferi (na površini) i litosferi (tvrdi sastav Zemlje ispod hidrosfere). Voda prodire u Zemlju prosječno do 1 km (u kršu i do 2-3 km), a u atmosferu do 15 km, pa se čitav proces zbiva u amplitudi od oko 16 km.



Slika 1.1 Hidrološki ciklus (V. T. Chow i dr. 1988.)

Na slici 1.1 shematski je prikazano kruženje vode u prirodi. Hidrološki ciklus je važan za razumijevanje vodne bilance, odnosno vodnoga bilansa. **Vodna bilanca** je pregled raspoložive vode temeljen na načelu da tijekom određena vremenskog intervala ukupni višak ili manjak vode u danome slivnom području ili vodnome objektu

mora biti jednak zbroju ukupnoga gubitka ili viška vode i neto promijenjene zalihe vode u slivu ili vodnome objektu.

U tablici 1.1 prikazane su približne količine vode na Zemlji, u atmosferi, hidrosferi i litosferi.

Tablica 1.1 Količine vode u hidrološkome ciklusu (D. R. Maidment i dr., 1993.)

Područje	Površina (10^6 km^2)	Količina vode (10^3 km^3)	Postotak ukupne vode	Postotak slatke vode
Atmosfera (A) Para kao ekvivalent vode	510,1	12,90	0,001	0,04
Hidrosfera (H) Oceani i mora	361,3	1.338.000,00	96,54	
Kopno:				
rijeka	148,8	2,12	0,0002	0,006
slatkovodna jezera	1,2	91,00	0,0066	0,26
slana jezera	0,8	85,40	0,0062	
močvare	2,7	11,47	0,0008	0,031
biološka voda	510,1	1,12	0,0001	0,003
vlaga u tlu	82,0	16,50	0,0012	0,05
polarni led	16,0	24.023,50	1,73	68,58
ostali led i snijeg	0,3	340,60	0,025	0,97
Litosfera (L) Podzemna voda				
slatka	134,8	10.530,00	0,760	30,06
slana	134,8	12.870,00	0,928	
Slatka voda na Zemlji	148,8	35.029,21	2,53	100,00
Ukupno vode na Zemlji	510,1	1.385.984,61	100,00	

Tablica 1.2 Prosječna godišnja vodna bilanca Zemljine kugle (D. Srebrenović, 1986.)

Područje	Površina (10^6 km^2)	Količina vode (10^3 km^3)			Prosjeak (mm)		
		Oborina <i>P</i>	Isparavanje <i>E</i>	Otjecanje <i>Q</i>	Oborina <i>P</i>	Isparavanje <i>E</i>	Otjecanje <i>Q</i>
Oceani i mora	361,3	412	448	-36	1140	1240	-100
Kopno s otjecanjem	116,8	89	53	+36	762	454	+308
Kopno bez otjecanja	32,0	10	10	-	313	313	-
Zemlja ukupno	510,1	511	511	-	1002	1002	0

Različiti autori određivali su vodnu bilancu Zemljine kugle. P. Meinardus, M. A. Velikanov, H. Lettau, M. I. Budyko i D. Srebrenović (1986.). U tablici 1.2 iznesene su prosječne godišnje veličine hidrološkoga ciklusa za oceane i kopno.

Također je potrebno definirati pojam **hidrološkoga** ili **vodnoga režima**. To su *varijacije stanja i karakteristika vodnoga toka, koje se ponavljaju u vremenu i prostoru i koje prolaze kroz faze, npr. sezonske.*

Dio vode koja isparava iz oceana i mora odlazi u oblacima do kopna iznad kojega se pretvara u oborinu, pada na tlo i otječe. Zbog toga je u tablici 1.2 za oceane i mora otjecanje *Q* označeno negativnim, a kod kopna pozitivnim predznakom, odnosno količina vode koja ispari iz oceana ne vraća se u njih izravno u obliku oborina, već se nadoknađuje s kopna.

Kao što je navedeno u tablici 1.1, u atmosferi se prosječno nalazi oko $12,9 \cdot 10^3 \text{ km}^3$ vode u obliku vodene pare, a tablica 1.2 pokazuje da prosječno godišnje isparavanje iznosi oko $511 \cdot 10^3 \text{ km}^3$, što je oko 40 puta više. Prema tome, vodene mase u atmosferi mijenjaju se približno svaki deveti dan. Osim toga, ako se ukupna količina vode koja ispari ($511 \cdot 10^3 \text{ km}^3$) podijeli s ukupnom količinom vode na Zemlji ($1.385,98 \cdot 10^6 \text{ km}^3$) dobije se da samo 0,37 posto ukupne vode kruži u obliku ovakva ciklusa. To znači da su vrlo velike količine vode ostale u stanju relativnoga mirovanja.

Na temelju tablice 1.1 moguće je približno odrediti odnos količine vode u hidrosferi *H*, litosferi *L* i atmosferi *A*:

$$H : L : A = 107.500 : 1800 : 1 \quad (1.1)$$

Prema tome, vodne zalihe su vrlo velike i kada bi one jednoliko pokrivala Zemljinu površinu, njihova bi debljina bila 2720 m. No najveći dio te vode, preko 96 posto, predstavlja slana voda. Količina slatke vode procjenjuje se na oko $35 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, od čega 68 posto otpada na polarni led i ledenjake, a oko 30 posto na podzemnu vodu.

Ukupna količina vode koja se uklapa u hidrološki ciklus i koja se, prema podacima danim u tablici 1.2., obnavlja, iznosi oko $36 \cdot 10^3 \text{ km}^3$. Prema tome, po jednome čovjeku na svijetu to bi danas iznosilo prosječno oko 6000 m^3 godišnje, što na prvi pogled izgleda sasvim povoljno. No pritom treba uzeti u obzir uglavnom nepovoljnu raspodjelu vode u velikom dijelu svijeta, sve veće potrebe za vodom, a i sve veća zagađivanja vode. Na kraju 20. stoljeća potrošnja vode u svijetu je oko 5500 km^3 , što je 15 posto količina koje se redovito obnavlja. Iako izgleda da za sada ne bi trebalo biti velikih problema s vodom, situacija u budućnosti bi se mogla pogoršati zbog porasta standarda i broja stanovnika, a naročito zbog nemara kojim se ljudi često odnose prema prirodnim bogatstvima u koje spada i voda.

Četnaest posto zemalja u svijetu raspolaže s manje od 1000 m^3 vode po stanovniku godišnje, što u vodoopskrbi predstavlja donju granicu siromaštva. U 37 posto zemalja raspolaže se s 1000 do 5000 m^3 vode po stanovniku godišnje i to su zemlje koje u sušnim godinama imaju premalo vode. Prihvatljivom količinom vode, od 5000

do 10.000 m³/stan./god. raspolaže 14 posto zemalja. Za 35 posto zemalja, koje raspolažu s preko 10.000 m³ vode po stanovniku godišnje, smatra se da obiluju vodom.

Zahvaljujući vrlo povoljnim klimatskim, hidrološkim i hidrogeološkim značajkama te srazmjerno malome broju stanovnika, u Hrvatskoj su prilike za vodoopskrbu vrlo povoljne. Raspoložive količine vode predstavljaju 15.000 m³/stan./god. prosječno od oborina, preko 7000 m³/stan./god. obnovljivih zaliha podzemnih voda i preko 30.000 m³/stan./god. vode koja iz susjednih zemalja rijekama dotječe u Hrvatsku. Iz toga se može zaključiti da Hrvatska danas raspolaže sa značajnim količinama vode. Ni ubuduće stanje neće biti zabrinjavajuće, uz uvjet da se vodom pažljivo gospodari i sačuva njezina odgovarajuća kakvoća (D. Mayer, 1996.).

1.3 Povijest i razvoj hidrologije

U ovom se poglavlju povezuje razvoj hidrologije s povijesnim razvojem ljudskoga društva, čime se želi dokumentirano dokazati da se hidrologija kao struka i znanost razvijala zajedno s potrebama ljudi da koriste vodu i da se zaštite od njezina štetnog utjecaja. Zbog toga se daje sažeti prikaz događaja bitnih za razvoj hidrologije kroz povijest (R. Žugaj, 1998.a).

U klasičnoj hidrološkoj literaturi (A. K. Biswas, 1963., 1969., V. T. Chow i dr., 1964., R. K. Linsley i dr. 1949., 1988., C. O. Wisler i E. F. Brater, 1967.) u kojoj se opisuje povijest hidrologije, samo su djelomično prikazane najvažnije okolnosti u kojima se hidrologija razvijala. Ovo se naročito odnosi na vrlo značajne početke razvoja hidrologije u vrijeme drevnih visokih civilizacija. U tom je smislu znatno više podataka dano u opsežnoj Biswasovoj Povijesti hidrologije iz 1972. godine. No cjelovitu je predodžbu o razvoju hidrotehnike i hidrologije moguće dobiti tek nakon pomnijega proučavanja povijesne literature (N. Vejnović, 1965., Velika ilustrirana povijest svijeta, 1974.) te članaka o razvoju hidrologije napisanih u novije vrijeme (S. C. Mehrotra, 1977., Z. M. Radić, 1991., W. K. Shenouda, 1994.).

Prema Ven Te Chowu (1964.), razvoj hidrologije dijeli se na osam karakterističnih razdoblja. Takva je podjela prihvaćena i ovdje, osim što Ven Te Chow prvo razdoblje smješta u doba antičke Grčke, a u ovome je poglavlju početak postavljen znatno ranije - u doba razvijanja drevnih visokih civilizacija.

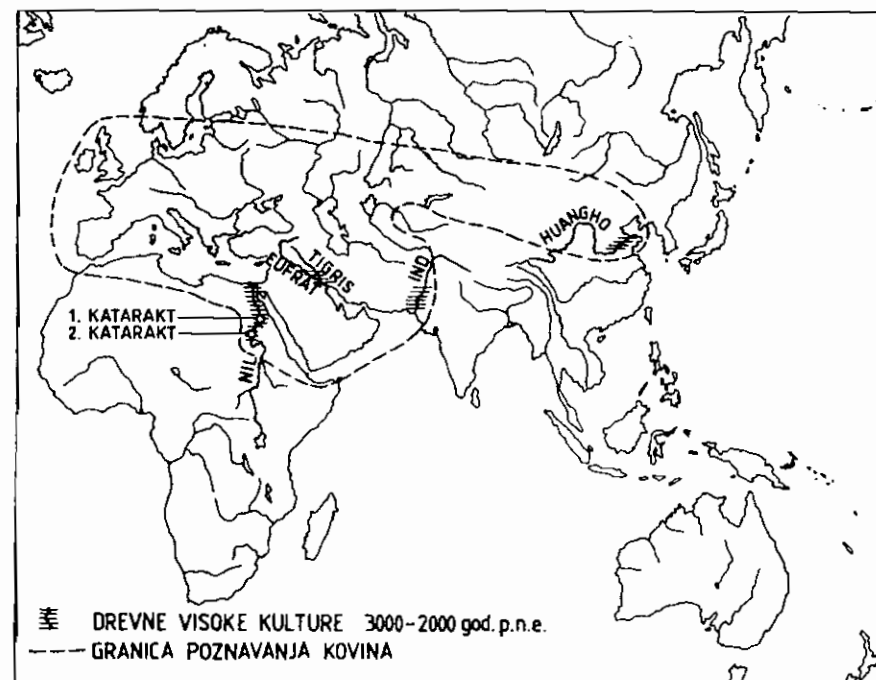
A. Razdoblje nagađanja (od Staroga vijeka do kraja 14. stoljeća)

Proučavanja i upoznavanja glavnih značajki vodnih režima, odnosno prva hidrološka istraživanja, povezana su s nastankom prvih drevnih visokih civilizacija (slika 1.2). Tijekom 5. tisućljeća prije Krista zbila su se dva događaja od presudna značaja za sav povijesni i kulturni razvitak. Prvi je događaj bio naseljavanje donjih naplavnih ravnica

Eufrata i Tigrisa, kasnije Babilonije, a drugi je bio koloniziranje Nila iz prednje Azije. U tim se područjima polja moglo uspješno obrađivati jedino pomoću umjetnoga natapanja. Stoga je u tim zemljama, Egiptu i Babiloniji, zbog različitosti prirodnih prilika trebalo pronaći i različita rješenja (R. K. Linsley i dr. 1988.) Stoga su veliki hidrotehnički radovi u Starom vijeku zahtijevali izučavanje hidroloških pojava i sposobne stručnjake u području hidrologije, kao što smatraju R. K. Linsley, M. A. Kohler i J. L. H. Paulhus (1949.).

Drevne visoke civilizacije razvile su se uz rijeke Tigris i Eufrat u Mezopotamiji, Nil u Egiptu, Ind u Indiji, te Huang-ho u Kini. Sve su četiri civilizacije nastale u sličnim geografskim uvjetima, u područjima gdje pada malo oborina, a ljeta su vrlo topla i koja su se nalazila u blizini rijeka s nestalnim vodnim režimima. Iz takvih je prirodnih uvjeta proizašla potreba čovjeka da se brani od djelovanja velikih voda i gradi sustave za navodnjavanje kako bi mogao proizvoditi hranu potrebnu za život.

Rijeka Nil, duljine 6650 km, među najduljim je rijekama u svijetu, a sliv joj obuhvaća oko 2,8 mil. km². Dolina Nila naseljena je više od 20.000 godina, a organizirano obrađivanje zemlje i uzgoj stoke na tom području provodi se neprekidno oko 7000 godina (započeto je nešto kasnije nego u Mezopotamiji, ali ne bez izravnih veza između tih dviju velikih zemalja).



Slika 1.2 Područja drevnih visokih civilizacija (Velika ilustrirana povijest svijeta, 1974.)

Nilska je dolina do 1. katarakta široka samo 2 do 5 km. Nizvodno od 1. katarakta do Sredozemnog mora proširuje se u 10 do 25 km široku dolinu koja je duga 120 km i prekrivena crnom plodnom naplavljenom zemljom.

U staroj se državi Gornja Nubija nalazila uzvodno od 2. katarakta, Donja Nubija između 1. i 2. katarakta, a nizvodno od 1. katarakta prostirali su se Gornji Egipat sa sjedištem vlasti u Tinisu i, još nizvodnije, Donji Egipat s glavnim gradom Memfisom.

U Egiptu je Nil kalendarskom točnošću počinjao rasti u mjesecu lipnju, a najviši je godišnji vodostaj bio redovito u rujnu, kada je ujedno dolazilo i do velikih izlivanja vode i plavljenja prostranih inundacija. U listopadu je voda redovito opadala i Nil se vraćao u staro korito. Slijedili su blagi zimski mjeseci, a nakon kratka prelaznoga razdoblja u travnju i svibnju dolazilo je vruće ljeto, kada bi - u lipnju - Nil opet počinjao lagano rasti. Na početku nastajanja Egipatske države nisu postojali veliki sustavi navodnjavanja, nego su, vjerojatno, nasipima od kamena i zemlje bile ograđivane samo manje doline na rubu nilske ravnice. Nakon toga uslijedila je izgradnja nasipa u cijeloj ravnici Nila, a u 3. tisućljeću prije Kr. nilska je voda prelazila od polja do polja kroz mrežu nasipa, brana i kanala. Naselja u ravnici bila su nasipima zaštićena od poplava.

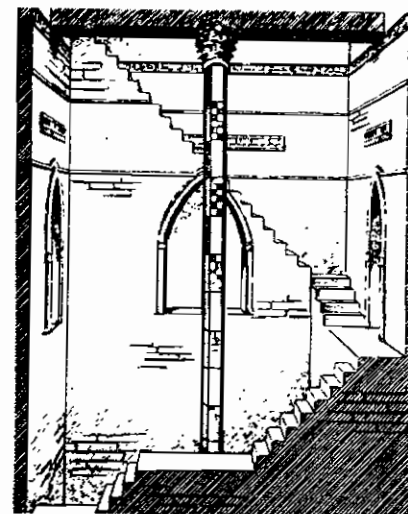
Porast razine vode Nila od lipnja do rujna, koji je u Egiptu prije izgradnje brane Asuan iznosio i do sedam metara, tisućama je godina zbunjivao ljude, budući da u Egiptu gotovo nikada ne pada kiša. Ovaj problem, nazvan "zagonetkom Nila", riješen je na osnovi razmatranja vodnoga režima Nila tek krajem 19. stoljeća.

Poznato je da Nil nastaje iz dviju rijeka: Bijeloga i Modroga Nila. Za Bijeli Nil izvorišna je rijeka Kagera, pritok Viktorijin jezero, iz kojeg istječe Viktorijin Nil i utječe u Albertovo jezero. Iz Albertova jezera istječe Albertov Nil, koji se nizvodno od grada Nimule na jugu Sudana zove Bahr el Jebel. Iza ušća pritoka Bahr el Ghazala se zove Bijeli Nil. Bijeli Nil ima ujednačen protok vode tijekom cijele godine i nije uzrok porastu vodostaja Nila u donjem toku, a u najsušnijemu razdoblju godine (u travnju i svibnju), kad je vodostaj Nila najniži, 85 posto vode u Nil dotječe iz Bijeloga Nila.

Modri Nil izvire u planinskim predjelima Etiopije, u kojima u kasno proljeće padaju obilne kiše i intenzivno se topi snijeg. Te se vode slijevaju u Modri Nil, njime teku u Nil i povećavaju njegovu vodnost, te su prije izgradnje brane Asuan bile uzrokom poplava.

Iako je malo poznatih pojedinosti o izgledu drevnih brana na Nilu, utvrđeno je da se u Egiptu već krajem 4. tisućljeća prije Kr. razvio poseban sustav mjerenja vodostaja Nila duž cijela njegova toka. Na određenim su razmacima na obalnim ili hramskim zidovima postojala posebno označena mjesta ("nilomjeri") podijeljena na laktove (1 egipatski kraljevski lakat = 0,52 m, a dijeli se na 7 dlanova ili na 28 palaca). Opažene vrijednosti vodostaja pohranjivane su u arhivima hramova ili palača. Na osnovi podataka s južnoga, najuzvodnijeg nilomjera u Nubiji, ustanovljavao je dolazak velikih voda Nila, pa je na vrijeme upozoravano da se nizvodno poduzmu odgovarajuće mjere.

Na slici 1.3 prikazan je nilomjer prema rekonstrukciji iz 1798. godine.



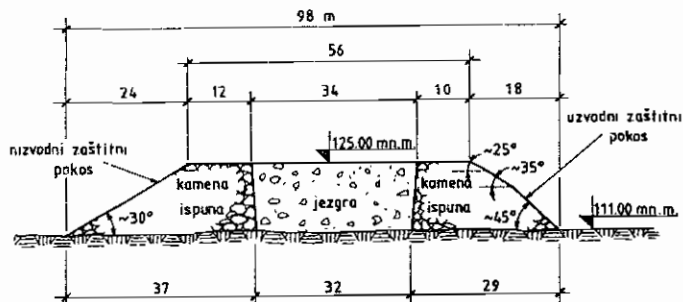
Slika 1.3 Nilomjer - rekonstrukcija iz 1798. godine, (A. K. Biswas, 1972.)

Još uvijek nije poznato kada su u Egiptu bili izgrađeni prvi hidrotehnički objekti. Najraniji poznati zapisi sa spomenika ("Palermki kamen") spominju kanale za natapanje koji postoje već u vrijeme kralja Škorpiona iz prve dinastije, koji je vladao oko 3200. godine prije Kr. (Njegovo ime potječe od škorpiona naslikana ispred kralja na jednoj vazi iz tog vremena.) Kralj Menes, također vladar Egipta iz prve dinastije, dao je izgraditi branu za skretanje vode Nila, kako bi njegov glavni grad Memphis mogao biti izgrađen na plodnome tlu nastalom od riječnoga nanosa.

Oko 2850. godine prije Kr., u razdoblju treće ili četvrtice dinastije, izgrađena je velika brana Sadd el-Kafara na Vadi Garawa, 30 kilometara od današnjega Kaira. Uz obale Vadi Garawe i danas postoje ostaci te brane. Ona je pregrađivala vadi¹ u njegovoj punoj širini od 130 m i pretpostavlja se da je bila izgrađena kao privremena građevina, jer nije imala preljev, a pri njezinu građenju nije bio upotrebljavan mort. Vjerojatno je bila izvedena kako bi se osiguralo vodu za piće za radnike kamencoloma alabastera smještena oko tri kilometra istočno od brane. Jezero ostvareno izvedbom brane imalo je kapacitet samo 1.860.000 m³, a u njega se slijevala voda sa sliva površine 250 km². Poprečni presjek brane Sadd el-Kafara prikazan je na slici 1.4.

Uzvodni i nizvodni dio brane bili su izgrađeni od kamena prosječnih dimenzija 0,3 x 0,45 x 0,8 m, a jezgra je bila izvedena od finoga otpadnog materijala s grubim kamenjem. Uz pretpostavku da je klima prije 5000 godina bila slična današnjoj (G. O. Murray, 1949.), jezero ostvareno izgradnjom brane Sadd el-Kafara nisu mogle napuniti prve jake kiše u vlažnome dijelu godine. Vjeruje se da je brana bila srušena

¹ Vadi je suho korito vodotoka u pustinji s povremenim vodnim tokom.



Slika 1.4 Poprečni presjek brane Sadd el-Kafara (oko 2850.g.pr.Kr.) (K. Shenouda, 1994.)



Slika 1.5 Nizvodni pogled na branu Sadd el-Kafara (G. O. Murray, 1949.)

nakon jedne jake bujice, koja ju je prelila, te je najprije isprala i odnijela njezinu jezgru. Na slici 1.5 je prikazan nizvodni pogled na ostatke brane Sadd el-Kafara.

Od niza velikih građevinskih pothvata u povijesti Egipta značajna je bila i gradnja brane duge oko 36 km, koju je oko 1850. godine prije Kr. dao izgraditi Amenemhat III, jedan od faraona XII dinastije. Na taj je način oko 130 km² dotad močvarne zemlje bilo osposobljeno za poljoprivredu. Akumulacijsko je jezero punjeno za vrijeme velikih voda Nila, a za vrijeme suše voda je bila ispuštana iz jezera za navodnjavanje. Ovome velikom pothvatu prethodila su duga i, koliko je u to doba bilo moguće, sustavna ispitivanja razina vode Nila, te ostale pripreme koje su tada bile uobičajene i koje su prethodile svakome važnom građevinskom pothvatu u Egiptu (S. Nonweiler, 1964.).

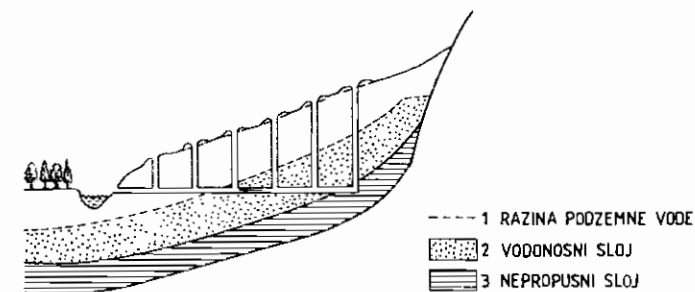
U vrućoj Babiloniji, koju je karakterizirala mala količina oborina, hidrološki uvjeti su bili drugačiji nego u Egiptu. Razdoblje pojavljivanja velikih voda od ožujka do lipnja nije bilo pravilno kao u Egiptu. Na početku ljeta voda bi se povukla, a tlo bi

se vrlo brzo isušilo. Prema tome, trebalo je riješiti probleme akumuliranja vode - iskapanjem odgovarajućih bazena za zadržavanje vode od vremena plavljenja. Od tih je bazena potom trebalo prokopati kanale za dovod vode do polja. Gradnja nasipa, brana, kanala i održavanje cijelog sustava, budući da su se kanali brzo zatrjavali nanosom, zahtijevali su odličnu društvenu organizaciju. U tu svrhu su bile uvažavane hidrološke podloge, budući da je trebalo odrediti dovoljno velike volumene akumulacijskih bazena za navodnjavanje, a ujedno i osigurati područja uz rijeke od velikih voda.

Zapisan oko 1700. godine prije Kr. u Hamurabijevu zakoniku, nalazi se, uz ostale, i zakon o vodi, koji se odnosi na navodnjavanje, izgradnju ganata ili kanata (podzemnih provodnika vode) i ostale načine gospodarenja vodama.

Ganati su vrlo važni i zanimljivi drevni zahvati podzemnih voda. Rabljeni su u vrlo širokom području Azije, Afrike, Španjolske, pa i Južne Amerike, a naročito u Perziji (područje današnjeg Irana) (Z. Pollak, 1995.). U Perziji se punih 7000 godina - sve do danas - održala mreža ganatskih sustava; prema iranskim procjenama, njezina duljina iznosi od oko 180.000 km.

Na slici 1.6 shematski je prikazan tipičan uzdužni presjek ganata. Ganati su rovovi dugi najčešće nekoliko kilometara, visoki obično oko 130 cm, najveće širine 60 cm. Vertikalna okua redovito su promjera oko 60 cm, dubine od 10 do 50 m, a nalaze se na razmacima od 25 do 60 m (A. Stepinae, 1979.a).



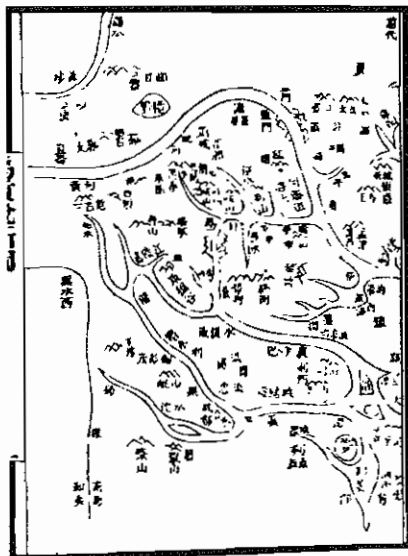
Slika 1.6 Shematski prikaz ganata (A. K. Biswas, 1972.)

Ganati se upotrebljavaju i danas, a preveliko crpljenje vode iz njih u nekim područjima u Iranu (npr. u okolici grada Mashada) uzrokuje velika sniženja razine podzemne vode.

Oko 2280. godine prije Kr. u drevnoj su Kini, u području uz rijeku Huang-ho (Žuta rijeka), za vrijeme legendarnoga cara-heroja Velikoga Yüa (utemeljitelja dinastije Hsia), izvedeni veliki natapni sustavi, te izgrađene brane i nasipi za obranu od poplava. Ovaj je veliki car-inženjer proučavao rijeke i pokazao se izvanredno nadarenim za

njihovu kontrolu, pa se govorilo da car Yü "gospodari vodama". Pomagao je i po potrebi štitio ondašnje inženjere hidrotehnike, među kojima su hidrolozi zauzimali posebno mjesto. Napredak hidrotehničkih znanja i iskustava u doba imperatora Yüa imao je presudan utjecaj na kasniji razvoj hidrotehnike u Kini.

Na slici 1.7 prikazana je situacija riječne mreže zapadnoga dijela Kine iz doba cara Yüa.



Slika 1.7 Situacija riječne mreže zapadne Kine u doba cara Yüa (A. K. Biswas, 1963.)

Sredinom 3. tisućljeća pr. Kr. u dolini rijeke Inda u području dugom 1500 km (slika 1.2) nastala je još jedna drevna civilizacija u kojoj su bili izvedeni vodoopskrbni i odvodni sustavi. Kultura uz rijeku Ind bila je tipična gradska kultura. O hidrološkim saznanjima toga doba teško je zaključivati, ali poznato je da način obrane od poplave nije uključivao sustavnu izgradnju nasipa. Zgrade u gradovima (najznačajniji gradovi bili su Harappa i Mohenjo Daro) bile su većinom građene od opeka pečenih od ilovače. Pečenje je opeka trajalo stoljećima i naposljetku dovelo do nestanka šuma, na mjestu kojih je nastala stepa. Često je dolazilo do poplava, a stanovništvo je kuće gradilo na sve višim potpornjima. Vremenom je brižljivost izgradnje kuća popustila, pa je sve češće dolazilo do njihova rušenja. Nekontroliranom su sječom šuma Mohenjo Daro i ostali gradovi drevne indijske civilizacije uz rijeku Ind sami uništili okoliš i svoju životnu osnovu. Ovo je ujedno jedan od prvih primjera nebrige za okoliš s vrlo neugodnim posljedicama (Velika ilustrirana povijest svijeta, 1974.).

Prema dosadašnjim saznanjima, najstarije tumačenje kruženja vode u prirodi, odnosno hidrološkoga ciklusa, dano je u indijskim svetim knjigama napisanim između 800. i 500. g. pr. Kr. (citat):

"Rijeke na istoku teku istočnim smjerom, rijeke na zapadu teku zapadnim smjerom i sve ulaze u more. One putuju od mora do mora, a oblaci ih dižu u nebo kao paru i šalju ih dolje kao kišu. I kao što te rijeke kada se sjedine s morem ne znaju jesu li ova ili ona rijeka, isto tako ni sva ona stvorenja koja sam spomenuo, kad se vraćaju od Brahme ne znaju odakle su došla" (S. C. Mehrotra, 1977.).

Ovo objašnjenje hidrološkoga ciklusa, koje je, u skladu sa zapisima iz tog vremena, povezano s vjerovanjem u reinkarnaciju i vrhovno indijsko božanstvo Brahma, potvrđeno je suvremenim prikazom na slici 1.1, u poglavlju 1.2.

Iz svega do sada navedenoga može se zaključiti da je dobro poznavanje hidrologije bilo neophodno za izvođenje uspješnog navodnjavanja, koje je glavni razlog tome što su drevne visoke civilizacije Staroga svijeta imale dobro organizirane države u kišom siromašnim područjima velikih rijeka.

Praćenje promjena vodostaja rijeka i pohranjivanje podataka o visokim vodostajima, tamo gdje je bilo motrenja, nije se na ondašnjemu stupnju razvoja moglo sustavno obrađivati. Na osnovi prikupljenih podataka moglo se tek nagađati o intenzitetima i trajanjima hidroloških fenomena. Dokaz tome da je većina tih zaključaka ipak bila realna, jest tisućljetni razvoj i trajanje drevnih visokih civilizacija.

Zanimljiv je razvoj razmišljanja i objašnjavanja hidroloških pojava potkraj i nakon doba drevnih visokih civilizacija.

U antičkoj Grčkoj, filozof Thales iz Mileta (kraj 7. i prva polovica 6. stoljeća pr. Kr.) smatra da je voda vjetrom ugurana u stijene, a pojavu izvora tumači kao rezultat pritiska stijena.

Jedan drugi grčki filozof, Anaksagora (500. - 428. g. pr. Kr.), zamislio je pibovitni jednostavni hidrološki ciklus. Vjerovao je da Sunce diže vodu iz mora u atmosferu iz koje ona pada na Zemlju kao kiša. Voda od kiše skuplja se potom u podzemnim rezervoarima iz kojih otječe i stvara rijeke (V. T. Chow i dr. 1988.).

U drugoj polovici 5. stoljeća prije Kr. hidrološki ispravne zaključke donosi Platonov ujak i Sokratov učenik, Kritija (nalazio se na čelu vladavine tridesetorice i za njegovo vrijeme su u Ateni za odmazdu aristokrati pobili oko 1500 građana, kako navodi N. Vejnović, 1965.). Kritija smatra da vode u rijekama i izvorima potječu od kiša, odnosno da je njezino porijeklo pluvijalno. No u to je doba bila poznatija Platonova ideja s početka 4. stoljeća pr. Kr. o postojanju velikoga podzemnog mora - u podzemnom svijetu Tartaru - kao izvorišta svih površinskih voda. Aristotel (oko 350. godine prije Kr.) smatra da se hladni zrak preobražava u vodu, a kako su planine hladne, u njima se mnogo zraka pretvara u vodu i na taj način on objašnjava porijeklo izvora, potoka i rijeka.

Od dostignuća iz tog razdoblja vrijedno je navesti mrežu kišomjernih stanica koja je u Indiji radila oko 300 godina pr. Kr., dok su ostala sustavna mjerenja bila vrlo rijetka i danas su slabo poznata (R. K. Linsley i dr. 1988.).

U antičkome su Rimu o kruženju vode u prirodi, odnosno o hidrološkom ciklusu, slično kao Aristotel razmišljali Lukrecije Seneka i Plinije stariji (krajem stare i početkom nove ere). No Marko Vitruvije Polion, koji je živio u 1. stoljeću pr. Kr., smatrao je da podzemna voda najvećim dijelom potječe od kiše i snijega i da se procijedi s površine. Ova je teorija općenito prihvatljiva i prethodila je modernoj predodžbi hidrološkoga ciklusa (V. T. Chow i dr., 1964.).

Ipak, Aristotelova je teorija bila prihvaćena praktički još 1500 godina - od svojeg nastanka pa sve do renesanse. Motrenja i mjerenja hidroloških veličina bilo je vrlo malo, pa nije moglo biti ni zaključaka temeljenih na rezultatima istražnih radova. U razdoblju nakon propasti Rimskoga carstva hidrologija se nije razvijala da bi se ponovo počela razvijati tek u renesansi. U Srednjemu su vijeku po potrebi bila korištena iskustva iz ranijeg razdoblja. Zanimljiv je primjer pojava ganata za opskrbu vodom u Bavarskoj. Smatra se da su tu istočnjačku tehniku uzimanja vode u Europu prenijeli njemački vojnici koji su sudjelovali u križarskim ratovima (A. Stepinac, 1979.a).

Prema tome, u Starome vijeku, pa sve do renesanse (od oko 4000 godina prije Kr. do kraja 14. stoljeća), bilo je razmjerno malo zabilježenih meteoroloških i hidroloških podataka. Klimatske varijacije i varijacije otjecanja površinskih vodotoka bile su poznate iz iskustva, ali njihovi uzroci nisu bili istraživani. Zbog toga se to razdoblje u razvoju hidrologije naziva doba nagađanja.

U Ven Te Chowovoj podjeli ovo se razdoblje tretira kao jedinstveno, no unutar njega vidljiva su dva bitno različita osnovna pristupa hidrologiji:

- zaključivanje na osnovi podataka prikupljenih na temelju hidroloških motrenja i mjerenja, pristup koji se razvio u visokim drevnim civilizacijama u vezi s korištenjem vode za navodnjavanje i za obranu od velikih voda (doline rijeka Nila, Eufrata, Tigrisa, Inda, Huang-hoa);
- objašnjavanje kruženja vode u prirodi, koje se uglavnom razvijalo u područjima gdje nije bilo intenzivnoga korištenja vode za navodnjavanje i sustavnih hidroloških motrenja (npr. Grčka, Rim).

U područjima uz velike rijeke, gdje je život ovisio o ispravno određenim količinama raspoložive vode i njezinoj raspodjeli tijekom godine, sustavno se prikupljalo opažene hidrološke i meteorološke podatke i na osnovi njih donosilo zaključke. U drugim područjima, u kojima ljudske zajednice nisu bile koncentrirane uz velike rijeke, ondašnji su učenjaci i filozofi proučavali i tumačili prirodne pojave. Tako su nastala različita tumačenja hidrološkoga ciklusa, temeljena na nagađanjima, dok je podzemni dio hidrološkoga ciklusa tada još u cijelosti bio nedostupan ljudskome opažanju.

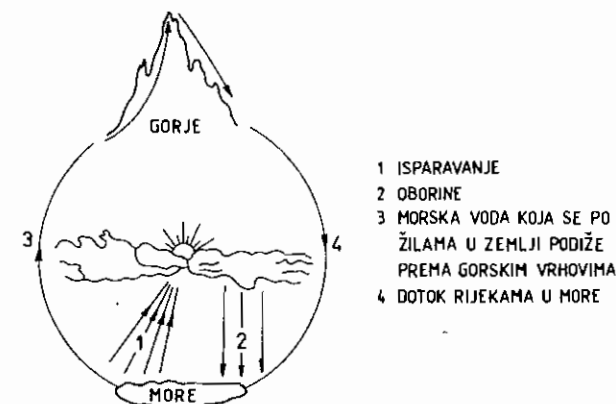
B. Razdoblje promatranja (15. i 16. stoljeće)

Kroz cijelu renesansu hidrologija je postupno bila usmjeravana u znanost koja se temelji na motrenjima i mjerenjima. Leonardo da Vinci (1425. - 1519.) je plovkom koji se sastojao od šipke s opekom na donjem i mjehurom na gornjem kraju, mjerio brzine vode u kanalima (slika 1.8), kako bi konačno objavio prvu sustavnu studiju o raspodjeli brzina u poprečnim presjecima vodotoka, "O kretanju i mjerenju vode". Ova je studija nastala oko 1500. godine, no objavljena je tek 1649. godine.



Slika 1.8 Leonardo da Vinci mjeri raspored brzine vode kroz protjecajni profil vodotoka ponavljajući pokuse (a). Upotrebljavao je štap s napuhanim balonom opterećen opekama (b). Pratio je napredovanje štapa niz tok vode, ometrom mjereći razmak, a jednoličnim ritmičkim otkucajima vrijeme (V. T. Chow i dr. 1988.)

Na slici 1.9 prikazan je hidrološki ciklus kako ga je zamišljao Leonardo da Vinci.



Slika 1.9 Hidrološki ciklus kako ga je tumačio Leonardo da Vinci (A. K. Biswas, 1972.)

Francuski hugenot B. Palissy, u djelu "Divan razgovor o prirodi voda i izvora" iz 1580. godine, pokazuje da izvori vode vuku porijeklo od kiša i opovrgava prastaru teoriju da se vodotoci opskrbljuju vodom izravno iz mora.

C. Razdoblje mjerenja (17. stoljeće)

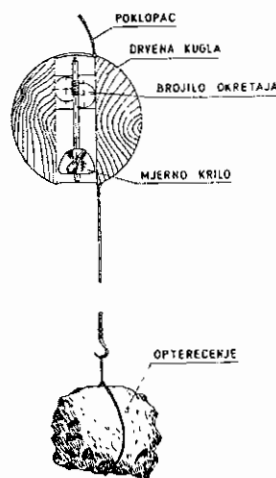
Zahvaljujući mjerenjima u prirodi (na terenu), tijekom 17. stoljeća hidrologija postaje još naprednija.

Evangelista Torricelli je 1643. godine postavio formulu za određivanje brzine istjecanja tekućine iz neke posude:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1.2)$$

gdje je v (m/s) brzina istjecanja; g (m/s²) gravitacija; h (m) visina površine tekućine iznad središta otvora na posudi kroz koji tekućina istječe. Važno je uočiti da je brzina istjecanja v proporcionalna \sqrt{h} .

Znameniti engleski fizičar Robert Hooke (poznat po osnovnome zakonu u teoriji elastičnosti) zamislio je, najvjerojatnije već 1663. godine, uređaj za mjerenje brzine tekuće vode, koji nigdje nije opisan. Dvadeset godina kasnije, 1683., koristeći tu ideju, Hooke je u Registru kraljevskog društva opisao uređaj za mjerenje dubine mora. Kako ne postoji izvorni crtež, a nije poznato ni da je takav uređaj bio izrađen, niti da se njime mjerilo, njegov prikaz na slici 1.10 dan je isključivo na temelju opisa i slika iz suvremene stručne literature.



Slika 1.10 Prikaz uređaja za mjerenje dubine mora na temelju ideje Roberta Hookea (A. H. Frazier, 1969.)

Hookeov se uređaj za mjerenje dubine mora sastoji od šuplje drvene kugle kroz koju, kad ona tone, struji voda. U šupljini se na osovini nalazi krilo koje okreće vodu, te kotač povezan s brojiлом okretaja. Opterećenje pričvršćeno ispod kugle povlači kuglu u dubinu, a kada dotakne dno, otkvači se od njc. Tada se poklopac na kugli zatvara, strujanje vode kroz kuglu prestaje i ona ispliva na površinu sa zabilježenim brojem okretaja krila, mjerenim za vrijeme njezina kretanja od površine do dna. Zbog bilježenja broja okretaja krila kojega vrti strujanje vode kroz kuglu, ovaj se uređaj može smatrati idejnim prethodnikom današnjega hidrometrijskoga krila.

Poznato je da su se u tom razdoblju vršila mjerenja pojedinih hidroloških i meteoroloških veličina. Tako je P. Perault 1674. godine na slivu Seine kod Pariza izračunao dotok vode u Seini na osnovi izmjerenih visina oborina i izmjerenoga isparavanja 1674. godine. Te je rezultate potvrdio E. Mariotte 1686. godine izračunom protoka Seine na temelju izmjerenih brzina vode i snimljenih poprečnih presjeka rijeke. Engleski astronom E. Halley mjerio je isparavanje vode iz male plosnate posude i procijenio isparavanje iz Sredozemnoga mora na temelju tih podataka. Usto je važno navesti da su zaključci o veličinama razmatranih hidroloških fenomena izvedeni na temelju prvih terenskih mjerenja ove vrste bili ispravni.

U ovom razdoblju - 1694. godine - izlazi i prva knjiga s naslovom "hidrologija". To je knjiga Eberharda Melchiora, "Hydrologia", u izdanju J. D. Zunnema iz Frankfurta. Knjiga se bavi izvorima mineralne vode u Wiesbadenu i njihovu značaju za zdravlje.

D. Razdoblje znanstvenih ispitivanja prirodnih pojava (18. stoljeće)

U 18. stoljeću pojavljuju se prve studije na osnovi izmjerenih veličina, koje izrađuje niz stručnjaka, kako iz hidrologije tako i iz hidraulike. U njima su objavljena temeljna hidraulička otkrića, npr. Bernoullijeva jednadžba, Venturijev vodomjer, Woltmanovo kolo za mjerenje brzine vode, te Chezyjeva formula 1769. godine (H. Rouse i I. Simon, 1957.).

U tome razdoblju važni doprinos razvoju hidrologije daju i sifonska teorija istjecanja vode iz izvora J. T. Desaguliersa (O. E. Meinzer, 1942.), knjiga o rijckama i bujicama P. Frisija 1860. i produbljivanje Mariottova rada o infiltraciji, La Methriea (V. T. Chow i dr., 1964.).

E. Razdoblje unapređivanja (19. stoljeće)

Ranije uvedena motrenja, mjerenja i ispitivanja prirodnih pojava u 19. se stoljeću unapređuju nizom teorijskih doprinosa koji predstavljaju osnovu suvremene hidro-tehnike, pa tako i hidrologije.

Suvremeno shvaćanje hidrologije kao znanstvene discipline očituje se u njezinu čvrstom povezivanju s ostalim znanostima - prvenstveno s geologijom. Temeljna otkrića u tom području su Hagen-Poiseuilleova jednadžba (G. H. L. Hagen, 1839. i J. L. M. Poiseuille, 1841., izvode jednadžbu na temelju eksperimenata laminarnoga strujanja u cijevima malih promjera), Darcyev zakon o filtraciji, 1856., Dupuiteva formula radijalnoga toka, 1863., i Ghyben-Herzbergov zakon (W. Badon Ghyben, 1888. - 1889., A. Herzberg, 1901.).

U prvoj polovici 19. stoljeća engleski geolog William Smith prvi je povezo znanja iz geologije s istraživanjima u hidrologiji. Smith je bio vrlo svestran znanstvenik, a sam je sebe smatrao geologom, mineralogom i građevinskim inženjerom. Objavio je značajne geološke karte, no A. K. Biswas (1969.) smatra da je u odnosu na svoje prethodnike Smith ipak nepravedno prikazan kao otac engleske geologije.

Glavni Smithov doprinos hidrologiji jest u području podzemnih voda. U radu pod naslovom "Zadržavanje vode u stijenama za ljetno korištenje" iz 1827. godine, on govori o korisnosti podzemne vode za grad Scarborough. U radu se opisuje potreba i poželjnost čuvanja vode i prikazuje postupak kojim se mogu povećati ljetne zalihe vode.

Vodonosnik iz kojega je korištena voda za Scarborough sastojao se od tankih slojeva žućkastoga fino granuliranoga pješčenjaka s otvorenim spojevima. U vodonošnik su bili nabušeni hodnici kroz koje su tijekom ljeta prije presušivanja istjecale male količine vode. Smith je najprije dao prokopati otvorene kanale dubine 9 - 10 stopa (oko 3 m), a potom je izmjerio dotok vode iz podzemlja u kanale od oko 24 velikih bačvi na sat (jedna velika bačva sadržavala je oko 600 l; što predstavlja ukupni protok u kanalima od oko 4 l/s). Ohrabren takvim povećanjem dotoka vode, Smith je dao produbiti kanale za 4 stope (oko 1,2 m). Na taj je način povećao površine kroz koje je voda dotjecala u kanal i dobio ukupni protok od 50 - 60 bačvi na sat (oko 10 l/s). Naslutivši da voda dolazi iz prostorno ograničena vodonosnika, Smith je preporučio zagrađivanje izlaza vodonosnika branom i ispravno zaključio da će se u tom slučaju izdašnost ovog izvora povećati za ljetnoga razdoblja, ukoliko prethodne zalihe vode u njemu budu veće od onih koje su bile dostatne za zimu (A. K. Biswas, 1969.).

U izučavanju površinskih voda u to se doba razvija i hidrometrija, počinju se provoditi sustavna hidrološka motrenja i mjerenja i izvode se brojne praktične formule za izračun protoka vode. Razvijaju se instrumenti za hidrološka mjerenja, pa se tada javljaju prva mjerenja protoka u protjecajnim presjecima velikih rijeka, poput onoga na Mississippiju 1861., i prvo međunarodno mjerenje protoka, na Rajni 1867. godine. E. Ganguillet i W. R. Kutter 1869. godine određuju realne veličine Chezyjeva koeficijenta, a R. Manning 1889. daje formulu za brzinu pri jednolikom tečenju u otvorenim koritima s dobrom aproksimacijom Chezyjeva koeficijenta.

U meteorologiji John Dalton 1802. ustanovljava vezu između isparavanja i pritiska vodene pare, a J. F. Müller 1849. radi osnovne pokušaje povezivanja visine

oborine s nadmorskom visinom. U Velikoj Britaniji izlazi prva hidrološka knjiga, koju je napisao građevinski inženjer Nathaniel Beardmore, "Manual of Hydrologic" (Hidrološki priručnik), u izdanju kuće "Waterlow and Sons" iz Londona 1862. godine.

Hidrologija se unapređuje iznalaženjem važnih iskustvenih formula za izračun maksimalnih protoka vode. To je prvenstveno racionalna formula koju su izveli irski inženjeri (T. J. Mulvancy, 1850.) i koja je 1847. godine dana u obliku:

$$Q_{max} = 2,52 C i A \quad (1.3)$$

gdje je Q_{max} maksimalni protok sa sliva u kubičnim stopama u minuti (acre foot per minute), C racionalni koeficijent, i maksimalna količina oborine (koja padne za 1,5 do 2 dana) i A površina sliva u akrima (1 ac = 4047 m²). Broj 2,52 je konstanta za preračunavanje jedinica.

Napominje se da racionalni koeficijent C predstavlja odnos između mjerodavnoga protoka Q_{max} i umnoška intenziteta kiše i površine sliva $i A$. Često ga se, čak i u klasičnoj hidrološkoj literaturi, pogrešno naziva koeficijentom otjecanja, koji predstavlja odnos između efektivne oborine (koja otječe) i oborine koja padne na sliv. Racionalni se koeficijent ni suštinski, a niti po svojim vrijednostima ne može tretirati kao otjecajni koeficijent (Z. M. Radić, 1991.).

Racionalna formula (ili racionalna metoda) rabi se za slivove veličine do 50 km² i o njoj se citira mišljenje jednoga od vodećih svjetskih hidrologa, B. C. Yena (1987.): "Racionalnu formulu mnogi od današnjih inženjera smatraju nadmašenom, neodgovarajućom i zastarjelom. Drugi je smatraju "dobrom starom uzdanicom". Istina je negdje između. Unatoč svim kritikama, ova se formula u svijetu još uvijek najviše rabi".

Druga značajna formula za proračun maksimalnoga protoka sa sliva predložena je također u prvoj polovici 19. stoljeća, a važno je uočiti njezin vrlo jednostavan oblik:

$$Q_{max} = C A^n \quad (1.4)$$

gdje su C i n koeficijenti ovisni o svojstvima sliva, a A je površina sliva u akrima.

Smatra se da je engleski pukovnik C. H. Dickens 1865. u Indiji prvi definirao vrijednosti koeficijenta C i n . Koeficijent C je u granicama od 1,56 do 17,2; a n je 0,75.

Oblik formule (1.4) ima jedna od danas često rabljenih formula za određivanje prosječnoga godišnjeg pronosa nanosa sa sliva (G. Fleming, 1969.b) i formula za vrijeme recesije (opadanja) hidrograma otjecanja (R. K. Linsley i dr. 1949.).

Nakon unapređivanja hidroloških istraživanja u 19. stoljeću, za 20. stoljeće karakteristična su tri razdoblja. U prvih trideset godina prevladava korištenje iskustvenih izraza, od tridesetih do pedesetih godina traje razdoblje racionalizacije, a nakon

pedesetih godina počinje razdoblje teoretizacije na osnovi velikog broja izmjerenih podataka. U današnje se vrijeme teži modeliranju hidroloških procesa.

U drugoj polovici 19. stoljeća, 1873. godine, osnovana je Svjetska meteorološka organizacija - World Meteorological Organization (WMO). 23.3.1950. WMO postaje specijalizirana organizacija Ujedinjenih naroda za meteorologiju (vrijeme i klima), hidrologiju i srodne znanosti.

F. Razdoblje empirije (od 1900. do 1930. godine)

Iako je u 19. stoljeću mnogo učinjeno za osuvremenjavanje hidrologije, početkom 20. stoljeća u hidrološkim izračunima prevladava iskustveni (empirijski) pristup. U razdoblju od početka pa do tridesetih godina 20. stoljeća razvija se iskustvena hidrologija, odnosno mjerodavni se hidrološki pokazatelji izračunavaju po različitim formulama. Znatno manje pažnje posvećuje se tzv. kvantitativnoj hidrologiji kod koje rezultate obrada treba temeljiti na opaženim i izmjerenim veličinama. Izveden je veliki broj iskustvenih formula, posebno za izračun velikih voda. Često puta, pogotovo ako su primijenjene na slivove s različitim hidrološkim karakteristikama od područja za koje su izvedene, iskustvene formule mogu dati nerealne rezultate. Treba napomenuti da se upotreba jednostavnih iskustvenih postupaka u hidrološkoj praksi zadržala sve do danas, ali je u stručnoj literaturi često puta upozoravano na opasnosti koje proizlaze iz pogrešno primijenjenih formula, naročito u izračunima velikih voda (F. Bidovec, 1971.). Od znanstvenih formula koje su se u hidrološkim izračunima zadržale do danas, ističu se dvije formule za isparavanje s vodne površine: Meyerova formula iz 1915. i Hortonova formula iz 1917. godine.

E. Maillet je 1905. godine izveo formulu kojom se određuje dugotrajno snižavanje protoka (recesija) u vodotoku tijekom vremena:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha T} \quad (1.5)$$

gdje je Q (m^3/s) protok u trenutku T , Q_0 (m^3/s) protok u početnom trenutku, $e = 2,718$ baza prirodnoga logaritma, α recesijski koeficijent, a T (dani) trajanje recesije.

Za određivanje prosječnoga otjecanja važna je Kellerova formula iz 1906. godine:

$$P_e = 0,942 P - 405 \quad (1.6)$$

gdje je P_e (mm) prosječna godišnja oborina koja otječe, a P (mm) prosječna bruto oborina na slivu.

Izraz (1.6), izveden za slivove u Srednjoj Europi, prethodio je izvođenju sličnih odnosa $P_e = f(P)$ za niz regija s međusobno različitim značajkama otjecanja vode.

Početkom 20. stoljeća u svijetu se javljaju veliki zahtjevi za određivanjem dovoljno pouzdanih hidroloških veličina na velikome broju različitih slivova, pri čemu osnovni problem predstavlja nedostatak hidroloških motrenja i mjerenja. Zbog toga

se počinju osnivati vladine organizacije i stručna udruženja, s ciljem da se unaprijedi hidrološke istraživačke radove i rezultate hidroloških proračuna.

U sklopu Međunarodne geodetske i geofizičke unije - International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) - 1922. je osnovano Međunarodno znanstveno hidrološko društvo pod nazivom Section of Scientific Hydrology, koje je kasnije preimenovalo u International Association of Scientific Hydrology (IASH).

U isto se vrijeme osnivaju i druga važna udruženja unutar kojih je hidrologija izravno uključena. To su, primjerice - Međunarodno oceanografsko društvo - International Association of Physical Oceanography - osnovano 1919. godine i Međunarodno udruženje za velike brane - International Congress on Large Dams (ICOLD) - osnovano 1928. godine (V. T. Chow i dr., 1964.).

Hidrologija se kao izdvojena znanstvena grana u punom smislu počinje razvijati usporedo s osnivanjem posebnih hidrometeoroloških službi (ili odvojenih hidroloških i meteoroloških službi), instituta i zavoda, te uvođenjem hidrologije kao predmeta na sveučilištima početkom 20. stoljeća (V. Jevđević, 1956.).

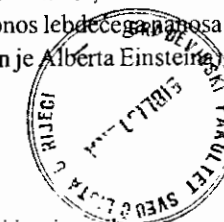
Za Hrvatsku kao dunavsku zemlju važno je osnivanje Međunarodne dunavske komisije 1919. godine, a 1948. godine je konvencijom regulirana plovidba po Dunavu.

G. Razdoblje racionalizacije (od 1930. do 1950. godine)

Za ovo srazmjerno kratko razdoblje od dvadesetak godina karakteristično je da se mnogi hidrološki problemi rješavaju pomoću racionalnih analiza umjesto, kako se radilo ranije, iskustvenih postupaka. Otkrića iz ovoga razdoblja prihvaćena su kao temelj suvremene hidrologije i uspješno se primjenjuju u današnjoj hidrološkoj praksi. Pritom se naročito ističu: jedinični hidrogram za pretvaranje oborina u otjecanje, koji je u hidrologiju 1932. godine uveo L. K. Sherman, Hortonov model proecjdivanja (infiltracije) iz 1933., Gumbelova raspodjela ekstremnih vrijednosti za statističku obradu hidroloških nizova iz 1941. i općenito uvođenje nesimetričnih krivulja raspodjela u hidrologiju, Hortonovi zakoni otjecanja u mreži vodotoka iz 1945., Penmanova formula za isparavanje iz 1948., Meyer-Peterova formula za pronos lebdjećeg nanosa u vodotocima iz 1948., te Einsteinova formula (H. A. Einstein sin je Alberta Einsteina) za pronos vučenoga nanosa iz 1950. godine.

H. Razdoblje teoretizacije (od 1951. do danas)

Od 1951. do danas u svijetu je prikupljeno obilje opaženih i izmjerenih meteoroloških i hidroloških veličina koje predstavljaju sigurnu osnovu za izvođenje općenitih zaključaka. U pojedinima nerazvijenim područjima još uvijek se ne provodi dovoljno pouzdanih hidroloških istraživačkih radova, pa zbog toga nije moguće do kraja izbjeći ni iskustveni pristup ni racionalizaciju. Ipak, takvih je područja sve manje, a naglim



razvojem hidrometrijskih instrumenata te metoda i načina mjerenja došlo se do vrlo velika broja osnovnih hidroloških podataka. U novije vrijeme te se podatke sustavno pohranjuje u baze podataka, a daljnja primjena elektroničkih računala očituje se u sve većem razvoju i primjeni različitih matematičkih modela za simulacije otjecanja.

Na sadašnjem stupnju razvoja hidrologije nije teško do kraja razjasniti kruženje vode u prirodi, kako je prikazano na slici 1.1 u pogl. 1.2.

Dosljednosti u hidrološkoj znanosti - unutar granica u kojima je to obzirom na karakteristike hidrologije moguće - značajno su pridonijele dvije kapitalne knjige, "Hydrology for Engineers" Linsleya, Kohlera i Paulhusa, čije je prvo izdanje bilo 1958. godine i prema mišljenju većine korisnika najznačajnije djelo, "Handbook of Applied Hydrology" Ven Te Chowa i suradnika iz 1964. godine.

Dok je prva navedena knjiga prvenstveno priručnik za inženjere praktičare (do danas je objavljeno nekoliko doradenih izdanja), u drugoj je sadržana i sažeto prikazana gotovo cijela hidrologija i ona predstavlja osnovu za daljnji razvoj te znanstvene discipline.

Hidrološka literatura u novije vrijeme postaje vrlo opsežna. Unutar hidrologije razvijaju se pojedina usmjerenja, a osnovna je podjela na parametarsku i stohastičku hidrologiju. Njihove definicije proizlaze iz samih naziva.

Pod pojmom parametarska hidrologija (može se još reći i: određena, iskustvena, deterministička, analitička ili dinamička hidrologija) podrazumijeva se način analize hidroloških procesa u kojemu se upotrebljava deterministički pristup istraživanjima hidroloških sustava uz korištenje različitih parametara.

Primjenom stohastičke hidrologije (sinonimi su: vjerojatnosna i statistička hidrologija ili hidrologija slučajnih procesa), hidrološki procesi i pojave opisuju se i analiziraju metodama teorije vjerojatnosti i matematičke statistike.

Obzirom na bitna svojstva pojedinih područja koja se razmatraju razvile su se posebne grane hidrologije, primjerice **hidrologija krša**, izučavana posebno u našinu uvjetima (A. Stepinac, 1969., O. Bonacci, 1987.a, R. Žugaj, 1995.b), **gradska (urbana) hidrologija** i **hidrologija akumulacija**.

Hidrologija krša je grana hidrologije koja se bavi hidrologijom u krškim naslagama i slojevima s velikim podzemnim prolazima, koji omogućuju tečenje znatnih količina vode podzemljem.

Gradska (urbana) hidrologija je grana hidrologije koja se bavi otjecanjem s naseljenih i gradskih područja, čiji se znatan dio sastoji iz međusobno bliskih nepristupačnih površina i uređenoga zemljišta pod vegetacijom.

Hidrologija akumulacija je grana hidrologije koja se bavi radom akumulacijskih jezera i njihovim utjecajem na vodni režim.

Velik broj hidroloških radova objavljuje se u različitim hidrotehničkim časopisima, a pojavljuju se i pojedini časopisi specijalizirani za hidrologiju na visokoj znanstvenoj i stručnoj razini, npr. Journal of Hydrology - koji izlazi još od 1941.

godine - i Hydrological Sciences Journal, koji je počeo izlaziti 1955. godine.

Naglom razvoju hidrologije u novije vrijeme doprinose i održavanja velika broja znanstvenih i stručnih skupova, na kojima se obrađuje opću hidrološku problematiku ili uža područja hidrologije (velike vode, suše i male vode, hidrologija krša, regionalizacija, problemi vezani uz pojedine velike slivove, npr. uz sliv Dunava).

Prema tome, za izučavanje i rješavanje hidroloških problema danas je dostupna vrlo opsežna literatura. Za izračune i analize koriste se programi za elektronička računala i različiti matematički modeli. Uz sve ove mogućnosti i pogodnosti postoji još jedan, i to najvažniji element, a to je iskustvo obrađivača. Ono je prvenstveno potrebno pri odabiru odgovarajućih pristupa izračunima i analizama, a potom kod prihvaćanja rezultata i ocjene njihove realnosti. Tretiranje bitnih fizičkih značajki - a one su na svakome slivu drugačije - na ispravan način, daje hidrološke parametre koji predstavljaju dovoljno pouzdanu podlogu za njihovo daljnje korištenje u hidrotehnici.

Iskustvo se u hidrologiji stječe radom na različitim hidrološkim problemima, shvaćanjem hidroloških fenomena i povezivanjem glavnih značajki otjecanja s odgovarajućim matematičkim metodama. Nije dovoljno samo poznavati hidrološke metode i postupke koji se preporučaju u literaturi - neophodno je znati ih ispravno primijeniti. Jedino se tako mogu dovoljno pouzdano odrediti zakonitosti po kojima se ponašaju pojedini slivovi za vrijeme odvijanja procesa otjecanja na njima.

Stoga se može zaključiti da počeci hidrologije sežu daleko u prošlost - još u drevne visoke civilizacije. Napredak u hidrološkim istraživanjima ovisio je, a ovisi i danas, prvenstveno o potrebama ljudi za korištenjem voda i zaštitom od voda. Kao posebna grana hidrotehnike, hidrologija se vremenom razvijala usporedo s drugim znanostima, koristeći po potrebi i njihova dostignuća. Neki od najvećih ljudskih umova (npr. Anaksagora, Aristotel, Leonardo da Vinci) dali su značajne doprinose hidrologiji i utjecali na razvoj hidroloških istraživanja i zaključivanja.

U današnje vrijeme hidrologija je multidisciplinarna znanost s rezultatima koji se temelje na analizama i zaključivanjima na osnovi obrada opaženih i izmjerenih podataka. Pritom se primjenjuju suvremeni pristupi i metode, te odgovarajuća tehnička pomagala.

1.4 Razvoj hidrologije u Hrvatskoj

Za razvoj hidrologije u Hrvatskoj od bitne su važnosti djelatnosti i zahtjevi triju organizacija: Hrvatskih voda, Hrvatske elektroprivrede i Državnoga hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske.

Prve se organizacije za obavljanje vodnogospodarske djelatnosti (današnje Hrvatske vode) u krajevima pod Austrijom što danas čine teritorij Republike Hrvatske, osnivaju u drugoj polovici 19. stoljeća. U tome se razdoblju donose prvi zakoni kojima se pravno uređuju vode i vodno gospodarstvo. Najvažniji je Zakon o vodnome pravu, što ga je 1891. godine donio Sabor. Nakon 1918., za vrijeme Kraljevine Srba, Hrvata

i Slovenaca, kasnije Kraljevine Jugoslavije, pa do kraja Drugoga svjetskog rata 1945. godine, donijet je samo Zakon o iskorištavanju vodnih snaga 1931. godine. U razdoblju od 1945. do 1990. u Hrvatskoj djeluju četiri vodoprivredna poduzeća koja su udružena u Vodoprivredu Hrvatske.

Od prvoga se siječnja 1991. počinje primjenjivati novi Zakon o vodama (Narodne novine 53/1990.) kojim se vodno gospodarstvo usklađuje s Ustavom Republike Hrvatske. Na državnoj se razini organizira Javno vodoprivredno poduzeće (JVP) "Hrvatska vodoprivreda" koje obavlja poslove vodnoga gospodarstva. Osnivaju se Hrvatske vode radi obavljanja poslova upravljanja vodama. U djelokrugu Hrvatskih voda svi su poslovi upravljanja vodama na državnoj razini i na razinama slivnih područja: od pripreme konceptijskih rješenja, planiranja, prikupljanja sredstava i financiranja radova pa do organiziranja obrane od poplava i drugih oblika zaštite od štetna djelovanja voda i obavljanja određenih poslova u vezi s organizacijom i kontrolom iskorištavanja i zaštite voda (I. Šimunović, 1997.).

Opisujući teritorijalne osnove za upravljanje vodama, J. Marušić (1999.) daje podjelu Republike Hrvatske (ukupne površine 56.538 km²) na četiri vodna područja:

1. vodno područje sliva Save (24.283 km², 42,9%)
2. vodno područje slivova Drave i Dunava (9.657 km², 17,1%)
3. vodno područje primorsko-istarskih slivova (9.840 km², 17,4%)
4. vodno područje dalmatinskih slivova (12.758 km², 22,6 %).

Osim na financiranje različitih hidrotehničkih istraživačkih radova, projekata i studija djelatnost Hrvatskih voda proteže se i na poticanje i potpomaganje znanstvenih istraživanja u hidrotehnici, a prema tome i u hidrologiji.

Za drugu spomenutu organizaciju - Hrvatsku elektroprivredu - hidrološke su podloge prvenstveno važne u projektiranju hidroelektrana, korištenju vode za proizvodnju električne energije i, u novije vrijeme, u upravljanju hidroenergetskim sustavima. U skladu s ovakvim specifičnim zahtjevima, hidrologija se prvenstveno razvija kao primijenjena znanost.

Prikupljanje i obrada hidroloških podataka provodi se u trećoj navedenoj organizaciji - Državnome hidrometeorološkom zavodu RH. Hidrometrijska služba sustavno prati hidrološke pojave površinskih i podzemnih voda. Hidrološki podaci prikupljeni motrenjima i mjerenjima na terenu na odgovarajući se način obrađuju i pohranjuju u Banku hidroloških podataka.

U Hrvatskoj se prvi vodostaji rijeka počinju bilježiti sredinom 17. stoljeća, a prva je hidrološka stanica osnovana 1817. godine na Savi kraj Staré Gradiške.

Hidrološka stanica na Dravi je kraj Varaždina postavljena 1821., a kraj Osijeka 1827. Na Savi su osnovane stanice: Zagreb, 1849., Galdovo, 1850. i Slavonski Brod, 1856., a na Dunavu Vukovar i Ilok, 1856. (K. Pandžić i dr., 1998.).

Razvoj hidrologije u Hrvatskoj u 20. stoljeću sažeto je prikazan u zadnjim trima razdobljima u razvoju hidrologije prema podjeli Ven Te Chowa iz 1964. godine.

A. Razdoblje empirije (od 1900. do 1930. godine)

U Hrvatskoj se, kao i u svijetu, hidrologija počinje razvijati usporedo s osnivanjem hidrometeorološke službe, organizacija koje se bave hidrotehnikom i uvođenjem hidrologije kao predmeta na sveučilišta početkom 20. stoljeća.

Prije početka Prvoga svjetskog rata u Hrvatskoj je najbolje razvijenu hidrometeorološku službu imala Dalmacija koja je bila pod austrijskom državnom službom. U početku rata Dalmacija je imala 105 aktivnih kišomjera ili prosječno jedan kišomjer na 123 km², što je bilo blisko poželjnom prosjeku u svijetu. Na svršetku rata, 1918. godine, u ispravnom stanju bilo je svega 25 kišomjera. Hidrološka mreža u Dalmaciji bila je srazmjerno dobro razvijena, sa 75 vodokaza od kojih su za 22 podaci bili upisivani u hidrografske godišnjake u Beču.

Slavonija i ostali dio Hrvatske bili su u to doba pod mađarskom upravom, a mreža hidrometeoroloških stanica bila je znatno slabije razvijena nego u Dalmaciji. Nakon Prvoga svjetskog rata u upotrebi je ostalo svega 25 kišomjera i 26 vodokaza.

Nakon Prvoga svjetskog rata prilike s mrežom kišomjera i vodokaza sporo se popravljaju, tako da 1923. godine u Hrvatskoj radi ukupno 54 kišomjera ili prosječno jedan kišomjer na 1047 km² i 49 vodokaza, tj. prosječno jedan vodokaz na 1154 km² površine Hrvatske. Ova vrlo rijetka vodokazna mreža bila je donekle razvijena na glavnim rijekama Hrvatske (Sava, Drava, Kupa, Krka, Cetina), a na njihovim pritocima broj vodokaza bio je ispod nužnoga minimuma (A. Stepinac, 1974.).

Na Građevinskome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu osnove hidrologije predaju se u sklopu prvih hidrotehničkih predmeta pod nazivom Vodogradnje (Spomenica Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 1994.).

B. Razdoblje racionalizacije (od 1930. do 1950. godine)

Za ovo razmjerno kratko razdoblje od dvadesetak godina karakteristično je da se mnogi hidrološki problemi rješavaju pomoću racionalnih analiza umjesto, kako se je radilo ranije, na temelju iskustvenih postupaka.

U Hrvatskoj se prilike u tom razdoblju znatno popravljaju u odnosu na raniju situaciju iz 1923. godine. 1924. počinje pojačani razvoj meteorološke (naročito kišomjerne) i hidrološke (vodokazne) mreže, koje traje do Drugoga svjetskog rata, a vrhunac dostiže 1934. godine. Tada na svakih 281 km² dolazi prosječno po jedan kišomjer, a na svaki 450 km² jedan vodokaz. Poslije 1934. godine broj vodokaza i kišomjera lagano opada, a za vrijeme Drugoga svjetskog rata, od 1941. do 1945., mreža kišomjera i vodokaza znatno se smanjuje. Konec 1945. godine na području tadašnje Jugoslavije postojalo je 390 vodokaznih stanica, ali neprekidna motrenja vodostaja provodila su se na svega 60 stanica (A. Stepinac, 1974.).

Odmah nakon rata, u prvih pet godina do 1950., započinje nagla obnova kišomjernih i vodokaznih stanica, a 1947. godine u Zagrebu se osniva Republički hidrometeorološki zavod (RHMZ) i unutar njega zasebni Hidrološki odjel (kasnije Hidrološki sektor). Meteorološka i hidrološka motrenja i mjerenja počinju se sustavno provoditi po pojedinim područjima i slivovima. U Hidrološkome sektoru posebna se pažnja posvećuje obučavanju kadrova za bavljenje hidrometrijom i hidrološkim obradama, analizama i studijama. Rezultati meteoroloških i hidroloških motrenja za glavne stanice objavljivali su se u Saveznim hidrološkim i meteorološkim godišnjacima (R. Žugaj i Ž. Orešković, 1983.).

U vezi s hidrologijom, a u području hidraulike podzemnih voda, u ondašnjemu Tehničkom vjesniku K. Gjurašin objavljuje značajne radove: "Prilog hidrografiji primorskoga krša" 1942. i "Prilog hidrografiji krša" 1943. U tim radovima analizira se postanak primorskih slanah vrela na tri načina:

1. na temelju hidrostatičkoga djelovanja razlika u specifičnoj težini morske i slatke vode (danas bi se u skladu sa SI sustavom jedinica umjesto specifične težine radilo s gustoćom);
2. na temelju dinamičkoga djelovanja razlika u brzini vode koja struji k vrelu;
3. na temelju djelovanja difuzije između slatke i slane vode.

1948. godine Milivoj Petrik uvodi Hidrologiju na Građevinski fakultet na Zagrebačkome sveučilištu, gdje se ona zadržala do danas kao jedan od temeljnih predmeta.

M. Petrik sustavno je 1954. godine proveo hidrometrijske istraživačke radove na Crvenome jezeru - krškome fenomenu kod Imotskoga, i na osnovi mjerenja dubina vode u 39 točaka izmjerio najveću dubinu jezera od 251 m. (Istraživanja provedena sa znatno modernijom opremom u ljetu 1998. pokazala su najveću dubinu od 281 m na koti od -6 m n.m., kao što navodi M. Garašić, 1999.)

Radovi M. Petrika za sliv Vranskoga jezera na otoku Cresu 1957. i 1961. godine, te za Plitvička jezera 1958. godine predstavljaju značajan doprinos razvoju hidrologije u Hrvatskoj.

Godinu dana nakon uvođenja predmeta Hidrologija na Zagrebačko sveučilište, 1949., osnovano je u Zagrebu poduzeće Elektroprojekt, specijalizirano prvenstveno za projektiranje hidroelektrana i melioracija. Neprekidno djelujući u Hrvatskoj, Elektroprojekt već 1954. godine počinje raditi i u inozemstvu, a projektna dokumentacija za HE Zawgyi u Burmi je prvi projekt hidroelektrane u inozemstvu izrađen za vrijeme bivše Jugoslavije (M. Mrvoš, 1956. i 1989.). U Elektroprojektu je od početka djelovala hidrološka grupa pod rukovodstvom jednoga od prvih hrvatskih hidrologa, Antuna Stepinca (rukovoditelja Hidrološkoga odjela RHMZ-a od 1953. do 1956. godine i profesora hidrologije na Građevinskome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu od 1965. do 1980. godine). U Elektroprojektu su izrađene hidrološke podloge za većinu do sada izvedenih hidroelektrana u Hrvatskoj, te niz hidroloških studija za Hrvatsku i inozemstvo (Burma, Etiopija, Egipat, Indija, Iran, Libija, Alžir). Među njima valja

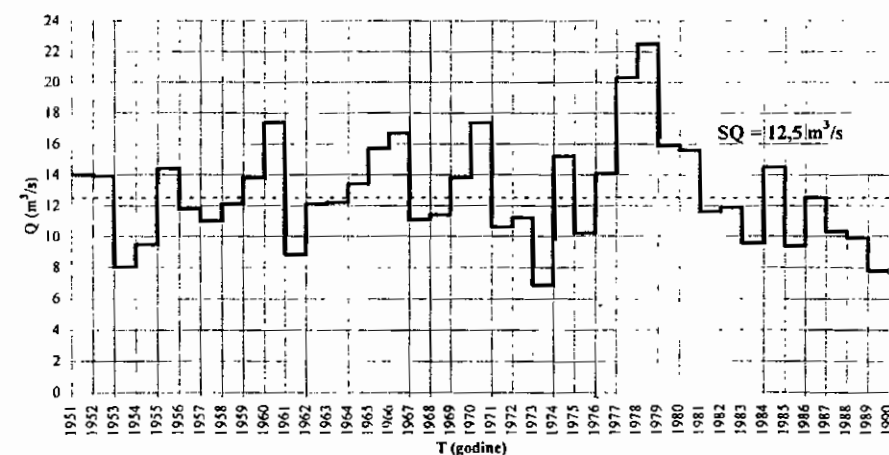
istaknuti pionirske hidrološke radove A. Stepinca na slivovima Dinarskoga krša (1969.), Lici i Gacki (1956.) i (1983.), Rječini, Cetini, Krki i Zrmanji (1979.b) te Kupa (1979.c).

C. Razdoblje teoretizacije (od 1951. do danas)

Prije opisivanja posljednjega razdoblja u razvoju hidrologije u Hrvatskoj, potrebno je ukratko opisati glavne općenite značajke moderne hidrologije.

Od 1951. do danas u Hrvatskoj je prikupljeno obilje opaženih i izmjerenih meteoroloških i hidroloških podataka koji predstavljaju sigurnu osnovu za provođenje hidroloških obrada. Kada u pojedinim područjima nedostaje dovoljno pouzdanih hidroloških podloga, tada nije moguće izbjeći iskustveni pristup. Ipak, takvih je područja sve manje, a primjenom različitih metoda i načina mjerenja, došlo se do vrlo velika broja osnovnih hidroloških podataka. Prikupljene se podatke sustavno obrađuje i pohranjuje u odgovarajuće baze podataka, a primjena elektroničkih računala očituje se u sve većem razvoju i primjeni različitih matematičkih modela, npr. za simulacije otjecanja.

Za rezultate hidroloških izračuna općenito je karakteristično da uglavnom nisu čvrste veličine, nego ih najčešće treba shvatiti kao pokazatelje koji variraju unutar određenih granica. U primjerice, srednji godišnji protoci rijeke Cetine u profilu Vinalić u razdoblju od 1951. do 1990. imaju prosječnu vrijednost od $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$, ali njihove su veličine različite za pojedine godine (slika 1.11). To se svojstvo opisuje koeficijentom varijacije srednjih godišnjih protoka, koji je u ovome slučaju $c_v = 0,22$. Osim toga,



Slika 1.11 Hidrogram srednjih godišnjih protoka Cetine u profilu Vinalić u razdoblju od 1951. do 1990. godine

već i sami ulazni izračunski podaci dobiveni na temelju mjerenja na terenu redovito variraju oko neke prosječne zakonitosti, primjerice veličine protoka vode za različite vodostaje ili još više veličine pronosa nanosa u odnosu na protok vode, a često se puta o pronosu i količinama nanosa može zaključivati tek orijentacijski (R. Žugaj i V. Marković, 1988.).

Zbog toga se, pogotovo početkom pedesetih godina, hidrologiju nije moglo prihvatiti kao do kraja dosljednu znanost. Postupnim razvijanjem odgovarajućih pristupa i metoda, obradama i analizama sve većega broja podataka od terenskih motrenja i mjerenja, te korištenjem stečenoga iskustva, hidrologija postaje sve dosljednija. Korištenje literature postaje neophodno, pa se to odražava i na razvoj hidrologije u Hrvatskoj.

Za Hrvatsku je karakteristično da se nakon 1950. godine broj hidroloških stanica ne povećava u većoj mjeri, već se one osuvremenjavaju tako da se u vodokaznim profilima postavljaju limnografi. Na taj se način - neprekidnim bilježenjem vodostaja - hidrološki podaci znatno poboljšavaju u odnosu na dnevna očitavanja s vodokaza i to naročito pri ekstremnim vodostajima. U Republičkome hidrometeorološkom zavodu u Zagrebu prikupljaju se brojni i vrijedni hidrološki podaci, a rezultati opažanja i mjerenja analiziraju se s hidrometrijskoga i fizikalnoga stanovišta, pri čemu značajan doprinos predstavlja, primjerice, studija vodne bilance Vranskoga jezera na otoku Cresu I. Pavletića iz 1992. Od hrvatskih hidrologa, nakon M. Petrika (1957.) i I. Pavletića (1992.), značajan doprinos izučavanju hidrologije Vranskoga jezera dali su O. Bonacci (1993.), B. Biondić i sur. (1995.), te N. Ožanić i J. Rubinić (1997.).

U Hrvatskoj se redovito prate svjetska teorijska dostignuća, a određena područja se i samostalno razvijaju. Krajem šezdesetih godina u Direkciji za Savu u Zagrebu (sada Hrvatske vode) Dionis Srebrenović ("Problemi velikih voda", 1970. i "Primjenjena hidrologija" 1986.) i Zlatko Srebrenović ("Metode regulacije vodnog režima", 1977.) primjenjuju i unapređuju metode matematičke statistike za hidrološke proračune. Osim što je uveo i održavao nastavu iz hidrologije na Studiju kulturne tehnike na Geodetskome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, D. Srebrenović je autor prve knjige iz hidrologije u Hrvatskoj, "Maksimalne vodne količine" iz 1953. godine. Važne su njegove iskustvene formule (koje se temelje na racionalnoj metodi) za izračune maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja malih i velikih slivova, te melioracijskih površina i poglavlje "Hidrologija" u Tehničkoj enciklopediji JLZ-a 1979. godine.

Krajem šezdesetih se u hidrologiju počinju uvoditi i elektronička računala. U tome je od 1969. godine istaknutu ulogu imao Ognjen Bonacci, jedan od prvih nastavnika na Građevinskome fakultetu Sveučilišta u Splitu osnovanome 1976. godine i profesor Hidrologije kao jednoga od temeljnih predmeta na tom Sveučilištu. Osim u Splitu, O. Bonacci je predavao na Sveučilištima u Zagrebu, Rijeci, Osijeku i Mostaru. Zbog sve većih potreba povezivanja geološkoga inženjerstva i hidrologije, on je također

bio prvi nastavnik predmeta Hidrologija na Rudarsko-geološko-naftnome fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Uz ostala područja hidrologije, O. Bonacci bavi se hidrologijom krša i hidrometrijom i autor je poglavlja "Hidrometrija" u Tehničkoj enciklopediji JLZ-a iz 1979. godine, a naročito proučava odnos oborine i otjecanja. Od njegovih mnogobrojnih radova objavljenih u Hrvatskoj i inozemstvu posebno su vrijedne knjige: "Karst Hydrology" (u izdanju Springer-Verlaga) iz 1987. godine i "Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus" iz 1994., koja je prva knjiga takve vrste u svijetu.

U Republičkome hidrometeorološkom zavodu RH u Zagrebu (od 1991. godine Državni hidrometeorološki zavod - DHMZ RH) osnovana je 1980. **Banka hidroloških podataka (BHP)** kao dio Hidrološkoga informacijskog sustava (HIS) (I. Mlaker i S. Komar 1980.).

U **Banci hidroloških podataka** pohranjuju se podaci u niz katalogiziranih zapisa, koji se čuvaju u nekom mediju za čuvanje podataka, koji ne mora biti nužno na dohvatu ruke. U Banci hidroloških podataka Državnoga hidrometeorološkog zavoda RH nalazi se vrlo velik fond dnevnih podataka o vodostajima i protocima prikupljenih sa svih hidroloških stanica u Hrvatskoj, zatim protočne krivulje, temperature vode, koncentracije i pronosi lebdećega nanosa - više od 20.000.000 podataka. Te je podatke svake godine potrebno nadopunjavati s gotovo 400.000 novih vrijednosti vodostaja, protoka i ostalih podataka. Hidrološki istraživački radovi velikim se dijelom provode za potrebe Hrvatskih voda i Hrvatske elektroprivrede, koje su uz DHMZ osnivači BHP.

Primjena različitih programa na osobnim računalima naročito napreduje devedesetih godina. U Institutu za elektroprivredu i energetiku d.d. iz Zagreba razvijaju se različite baze hidroloških podataka i primjenjuju deterministički matematički modeli za simulacije otjecanja s nekrških i krških slivova. U tom području svjetska iskustva našim uvjetima prilagođava K. Plantić (1995.). **Baza podataka je niz povezanih (srodnih) evidentiranih i odloženih podataka za posebnu primjenu i obično je moguć izravan pristup pohranjenim podacima.**

Značajan doprinos u izučavanju suše (pod sušom se podrazumijeva produljeno pomanjkanje ili značajan nedostatak oborina) sa zemljovidima izoliranih karakterističnih minimalnih specifičnih dotoka sa slivova u Hrvatskoj dao je D. Trninić (1993., 1997. i 1998. a i b).

Hidrologija se u Hrvatskoj u novije vrijeme intenzivno razvija i u nizu organizacija, a u hidrometriji sve više do izražaja dolazi i privatni sektor. Razaranja u Domovinskome ratu u razdoblju od 1991. do 1995. godine negativno su se odrazila na mrežu meteoroloških i hidroloških stanica. Prema podacima Državnoga hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske, 1987. je na području Hrvatske bilo aktivno 504 hidroloških stanica, a u ratnome razdoblju, nakon 1991. godine, broj aktivnih stanica smanjen je za trideset posto, pa je radilo oko 350 stanica. Nakon rata započelo se popravcima i obnavljanjem hidroloških stanica te sustavnim provođenjem motrenja i mjerenja u skladu s mogućnostima koja dopuštaju raspoloživa poratna sredstva. Prema podacima

iz 1998. godine, planira se da će nakon obnove u Hrvatskoj raditi 522 hidrološke stanice, od čega 313 limnografskih, a 209 vodokaznih (K. Pandžić i dr., 1998.).

Krajem 1992. osnovano je Hrvatsko hidrološko društvo (HHD). U veljači 1993. odlukom Vlade RH osnovan je i Hrvatski nacionalni komitet za hidrologiju, za Međunarodni hidrološki program - International Hydrological Program (IHP) - pri UNESCO-u. U siječnju 1999. odlukom Vlade RH osnovano je Hrvatsko vijeće za suradnju s IHP i Operativnim hidrološkim programom - Operating Hydrological Program (OHP) - također pri UNESCO-u.

1.5 Zadaci i primjena inženjerske hidrologije

Teorijska hidrologija izučava ključne geofizičke procese, a zadatak je inženjerske hidrologije da na temelju motrenja i bilježenja podataka, te nužnih mjerenja, utvrdi i analizira hidrološke veličine koje su osnova svih vodoprivrednih aktivnosti. To prvenstveno omogućuje sigurnost pri projektiranju i korištenju hidrotehničkih objekata prema njihovoj veličini, svrsishodnosti, ekonomičnosti i sigurnosti protiv oštećenja ili rušenja. Nadalje, kada se radi o izgrađenim objektima ili o objektima predviđenima za izgradnju na osnovi provedenih hidroloških analiza, potrebno je sagledati njihov utjecaj na vodni režim i to naročito na onaj nizvodno od njih.

Vodotoke treba sustavno srediti po njihovoj veličini, smještaju i važnosti, a pri tome je zadatak hidrologije prikupljanje, sređivanje i analiziranje hidroloških veličina u svrhu stvaranja kratkoročnih i dugoročnih prognoza hudaćih hidroloških zbivanja.

Primjena hidrologije očituje se u vodoopskrbi, iskorištavanju vodnih snaga, natapanju, odvodnji, zaštiti od poplava, regulaciji rijeka, uređivanju plovnih putova i luka, bujičarstvu, ribarstvu, rekreaciji i svim ostalim elementima života koji su u vezi s vodama.

Hidrologija se u sklopu ostalih znanosti ili kao zasebna znanost i vodoprivredna disciplina općenito razvijala u trima osnovnim smjerovima (V. Jevđević, 1993.):

1. opisna (deskriptivna) hidrologija
2. korisnička (primijenjena) hidrologija
3. znanstvena hidrologija.

Korištenje opisne hidrologije veoma je važno u primjeni rezultata obrada sa slivova za koje postoje mjerenja hidroloških veličina na slivove bez izmjerenih podataka ili s premalo njih. Geološka i morfološka² obilježja, a kod krških slivova se to osobito odnosi na rezultate geoloških, hidrogeoloških i morfoloških istraživačkih radova, valja sustavno prikazivati na odgovarajući način, da bi se na temelju tih analiza mogli donositi mjerodavni zaključci o sličnostima pojedinih područja i mogućnostima primjene izvedenih zakonitosti kojima se opisuje otjecanje.

² Morfološka je znanost o oblicima i promjenama oblika.

Korisnička ili primijenjena hidrologija usmjerava hidrološka istraživanja na rješavanje praktičnih problema. Ukoliko za razmatrani sliv postoje podaci o opažanjima i mjerenjima osnovnih hidroloških veličina (vodostaji, protoci), na temelju njih se provode različite hidrološke obrade i izvode odgovarajući zaključci. Ako tih podataka nema ili ih je premalo, koriste se pravila i općenite zakonitosti izvedene za slivove sa sličnim glavnim obilježjima otjecanja, na kojima je bilo dovoljno pouzdanih izmjerenih podataka.

U znanstvenoj hidrologiji primjenjuje se uobičajeni znanstveni pristup; donose se općeniti zaključci o hidrološkim fenomenima i izvode se zakonitosti koje je moguće primijeniti na druga, u hidrološkom smislu slična područja. Ako se analiziraju veze između karakterističnih hidroloških parametara (veličine slivova, prosječni i ekstremni protoci, njihova standardna odstupanja, koeficijenti varijacije i asimetrije, bruto i efektivne oborine i sl.) za jedno veliko slivno područje, npr. sliv Dunava (S. Jovanović i Z. M. Radić, 1985.), ili više slivova s nekim bitnim zajedničkim obilježjima, primjerice za krške slivove u Hrvatskoj (R. Žugaj, 1995.b), onda se općeniti zaključci izvode za čitavo razmatrano područje ili regiju, a takve hidrološke analize zovu se **regionalne hidrološke analize**. Prema tome, regionalne analize hidroloških parametara dio su suvremenih usmjeravanja u hidrologiji, koja pokazuju veliku povezanost hidroloških istraživanja s trendovima u vodoprivredi, odnosno višenamjenskome gospodarenju vodama (pogl. 4.22).

Ovdje je potrebno odrediti što se podrazumijeva pod pojmom karakterističnoga hidrološkog parametra. U širem smislu, parametar je matematički termin s više značenja. Obično je definiran kao varijabilna veličina čijim je posebnim značenjem određen konkretni element nekog skupa. **Hidrološki parametar općenito je veličina koja opisuje neko svojstvo obrađenih podataka**, npr.: prosjek hidrološkoga niza, standardno odstupanje, koeficijent varijacije, koeficijent asimetrije, modulni koeficijent itd. **Modulni koeficijent je karakteristična vrijednost - najčešće protok - podijeljena s prosječnom vrijednošću niza**. Modulni su koeficijenti naročito pogodni za uspoređivanje vodnih režima različitih vodotoka (pogl. 4.15). Hidrološki parametar može biti i koeficijent u nekim hidrološkim modelima i formulama ili drugi odnos, koji se može podesiti da bi se mogao primijeniti opći model na pojedine slučajeve itd. Primjerice, kalibriranje modela oborina - otjecanje za jedan sliv uključit će određujuće vrijednosti parametara koji odgovaraju upravo tom slivu, odnosno bitni su za realan opis glavnih karakteristika otjecanja vode.

U znanstvenoj, a i u primijenjenoj hidrologiji, zbog složenih se zahtjeva koje postavljaju korisnici hidroloških podloga i informacija, često puta moraju provoditi složene, odnosno kompleksne hidrološke analize. Kod kompleksnih hidroloških analiza potrebno je proces obrade i analizu, kao što navodi V. Jevđević (1993.), provoditi kroz tri osnovne faze:

1. **Procjena kakvoće osnovnih (ulaznih) meteoroloških i hidroloških podataka.** Pod tim se podrazumijeva razmatranje slučajnih i sustavnih pogrešaka u biranju uzoraka te ispitivanje pojava nehomogenosti u nizovima raspoloživih osnovnih podataka. **Temeljna je pretpostavka da rezultati kasnijih obrada - matematičkoga modeliranja, simulacija i optimalizacija - ne mogu biti bolji nego što to dopušta kakvoća ulaznih podataka.**

2. **Strukturalna analiza hidroloških sustava i procesa te studije unutar sustava i razvoja.** U to su uključena i raščlanjivanja složenih sustava na jednostavnije podsustave te procesa na njihove komponente uz definiranje njihovih unutarnjih odnosa. Na temelju takvih razmatranja moguće je usvojiti modele koji realno oponašaju obilježja otjecanja u prirodi.

3. **Modeliranje procesa i obilježja prirodne sredine u hidrologiji** pravilnim definiranjem matematičkih izraza za modele, te izborom odgovarajućih metoda za određivanje njihovih parametara.

Svaka od navedenih triju faza istraživanja vrlo je važna i sve njih treba u radu s hidrološkim podacima redovito provoditi i to sljedećim redoslijedom: od procjene kakvoće ulaznih podataka, preko strukturalne analize, do modeliranja procesa. No kod današnjih hidroloških istraživanja često se puta najviše pozornosti posvećuje trećoj fazi cjelokupne obrade, odnosno razvijanju modeliranja hidroloških procesa. Pritom se često zanemaruju prve dvije faze - studija osnovnih podataka i strukturalna analiza. Zbog toga nepouzdani osnovni podaci i pogreške uslijed nehomogenosti nizova osnovnih podataka mogu utjecati na izbor modela i rezultate modeliranja. Izostajanje temeljite analize strukture sustava ili procesa, kao i bitnih obilježja podsustava ili komponenata, također mogu biti uzroci većih neslaganja između stvarnog otjecanja u prirodi i rezultata primjene matematičkoga modela. Razlog što se svim fazama obrade ne posvećuje ista pažnja jest to što je treća faza - modeliranje - često najprivlačnija, a prva je faza složena, pa i najteža, a profesionalno (bolje rečeno financijski) donosi najmanje, iako je neophodna.

U Hrvatskoj se hidrološke podloge najvećim dijelom koriste za višenamjensko korištenje vodotoka, posebice u području hidroenergetike, pa potom u vodoopskrbi i navodnjavanju te za obranu od poplave. Prema M. Žugaju (1957.), u Hrvatskoj su do Drugoga svjetskog rata postojće hidroelektrane imale instaliranu snagu od 92 MW. Najveća hidroenergetska postrojenja do 1940. godine bile su HE Kraljevac na Cetini, s 58 MW te na Krki HE Manojlovac sa 17,7 MW i HE Jaruga s 5,8 MW instalirane snage.

Nakon Drugoga svjetskog rata u Hrvatskoj je do devedesetih godina izgrađeno 17 hidroelektrana, ukupne instalirane snage 2058 MW i moguće prosječne godišnje proizvodnje 6670 Gwh. Osim HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava na rijeci Dravi, sve su hidroelektrane smještene u slivu Jadranskoga mora. Ukupni preostali

hidroenergetski potencijal Hrvatske predstavlja još šezdesetak hidroelektrana s instaliranom snagom od oko 1280 MW i prosječnom godišnjom proizvodnjom od oko 5800 GWh (B. Grgić, 1995.).³

Hidrologija osigurava osnovne podloge za analize hidroenergetskoga potencijala koji predstavlja ukupnu energiju prirodnih voda na nekom području. Ta se energija računa obzirom na neku nižu razinu ne uzimajući u račun nikakve energetske gubitke. Postoje tri karakteristične etape puta vode:

1. pojava oborinom palih voda na površini terena
2. otjecanje voda cjelokupnim reljefom terena
3. tečenje voda koncentriranim tokovima (M. Žugaj, 1960.).

Rezultati hidroloških obrada i analiza trebaju sadržavati što pouzdanije informacije o vodnome režimu, po mogućnosti temeljene na podacima dobivenima motrenjem i mjerenjem. Uglavnom su to podaci o srednjim, velikim i malim vodama, zaključci o pronosu i količinama riječnoga nanosa i morfološkim promjenama korita, te podaci o temperaturi vode i pojavama leda u vodotocima (D. Trninić, 1995.).

Zadaća hidrologije najčešće je da odredi što pouzdanije temeljne podloge za ostale grane hidrotehnike. U nekim znanostima, hidrologija kao važna pomoćna disciplina može u velikoj mjeri pridonijeti objašnjavanju prirodnih pojava vezanih uz otjecanje vode i pomoći u izvođenju pouzdanih zaključaka. Od velika je značaja sudjelovanje hidrologije u geološkom inženjerstvu, gdje ona može biti primijenjena na više načina.

Nadalje, hidrološka razmatranja pronosa i količina nanosa u vodotoku nadovezuju se na geološke analize izjedanja tla (erozije) na slivu. Ova su istraživanja naročito važna za ocjenu ukupnih godišnjih količina nanosa, mjerodavnih za dimenzioniranje akumulacijskih jezera. Često se hidrološka razmatranja varijacija površinskih dotoka nastoji povezati s hidrogeološkim istraživačkim radovima - opažanjima razina vode u piczometrima u vodonosnome sloju iz kojega voda dolazi u vodotok ili iz njega odlazi (u nekim slučajevima voda u podzemlju struji paralelno s nadzemnim vodotokom).

S druge strane, i geologija je prijeko potrebna hidrologiji. Već u osnovnim hidrološkim analizama za određivanje granice slivne površine - razvodnice - nužno treba uzeti u razmatranje osnovne geološke karte u mjerilu 1:100.000 i rezultate geoloških i hidrogeoloških istraživačkih radova.

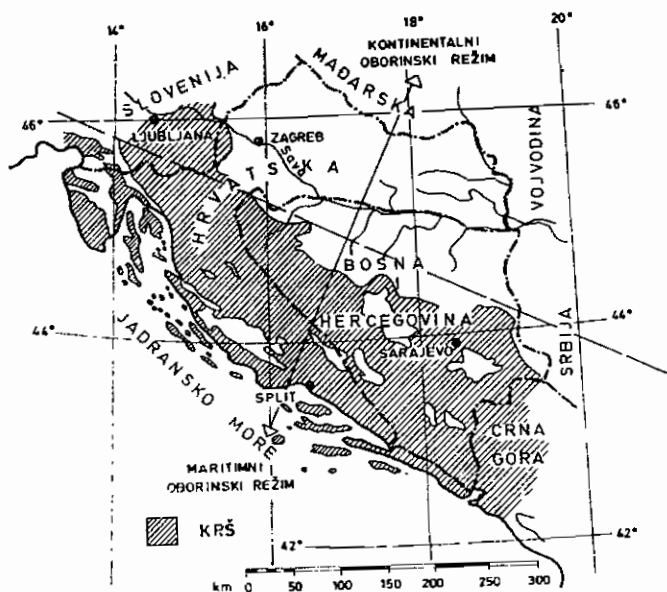
Prema tome, iako su geologija, hidrogeologija i hidrologija zasebne znanstvene discipline, one se u nekim područjima međusobno povezuju i nadopunjavaju. Zbog toga je za postizanje pouzdanih rezultata često potrebno provoditi zajednička, odnosno multidisciplinarna istraživanja i razmatranja.

³ Ovi se podaci ne odnose na male vodotoke na kojima se predviđa izgradnja malih hidroelektrana. One imaju svoju posebnu problematiku, a određivanje njihovih najpogodnijih lokacija i proizvodnje električne energije je, u vrijeme pisanja ove knjige, još u fazi razrade.

1.6 Općenito o otjecanju vode u kršu

Pri određivanju volumena prirodnih podzemnih retencija⁴ vode u kršu, hidrološka terenska mjerenja i analize njihovih rezultata mogu biti od velikog značaja. Naime, kada se primjenjuju suvremene analize sustava otjecanja vode, pristup se redovito sastoji od podjele procesa na tri osnovna dijela: **ulaz vode u podzemni sustav - prolaženje kroz podzemlje - izlaz vode iz podzemlja**. Ulaz vode u podzemni sustav upravljani je količinom i rasporedom oborina u vremenu po slivnome području. Prolaz vode kroz sustav podzemnih pukotina najslabije je poznat dio procesa, a izlaz iz podzemnoga sustava redovito je najbolje poznat jer se vodne količine nakon svojega izviranja na površinu mogu srazmjerno lako motriti i mjeriti. Na temelju tih mjerenja može se primjenom određenih hidroloških postupaka, uz obuhvaćanje podataka iz sušnih i vlažnih razdoblja, donositi pouzdane zaključke o rezervama vode u podzemnom zaleđu krških izvorišta.

Krš je osobit reljef s posebnim - pretežno podzemnim - tokom vode kroz topljive stijene: vapnenac, dolomit, sadru (gips), kretu i halit. Na Zemlji se 20 - 25 posto kopna nalazi pod kršom. Krš u Hrvatskoj obuhvaća površinu od oko 26.000 km² - gotovo cijeli južni dio Hrvatske, odnosno oko polovice njezina ukupnog teritorija.



Slika 1.12 Područje Dinarskoga krša

⁴ Retencija je spremište za vodu iz kojega se voda nekontrolirano ispušta, za razliku od akumulacije iz koje se voda ispušta kontrolirano.

Na slici 1.12 prikazano je područje Dinarskoga krša, koji je nazvan po istoime-nome planinskom masivu. Njegovo područje obuhvaća dio Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine te Crnu Goru. Pruža se paralelno s obalom Jadranskoga mora u pojasu širine od 50 do 150 km na dužini od 700 km, a ukupna mu je površina oko 57.000 km². Dinarskome krškom području pripadaju, osim Jabuke i Sveca, i svi otoci u Jadranskom moru.

Prema F. Fritzu (1991.) za Dinarski krš sve je više podataka da je današnji njegov reljef u geološkome smislu relativno mlad. Većina rijeka i ujezerenja u priobalju i uzduž rijeka nastala su u mlađem Pleistocenu i Holocenu. U razdoblju od zadnjega glacijala do danas okršavanje priobalnoga terena odvija se neprekidno, ali s promjenom intenziteta okršavanja ovisno o promjenama klimatskih prilika. Zbog toga čitav posljednji ciklus okršavanja - u razdoblju od oko 30.000 godina - treba tretirati kao recentno (skorašnje) okršavanje.

Tektonika je najznačajniji činitelj okršavanja. Snažni tektonski procesi u krtim karbonatnim stijenama stvorili su mnogo rasjeda i pukotina, koje omogućuju prodiranje vode u dublje zone. Tako je podzemlje pripremljeno za procese okršavanja, tj. otapanja duž pukotina i u njemu su uvjetovani glavni pravci i granice, odnosno dubine okršavanja.

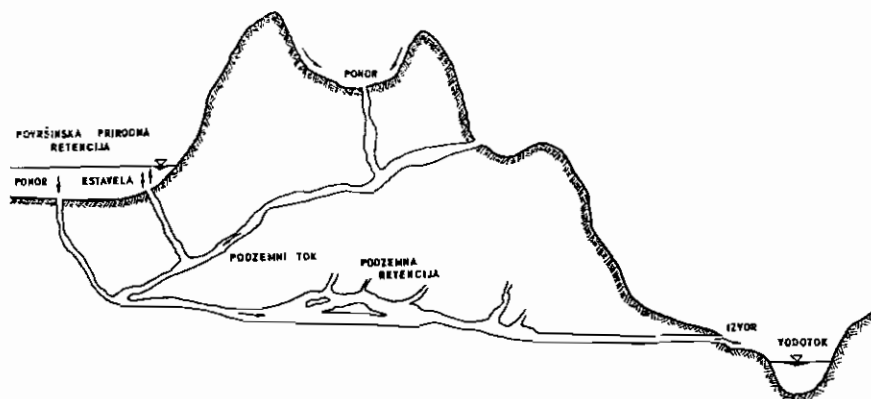
Voda sa CO₂ otapa kalcijev karbonat u vapnencu, pa se u njemu na površini stvaraju izbrazdane udoline ili škrape. Proširivanjem ili urušavanjem nastaju ljevkašte udubine koje se nazivaju ponikve, doci ili vrtače. Zavale duž većih pukotina u kršu nazivaju se uvalama, a najveće zavale s tekućicom i naplavljenim nanosom krška su polja.

Bitno je obilježje krša kapacitet podzemlja. U podzemlje ulazi oborinska voda koja padne na utjecajnu slivnu površinu, a veličina podzemne retencije i propusna moć izvorišta u najvećoj mjeri upravljaju izlazom iz podzemnoga sustava, odnosno otjecanjem u površinski vodotok.

Dimenzije pukotina kroz koje voda protječe ili se zadržava u krškome podzemlju, kreću se u vrlo velikom rasponu: od prostranih špilja, pa čak i podzemnih rijeka, do vrlo malih pukotina koje, ako su ispunjene pijeskom i glinom, mogu dugoročno usporiti prolaz vode kroz podzemlje. U kršu su česta pojava rijeke ponornice. **Ponornica je tekućica što se gubi u ponorima krškoga terena.** Kod njih se često površinski tokovi javljaju kao snažna vrela, a mogu ponirati i nekoliko puta. U Hrvatskoj su najpoznatije ponornice Dobra, Mrežnica, Lika i Gacka.

Za ukupne godišnje količine vode karakteristično je da je, što se tiče otjecanja oborina koje padnu na shij, krš veliki prikupljač oborina. Zbog mogućnosti brza poniranja vode u podzemlje povoljna je okolnost što su gubici uslijed isparavanja manji u krškim nego u nekrškim područjima u Hrvatskoj, a i u Europi. Što se tiče gustoće površinskih tokova, odnosno gustoće hidrografske mreže, krš je izrazito siromašan. U njemu se najčešće pojavljuju glavni vodotoci s nekoliko glavnih aktivnih pritoka. Ako glavni vodotoci završavaju u ponorima krških polja, zbog ograničenih kapaciteta ponora redovito nastaju sezonske poplave takvih polja (npr. rijeka Lika u Lipovu polju).

Na slici 1.13 shematski je prikazan presjek kroz krški sustav s podzemnim provodnicima i retencijama.



Slika 1.13 Krški podzemni sustav

U kršu se nalazi i najveća hidroelektrana u Hrvatskoj, HE Zakućac na Cetini, s instaliranom snagom od 540 MW i prosječnom godišnjom proizvodnjom električne energije od 1770 Gwh. Uz HE Peruća, HE Orlovac i HE Kraljevac ona pripada hidroenergetskom sustavu na slivu Cetine (S. Reštarović, 1969.) - kojem je u novije vrijeme dodana HE Đale. Dotoci vode u HE Zakućac najvećim se dijelom ostvaruju radom akumulacijskoga jezera Peruća na Cetini, koje predstavlja izuzetno uspješnu akumulaciju u kršu s vrlo malim gubicima vode (B. Pavlin i L. Mladineo, 1957.).

Hidrološki je vrlo zanimljiv hidroenergetski sustav Like i Gacke čije se vode koriste u HE Senj. Mogućnosti korištenja voda Like (koja ima izrazito bujični vodni režim karakteriziran jakim dotocima nakon kiša i topljenja snijega) i Gacke, čije je otjecanje pod utjecajem velike podzemne retencije u krškome zaleđu njezinih izvora, analiziraju još 1956. godine A. Stepinac i M. Sever. Energetski sustav HE Senj 1964. opisuje glavni projektant HE Senj Z. Schwartz.

1.7 Pristup hidrološkim izračunima

U proučavanjima hidroloških značajki nekoga sliva najvažniji element predstavlja otjecanje. Otjecanje vode (po potrebi i nanosa) proučava se i analizira u pojedinim protjecajnim profilima razmatranoga vodotoka. Pritom je redovito najjednostavnije definirati dotoke vode na temelju mjerenja u protjecajnome profilu vodotoka. Zbog složena odnosa između palih oborina i otjecanja znatno je teže, a u nekim slučajevima čak i nemoguće, realno odrediti otjecanje na osnovi oborina izmjenjenih na meteorološkim stanicama na slivu (A. Stepinac, 1976.).

Otjecanje vode nije konstantno po količini - čak ni u kratkim vremenskim razdobljima - a nagle i snažne promjene su česte. Maksimalni protoci pojedinih rijeka mogu biti nekoliko desetaka puta, pa sve do nekoliko tisuća puta veći od minimalnih. Odnos između maksimalnoga i minimalnoga godišnjeg protoka može biti bitno različit u pojedinim godinama. Obično se prosjeci malo mijenjaju, no srednji protoci u nekim različitim vremenskim razdobljima (npr. 5, 10, 20, 30 godina) mogu se međusobno značajno razlikovati.

Prema tome, za pouzdano utvrđivanje dugogodišnjega vodnog režima nekog vodotoka, pri rješavanju inženjerskih hidrotehničkih - i ne samo hidrotehničkih problema - potrebno je poznavati kronologiju protjecanja za odgovarajuće razdoblje ili biti upućen u odnose između poznatih podataka o oborinama i protjecanja vode u rijeci, kako bi to protjecanje moglo biti određeno sa zadovoljavajućom točnošću.

U nekim slučajevima u riječnome profilu u kojem treba definirati otjecanje nema nikakvih mjerenja protoka vode. Tada treba pronaći veze s nekim manje ili više udaljenim protjecajnim profilom čije su hidrološke veličine poznate, a hidrološki režim sličan. Takve se veze istražuju i u slučajevima kad se želi produžiti ili nadopuniti prekratke nizove protoka u jednome profilu na osnovi duljih nizova u drugom profilu. Pritom treba imati na umu da zadovoljavajuće hidrološko rješenje zahtijeva poznavanje odgovarajućih hidroloških pravila.

Osnovni podaci ili osnovne podloge za hidrološke izračune mogu se podijeliti na dvije skupine:

Prva skupina sadrži uglavnom nepromjenjive podloge kao što su topografske, geološke i pedološke karte.

Druga skupina sadrži mjerenja i mjerenja promjenljivih veličina u koje spadaju oborine, vodostaji, protoci vode i nanosa, svi oblici isparavanja i faktori vezani uz to (tlak zraka i vodene pare, temperatura, vlaga, vjetrovi) te podzemne vode. Ove veličine vremenom pokazuju promjene po količini i kakvoći, a njihovo sustavno prikupljanje i analiziranje je redovito složen posao.

U nekim slučajevima hidrološke obrade pokazuju određene nedostatke. Hidrološki nedostaci proizlaze iz nedovoljno pouzdanih osnovnih podloga i nedovoljna razumijevanja hidroloških pravila. Već sama spoznaja da postoje određeni nedostaci važna je informacija koja upućuje na usvajanje mjerodavnih hidroloških veličina s tzv. većom sigurnošću.

Nedostaci rješenja hidrotehničkih objekata i njihovih dimenzija često se puta pripisuju hidrološkim nedostacima. Tu se uglavnom radi o tome da su pri dimenzioniranju objekata bili usvojeni veći sigurnosni faktori nego što bi hidrološki bilo realno, odnosno dopustivo.

Hidrološki nedostaci očitovali su se kod objekata korištenja vodnih snaga - dolinskih pregrada - na njihovim evakuacijskim uređajima (preljevima i temeljni ispusti), vodoopskrbnih, kanalizacijskih i drenažnih sustava, kod prometnica s neopravdanom veličinom mostovnih otvora itd.

Ranije je bilo moguće usvajati visoke sigurnosne faktore (3 - 4) koji su za današnju ekonomsku izgradnju neprihvatljivi, jer se traži veći stupanj hidrološke točnosti. Realnije i točnije rezultate hidroloških obrada danas je moguće ostvariti zbog velika broja raspoloživih osnovnih hidroloških podloga i uvedenih novih metoda obrade podataka.

Osnovno pravilo i zahtjev trebali bi biti da hidrotehnički objekt zadovoljava velikoj vodi koja se može pojaviti, ali samo onda, kad su izravno u velikoj opasnosti ljudski životi ili kada bi mogle nastati vrlo velike štete.

U svim drugim slučajevima hidrotehnička rješenja moraju obuhvatiti i ekonomsku stranu problema. Pritom se redovito postavlja pitanje koja veličina troškova je ekonomski opravdana. Hidrotehnička građevina skromno projektirana samo zbog troškova izgradnje neće pružiti dovoljno sigurnu zaštitu od velikih voda, pa je u takvim slučajevima neophodno realno procijeniti sve negativne posljedice koje mogu nastati zbog takvih "ušteda" (A. Stepinac, 1976.).

U sadašnjemu razdoblju razvoja hidrologije - koje se zbog mogućnosti obrada velika broja prikupljenih podataka naziva razdobljem teoretizacije - može zbog neznanja ili površna poznavanja hidrologije kao primijenjene znanosti, doći do krupnih tehničkih propusta, ukoliko se smatra nepotrebnim iskoristiti sve raspoložive hidrološke podatke. Ne smije se zaboraviti ili zanemariti činjenica da veličine mjerodavnih hidroloških parametara nisu konstantne, nego variraju oko prosječnih vrijednosti. Te se prosječne vrijednosti s vremenom mogu značajno promijeniti. Razlozi za promjene mogu biti dulji nizovi prikupljenih podataka - koji redovito daju pouzdanije rezultate obrada, zatim klimatske promjene i promjene u vodnome režimu zbog utjecaja čovjekova rada na slivu i sl.

Danas nisu rijetki slučajevi osuvremenjivanja ili prerađivanja neizvedenih projekata nekih, znatno ranije projektiranih hidrotehničkih objekata. Nažalost se često smatra nepotrebnim naručiti obrade novih hidroloških podloga pa se koriste rezultati starih obrada. Stare hidrološke obrade u svjetlu ranijih raspoloživih podloga mogu predstavljati vrijedna dostignuća, pogotovo ako su ih izradili tadašnji vrhunski stručnjaci, ali zbog mogućih promjena hidroloških prilika ili zahvaljujući novim spoznajama one više ne moraju biti mjerodavne. Zanemarivo mala ušteda financijskih sredstava ostvarena nauštrb obrada novih hidroloških podataka može se nakon izvedbe projekta osvetiti, jer postoji velika vjerojatnost da će pojedini dijelovi objekta biti krivo dimenzionirani. Prema tome, da bi se moglo tehnički ispravno pristupiti projektiranju i općenito korištenju hidroloških parametara, potrebno je obraditi sve raspoložive osnovne hidrološke podatke, tako da se ustanovci i pri izračunavanju uzmu u obzir i sve moguće promjene nastale u vodnome režimu.

2 OSNOVE MEHANIKE FLUIDA

2.1 Uvod

U ovome se poglavlju opisuju osnovni pojmovi, obilježja i pojave koje se izučavaju u mehanici fluida, u onolikoj mjeri koliko je to neophodno za temeljna shvaćanja hidrologije površinskih voda. Poglavlje je usmjereno prvenstveno na vodu, koja se tretira kao izotropan (svojstva su mu neovisna od smjera gibanja), homogen (ista svojstva u svim točkama) i nestlačiv fluid

Mehanika fluida je grana fizike koja proučava oblike i zakone mehaničkoga gibanja i relativnoga mirovanja tekućina (kapljevine i plinovi), te razrađuje načine primjene tih zakona na različita područja tehnike, a naročito u hidrotehnici (npr.: hidroenergetika, hidrologija, melioracije, plovni putevi, vodoopskrba, kanalizacija).

Dok se u Newtonovoj klasičnoj mehanici krutine (statika, kinematika i dinamika) proučava kretanje materijalne čestice i elastična (statička) ravnoteža sustava čestica (greda, konzola itd.), u mehanici se fluida razmatra gibanje sustava čestica.

"Mehanika fluida" je najpravičniji naziv za tu znanost, koji se u svijetu najviše rabi. Postoje još i nazivi hidraulika (od grč. hydor - voda i aulos - cijev) i hidromehanika.

Nakon prvoga znanstvenog djela na tom području, Arhimedove rasprave "O tijelima koja plivaju", napisane 250 godina prije Krista, smatra se da dugo vremena nije bilo novih temeljnih otkrića u mehanici fluida. Poslije Leonarda da Vincija, koji je djelo "O gibanju i mjerenju vode" napisao koncem 15. stoljeća (objavljeno u 17. stoljeću), 1586.g. objavljen je rad S. Stevina "Osnove hidrostatike", a Galileo Galilei 1612. objavljuje "Raspravu o tijelima u vodi i onima koja se gibaju u njoj". E. Torricelli 1643. pronalazi zakon istjecanja tekućina kroz otvore; B. Pascal 1650. otkriva zakon o prijenosu tlaka u tekućini, koji objavljuje 1663. u znanstvenoj raspravi "O ravnoteži tekućina". I. Newton 1685. postavlja hipotezu o unutarnjemu trenju tekućine. D. Bernoulli 1738. u djelu "Hidrodinamika" daje temeljni teorem hidrodinamike pod nazivom Bernoullijeva jednadžba. U raspravi "Opći principi gibanja tekućine", L. Euler 1755. postavlja sustav diferencijalnih jednadžbi idealne tekućine (tekućina bez unutarnjega trenja) i to je početak analitičke mehanike kontinuuma¹. Euler je u mehaniku fluida uveo pojavu tlaka u točki tekućine u gibanju i mirovanju, izveo je

¹ Kontinuum je cjelina u kojoj nema prekida.

jednadžbu kontinuiteta (neprekidnosti) tekućine, formuirao zakon o promjeni količine gibanja i momenta količine gibanja, postavio osnove gibanja broda, te objasnio problem otpora tekućine tijelima koja se u njoj gibaju (I. I. Agroskin i dr., 1973.) Unutar mehanike fluida, naročito u 20. stoljeću razvila se i aeromehanika, no ona ovdje neće biti zasebno razmatrana.

Od početka značajnijega razvoja mehanike fluida, dakle od 16. stoljeća, izvode se teorijske osnove hidrauličkih zakonitosti, a usporedo s njihovom primjenom razvija se i praktična hidraulika. Posebni i često vrlo složeni zahtjevi, prvenstveno kada se radi o projektiranju i izvedbama velikih hidrotehničkih građevina, uvjetovali su razvitak hidrauličkih laboratorija u kojima se na fizikalnim modelima ispituju hidrotehnički problemi koje je vrlo teško, a često i nemoguće, riješiti na temelju teorijskoga pristupa.

Prema tome, u mehanici fluida su uzajamno povezani teorija, praksa, eksperimentiranje i matematičko modeliranje.

2.1.1 Mjerne jedinice u mehanici fluida

U Hrvatskoj je, kao i u većini zemalja u svijetu, zakonom određena upotreba SI (Standard International) sustava mjernih jedinica (od 15.2.1962.).

U mehanici fluida postoje tri osnovne veličine s pripadajućim dimenzijama, iz kojih se izvode ostale veličine:

1. **dužina:** L (m)
2. **vrijeme:** T (s)
3. **masa:** M (kg)

Od izvedenih fizičkih veličina ovdje se navode samo najvažnije:

$$\text{- brzina: } [v] = \frac{[L]}{[T]} \quad (\text{m/s}) \quad \left(v = \frac{ds}{dt} \right) \quad s \text{ je put, a } t \text{ vrijeme.} \quad (2.1)$$

$$\text{- ubrzanje ili akceleracija: } [a] = \frac{[L]}{[T^2]} \quad (\text{m/s}^2) \quad \left(a = \frac{dv}{dt} \right) \quad (2.2)$$

$$\text{- sila: } [F] = [M][a] \quad (\text{N}) \quad (2.3)$$

Izvedena jedinica za silu - Newton (N) = (kg m/s²) je sila koja masi od jednoga kilograma daje ubrzanje od jednoga m/s².

$$\text{- protok: } [Q] = \frac{[L^3]}{[T]} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.4)$$

Jedinica za protok je (m³/s), a za male protoke rabi se još i litra u sekundi (l/s), pa čak i (cm³/s).

$$\text{- mehanički rad: } [R] = [F][L] \quad (\text{J}) \quad (2.5)$$

Jedinica mehaničkoga rada je jedan Joule (J) = (Nm).

- **energija:**

Iz jednadžbe $E = \frac{mv^2}{2}$ može se izvesti dimenzija polja energije E:

$$[E] = \frac{(M L T^{-1})^2}{1} = [M][L^2][T^{-2}] \quad (2.6)$$

Jedinica za energiju E, kao i za mehanički rad R je (J):
(kg m²/s²) = (Nm) = (J)

- **snaga:**

Snaga N je energija E u jedinici vremena T, pa je u skladu s tim:

$$[N] = \frac{[E]}{[T]} = [M][L^2][T^{-1}] \quad (2.7)$$

Jedinica za snagu je:

$$(\text{N m/s}) = (\text{J/s})$$

Ostale izvedene jedinice koje se često upotrebljavaju u mehanici fluida, a zanimljive su i hidrologiji (gustoća, kinematički koeficijent viskoznosti, modul elastičnosti, tlak i tlak vodenih para) opisane su u poglavlju 2.2.

2.2 Glavne fizičke osobine tekućine

2.2.1 Pojam i svojstva tekućine

Tekućina ili **fluid** je maseno tijelo, čije se pojedine čestice međusobno veoma lako pomiču, tako da može teći, odnosno mijenjati svoj oblik i pri učinku neznatnih sila. U reološkom² smislu tekućina (fluid) je tvar (materija) koja pri tangencijalnim (smičnim) naponima neprekidno mijenja oblik, ma kako male bile sile koje su uzrokovala te napone. Prema tome, tekućina nema vlastiti oblik, nego poprima oblik posude u kojoj se nalazi.

² Reologija je znanost koja se bavi problemima napona i promjena oblika - deformacija.

Tekućine se dijele na kapljevine i plinove (uzdušnine). **Kapljevina** je fluid koji u otvorenoj posudi ne može proizvoljno povećati svoj volumen, a **plin** je ekspanzivni fluid koji uvijek zauzima najveći mogući volumen koji mu je dostupan. Pritom su, za razliku od plinova, kapljevine - kao i kruta tijela - vrlo malo stlačive i ne zauzimaju čitav raspoloživi volumen, tj. imaju **slobodnu površinu**. Neki autori pod pojmom tekućine podrazumijevaju kapljevinu i ne upotrebljavaju taj stručni izraz kao istoznačnicu za fluid.

Iako između kapljevina i plinova postoje velike razlike u gustoći, s kinematičkoga stajališta između njih gotovo nema razlike. Primjerice, mehanizam strujanja vjetra u nižim slojevima atmosfere i mehanizam strujanja u morima i jezerima načelno se ne razlikuju. Također je i za vrijeme kretanja tijela kroz kapljevinc ili zrak slika strujanja gotovo ista (npr.: opstrujavanje zraka oko avionskoga krila, vode oko stupa mosta i sl.).

Kapljevine i plinovi, odnosno tekućine imaju svojstvo tečenja i imaju određenu elastičnost (čvrstoću) na vlačna i smična naprezanja, što je inače svojstvo krutih tijela. Svojstvo elastičnosti stoga je kod tekućina redovito prikriveno izrazitim svojstvom tečenja.

2.2.2 Gustoća

Gustoća ρ je fizička veličina koja pokazuje raspodjelu mase tekućine M u volumenu V :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2.8)$$

Ako je njezina gustoća u svim točkama ista tekućina je homogena.

Gustoća vode ovisno o njezinoj temperaturi se vrlo lagano mijenja. U hidrotehnici se temperatura vode obično mijenja u granicama od 0 do 35°C, pa se za praktične proračune može uzeti da je gustoća vode stalna i jednaka:

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Gustoća mora iznosi od 1020 do 1030 kg/m³, a u posebnim slučajevima (za velik salinitet mora) 1050 kg/m³. Gustoća nafte kreće se unutar granica od 650 do 850 kg/m³, a gustoća žive iznosi 13.600 kg/m³. Gustoća zraka iznosi 1,293 kg/m³ (na morskoj površini pri atmosferskome tlaku).

Uz pojam gustoće tekućine treba navesti i pojam specifične težine tekućine γ , koja je opisana osnovnim jedinicama MKS sustava mjera za razliku od gustoće ρ , opisane jedinicama određenima prema postojećem zakonskom SI sustavu mjera.

Specifična težina γ je fizička veličina koja prikazuje raspodjelu težine G u volumenu V .

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{N/m}^3) \quad (2.9)$$

Između specifične težine γ i gustoće ρ postoji sljedeći odnos:

$$\gamma = \rho g \quad (2.10)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (2.10a)$$

gdje je $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ubrzanje sile teže (gravitacija).

2.2.3 Elastična svojstva tekućina

2.2.3.1 Elastičnost

Elastičnost ili **elasticitet** je svojstvo tijela da mijenja svoj oblik pod utjecajem neke sile, a nakon prestanka njezina djelovanja poprimi prijašnji oblik.

Modul elastičnosti E tekućine dobija se iz formule:

$$E = c^2 \rho \quad (\text{kg/ms}^2) \quad (\text{kgm}^{-1} \text{ s}^{-2}) \quad (2.11)$$

gdje c označava brzinu širenja zvuka, vibracija i stišljivih efekata kroz tekućinu, a ρ gustoću tekućine.

Za vodu pri temperaturi od 20°C modul elastičnosti je $E = 21,08 \cdot 10^8 \text{ kg/ms}^2$, a brzina širenja zvuka $c = 1452 \text{ m/s}$. (Brzina širenja zvuka kroz zrak je $c = 330 \text{ m/s}$).

2.2.3.2 Stlačivost

Stlačivost (**stišljivost**, **kompresibilnost**) tekućina određena je koeficijentom volumne dilatacije β_s , kojim je definirana relativna promjena volumena tekućine V pri promjeni normalnoga tlaka p za jedinicu tlaka, na osnovi izraza:

$$\beta_s = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (2.12)$$

Stlačivost kapljevina vrlo je mala u usporedbi sa stlačivošću plinova, a vrlo velika u usporedbi sa stlačivošću čvrstih tijela (npr. stlačivost vode je oko 100 puta veća od stlačivosti čelika).

Stlačivost tekućine neizostavan je čimbenik u objašnjavanju onih hidrauličkih pojava u kojima je brzina gibanja tekućine istoga reda veličine kao i brzina širenja zvuka (M. Fancev, 1982.).

Elastična svojstva tekućine uzimaju se u obzir, primjerice, za vrijeme zatvaranja i otvaranja zatvarača u cijevnim vodovima pod tlakom, pri čemu dolazi do pojave koja se naziva **hidraulički udar** (vodni udar), tj. do nagla povećanja ili nagla smanjenja tlaka zbog promjene brzine tekućine.

Za većinu hidrauličkih pojava, pri kojima su brzine gibanja tekućine i njihove promjene male u odnosu na brzinu širenja zvuka kroz tekućinu, u izračunima se ne uzima u obzir elastična svojstva. U takvim se slučajevima slobodno pretpostavlja da je tekućina nestlačiva. Ta je pretpostavka realna i kada se radi o primjeni hidrauličkih postupaka u hidrologiji (npr. mjerenja brzina i protoka vode).

2.2.4 Viskoznost

Viskoznost ili **unutarnje trenje** je svojstvo tekućine da pruža otpor promjenama oblika. Tekućina pri posmičnim deformacijama pruža otpor zbog djelovanja kohezije³ i međusobne izmjene kinetičke energije molekula. Viskoznost povećanjem temperature opada zbog smanjenja kohezije. Kod plinova povećanjem temperature viskoznost raste, jer zbog znatno manje zbijenosti molekula nego kod kapljevine povećanjem temperature raste kinetička energija molekula (V. Jović, 1977.).

Kada se u tekućini promatraju dva neizmjerljivo bliska sloja, međusobno udaljena za dy , čiji gradijent brzina je dv , onda je tangencijalni napon između tih slojeva:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{kgm/s}^2) \quad (2.13)$$

gdje je μ - dinamički faktor proporcionalnosti koji se još naziva i **dinamičkim koeficijentom viskoznosti**.

Ukoliko se dinamički koeficijent viskoznosti μ podijeli s gustoćom ρ dobije se **kinematički koeficijent viskoznosti**:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.14)$$

koji je tako nazvan zbog svoje dimenzije (m^2/s), koja sadrži samo kinematičke veličine.

U praktičnim inženjerskim izračunima može se usvojiti da veličina kinematičkoga koeficijenta viskoznosti ovisi samo o temperaturi tekućine; pa su za različite temperature vode ν veličine ν dane u tablici 2.1.

Osirn u propisanoj jedinici (m^2/s) radi jednostavnijega se pisanja kinematički koeficijent viskoznosti ν može zadati u (cm^2/s). Jedinica (cm^2/s) naziva se još i Stokes prema fizičaru G. G. Stokesu.

$$1 \text{ St (Stokes)} = 1 \text{ (cm}^2/\text{s)} = 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$\text{Za vodu temperature } 10^\circ\text{C} \quad \nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 0,0131 \text{ St}$$

Svaka tekućina ima određenu viskoznost. Primjerice, alkohol je slabo viskoznan, voda ima veću viskoznost od alkohola, a bitumen je vrlo viskoznan - znatno više nego voda. Često puta je, radi pojednostavljivanja, određene hidrauličke pojave potrebno tretirati bez utjecaja viskoznosti. U takvim se slučajevima pretpostavlja da tekućina ne prima posmična naprezanja uslijed djelovanja sila. Takva tekućina, za koju se pretpostavlja da nema viskoznosti, zove se **neviskozna tekućina** valja je razlikovati od **viskozne tekućine**. U nekim se slučajevima uvodi pojam **idealne tekućine**, kojoj su prema I. I. Agroskinu i dr. (1977.), *svojstveni nestlačivost, pomanjkanje otpora kidanju i nepostojanje viskoznosti*. Važno je znati da idealna tekućina u stvarnosti ne postoji, ali kod mnogih hidrauličkih izračuna, tamo gdje je to moguće, pretpostavka da je tekućina idealna znatno pojednostavljuje izračun. Ovo pojednostavljenje je moguće uz uvjet da su rezultati takvoga izračuna dovoljno točni da bi se mogli praktično primijeniti.

2.2.5 Tlak vodenih para

Kapljevine imaju sposobnost rastvaranja i primanja plinova pri dodiru s njima. Prema **Henryevu zakonu** *količina upijena plina na određenoj temperaturi je proporcionalna tlaku kapljevine i u odnosu na volumen ostaje stalna*.

Voda u prirodnome stanju uvijek sadrži određenu količinu rastvorenoga zraka - u normalnim uvjetima (prirodna temperatura i atmosferski tlak zraka) ta količina iznosi oko dva posto. Smanji li se tlak, dio rastvorenoga zraka izdvaja se iz vode, a što je smanjenje tlaka veće to burnije se zrak izdvaja, pri čemu dolazi i do isparavanja vode.

Ovisno o temperaturi i tlaku, kapljevine, pa prema tome i voda, isparavaju zbog kinetičke energije molekula. Iznad površine kapljevine ohlikuje se tlak vodenih para. Za hidrologiju je zanimljiva veličina tlaka vodenih para u Meyerovoj iskustvenoj (empirijskoj) formuli za proračun mjesečnih isparavanja sa slobodne površine vode.

Pri opisivanju pojma tlaka vodenih para zanimljivo je navesti jednu pojavu. Naime, ako u određenim uvjetima toka vode tlak u nekoj točki padne na tlak vodenih para, dolazi do isparavanja vode na tome mjestu. Mjehurić pare nošen tokom vode dolazi tada do područja većih tlakova gdje se naglo zgušnjava (pretvara u kapljevinu), uslijed čega dolazi do nagle promjene gustoće i vrlo velike i nagle promjene tlaka (udar tlaka čak do 1000 N/cm^2 , odnosno 10^4 bar). Ovaj tlačni udar oštećuje i najčvršće metale, stvarajući u njima mala udubljenja i ta se pojava naziva **kavitacija** (V. Jović, 1977.).

³ Kohezija je međumolekularna sila koja drži na okupu čestice iste tvari.

Za vodu pri atmosferskome tlaku i različitim temperaturama t , tlak vodenih para p_v dan je u tablici 2.1.

2.2.6 Kapilarnost

Slobodna površina tekućine, tj. površina kapljevine u dodiru s plinom ili granica dviju kapljevina koje se ne miješaju, u stanju je jednolike površinske napetosti. Prema tome, na spoju dviju tekućina javlja se poseban slučaj ravnoteže djelovanja kohezijskih sila.

Površinska se napetost određuje silom zatezanja i djeluje na jedinicu duljine opsega koji omeđuje slobodnu površinu. Ta se sila zove površinski napon σ i ovisna je samo o prirodi tekućine i njezinoj temperaturi. S povećanjem temperature, vrijednosti σ se smanjuje. Za vodu koja je u dodiru sa zrakom na temperaturi od 20 °C površinski je napon $\sigma = 0,0726$ N/m. Za živu je pri 20 °C $\sigma = 0,540$ N/m - gotovo 7,5 puta veći od površinskoga napona za vodu.

Sposobnost kapljevine da se u cijevima maloga promjera i procijepima diže ili spušta pod djelovanjem sila površinske napetosti zove se kapilarnost.

Pri 20 °C visina dizanja ili kapilarna elevacija h za vodu u staklenoj cijevi promjera d je:

$$h d = \frac{4 \sigma}{\rho g} = \frac{4 \cdot 0,0726}{1000 \cdot 9,81} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^2\text{)} \quad (2.15)$$

gdje su dimenzije površinskoga napona (kapilarne konstante) ν (kg/ms²/m) (1N = 1 kg/ms²), gustoće ρ (kg/m³) i gravitacije g (m/s²).

Visina kapilarnoga dizanja h u odnosu na promjer kapilare d je:

$$h = \frac{30}{d} \text{ (mm)} \quad (2.16)$$

Za živu se na isti način može odrediti kapilarno spuštanje ili kapilarna depresija:

$$h = \frac{10,15}{d} \text{ (mm)} \quad (2.17)$$

2.2.7 Tlak

Tlak ili **pritisak** p definira se kao srednja vrijednost normalnih napona u nekoj točki:

$$p = \sigma_n = \frac{dF_n}{dA} \text{ (Pa)} \quad (2.18)$$

gdje je σ_n normalni napon, F_n komponenta sile F okomita na podlogu, a A površina na koju sila F djeluje.

Prema SI sustavu mjera tlak se izražava u Pascalima (Pa) ili barima (bar). Odnos između tih jedinica je: 1 bar = 10⁵ Pa.

U odnosu na MKS sustav mjera je:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2,$$

a ranije (prije uvođenja SI sustava mjera) se tlak izražavao u:

- tehničkim atmosferama: 1 at = 0,981 bar; 1 at = 1 kp/cm²

- fizikalnim atmosferama: 1 Atm = 1,033 at.

Kada je tekućina u stanju mirovanja normalni naponi u svim smjerovima imaju jednak intenzitet.

Nema negativnoga tlaka; tekućina ga ne može primiti pa dolazi do prekida toka. Često se veličina tlaka u nekoj točki promatra kao relativna vrijednost - najčešće u odnosu na tlak u atmosferi (atmosferski tlak). Tada se tlak koji je niži od atmosferskoga naziva **podtlak**.

U tablici 2.1 prikazana su osnovna fizikalna svojstva vode pri različitim temperaturama.

Tablica 2.1 Fizikalna svojstva vode (prema Ž. Živić, 1969.)

TEMPERATURA VODE	GUSTOĆA	KINEMATIČKA VISKOZNOST	DINAMIČKA VISKOZNOST	TLAK VODENIH PARA	POVRŠINSKA NAPETOST	MODUL ELASTIČNOSTI	BRZINA ZVUKA	
t	t_{apr}	ρ	ν	μ	p_v	σ	c	
°C	K	kg/m ³	10 ⁻⁶ m ² /s	10 ⁻³ kg/ms	Pa=N/m ²	N/m	10 ⁹ Pa	m/s
0	273,15	999,8	1,78	1,78	610	0,0761	1,95	1397
4	277,15	1000	1,564	1,564	806	0,075	1,99	1412
10	283,15	999,6	1,31	1,31	1220	0,074	2,04	1429
20	293,15	998,1	1,01	1,01	2340	0,073	2,10	1451
30	303,15	995,5	0,81	0,81	4220	0,071	2,15	1468
40	313,15	992	0,67	0,66	7350	0,069	2,18	1482
50	323,15	998	0,56	0,55	12400	0,068	2,20	1492
60	333,15	983	0,48	0,47	20100	0,066	2,21	1500
70	343,15	978	0,42	0,41	31500	0,064	-2,21	-1506
80	353,15	972	0,36	0,35	47900	0,063	-2,21	-1510
90	363,15	966	0,32	0,31	70500	0,061	-2,2	-1512
100	373,15	958	0,29	0,28	101000	0,059	-2,2	-1512

2.2.8 Anomalije vode

Voda se, ni čista ni u prirodi, ne pojavljuje samo kao jednostavan spoj H_2O , nego kao smjesa različitih asociiranih molekula $(H_2O)_8$, $(H_2O)_2$, $(H_2O)_2$ i molekula H_2O . Zbog različitih osobina tih molekula voda posjeduje osobita svojstva, tj. određene anomalije, od kojih se ovdje navode sljedeće:

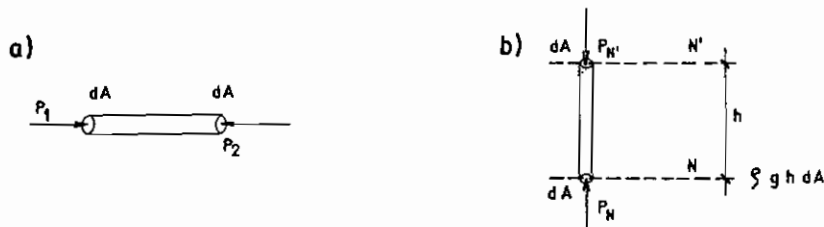
1. Pri smrzavanju se volumen vode povećava oko 10 posto, a pri hlađenju od 4 do 0 °C volumen vode se povećava, a gustoća smanjuje.
2. Povećanjem tlaka do 2000 at, temperatura smrzavanja vode se smanjuje (a ne povećava).
3. Sposobnost vode da u sebe primi toplinu veoma je velika u usporedbi s drugim tijelima, a najniža je kod temperature od oko 40 °C.
4. Voda može agresivno djelovati na različite materijale. To je naročito neugodno kad je riječ o hidrotehničkim postrojenjima za iskorištavanje vode. *Pojava razjedanja metala i betona djelovanjem vode naziva se korozija.*
5. Suspendirane (lebdeće) čestice i različite otopljene soli u vodi uzrokuju pojavu **inkrustacije**, odnosno oblaganja ili dobivanja kore.

2.3 Hidrostatika

U hidrostatičkim se problemima ne pojavljuju sile trenja, jer tekućina ne struji nego miruje, a ne pojavljuje se niti sila inercije. Hidrostatika je poseban slučaj hidrodinamike. Pritom je mirno stanje mase tekućine samo poseban slučaj kretanja s brzinom $v = 0$ u odnosu na proizvoljno odabran koordinatni sustav, koji se smatra nepokretnim. Prema tome, hidrostatički su zakoni samo poseban slučaj zakona o kretanju tekućina. **Hidrostatika razmatra zakone tlaka i njegovu raspodjelu po tekućini koja miruje u odnosu na stijenke posude u kojoj se nalazi.**

2.3.1 Raspodjela hidrostatičkoga tlaka

U hidrostatičkim razmatranjima u polju sile teže za tekućinu se može pretpostaviti da je nestlačiva i homogena (gustoća $\rho = \text{const.}$).



Slika 2.1 Hidrostatički tlak p u (a) horizontalnoj i (b) vertikalnoj ravnini

Ako se u tekućini pretpostavi valjak diferencijalno male površine baze (slučaj a na slici 2.1), sile hidrostatičkoga tlaka koje djeluju na plašt valjka međusobno se poništavaju. Uz pretpostavku ravnoteže u horizontalnom smjeru je:

$$p_1 dA - p_2 dA = 0 \quad (2.18)$$

gdje su p_1 i p_2 tlakovi u horizontalnoj ravnini, a dA je diferencijal površine na koju ti tlakovi djeluju.

Iz jednadžbe (2.18) slijedi:

$$p_1 = p_2 = \text{const.}$$

Prema tome, u horizontalnoj ravnini hidrostatički tlak ima jednaku veličinu. Takva ravnina naziva se plohom jednakoga tlaka. U homogenoj tekućini koja miruje, sve točke u nekoj horizontalnoj ravnini imaju jednak tlak (npr. slobodna vodna površina).

Kada se radi o hidrostatičkome tlaku homogene, nestlačive tekućine u vertikalnoj ravnini (slučaj b na slici 2.1), sile svih tlakova okomitih na plašt valjka s osnovicom površine dA daju rezultantu veličine nula. U skladu s pretpostavkom da je tekućina unutar uspravnoga valjka u ravnoteži, zbroj svih vertikalnih sila mora biti:

$$\rho g h dA + p_N dA - p_{N'} dA = 0 \quad (2.19)$$

$$p_N = p_{N'} + \rho g h \quad (2.20)$$

Izraz (2.20) predstavlja temeljnu (osnovnu) jednadžbu hidrostatike.

Ako je tekućina u dodiru sa zrakom (atmosfera) onda je u temeljnoj jednadžbi hidrostatike (2.20) $p_{N'} = p_o$ (p_o je atmosferski tlak) i izraz (2.20) postaje jednadžba za određivanje apsolutnoga tlaka:

$$p_N = p_o + \rho g h \quad (2.21)$$

gdje je p_N apsolutni tlak.

Kada se pođe od pretpostavke da je atmosferski tlak p_o jednak nuli, onda je relativni tlak p :

$$p = \rho g h \quad (2.22)$$

Izraz (2.22) je jednadžba pravca u koordinatnome sustavu gdje je koeficijent smjera ρg , pa prema tome vrijednost tlaka raste linearno s povećanjem dubine. Za tekućinu u mirovanju vrijedi **Pascalov zakon**:

Svaka promjena tlaka u bilo kojoj točki tekućine u mirovanju prenosi se na ostale točke u tekućini u jednakom iznosu, pri čemu se njezina ravnoteža ne remeti.

Prema definiciji tlaka kao normalnoga prosječnog napona, sile tlaka djeluju uvijek okomito na čvrstu konturu. Tlak se u svim smjerovima rasprostire jednakim intenzitetom (brzinom širenja stišljivih efekata - pogl. 2.2.7).

2.3.2 Raspodjela potencijalne energije u tekućini

Ukoliko je visinom z definiran položaj točke u tekućini u odnosu na neku odabranu ravninu, može se općenito napisati:

$$p + \rho g z = \text{const.} \quad (2.23)$$

Podijeli li se izraz (2.23) s konstantom ρg dobije se tzv. visinski oblik:

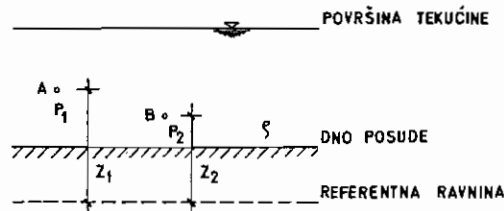
$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const.} \quad (\text{m}) \quad (2.24)$$

u kojemu svi članovi imaju dimenziju duljine L (m).

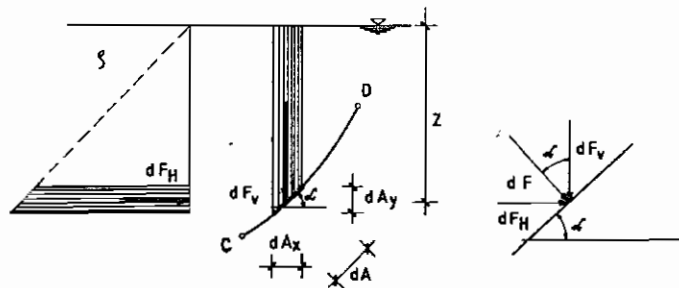
Za dvije proizvoljne čestice tekućine se zakon raspodjele hidrostatičkoga tlaka može izraziti kao zbroj dviju visina:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (\text{m}) \quad (2.25)$$

Općenite oznake u izrazu (2.25) prikazane su na slici 2.2. Izrazima (2.24) i (2.25) je definirana raspodjela potencijalne energije čestica idealne tekućine u mirovanju.



Slika 2.2 Skica oznaka za temeljnu jednadžbu hidrostike u obliku (2.25).



Slika 2.3 Rastavljanje sile hidrostatičkoga tlaka dF na komponente

2.3.3 Sile hidrostatičkoga tlaka na bočne plohe

Sila hidrostatičkoga tlaka uvijek je usmjerena okomito na promatranu površinu jer tekućina u stanju mirovanja nije sposobna preuzeti tangencijalne naponc.

Izračunavanje sile tlaka na neku plohu provodi se rastavljanjem krivuljnoga (ili plošnoga) integrala na komponente u skladu s oznakama na slici 2.3.

Veličina hidrostatičkoga tlaka p u homogenoj tekućini gustoće ρ u polju sile teže definirana je kao relativni tlak prema izrazu (2.23). Veličina koncentrirane sile F kojom se definira djelovanje hidrostatičkoga tlaka p na razmatranu plohu površine A je:

$$F = p A \quad (2.26)$$

U određivanju ukupne sile odrediti će se njezine horizontalna i vertikalna komponenta. Na diferencijalno malu površinu dA djeluje sila dF :

$$dF = p dA \quad (2.27)$$

Horizontalna komponenta sile hidrostatičkoga tlaka je:

$$F_H = F \sin \alpha \quad (2.28)$$

iz čega proizlazi

$$dF_H = dF \sin \alpha = p dA \sin \alpha = p dA_y = \rho g h dA_y \quad (2.29)$$

Jednako je za vertikalnu komponentu sile hidrostatičkoga tlaka:

$$dF_V = \rho g h dA_x \quad (2.30)$$

Ukupna horizontalna i vertikalna komponenta sile hidrostatičkoga tlaka dobiju se integriranjem komponenti koje djeluju na diferencijalno malim površinama (od početka C do kraja plohe D). Za karakterističan presjek u ravnini horizontalna komponenta sile je:

$$F_H = \int_C^D \rho g h dA_y \quad (2.31)$$

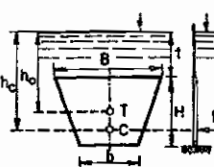
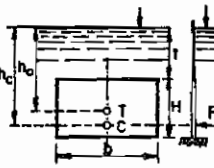
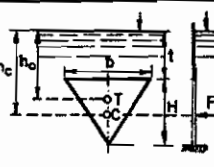
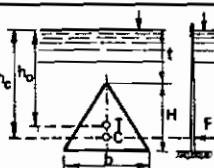
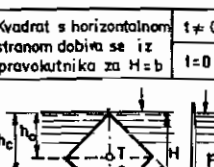
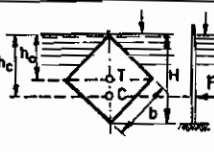
Vertikalna komponenta sile hidrostatičkoga tlaka je:

$$F_V = \int_C^D \rho g h dA_x \quad (2.32)$$

Ukupna koncentrirana sila (rezultanta) F koja u ravninskom slučaju zamjenjuje djelovanje hidrostatičkoga tlaka je:

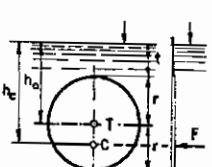
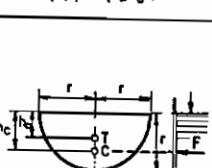
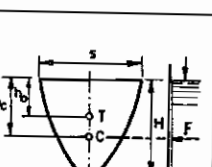
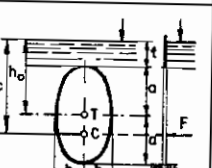
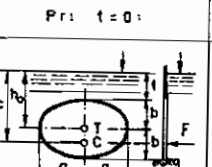
$$F = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} \quad (2.33)$$

Tablica 2.2 Sumarni tlak na oštrobridne vertikalne površine (D. Carić, 1952.).

Dispozicija	Površina lika A:	Dubina težišta $l_0 = h_0$:	Sila u tež. lika F:	Centar sumarnog tlaka $l_c = h_c$
 T R A P E Z	$\frac{1}{2} H (B+b)$	$\frac{H}{3} \frac{B+2b+t}{B+b}$	$\frac{1}{2} \rho g (B+b) H$ $\left[\frac{H}{3} \frac{B+2b+t}{B+b} \right]$	$\frac{[6t^2(B+b)+4Ht \cdot (B+2b)+H^2(B+3b)]}{[6t(B+D) + 2H(B+2b)]}$
	Pri $t = 0$:	$\frac{1}{2} H (B+b)$	$\frac{H}{3} \frac{B+2b}{B+b}$	$\frac{1}{6} \rho g H^3 (B+2b)$
 P R A V O K U T N I K	$b \cdot H$	$\frac{H}{2} + t$	$\rho g \cdot b \cdot H \left(\frac{H}{2} + t \right)$	$\frac{6t^2 + 6Ht + 2H^2}{6t + 3H}$
	Pri $t = 0$:	$b \cdot H$	$\frac{H}{2}$	$\frac{1}{2} \rho g \cdot b \cdot H^2$
 T R I J A K	$\frac{1}{2} \cdot b \cdot H$	$\frac{H}{3} + t$	$\frac{1}{2} \rho g b H \left(\frac{H}{3} + t \right)$	$\frac{6t^2 + 4Ht + H^2}{6t + 2H}$
	Pri $t = 0$:	$\frac{1}{2} \cdot b \cdot H$	$\frac{H}{3}$	$\frac{1}{6} \rho g b H^2$
 T R O K U T N I K	$\frac{1}{2} \cdot b \cdot H$	$\frac{2}{3} \cdot H + t$	$\frac{1}{6} \rho g b H (2H + 3t)$	$\frac{6t^2 + 8Ht + 3H^2}{6t + 4H}$
	Pri $t = 0$:	$\frac{1}{2} \cdot b \cdot H$	$\frac{2}{3} \cdot H$	$\frac{1}{3} \rho g \cdot b \cdot H^2$
Kvadrat s horizontalnom stranom dobiva se iz pravokutnika za $H=b$  K V A D R A T	$t \neq 0$ b^2	$\frac{b}{2} + t$	$\rho g \cdot b^2 \left(\frac{b}{2} + t \right)$	$\frac{6t^2 + 6bt + 2b^2}{6t + 3b}$
	$t = 0$ b^2	$\frac{b}{2}$	$\frac{1}{2} \rho g b^3$	$\frac{2}{3} \cdot b$
 K V A D R A T	b^2	$\frac{H}{2}$	$\frac{1}{2} \rho g H \cdot b^2$	$\frac{7}{12} \cdot H$

T - TEŽIŠTE
C - CENTAR

Tablica 2.3 Sumarni tlak na zaobljene vertikalne površine (D. Carić, 1952.).

Dispozicija	Površina lika A:	Dubina težišta $l_0 = h_0$:	Sila u tež. lika F:	Centar sumarnog tlaka $l_c = h_c$
 K R U G	$r^2 \pi$	$r + t$	$\rho g \cdot r^2 \pi (r+t)$	$\frac{r^2}{4(r+t)} + r + t$
	Pri $t = 0$:	$r^2 \pi$	r	$\rho g \cdot r^3 \cdot \pi$
 P O L U K R U G	$\frac{1}{2} \cdot r^2 \pi$	$\frac{4r}{3\pi}$	$\frac{2}{3} \rho g \cdot r^3$	$\frac{3}{16} \cdot r \cdot \pi$
 P A R A B O L A	$\frac{2}{3} \cdot s \cdot H$	$\frac{2}{5} \cdot H$	$\frac{4}{15} \rho g \cdot s \cdot H^2$	$\frac{1}{7} \cdot H$
 E L I P S A	$a \cdot b \cdot \pi$	$a + t$	$\rho g \cdot a \cdot b \cdot \pi (a+t)$	$\frac{a^2}{4(a+t)} + a + t$
	Pri $t = 0$:	$a \cdot b \cdot \pi$	a	$\rho g \cdot a^2 \cdot b \cdot \pi$
 E L I P S A	$a \cdot b \cdot \pi$	$b + t$	$\rho g \cdot a \cdot b \cdot \pi (b+t)$	$\frac{b^2}{4(b+t)} + b + t$
	Pri $t = 0$:	$a \cdot b \cdot \pi$	b	$\rho g \cdot a \cdot b^2 \cdot \pi$

T - TEŽIŠTE
C - CENTAR

Komponente sile moguće je izračunati na temelju dijagrama tlaka komponentata sile. Postupak vrijedi za ravne i zakrivljene plohe pri bilo kakvoj raspodjeli tlaka po konturi.

Hvatište djelovanja pojedinih komponenti sile određeno je težištem dijagrama tlaka. To se jednostavno može pokazati postavljanjem uvjeta jednakosti momenta rezultante i momenta elementarnih komponenti. Ovako definirano hvatište je samo zamišljen pojam, prikladan za određivanje momenata sile preko položaja i veličine rezultante. Stvarno djelovanje sile raspoređeno je po plohi kako to pokazuje dijagram raspodjele tlaka.

Sumarni tlakovi i položaj centra sile na različite oštrobridne vertikalne površine prikazani su u tablici 2.2, a na zaobljene vertikalne površine u tablici 2.3.

2.3.2 Plivanje tijela i Arhimedov zakon

Plivanje tijela koje je u mirnoj tekućini u ravnoteži uvjetuju dva elementa:

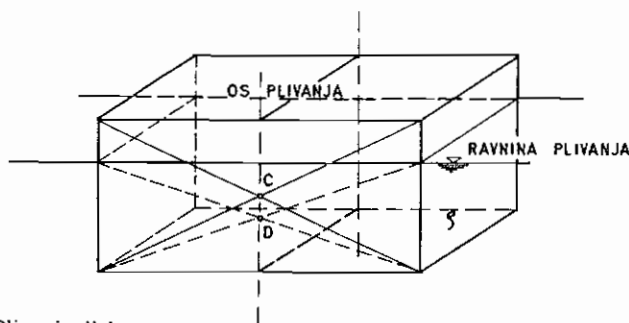
1. **Sposobnost plivanja**, pod čime se podrazumijeva svojstvo tijela da pliva pri zadanom teretu uz unaprijed ustanovljeni gaz (uronjenje).
2. **Stabilnost**, što znači da je plivajuće tijelo sposobno poslije prestanka djelovanja sile koje su izazvale njegovo nagibanje uspostaviti prvobitni položaj u tekućini.

Izučavanje ovih svojstava temelji se na **Arhimedovu zakonu**: Rezultanta sile tlaka tekućine P na uronjeno tijelo - **Arhimedova sila**, po veličini je jednaka a po smjeru suprotna težini $\rho g V$ tekućine volumena koji je tijelo istisnulo:

$$|P| = \rho g V \quad (3.34)$$

gdje je P sila tlaka na tijelo uronjeno u tekućinu.

Vertikalni pravac Arhimedove sile - **uzgona** - prolazi kroz težište volumena. **Volumen tekućine V koje je tijelo istisnulo zove se volumen istisnine ili deplasman, a centar težišta volumena istisnine zove se centar deplasmana D .**

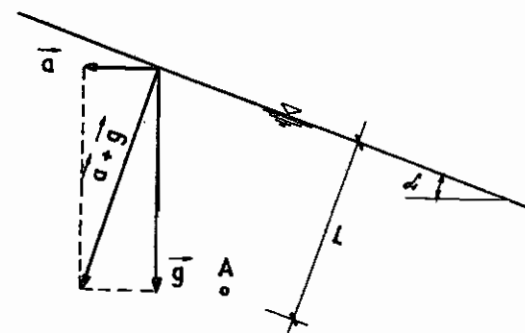


Slika 2.4 Plivanje tijela

Ako je težina G tijela uronjena u tekućinu manja od uzgona $P = \rho g V$, tijelo pliva, ako je $G > P$ tijelo će potonuti, a ako je $G = P$ tijelo će lebdjeti u tekućini.

2.3.3 Relativno mirovanje

U slučaju kada na tekućinu u polju sile teže konstantnoga ubrzanja djeluje i sila inercije, njezina se slobodna površina postavlja okomito na pravac rezultirajućega ubrzanja.



A - TOČKA U TEKUĆINI

Slika 2.5 Tekućina u polju sile konstantnoga ubrzanja

Tlak u točki A je jednak:

$$p_A = \rho \sqrt{a^2 + g^2} L \quad (2.37)$$

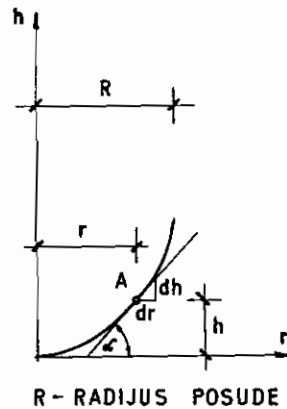
Kada je tekućina u polju radijalnoga ubrzanja (prilikom vrtnje posude u kojoj se nalazi) nagib slobodne površine tekućine je (α je kut tangente u točki A prema horizontalnoj ravnini):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dh}{dr} = \frac{a}{g} \quad (2.38)$$

iz čega slijedi:

$$h = \int_0^R \frac{a}{g} dr = \int_0^R \frac{r \omega^2}{g} dr = R^2 \frac{\omega^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} \quad (2.39)$$

jer je $v = r\omega$; a $a = r\omega^2$



Slika 2.6 Tekućina u polju radialnoga ubrzanja

gdje su a akceleracija u točki A , ω kutna brzina u točki A i R polumjer posude u kojoj se tekućina nalazi (slika 2.6).

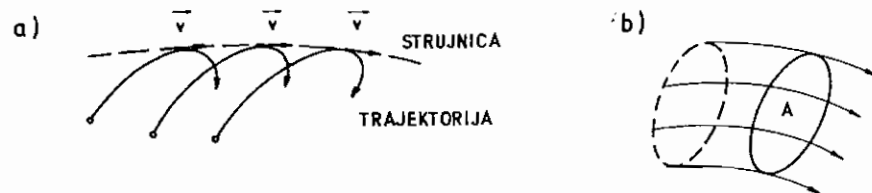
2.4 Kinematika tekućina

U kinematici tekućina ispituju se kretanja geometrijski oblika, pri čemu se zanemaruju materijalnost tijela i uzroci kretanja.

Geometrijsko mjesto točaka kroz koje je prostrujila čestica tekućine zove se staza, trajektorija ili putanja.

Određivanjem trenutnoga smjera gibanja čestica dobija se polje brzina, a smjerovi vektora polja brzina prikazuju se specifičnim crtama koje se zovu strujnice. Brzinsko se polje može prostorno i vremenski mijenjati. Strujnice ili polje brzina može se snimiti kratkim osvjetljenjem označenih čestica, a trag koji ostane na filmu je trenutni smjer gibanja (slika 2.7a).

Strujnice koje dodiruju neku zatvorenu plohu A (slika 2.7b) zatvaraju strujnu cijev. Vektor brzine je uvijek tangenta na strujnicu, pa zbog toga ne postoji poprečan tok na strujnu cijev.



Slika 2.7 Brzinsko polje strujnice i strujna cijev

U mehanici se fluida strujanje tekućine prikazuje kao skup elementarnih strujnih cijevi čestica koje se kreću različitim brzinama. Važno je napomenuti da se u jednostravnim slučajevima toka - a takvih u praktičnim proračunima ima znatan broj - u razmatranje može uzeti samo jedna strujna cijev.

U kinematici se tokovi dijele na tri vrste:

1. **tečenje sa slobodnom površinom** (npr. kanal, rijeka)
2. **tečenje pod tlakom** (npr. cijev kroz koju pod tlakom struji tekućina)
3. **hidrauličko strujanje** (npr. mlazevi ograničeni samo kapljevnom ili zračnom sredinom).

Temeljni pojmovi u vezi s tečenjem su:

1. **Protjecajni ili živi presjek**, koji se definira postavljanjem zahtjeva da u svim točkama površine neke plohe strujnice budu okomite na nju. Površina A živoga presjeka vodotoka je:

$$A = \int_A dA \quad (\text{m}^2) \quad (2.40)$$

2. **Protok Q** kroz protjecajni presjek vodotoka. On je jednak sumi protoka elementarnih strujnica koje presjecaju površinu protjecajnoga presjeka:

$$Q = \int_A dQ = \int_A v dA \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.41)$$

3. **Srednja brzina toka v** , koja je u razmatranom živom presjeku vodotoka:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{m/s}) \quad (2.42)$$

2.4.1 Vrste strujanja s kinematičkoga stanovišta

Gledano s kinematičkoga stanovišta, postoje dvije vrste strujanja:

1. **Stacionarno strujanje**. Ono tijekom vremena ne mijenja strujnu sliku. Prema tome, svi su parametri toka u svakoj točki prostora konstantni po vremenu.

U stacionarnome strujanju trajektorije i strujnice postaju jedinstvene krivulje, koje se zovu strujnice.

Za vrijeme strujanja praktički je nemoguće pratiti gibanje svake čestice tekućine kao materijalne točke, pa se zbog toga primjenjuje stalni koordinatni sustav. Na taj se način promatraju promjene u stalnoj točki s koordinatama (x, y, z) . Među njima se razlikuju promjene nastale uslijed prostorne promjenjivosti polja brzina i promjene zbog vremenske promjenljivosti polja.

Za stacionarno strujanje se brzine u smjeru osi x , y i z mogu mijenjati samo prostorno, pa su pojedine komponente brzine funkcije koordinata:

$$v_x = v_x(x, y, z) \quad (2.43a)$$

$$v_y = v_y(x, y, z) \quad (2.43b)$$

$$v_z = v_z(x, y, z) \quad (2.43c)$$

Nema promjene brzine v u vremenu t :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.44)$$

niti promjene tlaka p u vremenu t :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2.45)$$

2. **Nestacionarno strujanje.** *To je strujanje čija se strujna slika mijenja tijekom vremena. Za nestacionarno strujanje polje brzina je u općem slučaju definirano kao:*

$$v_x = v_x(x, y, z, t) \quad (2.46a)$$

$$v_y = v_y(x, y, z, t) \quad (2.46b)$$

$$v_z = v_z(x, y, z, t) \quad (2.46c)$$

Ubrzanje ili akceleracija definirana je kao promjena brzine u vremenu:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.47)$$

Općenito je vektor ubrzanja po smjerovima:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} \quad (2.48)$$

a vektor brzine po smjerovima:

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (2.49)$$

Totalni diferencijal veličine v_x je definiran u skladu s izrazom (2.43a).

$$dv_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} dx + \frac{\partial v_x}{\partial y} dy + \frac{\partial v_x}{\partial z} dz + \frac{\partial v_x}{\partial t} dt \quad (2.50)$$

Ako se izraz (2.50) podijeli s dt (uz uvjet $dt \neq 0$), dobije se:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad (2.51)$$

Promjena brzine u vremenu $\frac{dv_x}{dt} = a_x$ (komponenta ubrzanja u smjeru x), a $\frac{dx}{dt} = v_x$; $\frac{dy}{dt} = v_y$ i $\frac{dz}{dt} = v_z$ su komponente brzine v po pojedinim smjerovima, pa se nakon sređivanja dobije:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad (2.52)$$

Na isti se način dobiju komponente ubrzanja u smjerovima y i z .

Lokalno ubrzanje je ubrzanje nastalo uslijed vremenskih promjena brzinskoga polja, a konvektivno ili prijenosno ubrzanje je ubrzanje koje nastaje uslijed prostorne promjenljivosti polja brzina.

2.4.2 Jednadžba kontinuiteta

U razmatranome trenutku homogena, nestlačiva tekućina ulazi i izlazi samo kroz protjecajni (živi) presjek elementarne strujne cijevi, a bočnoga protjecanja nema. *Masa tekućine koja je ušla u razmatrani volumen strujne cijevi kroz ulazni presjek jednaka je masi tekućine koja je iz razmatranog volumena izašla kroz izlazni presjek.* **Jednadžba kontinuiteta** pri strujanju nestlačive, homogene i izotropne tekućine za stacionarno se tečenje piše u obliku:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 = \dots = A_i v_i \quad (2.53)$$

2.4.3 Vrste stacionarnoga strujanja s kinematičkoga stanovišta

Stacionarno se strujanje s kinematičkog stanovišta može podijeliti u dvije grupe:

1. **Jednoliko tečenje**, tijekom kojega sustav strujnica tvori familiju međusobno paralelnih pravaca. Oblik i površina protjecajnoga presjeka A su nepromjenljivi, iz čega slijedi da je srednja brzina $\vec{v} = \text{const.}$ duž pravolinijskoga toka tekućine.
2. **Nejednoliko tečenje**, tijekom kojega strujnice zauzimaju međusobna različite položaje, a površine protjecajnih presjeka A i brzine v mijenjaju se duž toka.

Iz grupe nejednolikoga tečenja izdvaja se tečenje s postupnim promjenama tijekom kojega su strujnice neznatno zakrivljene, a površine protjecajnih presjeka i brzine se duž toka lagano mijenjaju.

U hidrotehnici se najčešće radi o slučajevima jednolikoga tečenja i tečenja s postepenim promjenama, pa se kod vodotoka - ukoliko se posebno ne napomene - podrazumijevaju tokovi sa spomenutim osobinama (I. I. Agroskin i dr., 1973.).

Kod protjecajnih presjeka vodotoka je uz njegovu površinu potrebno voditi računa o još jednoj geometrijskoj osobini, a to je omočeni obod O , odnosno duljina linije po kojoj protjecajni presjek dodiruje korito vodotoka.

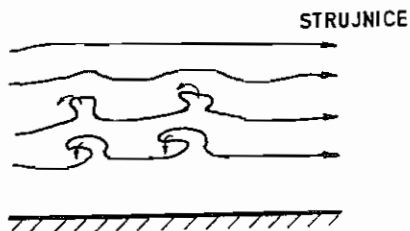
Odnos površine protjecajnoga presjeka A i omočenoga oboda O naziva se **hidraulički radijus** R , a njegova veličina utječe na propusnu moć protjecajnoga presjeka.

$$R = \frac{A}{O} \quad (\text{m}) \quad (2.54)$$

2.4.4 Vrste strujanja s obzirom na strujnu sliku

Strujanje tekućine može se podijeliti na:

1. **Laminarno tečenje** (lat. lamina = sloj), kad tekućina struji u međusobno paralelnim slojevima. To strujanje može biti stacionarno i nestacionarno, a javlja se kada su brzine tečenja male (npr. tečenje podzemnih voda u aluviju, tečenje malim brzinama u cijevima, tečenje tekućina s velikom viskoznošću).
2. **Turbulentno tečenje**. Ako su sile poremećaja veće od sila viskoznosti, stvaraju se vrtlozi (slika 2.8). Čestice tekućine se kreću bez reda i miješaju se uslijed pulzacije (nagle promjene veličina i smjerova) brzina. Turbulentno tečenje je nestacionarno, ali kad se razmatraju srednje brzine u protjecajnim presjecima, može se (uz takvu pretpostavku) nestacionarno tečenje razmatrati kao stacionarno.



Slika 2.8 Stvaranje virova

2.5 Dinamika tekućina

U dinamici tekućina, osim promjena čestica s obzirom na prostor i vrijeme - kao i u kinematici tekućina - razmatra se i utjecaj sila koje na čestice tekućine izazivaju te promjene.

Mehanička energija može se pojaviti u trima oblicima:

- a) u obliku **energije položaja**
- b) u obliku **energije napona**
- c) u obliku **kinetičke energije**.

Unutrašnjim i vanjskim trenjem viskozne tekućine jedan se dio mehaničke energije pretvara u toplinsku energiju koja je **disipirana** (izgubljena). Budući da se disipirana energija ne može opet pretvoriti u neku od vrsta mehaničke energije, naziva ju se **gubitak mehaničke energije**. Pojam gubitka mehaničke energije nije u suprotnosti s općenito poznatim zakonom o održavanju energije.

U dinamici tekućina postoje dvije vrste dinamičkih jednadžbi kojima je opisano gibanje tekućina:

1. **Eulerove dinamičke jednadžbe**, koje matematički izražavaju općenito gibanje nestlačive, viskozne i neviskozne tekućine.
2. **Navier-Stokesove jednadžbe**, koje matematički opisuju trodimenzionalno gibanje nehomogene, stlačive i viskozne tekućine. (Naziv po L.M.H. Navieru i G.G. Stokesu.)

Rješenje Eulerove jednadžbe za specifične karakteristike toka jest **Bernoullijeva jednadžba**, koja se može rabiti za idealnu i realnu tekućinu. Primjenjuje se u rješavanju mnogih problema u mehanici fluida, ukoliko ih se može svesti na jednodimenzionalne.

Pod jednodimenzionalnošću se podrazumijeva strujnica u osi cijevi s karakteristikama strujanja u pojedinim presjecima.

Eulerove i Navier-Stokesove diferencijalne jednadžbe za trodimenzionalno gibanje tekućine opisane su u stručnoj literaturi (M. Fancev, 1982.). Njih je moguće integrirati samo u posebnim slučajevima. Nasuprot tome, primjenom Bernoullijeve jednadžbe rješava se pretežni dio problema iz mehanike fluida (uz uvjet da ih se može svesti na jednodimenzionalne).

2.5.1 Zakon održanja količine gibanja tekućine

Kada na konačni volumen strujne cijevi djeluju sile, one izazivaju promjenu količine gibanja. Važnost zakona održanja količine gibanja sastoji se u tome što on općenito izražava stanje jednoga dijela tekućine koja struji između graničnih površina.

Polazi se od **II. Newtonova zakona** kojega se može izraziti u obliku promjene količine gibanja. Prema II. Newtonovu zakonu količina gibanja K je:

$$\bar{K} = m \bar{v} \quad (2.55)$$

gdje je m masa tekućina, a v brzina strujanja.

Ukupna promjena količine gibanja u jedinici volumena je:

$$\frac{d\bar{K}}{dt} = \bar{N} + \bar{T} + \bar{G} \quad (2.56)$$

gdje su N i T rezultante normalnih i tangencijalnih sila, a G je sila od težine tekućine unutar razmatranoga dijela strujne cijevi.

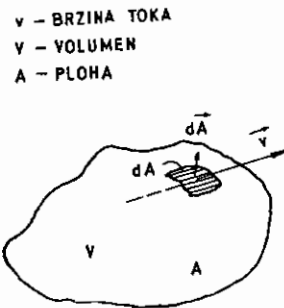
Na temelju izraza (2.55) i (2.56), promjena količine gibanja je:

$$d(m\bar{v}) = (\bar{N} + \bar{T} + \bar{G})dt \quad (2.57)$$

Vektorski zbroj sila u diferencijalnome vremenu na desnoj strani jednadžbe (2.57) predstavlja impuls sila.

Za količinu gibanja kao fizikalnu karakteristiku polja zakon održanja količine gibanja se definira na sljedeći način:

Promjena količine gibanja u jedinici vremena unutar nekog volumena V jednaka je ukupnoj razlici toka količine gibanja kroz plohu A koja zatvara taj volumen i promjeni impulsa sila u jedinici vremena, raspodijeljenih po volumenu V ili plohi A (V. Jović, 1977.) (slika 2.9).



Slika 2.9 Tok količine gibanja

Masa tekućine u razmatranome dijelu strujne cijevi je:

$$m = \rho Q dt = (\rho \bar{v} d\bar{A})dt \quad (2.58)$$

gdje je $d\bar{A}$ diferencijal površine (pozitivan smjer vektora označava njegovu orijentaciju prema van - vanjsku normalu).

Količina gibanja je:

$$m \bar{v} = (\rho \bar{v} d\bar{A})\bar{v} dt \quad (2.59)$$

pri čemu je $(\rho \bar{v} d\bar{A})\bar{v}$ tok količine gibanja u jedinici vremena kroz elementarnu plohu.

Ukupan tok količine gibanja kroz plohu A u jedinici vremena je:

$$\int_A (\rho \bar{v} d\bar{A})\bar{v} = \int_A (\rho dQ)\bar{v} \quad (2.60)$$

Promjena količine gibanja u vremenu je:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho dV)\bar{v} \quad (2.61)$$

Prema tome, općeniti je oblik zakona održanja količine gibanja:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho dV)\bar{v} + \int_A (\rho dQ)\bar{v} = \bar{N} + \bar{T} + \bar{G} \quad (2.62)$$

gdje je:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho dV)\bar{v} \quad \text{promjena količine gibanja unutar volumena } V \text{ u jedinici vremena}$$

$$\int_A (\rho dQ)\bar{v} \quad \text{tok količine gibanja kroz plohu } A$$

$$\bar{N} + \bar{T} + \bar{G} \quad \text{ukupna promjena impulsa sila u jedinici vremena}$$

Pri rješavanju velikoga broja praktičnih problema zakon održanja može se znatno pojednostaviti ako se poštuju tri osnovne pretpostavke:

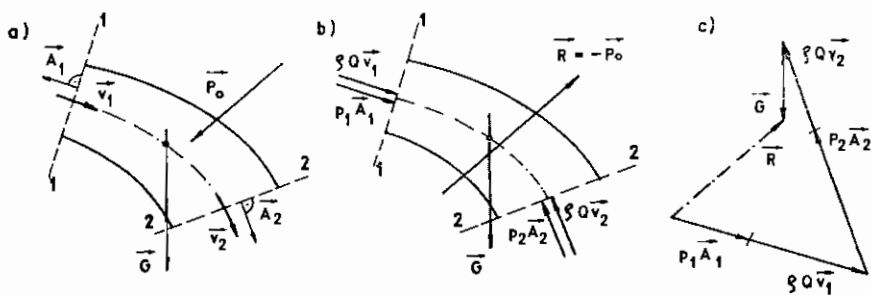
1. Strujanje tekućine je stacionarno. U tom je slučaju $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ pa prvi član u izrazu (2.62) otpada.
2. Tekućina se može smatrati neviskoznom, pa su onda tangencijalne sile $T = 0$.
3. Tekućina se može smatrati nestlačivom, a u tom je slučaju gustoća tekućine $\rho = const$.

Kada su ove tri pretpostavke zadovoljene, zakon održanja količine gibanja može se napisati na sljedeći način:

$$\rho \int_A dQ \bar{v} = \bar{N} + \bar{G} \quad (2.63)$$

Uz pretpostavke stacionarnoga strujanja idealne tekućine zakon održanja količine gibanja ilustrirati će se primjerom. Na konačni volumen strujne cijevi (između presjeka 1-1 i 2-2) djeluju sile koje izazivaju promjenu količine gibanja (slika 2.10).

Unutrašnje sile zovu se površinskim jer su uočljive na presječnim površinama. U ovom primjeru površinske sile su sile tlaka, a vektori normale na površinu usmjereni su prema izvanjskom dijelu površine (vanjska normala). Rezultirajuća sila tlaka \bar{P}_0 predstavlja djelovanje tlačnih sila po omočenom obodu cijevi između presjeka 1-1 i 2-2. Sile koje djeluju na cijev prikazane su na slici 2.10b. Nakon definiranja sila u presjeku 1-1 potrebno je sile u presjeku 2-2 okrenuti za 180° i na taj način uspostaviti ravnotežu.



Slika 2.10 Konačni volumen strujne cijevi (a) sa silama koje na njega djeluju (b) i vektorskim zbrojem tih sila (c) (V. Jović, 1977.)

Uz uvažavanje pravila vanjske normale (pozitivan smjer vektora je prema van), tok količine gibanja je:

$$\rho (\vec{v}_1 \vec{A}_1) \vec{v}_1 + \rho (\vec{v}_2 \vec{A}_2) \vec{v}_2 = p_1 \vec{A}_1 - p_2 \vec{A}_2 + \vec{G} + \vec{P}_0 \quad (2.64)$$

odnosno, može se pisati:

$$p_1 (-\vec{A}_1) + \rho Q \vec{v}_1 - p_2 \vec{A}_2 - \rho Q \vec{v}_2 + \vec{G} - \vec{R} = 0 \quad (2.65)$$

gdje je hidrodinamički tlak \vec{R} na omočeni obod cijevi po intenzitetu jednak, ali po smjeru suprotan sili \vec{P}_0 .

Vektorski zbroj sila prikazan je na slici 2.10c.

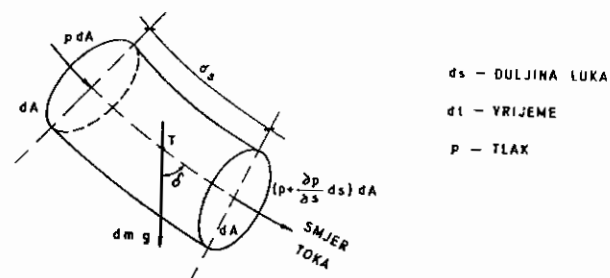
Prema tome, ukoliko su poznati tlakovi i brzine u dvama presjecima cijevi, nije teško na temelju zakona održanja količine gibanja u obliku sila odrediti hidrodinamičku silu tlaka na oplošje cijevi između tih dvaju presjeka. Ovo vrijedi za slučajeve kada su pojednostavljenja uz pretpostavke $\frac{\partial}{\partial t} = 0$; $T=0$ i $\rho = const.$ moguća.

2.5.2 Bernoullijeva jednadžba za tečenje idealne i realne tekućine pod tlakom

Jedan od osnivača hidrodinamike, švicarski matematičar i fizičar Daniel Bernoulli (1700.-1782.), pošao je pri izvođenju jednadžbe od diferencijalno maloga dijela strujne cijevi u polju sile teže prikazana na slici 2.11.

Uzdužno ubrzanje jednako je komponenti ubrzanja duž strujnice (u smjeru s). Promjena brzine dv uz promjenu uzduž puta ds i promjenu vremena dt je:

$$dv = \frac{\partial v}{\partial s} ds + \frac{\partial v}{\partial t} dt; \quad ds = v dt \quad \left(\text{jer je } v = \frac{ds}{dt} \right)$$



Slika 2.11 Element strujne cijevi u ravnoteži

Prema tome je uzdužno ubrzanje:

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.66)$$

Komponenta $v \frac{\partial v}{\partial s}$ je konvektivna promjena brzine. Ona nastaje jer čestica tekućine mijenja u točki svoju brzinu.

Komponenta $\frac{\partial v}{\partial t}$ je lokalna promjena brzine, koja nastaje uslijed vremenske promjene gibanja u jednoj te istoj točki.

Kada je gibanje stacionarno, lokalna promjena brzine jednaka je nuli. Izraz $v \frac{\partial v}{\partial s}$ može se pisati u obliku:

$$v \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} \right) \quad (2.67)$$

Prema slici 2.11 masa elementarnoga valjka strujne cijevi iznosi:

$$m = \rho dA ds$$

gdje je ρ gustoća tekućine, a ds duljina luka.

Polje sila predstavljeno je ubrzanjem sile teže g (volumenska sila).

Na tijelo koje se giba (tekućina u valjku) djeluju sile tlaka. Rezultanta sile tlaka je:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} ds dA$$

Komponenta sile teže u smjeru gibanja tekućine je:

$$\rho dA ds g \cos \delta,$$

gdje je $\rho dA ds$ masa, a $g \cos \delta$ ubrzanje.

U skladu s II Newtonovim zakonom ($F = m a$) vrijedi relacija:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} ds dA + \rho dA ds g \cos \delta = \left[\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} \right] \rho dA ds \quad (2.68)$$

sila tlaka *ukupna vanjska sila* *ubrzanje* *masa*

Jednadžbu (2.68) treba podijeliti sa $-\rho dA ds$ kako bi se dobilo.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \delta = -\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} \right) - \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.69)$$

Položaj razmatranoga elementa strujne cijevi potrebno je odrediti s obzirom na neku sravnjujuću ravninu ili geodetski horizont (najčešće razina mora), a na vertikalnoj osi z određuje visinski položaj elementa. U tome se slučaju može usvojiti da je:

$$\cos \delta = -\frac{dz}{ds} \quad (2.70)$$

Nakon sređivanja jednadžba (2.69) poprima oblik:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(g z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (2.71)$$

Izraz (2.71) je Eulerova jednadžba za jednodimenzionalno gibanje homogene, izotropne i neviskozne tekućine u polju sile teže.

Pretpostavi se stacionarno tečenje, a u tom se slučaju brzina tijekom vremena ne mijenja:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

Jednadžbu (2.71) se integrira za stacionarno stanje i dobije se:

$$g z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = const. \quad (2.72)$$

Jednadžba (2.72) naziva se **Bernoullijeva jednadžba** za gibanje idealne tekućine.

U njoj su dana tri oblika mehaničke energije:

$g z$ - **energija položaja** jedinice mase tekućine (m^2/s^2)

$\frac{p}{\rho}$ - **energija tlaka** jedinice mase tekućine (m^2/s^2)

$\frac{v^2}{2}$ - **kinetička energija** jedinice mase tekućine (m^2/s^2)

Izraz (2.72) vrijedi za stacionarno gibanje idealne nestlačive tekućine i u tom je slučaju suma energije položaja, energije napona i kinetičke energije konstantna.

Bernoullijeva jednadžba se redovito prikazuje kao suma triju visina tako da se jednadžba (2.72) podijeli s gravitacijom g , iz čega slijedi:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = Const. = H \quad (m) \quad (2.73)$$

gdje je:

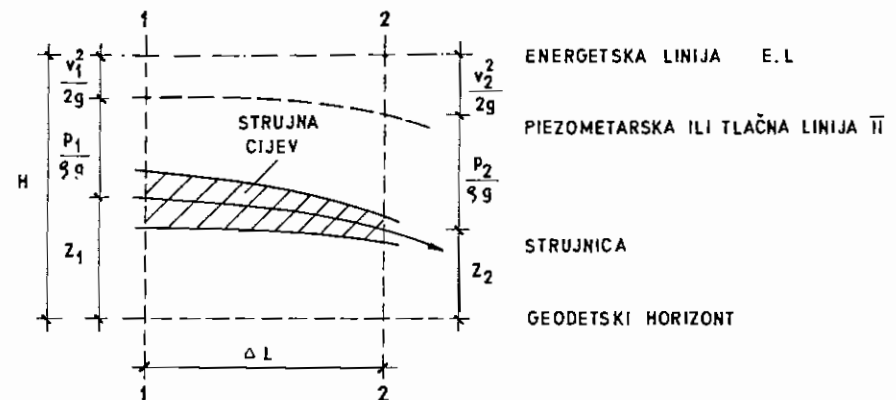
z - **geodetska visina** (položaj strujnice, odnosno osi cijevi u odnosu na geodetski horizont)

$\frac{p}{\rho g}$ - **tlačna visina** (dubina točke ispod slobodne površine; sila teža uzrokuje stvaranje tlaka p)

$\frac{v^2}{2g}$ - **brzinska visina** (visina s koje bi tijelo u zrakopraznom prostoru palo i dobilo brzinu v)

H - **visina energetskog horizonta** (koja se za idealnu tekućinu ne mijenja od presjeka do presjeka)

Na slici 2.12 prikazane su komponente energije za dvije točke strujnice idealne tekućine.

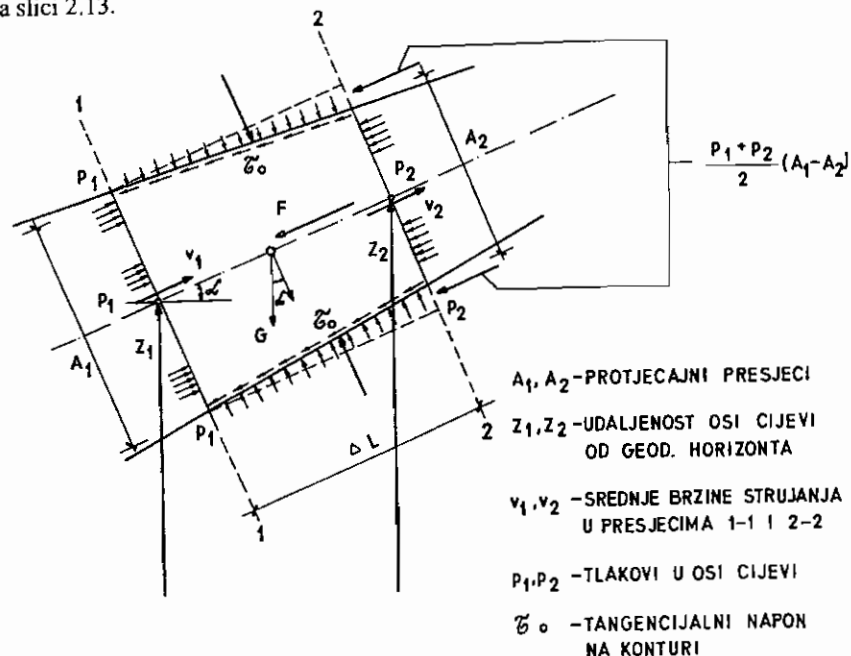


Slika 2.12 Komponente energije za dvije točke strujnice idealne tekućine

Bernoullijevu jednadžbu za strujanje realne tekućine može se izvesti na osnovi ravnoteže sila na konačnom volumenu strujne cijevi. Ovakvim pristupom se u izvodu osrednjava neke veličine (brzine, omočene obode, površine protjecajnih profila) kao i u praktičnim izračunima gdje se primjenjuje Bernoullijeva jednadžba.

Realna tekućina struji tako da se duž njezina toka pojavljuju otpori tečenju. Jedna se vrsta tih otpora javlja uslijed unutarnjega trenja ili uslijed trenja po čvrstoj podlozi (stijenka cijevi), a druga vrsta otpora nastaje uslijed otpora oblika preko kojega ili uz koji tekućina struji.

Razmatra se ravnoteža sila uz pretpostavku stacionarne, nestlačive tekućine. Kod njezinog tečenja postoji općenita sila otpora F . Ravnoteža sila određuje se na osnovi teorema o promjeni količine gibanja na konačnome elementu strujne cijevi prikazanu na slici 2.13.



Slika 2.13 Element strujne cijevi za izvod Bernoullijeve jednadžbe na osnovi zakona održanja količine gibanja - prema V. Jović, 1977.

Volumen razmatranoga elementa strujne cijevi je:

$$\Delta V = \frac{A_1 + A_2}{2} \Delta L = \bar{A} \Delta L \quad (2.74)$$

Protok vode kroz element strujne cijevi je:

$$Q = \bar{A} \bar{v}; \quad \bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.75)$$

gdje su A_1 i A_2 površine protjecajnih presjeka 1-1 i 2-2, a v_1 i v_2 srednje profilске brzine u presjecima 1-1 i 2-2. \bar{A} i \bar{v} su osrednjena površina protjecajnoga presjeka i osrednjena brzina.

Na element strujne cijevi između presjeka 1-1 i 2-2 djeluju sile:

a) **Površinske sile:**

- sila tlaka u presjeku 1-1: $p_1 A_1$
- sila tlaka u presjeku 2-2: $p_2 A_2$
- sila tlaka po oplošju cijevi - komponenta u smjeru toka: $\frac{p_1 + p_2}{2} (A_1 - A_2)$
- količina gibanja u presjeku 1-1: $r Q v_1$
- količina gibanja u presjeku 2-2: $r Q v_2$

b) **Volumenska sila:**

- težina tekućine u razmatranom elementu cijevi:

$$G = \rho g \Delta V = \rho g \bar{A} \Delta L \quad (2.76)$$

- komponenta težine elementa cijevi u smjeru toka je:

$$G \sin \alpha; \quad (2.77)$$

a za $\sin \alpha$ može se uzeti: $\sin \alpha = \frac{z_2 - z_1}{\Delta L}$

c) **Sila otpora:**

- uslijed trenja (po oplošju cijevi): $F_t = \sigma_o \bar{O} \Delta L = c_f \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \bar{O} \Delta L \quad (2.78)$

- uslijed otpora oblika: $F_i = c_o \bar{A} \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.79)$

gdje je c_f koeficijent trenja, a c_o koeficijent otpora oblika. Koeficijenti c_f i c_o su bezdimenzionalani.

Sile tlaka koje nastaju uslijed djelovanja po oplošju cijevi rastavljaju se na komponente u smjeru toka i okomito na tok. Pritom se može pretpostaviti da su tlakovi i ostale razmatrane veličine linearno promjenljive s obzirom na odabranu veličinu volumena.

U skladu sa slikom 2.13 u daljnjem se izvodu uzima samo sila trenja F_t .

Ravnoteža sila koje djeluju na element strujne cijevi je:

$$p_1 A_1 + \rho Q v_1 - p_2 A_2 - \rho Q v_2 - \frac{p_1 + p_2}{2} (A_1 - A_2) - G \sin \alpha - F_t = 0 \quad (2.80)$$

Nakon sredivanja se dobije:

$$p_1 A_1 - \frac{p_1}{2} (A_1 - A_2) - p_2 A_2 + \frac{p_2}{2} (A_1 - A_2) + \rho \bar{A} \bar{v} (v_1 - v_2) - \rho g \bar{A} \Delta L \frac{z_2 - z_1}{\Delta L} - F_t = 0 \quad (2.81)$$

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 + \rho g \bar{A} \frac{v_2 - v_1}{2g} - \rho g \bar{A} (z_2 - z_1) - F_t = 0$$

Bernoullijeva jednadžba za presjeka 1-1 i 2-2 je:

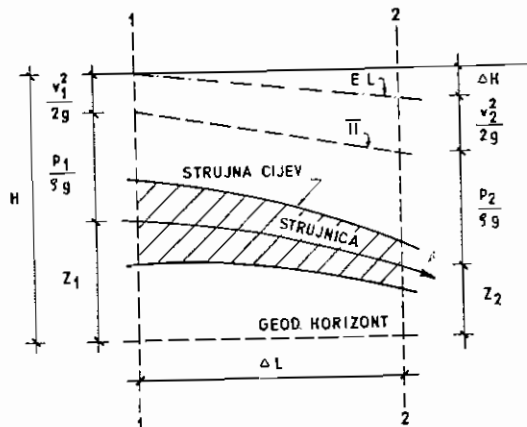
$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{F_t}{\rho g A} \quad (2.82)$$

$\frac{F_t}{A}$ je tlak, a $\frac{F_t}{\rho g A} = \Delta H$ je gubitak tlačne visine između presjeka 1-1 i 2-2 uslijed otpora tečenju.

“Visinski oblik” Bernoullijeve jednadžbe omogućuje uvid u energetska bilancu duž toka tekućine. Kod viskozne (realne) tekućine u obzir treba uzeti da viskoznost izaziva unutarnje trenje, a trenjem se mehanička energija pretvara u toplinsku energiju, koja se disipira. “Visinski oblik” Bernoullijeve jednadžbe je za presjeka 1-1 i 2-2 prema ranijem izvodu:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2.83)$$

Oznake u izrazu (2.83) su kao i u izrazu (2.73), a ΔH su gubici mehaničke energije. Bernoullijeva jednadžba za realnu tekućinu prikazana je na slici 2.14.



Slika 2.14 Komponente energije za dvije točke strujnice realne tekućine

Tlačna ili piezometarska visina h može se definirati u odnosu na geodetski horizont i u tom je slučaju:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad (m) \quad (2.84)$$

što je ona visina do koje bi se voda digla u piezometru (cjevčici za mjerenje tlaka).

Potrebno je naglasiti da u viskoznoj (realnoj, stvarnoj) tekućini energetska visina uvijek mora opadati u smjeru strujanja, bez obzira na to kakve su međusobne promjene triju oblika mehaničke energije.

Energetski gubici mogu biti dvojaki:

1. **linijski** - gubici uslijed trenja na dionici između dvaju karakterističnih presjeka
2. **lokalni** - gubici na mjestima nagle promjene protjecajnog presjeka ili nagla skretanja toka fluida.

Gubitak energije - u metrima vodnoga stupca (m v.s.) - općenito je jednak:

$$\Delta H = \frac{F}{\rho g A} \quad (2.85)$$

Za slučaj gubitaka uslijed trenja, sila otpora je:

$$F_t = c_f \bar{O} \Delta L \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.86)$$

pa je gubitak koji nastaje trenjem:

$$\Delta H_t = \frac{c_f \bar{O} \Delta L \rho \frac{\bar{v}^2}{2}}{\rho g A} = c_f \frac{\Delta L}{R} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.87)$$

Veličina $\bar{R} = \frac{\bar{A}}{O}$ je osrednjeni hidraulički radijus između presjeka 1-1 i 2-2:

$$\bar{R} = \frac{\bar{A}}{O} = \frac{A_1 + A_2}{O_1 + O_2} \quad (2.88)$$

Hidraulički radijus za okruglu cijev izražen preko promjera cijevi D je:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4}}{D \pi} = \frac{D}{4} \quad (2.88a)$$

pa je gubitak energije uslijed trenja:

$$\Delta H = 4 c_f \frac{\Delta L}{D} \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2.89)$$

Ako se uvrsti da je $4 c_f = \lambda$, a $\Delta L = L$, dobije se poznata **Darcy-Weisbachova formula** (po H.P.G. Darcyju i J. Weisbachu) za gubitak energetske visine nastao trenjem tijekom tečenja u cijevi pod tlakom između presjeka 1-1 i 2-2 (slika 2.14):

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.90)$$

gdje je L razmak između presjeka 1-1 i 2-2, D promjer cijevi, v srednja brzina tekućine u cijevi, a λ koeficijent otpora strujanju.

Darcy-Weissbachov koeficijent otpora strujanju λ najčešće ovisi o **Reynoldsovu broju** R_e . O. Reynolds je dokazao da struktura strujanja fluida ovisi o bezdimenzionalnome odnosu:

$$R_e = \frac{vD}{\nu} \quad (2.91)$$

gdje je v (m/s) srednja brzina, D (m) promjer cijevi, ν (m²/s) kinematički koeficijent viskoznosti.

Tečenje vode u cijevima je za $R_e < 2320$ laminarno, a za $R_e > 2320$ turbulentno. Ovo vrijedi za praktične slučajeve, dok je u specijalnim laboratorijskim uvjetima moguće postići laminarno strujanje i do $R_e = 150.000$.

Kada je gubitak lokalni, sila otpora je:

$$F_l = c_o \bar{A} \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.92)$$

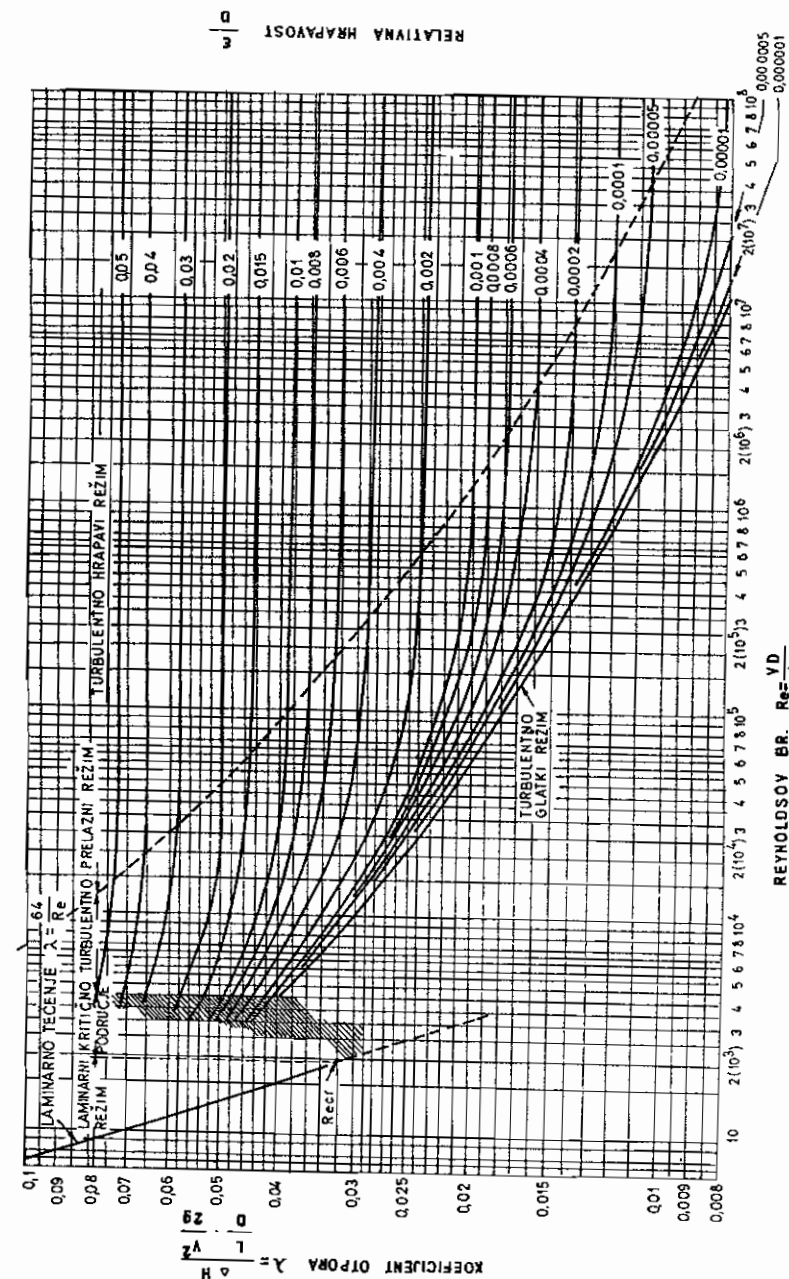
a lokalni gubitak energije je:

$$\Delta H_l = \frac{c_o \bar{A} \rho \frac{\bar{v}^2}{2}}{\rho g \bar{A}} = \frac{c_o \bar{v}^2}{2g} \quad \text{ili} \quad (2.93)$$

$$\Delta H_l = \xi \frac{v^2}{2g}$$

gdje je ξ koeficijent lokalnoga gubitka energije.

MOODYJEV DIJAGRAM



Slika 2.15 Moodyjev dijagram za proračune otpora u cijevima (L. F. Moody, 1944.)

Svi gubici energije (linijski i lokalni) mogu se izraziti kao umnožak koeficijenta gubitka energije ξ i brzinske visine $\frac{v^2}{2g}$. Za gubitke nastale trenjem je:

$$\xi_r = \lambda \frac{L}{D} \quad (2.94)$$

gdje je L dužina cijevi, D promjer cijevi, a Darcy-Weisbachov koeficijent otpora strujanju λ određuje se na temelju odgovarajućega dijagrama. U praksi se najčešće za određivanje koeficijenta λ rabi **Moodyjev dijagram** (slika 2.15), u kojemu su sintetizirana ranija Nikuradzeova iskustva s umjetnom hrapavošću, te Colebrookova, Whiteova i iskustva ostalih istraživača sa stvarnom hrapavošću (H. Rouse, 1949.).

Za laminarno strujanje koeficijent otpora strujanju λ je:

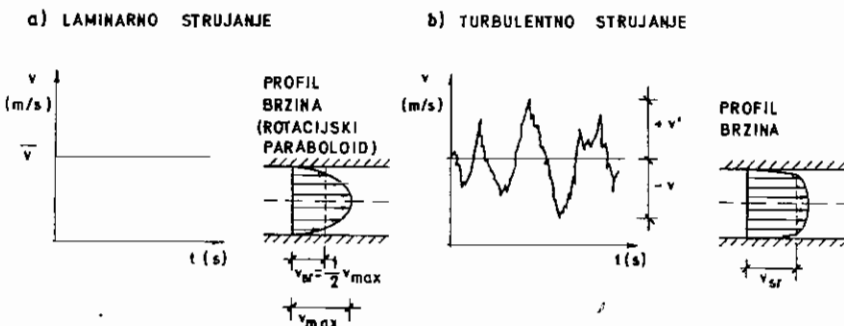
$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.95)$$

Gubitak energije po jedinici duljine cjevovoda $\frac{\Delta H}{L}$ za laminarno strujanje prema **Hagen-Poiseuilleovu zakonu** glasi:

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{32}{g} \frac{v}{D^2} \bar{v} \quad (2.96)$$

gdje je g gravitacija; v kinematički koeficijent viskoznosti, D promjer cjevovoda, a \bar{v} srednja brzina toka.

Na slici 2.16 prikazane su promjene veličina brzina u smjeru toka u cijevima pod tlakom za laminarni i turbulentni režim tečenja, te profili brzina u cijevi za iste režime tečenja.



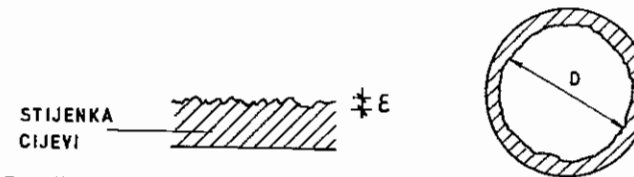
Slika 2.16 Raspodjela brzina u cijevima kružnoga poprečnoga presjeka za laminarno i turbulentno strujanje (W. F. Hughes, J. A. Brighton, 1967.)

Kod laminarnoga strujanja je smjer vektora brzine vezan uz smjer strujnice, a kod turbulentnoga (slobodnog) strujanja vektor brzine u nekoj točki mijenja veličinu i smjer.

Ako je strujanje u cijevi turbulentno koeficijent otpora strujanja λ općenito ovisi o dvama parametrima:

$$\lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, Re\right) \quad (2.97)$$

gdje je ε apsolutna hrapavost cijevi (mm), skicirana na slici 2.17, a $\frac{\varepsilon}{D}$ je relativna hrapavost cijevi.



Slika 2.17 Prikaz apsolutne hrapavost cijevi

U skladu s izrazom (2.97) razlikuju se tri tipa turbulentnoga strujanja:

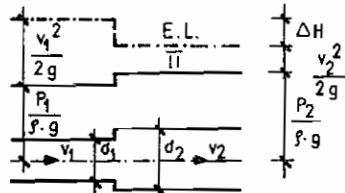
1. **Turbulentno-glatki:** $\lambda = f(Re)$. Na Moodyjevu dijagramu na slici 2.15 ovaj je režim strujanja definiran najnižom krivuljom $\frac{\varepsilon}{D}$ (u praksi je relativna hrapavost niža od 0,000001).
2. **Turbulentno-prijelazni:** $\lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, Re\right)$ Na Moodyjevu dijagramu na slici 2.15 turbulentno-prijelazni režim određen je krivuljom $\frac{\varepsilon}{D}$ između krivulje za turbulentno-glatki režim i crtkane linije do koje krivulje $\frac{\varepsilon}{D}$ još nisu horizontalne.
3. **Turbulentno-hrapavi:** $\lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$ Na Moodyjevu dijagramu na slici 2.15 ovaj je režim određen gotovo sasvim horizontalnim linijama $\frac{\varepsilon}{D}$. Za većinu cijevi pod tlakom je tečenje u turbulentno-hrapavom režimu, pa se Moodyjev dijagram najčešće koristi uz pretpostavku turbulentno-hrapavoga režima tečenja. Nakon izračunavanja brzina u cijevima provjeri se na temelju vrijednosti Reynoldsova broja ispravnost pretpostavljena tipa turbulentnoga strujanja.

Osim otpora toku koji se kod strujanja realne tekućine pojavljuje zbog viskoznosti ili uslijed trenja po čvrstoj podlozi, postoje lokalni otpori zbog oblika preko kojih ili uz koje struji tekućina. Lokalni gubici mehaničke energije ΔH (nastali uslijed lokalnih otpora strujanju tekućine) također se izražavaju pomoću Darcy-Weisbachove formule (2.90) u obliku (2.93):

$$\Delta H_l = \xi \frac{v^2}{2g}$$

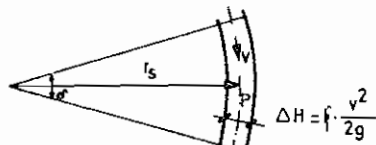
gdje je ξ koeficijent lokalnoga gubitka energije koji je ovisan o obliku i o Reynoldsovu broju Re . U praksi se pokazalo kako je za izračune dovoljno točno uzeti da ξ ovisi samo o obliku presjeka toka.

1. NAGLO PROŠIRENJE



$$\Delta H = f \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad f = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2$$

5. KRUŽNO KOLJENO

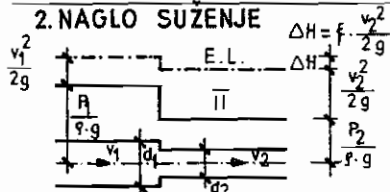


$$\Delta H = f \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$r_s = \text{RADIJUS ZAKRIVLJENOSTI}$

$$f = \left[0.131 + 0.163 \left(\frac{D}{r_s} \right)^{3.5} \right] \frac{\delta^\circ}{90^\circ}$$

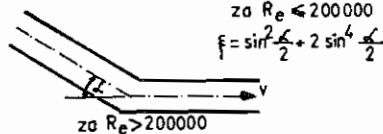
2. NAGLO SUŽENJE



$\frac{A_2}{A_1}$	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0
f	0.42	0.40	0.36	0.30	0.20	0.00

A_1, A_2 - POVRŠINE POPREČNIH PRESJEKA

6. OSTRO KOLJENO



$$\Delta H = f \cdot \frac{v^2}{2g}$$

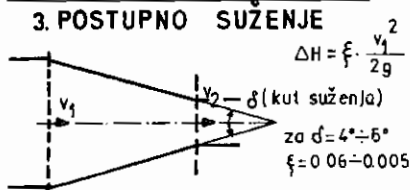
za $Re \leq 200000$

$$f = \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

za $Re > 200000$

α°	15	30	45	60	90
f	0.062	0.165	0.320	0.684	1.265

3. POSTUPNO SUŽENJE



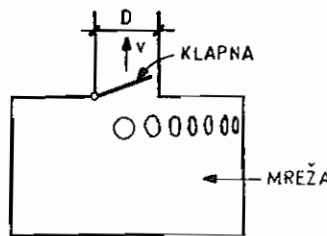
$$\Delta H = f \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

za $\delta = 4^\circ - 6^\circ$

$$f = 0.06 - 0.005$$

δ°	15	20	25	30	45	60	75
f	0.18	0.20	0.22	0.24	0.30	0.32	0.34

7. USISNA KOŠARA

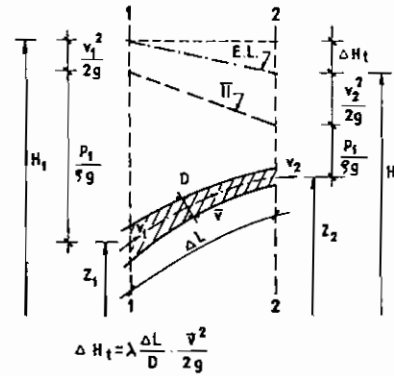


$$\Delta H = f \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$\frac{D}{\xi}$	50	100	150	200	300	400	500
ξ	10.0	7.0	6.0	5.2	3.7	3.1	2.5

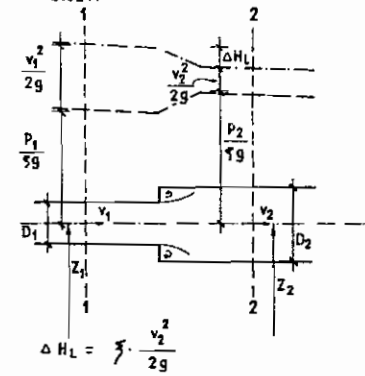
Slika 2.18 Koeficijenti lokalnoga gubitka energije

a) LINIJSKI GUBITAK ENERGIJE



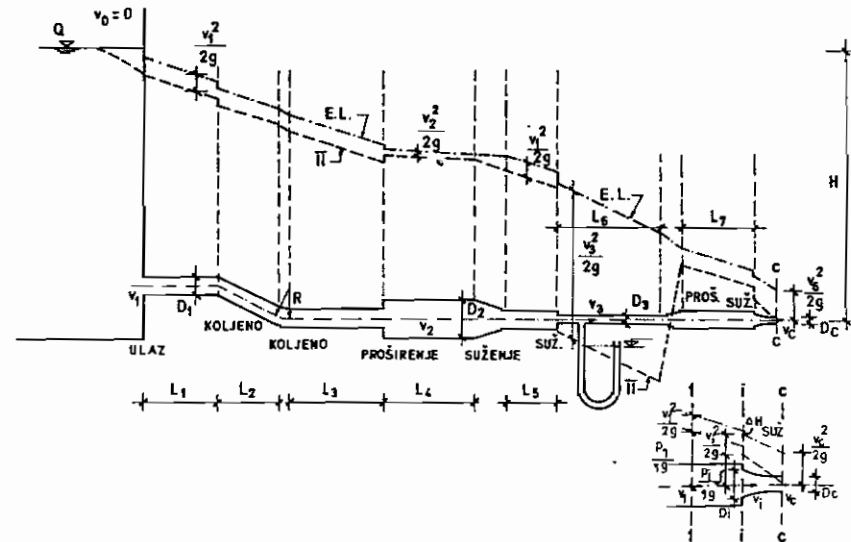
$$\Delta H_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

b) LOKALNI GUBITAK OD PROŠIRENJA CIJEVI



$$\Delta H_L = \xi \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

c) GUBICI MEHANIČKE ENERGIJE U CJEVOVODU POD TLAKOM



Slika 2.19 Karakteristični grafički prikazi linije energije, tlačne linije i gubitaka energije za tečenje pod tlakom (V. Jović, 1977.)

Na slici 2.18 prikazane su veličine koeficijenta lokalnoga gubitka energije ξ u različitim praktičnim slučajevima.

Karakteristični opći grafički prikazi linije energije, tlačne linije i pripadni gubici energije su na slici 2.19: a) linijski gubici, b) lokalni gubitak, c) energetska i tlačna (piezometarska) linija za tečenje pod tlakom u cjevovodu različitih protjecajnih presjeka. Za tlačni sustav na slici 2.19c energetska visina H je:

$$H = \frac{v_0^2}{2g} + \sum_i \xi_{h_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum_i \lambda_i \frac{L_i}{D_i} \frac{v_i^2}{2g} \quad (2.98)$$

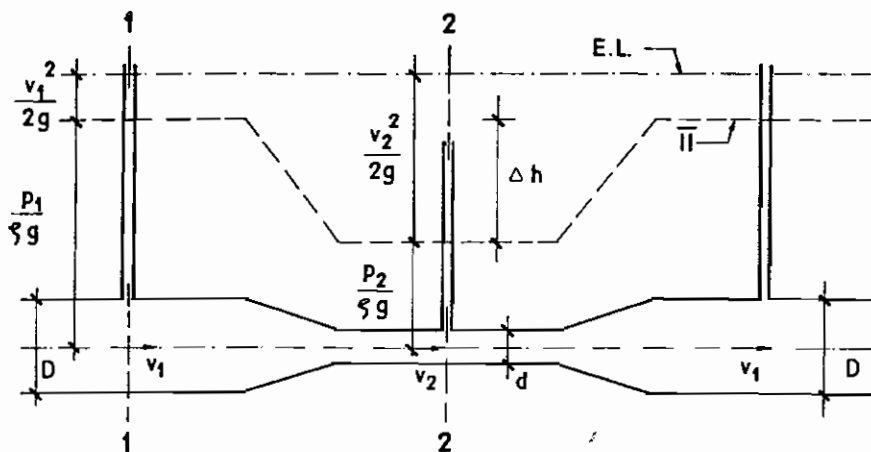
ξ_{h_i} je koeficijent lokalnoga gubitka energije ovisan o promjeni oblika.

Ukoliko je poznata geometrija cjevovoda (promjeri cijevi) i barem jedna srednja profilska brzina, moguće je na osnovi jednadžbe kontinuiteta (2.53) izračunati sve ostale srednje profilske brzine:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \dots = v_n A_n$$

2.5.2.1 Venturimetar (Venturijev vodomjer)

Venturimetrom, (nazvanom po G.B. Venturiju), čiji je uzdužni presjek prikazan na slici 2.20, mjeri se protok u tlačnim sustavima na osnovi razlike tlakova. Budući da je venturimetar iznutra gladak i fino hidraulički oblikovan, linijski i lokalni gubici su vrlo mali. Da bi očitavanje razlike tlakova bilo što bolje, potrebno je da brzina u užoj cijevi v_2 bude višestruko veća od brzine v_1 u široj cijevi ($v_2 \gg v_1$). Također je uobičajeno da je os venturimetra u horizontalnom položaju. (Zbog toga se geodetski horizont postavlja u os cijevi, pa se računa samo s tlačnim i brzinskim visinama).



Slika 2.20 Venturimetar (shematizirani uzdužni presjek)

Izraz za izračunavanje protoka kroz venturimetar dobiva se primjenom Bernoullijeve jednadžbe i jednadžbe kontinuiteta na presjeka 1-1 i 2-2.

Prema slici 2.20, Bernoullijeva jednadžba za presjeka 1-1 i 2-2 je:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.99)$$

i iz nje slijedi:

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.99a)$$

Površine protjecajnih presjeka 1-1 i 2-2 su:

$$A_1 = \frac{D^2 \pi}{4}; \quad A_2 = \frac{d^2 \pi}{4}$$

Iz jednadžbe kontinuiteta:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.53a)$$

slijedi:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{D^2 \pi}{4}}{\frac{d^2 \pi}{4}} = \frac{D^2}{d^2}$$

pa je:

$$v_2 = \frac{D^2}{d^2} v_1$$

Razlika u tlačnim visinama Δh , koja se na venturimetru očitava dana je izrazom:

$$\Delta h = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} \quad (2.100)$$

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.101)$$

Kada se v_2 na temelju jednadžbe kontinuiteta (2.53a) izrazi preko brzine v_1 , dobije se:

$$\Delta h = \left(\frac{D^2}{d^2} v_1 \right)^2 \frac{1}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} \left(\frac{D^4}{d^4} - 1 \right) \quad (2.102)$$

Brzina v_1 (s pozitivnim predznakom) iznosi:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \Delta h}{\frac{D^4}{d^4} - 1}} \quad (2.103)$$

a protok kroz venturimetar je:

$$Q = A_1 v_1 = \frac{D^4 \pi}{4} \sqrt{\frac{2g \Delta h}{\frac{D^4}{d^4} - 1}} \quad (2.104)$$

Izraz (2.104) osnovni je izraz za izračunavanje protoka kroz venturimetar. U praksi se zbog poremećaja u strujnoj slici uvodi koeficijent protoka μ (u μ su uračunati i gubici nastali uslijed trenja).

$$Q = \mu \frac{D^4 \pi}{4} \sqrt{\frac{2g \Delta h}{\frac{D^4}{d^4} - 1}} \quad (2.105)$$

Vrijednosti koeficijenta protoka μ su:

- za nove vodomjere $\mu = 0,985$

- za stare vodomjere $\mu = 0,98$

Ukoliko je u izrazu za izračunavanje protoka kroz venturimetar sadržan i utjecaj

suženja $\frac{D^4}{d^4}$ protok je:

$$Q = \alpha \frac{D^2 \pi}{4} \sqrt{2g \Delta h} \quad (2.106)$$

gdje je α koeficijent protoka vodomjera.

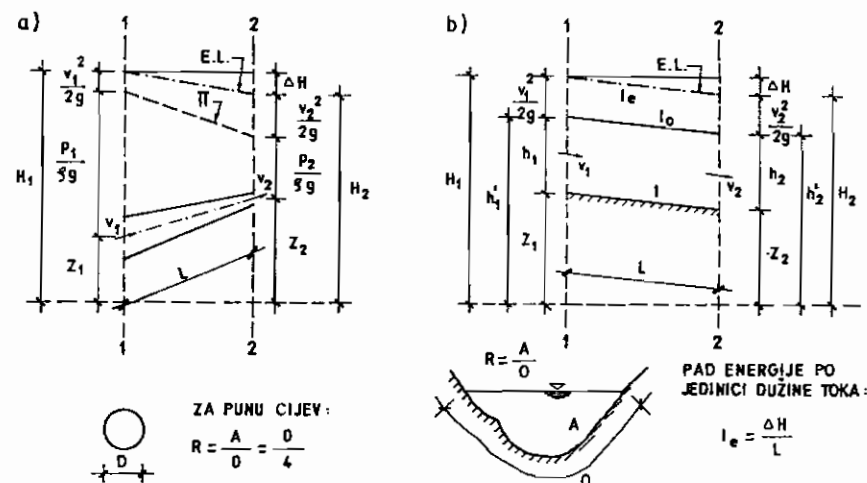
Ovdje je važno napomenuti da se kada se na temelju jednadžbe kontinuiteta brzina v_1 izrazi preko brzine v_2 , dobije izraz za izračunavanje protoka kroz venturimetar u obliku:

$$Q = \mu \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2g \Delta h}{1 - \frac{d^4}{D^4}}} \quad (2.107)$$

pri čemu formula (2.107) daje iste vrijednosti za protok kao i formula (2.105).

2.5.3 Tečenje vode u otvorenim koritima

Za tečenje vode u otvorenim koritima - sa slobodnim vodnim licem - vrijedi Bernoullijeva jednadžba za realnu tekućinu, pa ga je na toj osnovi moguće usporediti s tečenjem pod tlakom, kao što je prikazano na slici 2.21. Za razliku od strujanja u cijevima pri otvorenim tokovima, tlačna (piezometarska) linija jednaka je liniji vodnoga lica.



Slika 2.21 Usporedba Bernoullijeve jednadžbe za tečenje pod tlakom (a) i tečenje sa slobodnim vodnim licem (b)

Za tečenje pod tlakom (slučaj (a) na slici 2.21) i za tečenje sa slobodnim vodnim licem (slučaj (b) na slici 2.21) može se napisati Bernoullijeva jednadžba:

$$\text{slučaj a)} \quad z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2.83)$$

$$\text{slučaj b)} \quad z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2.108)$$

Uspoređi li se tečenje pod tlakom (a) i tečenje sa slobodnim vodnim licem (b) na osnovi izraza (2.83) i (2.108), ona su na prvi pogled vrlo slična. No tome ni u kojem slučaju nije tako, i to iz sljedećega bitnog razloga: **Dok u tlačnim sustavima za jednu te istu cijev u turbulentno-brapavom režimu tečenja koeficijent brapavosti ostaje nepromijenjen bez obzira na veličinu tlaka, u otvorenim tokovima koeficijent hrapavosti ovisi o položaju vodnoga lica, odnosno o dubinama vodotoka h .**

2.5.3.1 Jednoliko tečenje

Jednoliko, a i nejednoliko tečenje općenito su opisani u poglavlju 2.4.3, "Vrste stacionarnoga strujanja s kinematičkoga stanovišta".

Jednoliko tečenje je tečenje pri kojemu su hidrodinamičke osobine duž toka jednake: u slučaju tečenja sa slobodnim vodnim licem pad linije energije I_e jednak je padu vodnoga lica I_o i padu dna I (slika 2.21 b). Za konstantni protok Q srednje profilske brzine su jednake, pa iz toga slijedi da su protjecajni poprečni presjeci korita jednaki.

Dubina vodotoka koja odgovara jednolikom tečenju u njemu zove se **normalna dubina** i označava s h_o .

Prema oznakama na slici 2.21 (b):

$$\text{- pad dna je: } I = \frac{z_1 - z_2}{L} = \frac{\Delta z}{L}$$

$$\text{- pad vodnoga lica je: } I_o = \frac{h_1' - h_2'}{L} = \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{gdje je } h_1' = h_1 + z_1; \quad h_2' = h_2 + z_2)$$

$$\text{- pad linije energije po jedinici dužine toka je: } I_e = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Delta h}{L}$$

$$I = I_o = I_e$$

$$v_1 = v_2 = v \quad Q = \text{const.}$$

$$A_1 = A_2 = A$$

Kada je tečenje jednoliko, sila otpora trenja F , raspodijeljena je po omočenoj površini korita $\bar{O}L$ i u skladu s izrazom (2.78) je:

$$F_t = c_f \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \bar{O}L$$

a gubitak mehaničke energije uslijed trenja ΔH_t u skladu je s izrazom (2.87):

$$\Delta H_t = c_f \rho g \frac{\bar{v}^2}{2g} \frac{\bar{O}L}{\rho g A} = c_f \frac{\bar{v}^2}{2g} \frac{L}{R}$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{A}}{O} \quad (\text{hidraulički radijus})$$

Pad linije energije I_e je:

$$I_e = \frac{\Delta H_t}{L} = \frac{c_f}{2gR} \bar{v}^2 \quad (2.109)$$

Iz (2.109) slijedi da je srednja brzina \bar{v} između dvaju presjeka:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2g}{c_f}} \sqrt{R I_e} \quad (2.110)$$

Ako se uvrsti $C = \frac{\sqrt{2g}}{c_f}$, dobije se

$$\bar{v} = C \sqrt{R I_e} \quad (\text{m/s}) \quad (2.111)$$

gdje je C ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) Chezyjev koeficijent.

Izraz (2.111) naziva se **Chezyjevom formulom** za brzinu u otvorenom vodotoku, a naziv je dobila po A. Chezyju, koji ju je izveo 1769. godine na temelju iskustva i mjerenja na rijekama u Francuskoj.

Chezyjev koeficijent ne označava konstantu za pojedini vodotok - kao što se na početku smatralo - nego je vrlo složena funkcija na koju bitan utjecaj imaju relativna hrapavost i veličina Reynoldsova broja.

Budući da se pokazalo kako Chezyjev koeficijent nije konstanta, taj se problem nastojalo riješiti jednostavnijim funkcijama. Od niza izvedenih formula (npr.: Ganguillet-Kutterova formula iz 1869., Bazinova formula iz 1897., Forchheimerova formula iz 1923. god. i sl.) vrlo dobru aproksimaciju Chezyjeva koeficijenta u razvijenu turbulentno-hrapavom režimu tečenja daju **Manningova** (iz 1891. godine) i **Stricklerova** formula (po A. Strickleru). U skladu s njihovom definicijom Chezyjev koeficijent C je:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = K R^{1/6} \quad (\text{m}^{1/2}/\text{s}) \quad (2.112)$$

gdje je

n ($\text{s}/\text{m}^{1/3}$) Manningov koeficijent hrapavosti

K ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$) Stricklerov koeficijent glatkosti.

Tako Manningova formula za srednju brzinu glasi:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I_e^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (2.113)$$

a Stricklerova formula za srednju brzinu je:

$$v = K R^{2/3} I_e^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (2.114)$$

U tablici 2.4 dane su vrijednosti Manningova koeficijenta hrapavosti n i Stricklerova koeficijenta glatkosti K za nekoliko različitih površina preko kojih protječe voda.

Tablica 2.4 Manningovi (n) i Stricklerovi (K) koeficijenti (D. Carić, 1952.)

Kategorija	Vrsta podloge	n ($\text{s/m}^{1/3}$)	$K = \frac{1}{n}$ ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
I.	osobito glatke površine	0,009	111
II.	briljivo blanžane daske, najbolje zaglađena cementna žbuka	0,010	100
IV.	obloga od opeke, cijevi za vodu	0,013	75
VI.	betonirani kanali, nečiste cijevi	0,014	70
XIII.	zemljani kanali	0,0275	35
XVI.	kanali u vrlo lošem stanju	0,04 i više	25 i manje

Chezyjevu (2.114) i Darcy-Weisbachovu formulu (2.90) moguće je povezati tako da se obje formule izraze preko pada energetske linije I_e .

Iz Darcy-Weisbachove formule:

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

dobije se:

$$I_e = \frac{\Delta H}{L} = \lambda \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.115)$$

Za okruglu punu cijev hidraulički radijus je:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{D}{4}$$

pa se iz Chezyjeve formule dobije:

$$I_e = \frac{v^2}{C^2 R} = \frac{v^2}{C^2 \frac{D}{4}} = \frac{4v^2}{C^2 D} \quad (2.116)$$

Izrazi (2.115) i (2.116) se izjednače:

$$\lambda \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} = \frac{4v^2}{C^2 D}$$

i nakon sređivanja dolazi se do veze između Chezyjeva koeficijenta C i koeficijenta otpora strujanju λ :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (2.117)$$

2.5.3.2 Protočna krivulja i modul protoka

Protočna krivulja je prikaz protoka kao funkcije vodostaja. Hidraulički se protočna krivulja može definirati na osnovi Chezyjeve, Manningove, Stricklerove i sličnih formula za srednju brzinu u protjecajnome profilu, tako da se srednja brzina pomnoži s površinom protjecajnoga presjeka:

$$Q = A v$$

Primjerice kod Chezyjeve formule za srednju profilsku brzinu (2.111) protok Q je:

$$Q = A C \sqrt{R I_e} = A C \sqrt{R} \sqrt{I_e} \quad (2.118)$$

Dio izraza (2.118) za protok:

$$K_o = A C \sqrt{R} \quad (2.119)$$

se naziva **modul protoka** ili propusna karakteristika vodotoka pri jednolikom strujanju. Ako se radi s Manningovom formulom za srednju profilsku brzinu, vrijedi odnos (2.112):

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

pri čemu je modul protoka:

$$K_o = \frac{1}{n} A R^{2/3} \quad (2.120)$$

Izražava li se protok preko modula protoka, dobiva se:

$$Q = K_o \sqrt{I_e} \quad (2.121)$$

Definiranje protočne krivulje provodi se tako da se za različite vodostaje h najprije izračunaju hidrauličke karakteristike protjecajnoga profila: njegova površina A , omočeni obod O i hidraulički radijus R . Nakon toga se odrede modul protoka K_0 i odgovarajući protok Q .

Na prirodnim se tokovima vrlo rijetko mjeri pad vodnoga lica I_0 - za koji se samo uz pretpostavku jednolikoga tečenja može usvojiti da je jednak padu energetske linije I_e .

Često se ni ne može usvojiti da je tečenje jednoliko, pa tada nije moguće hidraulički definirati protočnu krivulju. U hidrologiji se protočna krivulja redovito određuje na osnovi mjerenja brzina vode u protjecajnom profilu iz kojih se definira srednja profilna brzina vode. Protok za odgovarajući vodostaj u profilu određuje se kao umnožak površine protjecajnoga profila A i srednje profilne brzine v . Iz tako određenih protoka (vodomjerenja) za različite vodostaje analitički se definira protočna krivulja (pogl. 4.7).

2.5.3.3 Koeficijent kinetičke raspodjele brzine po presjeku ili Coriolisov broj

Kada se - prilikom primjenjivanja Bernoullijeve jednadžbe - pretpostavi da je strujanje pod tlakom i strujanje sa slobodnim vodnim licem jednodimenzionalno, ukupna se energija toka izražava srednjom profilskom brzinom:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A}$$

Kako bi ukupna energija toka, izražena preko Bernoullijeve jednadžbe za strujnicu, ostala nepromijenjena, brzinska se visina popravljiva pomoću koeficijenta kinetičke raspodjele u presjeku ili Coriolisova broja α (po G.G. de Coriolisu). **Coriolisov broj α** je bezdimenzionalni koeficijent, a prikazuje odnos stvarne kinetičke energije mase tekućine koja u jednoj sekundi proteče kroz protjecajni presjek i kinetičke energije koja je uvjetovana time da su brzine u svim točkama protjecajnoga presjeka jednake srednjoj brzini. Prema tome, specifična kinetička energija E_k može se odrediti pomoću srednje profilne brzine:

$$E_k = \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2.122)$$

ukoliko je veličina Coriolisova broja α poznata.

Coriolisov se broj određuje integriranjem profila brzina po protjecajnome presjeku i ovisi o obliku profila brzina. Na slici 2.22 prikazana su dva karakteristična profila brzina u cijevima s odgovarajućim Coriolisovim brojevima α .

Kod otvorenih je tokova veličina Coriolisova broja često u granicama $\alpha = 1,05 - 1,10$. Budući da se točnost mjerenja u riječnoj hidraulici kroće u granicama $\pm 5\%$, najčešće se može uzeti da je $\alpha = 1,0$.



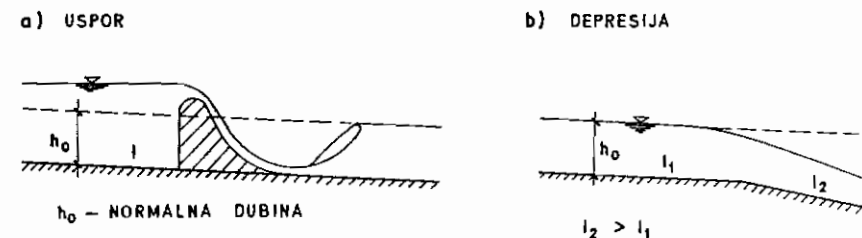
Slika 2.22 Coriolisov broj α za različite raspodjele brzina u cijevima kružnoga poprečnog presjeka

2.5.3.4 Nejednoliko tečenje

Nejednoliko tečenje u otvorenim tokovima je promjenljivo tečenje. Srednje profilne brzine i površine protjecajnih presjeka su različite. Vodno se lice duž toka neprekidno mijenja. **Vodostaj se duž toka može i povećavati, ali linija energije u svakom slučaju opada duž toka.**

Kada je tečenje nejednoliko, dva su osnovna oblika krivulje slobodne vodne površine:

1. **Krivulja uspora (uspor)**, koja nastaje pri postupnome porastu dubine duž osi vodotoka (slika 2.23a).
2. **Krivulja depresije (depresija)**, koja nastaje pri postupnome opadanju dubine duž osi vodotoka (slika 2.23b).



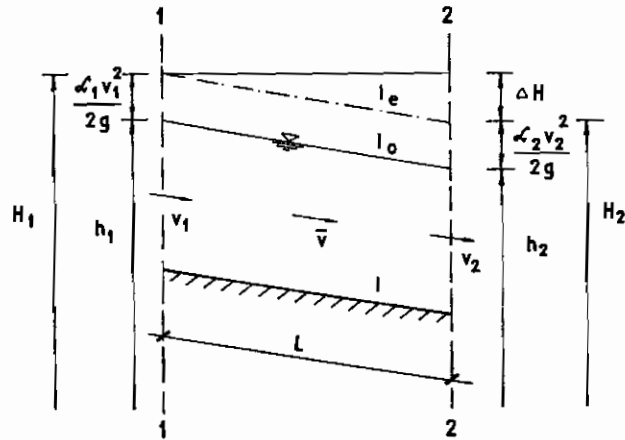
Slika 2.23 Uspor (a) i depresija (b)

Nejednoliko se tečenje izračunava po odsječcima L koji su tako kratki da za njih vrijede Chezyjeve postavke o pravilnosti korita. U praktičnim se izračunima uzima da je Chezyjev koeficijent $C = \text{const.}$ za pojedinu dužu dionicu vodotoka ili za cijeli vodotok.

Određivanje visina vodnoga lica kod nejednolikoga se tečenja provodi počev od jednoga presjeka s poznatim vodostajem h i poznatim protokom Q . Izračun vodostaja

u ostalim presjecima provodi se iterativno pomoću Bernoullijeve jednadžbe. Na slici 2.24 prikazana su dva dovoljno bliza presjeka, 1-1 i 2-2, na koje se odnose tumačenja izračuna nejednolikoga tečenja.

Izračun se provodi tako da se pretpostavi vodostaj u uzvodnome (ili u nizvodnome) presjeku, te se pomoću njega izračunavaju ostali hidraulički parametri.



Slika 2.24 Skica presjeka između kojih se pretpostavi jednoliko tečenje, tj. $I = I_0 = I_e$.

Za presjeke 1-1 i 2-2 postavi se Bernoullijeva jednadžba:

$$h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (2.123)$$

Srednja brzina između presjeka 1-1 i 2-2 na osnovi Manningove formule (2.113) je:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \bar{R}^{-2/3} I_e^{1/2} \text{ gdje je } \bar{R} \text{ srednji hidraulički radijus}$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{A}}{\bar{O}} = \frac{\frac{A_1 + A_2}{2}}{\frac{O_1 + O_2}{2}} = \frac{A_1 + A_2}{O_1 + O_2} \quad (2.124)$$

Pad linije energije I_e je:

$$I_e = \frac{\Delta H}{L}$$

pa je prema tome gubitak mehaničke energije ΔH između presjeka 1-1 i 2-2:

$$\Delta H = \frac{n^2 \bar{v}^2}{R^{4/3}} L \quad (2.125)$$

Bernoullijeva jednadžba (2.123) može se pisati na sljedeći način:

$$h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + n^2 \frac{\bar{v}^2}{R^{4/3}} L \quad (m) \quad (2.126)$$

Srednja brzina \bar{v} između presjeka 1-1 i 2-2 je:

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.127)$$

U izračunima za nejednoliko tečenje mogu nastupiti dva tipa problema:

- 1. tip problema** - zadan je vodostaj u nizvodnome presjeku 2-2, pa treba izračunati uzvodni vodostaj h_1 :

$$h_1 = h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \Delta H \quad (m) \quad (2.128)$$

- 2. tip problema** - zadan je vodostaj u uzvodnome presjeku 1-1, pa treba izračunati nizvodni vodostaj h_2 :

$$h_2 = h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} - \Delta H \quad (m) \quad (2.129)$$

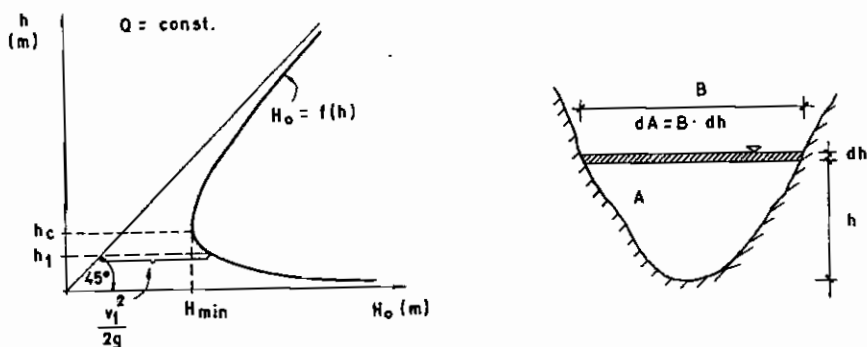
2.5.3.5 Specifična energija presjeka, mirno i silovito tečenje, kritična dubina

Specifična energija H_o (energija jedinice težine fluida), određena s obzirom na horizontalnu ravninu kroz najnižu točku presjeka je:

$$H_o = h + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (m) \quad (2.130)$$

gdje h dubina, v srednja profilska brzina, a α Coriolisov broj koji je kod otvorenih tokova obično $\alpha = 1,0 - 1,1$.

Ukoliko je primjerice zadan protok kroz profil koji se ne mijenja (kod projektiranja kanala), onda se s promjenama uzdužnoga pada nužno mijenjaju dubine vodotoka. Za različite dubine h računaju se prema izrazu (2.130) odgovarajuće vrijednosti specifične energije presjeka H_o . Nakon toga se crta krivulja specifične energije presjeka $H_o = f(h)$, kako je to prikazano na slici 2.25.



Slika 2.25 Krivulja specifične energije presjeka $H_o = f(h)$

Dubina kod koje je specifična energija presjeka najmanja H_{min} , naziva se **kritičnom dubinom** h_c . Prema tome, **minimalna specifična energija presjeka** H_{min} je :

$$H_{min} = h_c + \alpha \frac{v_c^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (2.131)$$

Gornji dio krivulje specifične energije presjeka sa slike 2.25 prikazuje porast energije H_o za $h > h_c$, a donji dio za vrijednosti $h < h_c$ pokazuje smanjenje energije H_o s porastom dubine vodotoka. Radi toga se kod otvorenih vodotoka razlikuju tri stanja:

1. **mirni tok**, pri kojemu su dubine veće od kritične dubine ($h > h_c$); u mirnome toku povećanje specifične energije presjeka nastaje uslijed povećanja potencijalne energije, uz istodobno smanjenje kinetičke energije
2. **kritični tok**, pri kojemu je u vodotoku kritična dubina h_c , a kroz presjek voda teče **kritičnom brzinom** v_c
3. **siloviti (burni) tok**, pri kojemu su dubine manje od kritične dubine ($h < h_c$); kod silovitoga toka porast specifične energije presjeka nastaje zbog povećanja njegove kinetičke energije, a istodobno se potencijalna energija smanjuje.

Osim radi ocjenjivanja stanja toka, kritičnu je dubinu potrebno odrediti i zbog različitih hidrauličkih izračuna koje se rabi za pojedina stanja u vodotoku.

Prema definiciji, **kritična dubina** je ona dubina za koju specifična energija presjeka postaje minimalna:

$$H_o = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g A^2} = H_{min} \quad (2.132)$$

Prema tome, treba naći prvu derivaciju navedene funkcije:

$$\frac{dH_o}{dh} = \frac{d}{dh} \left(h + \frac{\alpha Q^2}{2g A^2} \right) = 1 - \frac{\alpha Q^2}{g A^3} \frac{dA}{dh} \quad (2.133)$$

odnosno, ako se uzme u obzir da je širina vodnoga lica $B = \frac{dA}{dh}$, onda je:

$$\frac{dH_o}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3} = 1 - \pi_k \quad (2.134)$$

Bezdimenzionalna veličina $\frac{\alpha Q^2 B}{g A^3}$ naziva se **parametrom kinetičnosti vodotoka** i označava se s π_k .

Za minimalnu specifičnu energiju presjeka H_{min} mora biti $\frac{dH}{dh} = 0$, pa u tom slučaju iz izraza (2.134) proizlazi:

$$1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3} = 0, \text{ odnosno za kritično tečenje:}$$

$$\frac{\alpha Q^2 B}{g A_c^3} = 1 \quad (2.135)$$

Ukoliko je $\alpha = 1$; a u izraz (135) se uvrsti $\frac{A_c}{B} = h_c$ (kritična dubina) i $\frac{Q^2}{A_c^2} = v_c^2$ (kritična brzina), onda se za kritično tečenje dobije:

$$\frac{v_c^2}{g h_c} = 1 \quad (2.136)$$

Izraz $\frac{v^2}{g h_{sr}}$ naziva se **Froudeovim brojem** (po W. Froudeu) i označava simbolom F_r :

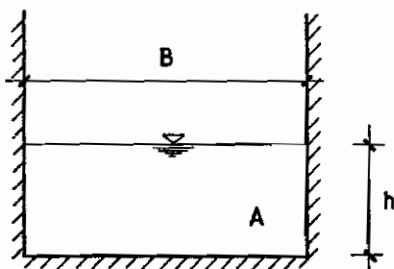
$$F_r = \frac{v^2}{g h_{sr}} \quad (2.137)$$

U SAD-u se rabí oznaka $\sqrt{F_r} = F$, pa iz toga proizlazi:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g h_{sr}}} \quad (2.138)$$

Za pravokutni protjecajni presjek je:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g h}}; \quad (A = B h) \quad (\text{slika 2.26})$$



Slika 2.26 Pravokutni protjecajni presjek

Parametar kinetičnosti π_k zapravo je jedan od oblika Froudeova broja. Froudeov broj F_r je, kao i Reynoldsov broj R_r , jedan od kriterija hidrauličke sličnosti.⁴

Iz izraza za Froudeov broj (2.137) ili (2.138) slijedi još jedan jednostavan kriterij za ocjenjivanje stanja toka, jer je:

- za mirni (riječni) tok: $F_r < 1$
- za kritični tok: $F_r = 1$
- za siloviti tok: $F_r > 1$

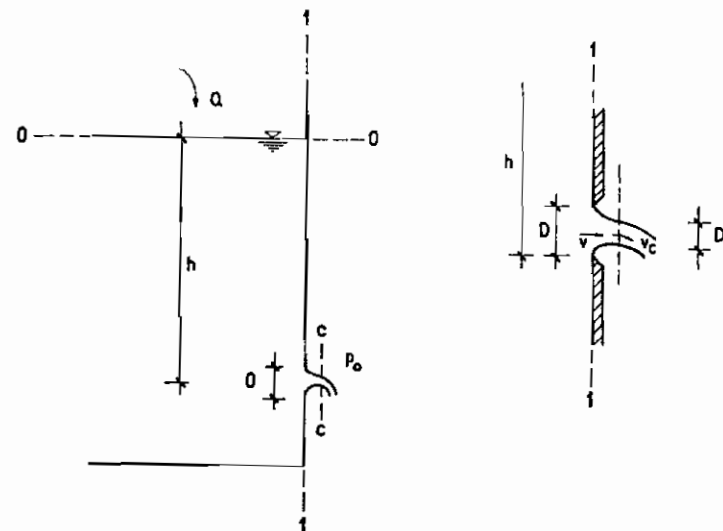
Na kraju je važno napomenuti da se pad vodotoka kod kojega je normalna dubina jednaka kritičnoj dubini zove **kritični pad** i označava simbolom I_c . Ako je pad vodotoka $I < I_c$, tok je miran, a ako je $I > I_c$, tok je silovit (buran).

2.5.3.6 Istjecanje kroz otvore

Na slici 2.27 prikazano je istjecanje vode kroz mali okrugli otvor hidraulički oštih rubova pod stalnim tlakom.

U slučajevima tečenja kroz otvore posljednji član Bernoullijeve jednadžbe ΔH prikazuje samo gubitak mehaničke energije namijenjene svladavanju lokalnoga otpora

⁴ Ako se neko gibanje u mehanici fluida odvija pri dominantnom djelovanju sile teže, onda se kao izvjet sličnosti te pojave u prirodi i one na fizikalnome modelu (u određenom mjerilu) postavlja da su Froudeovi brojevi F_r u prirodi i na modelu jednaki. U slučaju kada za vrijeme nekog kretanja prevladavaju sile viskoznosti, gibanja u prirodi i na modelu su slična samo onda, kada su Reynoldsovi brojevi R_r u prirodi i na modelu jednaki.



Slika 2.27 Istjecanje kroz mali otvor pod stalnim tlakom

u otvoru. Pri istjecanju iz otvora strujnice nisu paralelne pa se mlaz u blizini otvora sužuje. Kod kružnih, u hidrauličkom smislu oštih otvora, zakrivljenost strujnica se smanjuje i one postaju gotovo usporedne, približno na udaljenosti $0,5 D$ od otvora (D je promjer otvora). Presjek C-C, najbliži otvoru u kojemu nastaje istjecanje, s gotovo usporednim strujnicama, zove se **suženi ili kontrahirani presjek**.

Odnos površine suženoga presjeka mlaza A_c prema površini otvora A zove se **koeficijent suženja ili koeficijent kontrakcije c** :

$$c = \frac{A_c}{A} = \frac{\frac{D_c^2 \pi}{4}}{\frac{D^2 \pi}{4}} = \frac{D_c^2}{D^2} \quad (2.139)$$

Bernoullijeva jednadžba se za istjecanje kroz otvore primjenjuje tako da se za početni presjek (presjek 0-0 na slici 2.27) uzme površina vode iznad otvora, dok se za drugi presjek uzima izlazni presjek (presjek 1-1 na slici 2.27). Istjecanje mora biti stacionarno da bi se moglo primijeniti Bernoullijevu jednadžbu.

Prema tome, za presjke 0-0 i 1-1 visinski oblik Bernoullijeve jednadžbe (uz pretpostavljeni geodetski horizont u težištu otvora) je:

$$\frac{p_0}{\rho g} + h + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_c}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + \xi \frac{v^2}{2g} \quad (2.140)$$

- p_o - atmosferski tlak koji vlada na površini tekućine i u području u koje istječe tekućina.
- v_o - brzina pomicanja slobodne površine tekućine u rezervoaru iz kojega tekućina istječe je $v_o = 0$ za stacionarno istjecanje.
- v_c - srednja brzina vode u izlaznome presjeku.
- $\xi \frac{v^2}{2g}$ - gubitak tlaka pri izlasku mlaza iz otvora, pri čemu je ξ koeficijent lokalnoga otpora.

Vrlo često, a naročito kod malih otvora, v_o je vrlo mala, pa se $\frac{v_o^2}{2g}$ može zanemariti. Nakon kraćenja lijeve i desne strane s $\frac{p_o}{\rho g}$ i izdvajanja brzinske visine $\frac{v_o^2}{2g}$ iz izraza (2.140), dobije se:

$$H = \frac{v^2}{2g} (1 + \xi), \text{ odnosno:}$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} \sqrt{2gH} \quad (2.141)$$

$$\sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} = \varphi \quad (2.142)$$

gdje je φ koeficijent brzine.

Za idealnu je tekućinu $\xi = 0$ pa se iz (2.141) dobije **Torricellijeva formula** za brzinu istjecanja idealne tekućine:

$$v = \sqrt{2gH} \quad (2.143)$$

Za vodu je koeficijent brzine $\varphi = 0,97$, pa je u tom slučaju $\xi = 0,06$.

Veličina protoka kroz otvor površine A_c je zbog utjecaja suženja:

$$Q = A_c v = A_c \varphi \sqrt{2gH} \quad (2.144)$$

Ako se usvoji da je koeficijent istjecanja $\mu = c\varphi$ onda je formula za istjecanje kroz male otvore:

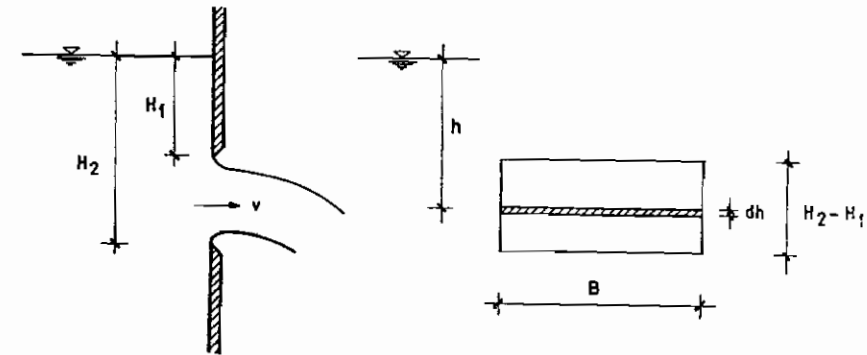
$$Q = \mu A \sqrt{2gH} \quad (2.145)$$

Vrijednosti koeficijenta istjecanja μ mogu se naći u hidrauličkoj literaturi, a ovdje je u tablici 2.5 dano nekoliko karakterističnih vrijednosti.

Kod velikih otvora (širine i visine reda veličine nekoliko, pa i desetak metara) voda koja je niže u otvoru ima, zbog utjecaja gravitacije, veću brzinu nego voda u višim slojevima. Na slici 2.28 prikazan je veliki pravokutni otvor.

Tablica 2.5 Vrijednosti koeficijenta istjecanja μ

H (m)	$D = 10$ mm	$D = 180$ mm
0,5	0,622	0,599
3,0	0,605	0,596
30,0	0,593	0,592



Slika 2.28 Istjecanje kroz veliki pravokutni otvor

Protok kroz površinu otvora diferencijalno male visine dh je:

$$dQ = \mu B dh \sqrt{2gh} \quad (2.146)$$

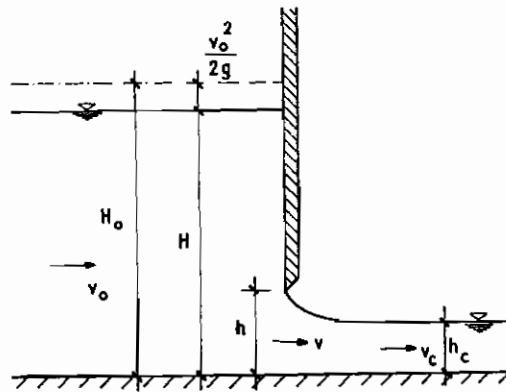
Ukupni se protok kroz otvor dobije ako se desna strana izraza (2.146) integrira u granicama od dubine vode na vrhu otvora H_1 do dubine vode na dnu otvora H_2 :

$$Q = \mu B \sqrt{2g} \int_{H_1}^{H_2} h^{1/2} dh \quad (2.147)$$

$$Q = \frac{2}{3} \mu B \sqrt{2g} (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}) \quad (2.148)$$

Za otvore srednjih dimenzija (B i $H_2 - H_1$ reda veličine nekoliko metara) $\mu = 0,65$. Za otvore velikih dimenzija (B i $H_2 - H_1$ reda veličine desetak i više metara) $\mu = 0,70$.

Istjecanje ispod uspravne oštrobriđne ustave u kanalu pravokutnoga poprečnog presjeka širine B (npr. u protočnom polju brane) predstavlja istjecanje kroz granični slučaj velikog otvora koji nije ograničen s donje strane (slika 2.29).



Slika 2.29 Istjecanje ispod uspravne oštrobridne ustave

Protok ispod ustave, čiji je uzdužni presjek prikazan na slici 2.32, je:

$$Q = \mu B h \sqrt{2g H_o} \quad (2.149)$$

Za koeficijent protoka μ D. J. Sokolov daje obrazac (M. Boreli i G. Bata, 1979.):

$$\mu = 0,62 \left(1 - 0,12 \frac{h}{H_o} \right) \quad (2.150)$$

U ovakvim se slučajevima pravokutnoga korita koeficijent suženja (kontraksije) c_c definira kao odnos smanjene dubine h_c i visine otvora h :

$$c_c = \frac{h_c}{h} \quad (2.151)$$

Vrijednosti koeficijenta kontraksije c_c za različite odnose visine otvora ispod ustave h i dubine gornje vode H dane su u tablici 2.6.

Tablica 2.6 Koeficijenti kontraksije c_c za istjecanje ispod uspravne ustave u pravokutnome koritu, prema M. D. Čertousovu (M. Boreli i G. Bata, 1979.)

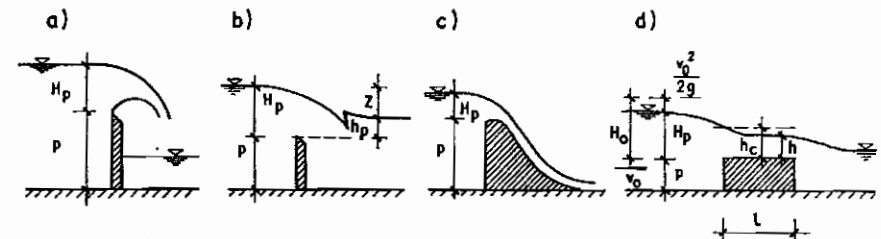
$\frac{h}{H}$	$c_c = \frac{h_c}{h}$	$\frac{h}{H}$	$c_c = \frac{h_c}{h}$
0,0	0,611	0,30	0,625
0,05	0,613	0,40	0,633
0,10	0,615	0,50	0,645
0,20	0,619	0,60	0,661

2.5.3.7 Preljevi

Preljevi su pregrade preko kojih se prelijeva voda ili druge tekućine. Preljevi se dijele na tri grupe:

- oštrobridni preljevi
- pravilni preljevi praktičnoga profila
- preljevi sa širokim pragom.

Dio vodotoka uzvodno od preljeva naziva se **gornjom vodom**, a nizvodni dio **donjom vodom**. Preljev je potopljen ako donja voda ima utjecaj na veličinu protoka. U tom je slučaju razina donje vode viša od krune preljeva (kruna preljeva je gornji - najviši dio preljeva). Na slici 2.30 prikazani su osnovni oblici preljeva.



Slika 2.30 Oblici preljeva: a) oštrobridni preljev; b) potopljeni oštrobridni preljev; c) preljev praktičnoga profila; d) preljev preko široka praga.

Visina preljevna mlaza H_p je visina od krune preljeva do horizontalne razine vode ispred preljeva, odnosno do gornje vode, a p je visina preljevne građevine.

Preljev se tretira kao velik otvor koji nije ograničen s gornje strane. Osnovni izraz za protok preko preljeva u koritu pravokutnoga poprečnog presjeka bez bočnoga suženja (kontraksije) preljevna mlaza je **Polenijeva formula**⁵:

$$Q = m B \sqrt{2g} H_p^{3/2} \quad (2.152)$$

gdje je m koeficijent prelijevanja i za pojedine oblike preljeva m ima različite vrijednosti, B je širina vodnoga lica preljeva, g je gravitacija, a H_p je visina preljevna mlaza.

Ako postoji utjecaj bočnoga suženja, onda desnu stranu izraza (2.152) treba pomnožiti s koeficijentom bočnoga suženja, čije su vrijednosti od 0,90 do 0,95.

Za nepotopljeni oštrobridni preljev (slika 2.30a) za izračunavanje koeficijenta m koristi se **Bazinov izraz**:

⁵ Giovanni Poleni (1683. - 1761.), matematičar, astronom, fizičar, inženjer i arheolog. Jedan od najslavnijih profesora na univerzitetu u Padovi. Naročito se bavio mehanikom fluida (strujanjem vode u rijekama i dinamičkim tlakom vode) i problemima navigacije.

$$m = m_o \left[1 + 0,55 \left(\frac{H_p}{H_p + p} \right)^2 \right] \quad (2.153)$$

gdje je m_o koeficijent koji se dobije na temelju izraza:

$$m_o = 0,405 + \left(\frac{0,003}{H_p} \right) \quad (2.154)$$

Za izračun protoka preko oštrobriidnoga preljeva pretpostavljaju se različite vrijednosti visine preljevnoga mlaza H_p , pa se s njima računaju koeficijenti prelijevanja m_o i m , a nakon toga veličina protoka Q . Redovito je dovoljno nekoliko računskih koraka, pa je proračun jednostavan i brz.

Za **potopljeni oštrobriidni preljev** (slika 2.30b) koeficijent prelijevanja m_o treba pomnožiti s koeficijentom potopljenosti σ , koji je, prema Bazinu:

$$\sigma = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_p}{p} \right) \sqrt{\frac{z}{H_p}} \quad (2.155)$$

Oznake u izrazu (2.155) objašnjene su na slici 2.30b).

Za **nepotopljeni preljev sa širokim pragom** ($h < h_c$; nije potopljena kritična dubina) bez bočne kontrakcije (slika 2.30d) vrijedi:

$$Q = M \sqrt{2g} B H_o^{3/2} \quad (2.156)$$

gdje je B širina preljevnoga praga, a ostale oznake objašnjene su na slici 2.30d.

Za različite odnose visine preljeva i visine preljevnoga mlaza A. R. Berezinski je dao formule za koeficijent M (V. Jović, 1977):

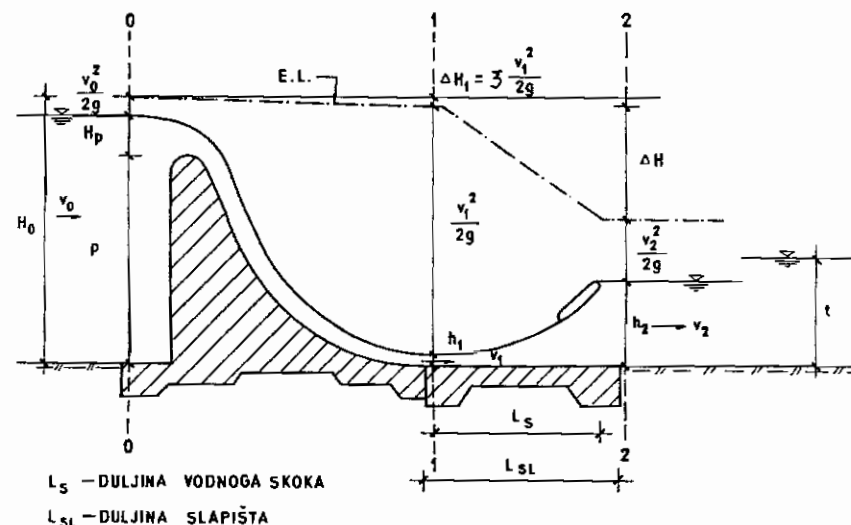
$$\text{za } 0,6 < \frac{p}{H_p} < 2,5 \quad M = 1,973 - 0,222 \frac{p}{H_p} \quad (2.157)$$

$$\text{za } 2,5 < \frac{p}{H_p} < 10 \quad M = 1,706 \frac{1 + 1,30 \frac{p}{H_p}}{1 + 1,63 \frac{p}{H_p}} \quad (2.158)$$

Karakteristični tipovi preljeva koji se u mjerenju protoka vode najčešće koriste, opisani su u poglavlju 4.6, "Hidrometrija".

2.5.3.8 Vodni skok i slapište

Slapište ili **bučnica** je dio hidrotehničke građevine u kojemu se pri spajanju razina gornje i donje vode vrši disipacija mehaničke energije. Promjena oblika slobodne vodne površine u obliku skoka pri prijelazu iz silovitoga u mirni tok zove se **hidraulički** ili **vodni skok** i on je na slici 2.31 prikazan na jednostavnu primjeru preljeva i slapišta.



Slika 2.31 Vodni skok u slapištu nizvodno od preljeva

Kod vodnoga se skoka razlikuju dvije karakteristične dubine: **prva konjugirana (spregnuta) dubina** h_1 , na početku, i **druga konjugirana dubina** h_2 , na kraju vodnoga skoka. Prva konjugirana dubina h_1 najmanja je dubina na najnižem mjestu slapišta i nalazi se u silovitome toku. Ona prvenstveno ovisi o gornjoj vodi i položaju najniže točke slapišta u odnosu na gornju vodu. Druga konjugirana dubina h_2 je dubina vode neposredno iza prelaska iz silovitoga u mirni režim toka i ovisi o nizvodnim hidrauličkim uvjetima o kojima ovisi i donja voda.

Siloviti tok prelazi u mirni preko vodnoga skoka. U ovisnosti položaja vodnoga skoka slapištu razlikuju se tri slučaja:

- Potopljeni vodni skok** - kod kojega je siloviti tok na nizvodnom pokosu preljeva potopljen zbog dovoljne dubine donje vode. U tom je slučaju druga konjugirana dubina vodnog skoka manja od dubine donje vode: $h_2 < t$.
- Odbačeni vodni skok** - javlja se na određenoj udaljenosti od građevine kada je druga konjugirana dubina veća od dubine donje vode: $h_2 > t$.

c) **Kritično, nestabilno stanje - prijelazni slučaj između potopljenoga i odbačenoga vodnog skoka.** U tom je slučaju druga konjugirana dubina jednaka dubini donje vode $h_2 = l$.

U praksi se redovito teži potapanju vodnoga skoka jer je u tom slučaju moguće racionalno dimenzionirati slapište.

Određivanje prve konjugirane dubine vodnoga skoka h_1 provodi se postavljanjem Bernoullijeve jednadžbe za presjke 0-0 i 1-1 prema slici 2.31:

$$H_0 = p + H_p + \frac{v_0^2}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \xi \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.159)$$

Članovi Bernoullijeve jednadžbe u presjeku 0-0 su poznati, pa se u daljnjim izračunima uzima njihov zbroj H_0 :

$$H_0 = (\xi + 1) \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (2.160)$$

Ako su preliv i slapište u pravokutnom koritu, onda je specifični dotok q (po tekućem metru širine korita):

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{v_1 A}{B} = \frac{v_1 h_1 B}{B} = v_1 h_1 \quad (2.161)$$

Iz (2.161) proizlazi da je brzina v_1 u prvome konjugiranom presjeku:

$$v_1 = \frac{q}{h_1} \quad (2.162)$$

Kada se izraz (2.162) uvrsti u (2.160) i dobije se:

$$H_0 = (\xi + 1) \frac{q^2}{2g h_1^2} + h_1 \quad (2.163)$$

Uz supstituciju $\xi = \frac{1}{\sqrt{\xi+1}}$ konačno se za prvu konjugiranu dubinu dobije:

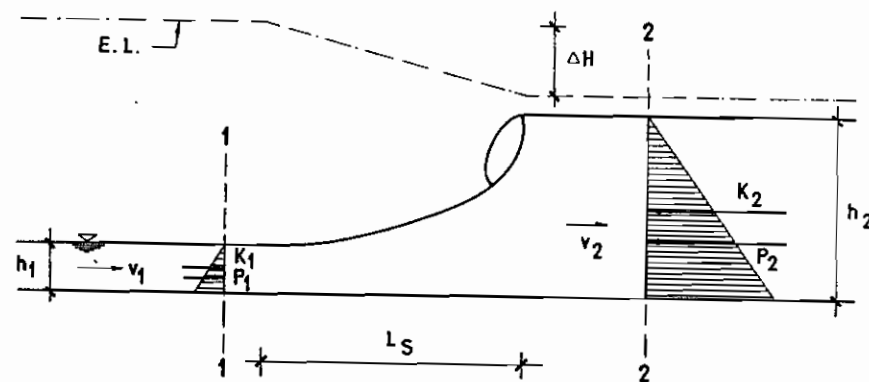
$$h_1 = \frac{q}{\xi \sqrt{2g (H_0 - h_1)}} \quad (2.164)$$

Koeficijent ξ se mijenja u granicama od 0,95 do 1,00; a najčešće se uzima kako njegova vrijednost iznosi približno 1,00.

Računanje prve konjugirane dubine vodnoga skoka prema izrazu (2.164) provodi se tako da se pretpostave dubine h_1 . Redovito je pritom potrebno provesti samo

nekoliko izračunskih koraka jer zbog korijena izraz (2.164) za h_1 vrlo brzo konvergira rješenju.

Druga konjugirana dubina izračunava se iz ravnoteže sila primjenom zakona održanja količine gibanja. Na slici 2.32 prikazan je uzdužni presjek vodotoka s vodnim skokom i silama koje su zbog primjene zakona održanja količine gibanja postavljene u ravnotežni položaj.



Slika 2.32 Vodni skok sa silama u ravnoteži

Za korito pravokutnoga poprečnog presjeka izračun se provodi na temelju specifičnoga protoka q (protok na jedinicu širine korita):

$$q = \frac{Q}{B} = v h$$

U presjecima 1-1 i 2-2 djeluju sile:

- nastale uslijed tlaka (prema dijagramu hidrostatičkoga tlaka):

$$p = \frac{\rho g}{2} h^2 \quad (2.165)$$

- nastale uslijed količine gibanja:

$$K = \rho q v = \rho \frac{q^2}{h} \quad (2.166)$$

$$\left(v = \frac{q}{h} \right)$$

Iz ravnoteže sila slijedi:

$$P_1 + K_1 = P_2 + K_2 \quad (2.167)$$

$$\frac{\rho g}{2} h_1^2 + \rho \frac{q^2}{h_1} = \frac{\rho g}{2} h_2^2 + \rho \frac{q^2}{h_2} \quad (2.168)$$

Izraz (2.168) potrebno je srediti; najprije se (2.168) dijeli s gustoćom tekućine ρ , pa se dobije:

$$\frac{1}{2} (h_2^2 - h_1^2) = \frac{q^2}{g} \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} \right) / 2 h_1 h_2$$

$$h_1 h_2 (h_2^2 - h_1^2) = \frac{2q^2}{g} (h_2 - h_1) / : h_1 (h_2 - h_1)$$

$$h_2^2 + h_1 h_2 - \frac{2q^2}{g h_1} = 0 \quad (2.169)$$

potom se uvrsti $q = v_1 h_1$:

$$h_2^2 + h_1 h_2 - 2 h_1^2 \frac{v_1^2}{g h_1} = 0 \quad (2.170)$$

pa iz ovoga izraza proizlazi da je druga konjugirana dubina h_2 :

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 2 h_1^2 \frac{v_1^2}{g h_1}}$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8 \frac{v_1^2}{g h_1}} \right) \quad (2.171)$$

U skladu s izrazom (2.137) može se pisati da je Froudeov broj u presjeku 1-1, u kojem je prva konjugirana dubina h_1 :

$$F_{r1} = \frac{v_1^2}{g h_1} \quad (2.172)$$

pa izraz (2.171) za izračun druge konjugirane dubine h_2 , nakon što se prva konjugirana dubina h_1 odredi na osnovi izraza (2.172), glasi:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8 F_{r1}} \right) \quad (2.173)$$

Duljina vodnoga skoka L_s može se odrediti prema Smetaninu iskustvenom izrazu (I. Smetana, 1933.):

$$L_s = 6 (h_2 - h_1) \quad (2.174)$$

Potrebna duljina slapišta L_{sl} , uz uvjet da je vodni skok potopljen, može se odrediti na temelju duljine vodnoga skoka L_s (V. Jović, 1977.):

$$L_{sl} = 1,1 L_s \quad (2.175)$$

Na kraju je važno napomenuti da se mirni tok nakon slapišta, ukoliko je $h_2 < t$ pa vodni skok nije potopljen, može osigurati potapanjem vodnoga skoka produbljivanjem slapišta. Ukoliko to ne zadovoljava, ili nije moguće dovoljno produbiti slapište, može se pokušati s drugim mjerama (proširenje slapišta, ugradnja uređaja za disipaciju mehaničke energije u slapištu - npr. betonski zubi, povišen izlazni prag iz slapišta i sl.).

2.6 Dimenzionalna analiza

Dimenzionalna analiza je postupak kojim se, na osnovi dimenzionalne homogenosti, definiraju ili provjeravaju matematički odnosi između fizikalnih veličina. Najvjerojatnije je prvi put bila primijenjena u hidrauličkim i hidrodinamičkim radovima Osbornea Reynoldsa u drugoj polovici osamnaestoga stoljeća. U Rusiji je opću teoriju te metode postavio A. Federman 1911. godine (I. I. Agroskin i dr. 1973.).

Dimenzionalna analiza je odigrala važnu ulogu u razvoju suvremene mehanike fluida. Zahvaljujući primjeni dimenzionalne analize provjerene su različite formule koje su preporučavali pojedini hidrauličari. Na taj je način mehanika fluida oslobođena mnogih ranije nagomilanih iskustvenih formula u slučajevima kad te formule nisu bile dimenzionalno homogene, pa nije imalo opravdanja općenito ih primjenjivati.

Za dimenzionalnu analizu je značajno da ona ne daje nešto novo u biti hidrauličkih procesa, nego pomaže u daljnjem proučavanju te biti, uz pretpostavku da je ona već poznata iz iskustva.

Postupak dimenzionalne analize provodi se na temelju **Buckinghamova teorema** (π -teorem), koji glasi: *Za fizikalni sustav od N polja, a koja su opisana s M dimenzija, sva se polja mogu prikazati s $N-M$ bezdimenzionalnih parametara.*

Navedeni se postupak može prikazati pomoću jednostavnog primjera:

Koristeći dimenzionalnu homogenost, treba naći matematički izraz za gubitak tlaka na jedinicu duljine cijevi $\frac{\Delta p}{L}$, koji ovisi o promjeru cijevi D , srednjoj brzini tekućine u cijevi v i gustoći tekućine ρ .

Prema tome je:

$$F\left(D, v, \rho, \frac{\Delta p}{L}\right) = 0 \quad (2.176)$$

Međusobni utjecaj različitih polja provodi se samo množenjem ili dijeljenjem dimenzija tih polja.

$$\pi = D^{x_1} v^{x_2} \rho^{x_3} \frac{\Delta p}{L} \quad (2.177)$$

Svako od navedenih četiriju polja u izrazu (2.176) treba zamijeniti s intenzitetom polja i dimenzijama polja, pa se nakon množenja svih intenziteta polja dobije:

$$\pi = (L)^{x_1} (LT^{-1})^{x_2} (ML^{-3})^{x_3} (ML^{-2}T^{-2}) = L^0 T^0 M^0 \quad (2.178)$$

U ovom su primjeru četiri polja predstavljena pomoću triju osnovnih dimenzija (L , T i M).

Da bi postojala jednakost, eksponenti svake osnovne dimenzije s obe strane jednadžbe (2.178) moraju biti jednaki. Eksponente prvo treba svesti na jednu osnovnu dimenziju pa se tada može pisati:

$$\begin{aligned} L^{x_1+x_2-3x_3-2} &= L^0 \\ T^{-x_2-2} &= T^0 \\ M^{x_3+1} &= M^0 \end{aligned}$$

Odgovarajuće jednadžbe su:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 - 3x_3 - 2 &= 0 \\ x_2 + 2 &= 0 \\ x_3 + 1 &= 0 \end{aligned}$$

Rješenja jednadžbi su:

$$x_1 = 1; \quad x_2 = -2; \quad x_3 = -1$$

Ova se rješenja uvrste u izraz (2.176) i dobije se:

$$\pi = D^1 v^{-2} \rho^{-1} \left(\frac{\Delta p}{L}\right)$$

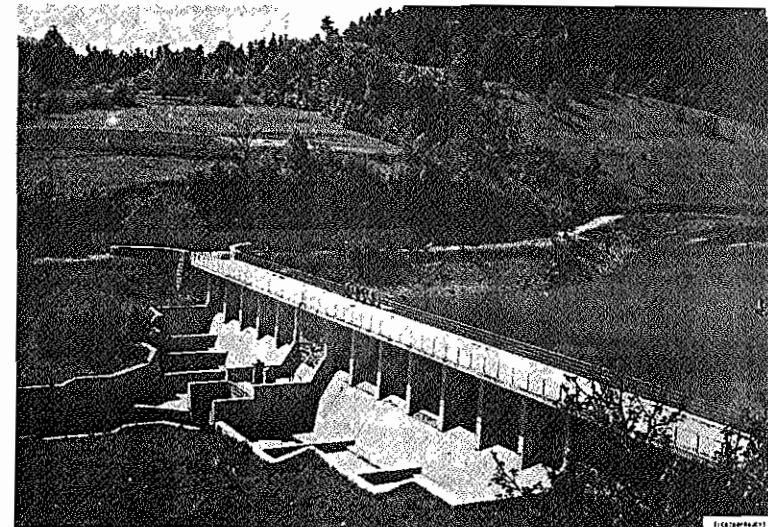
iz čega proizlazi da je formula za gubitak tlaka na jedinici dužine cijevi:

$$\frac{\Delta p}{L} = \left(\frac{v^2 \rho}{D}\right) \quad (2.179)$$

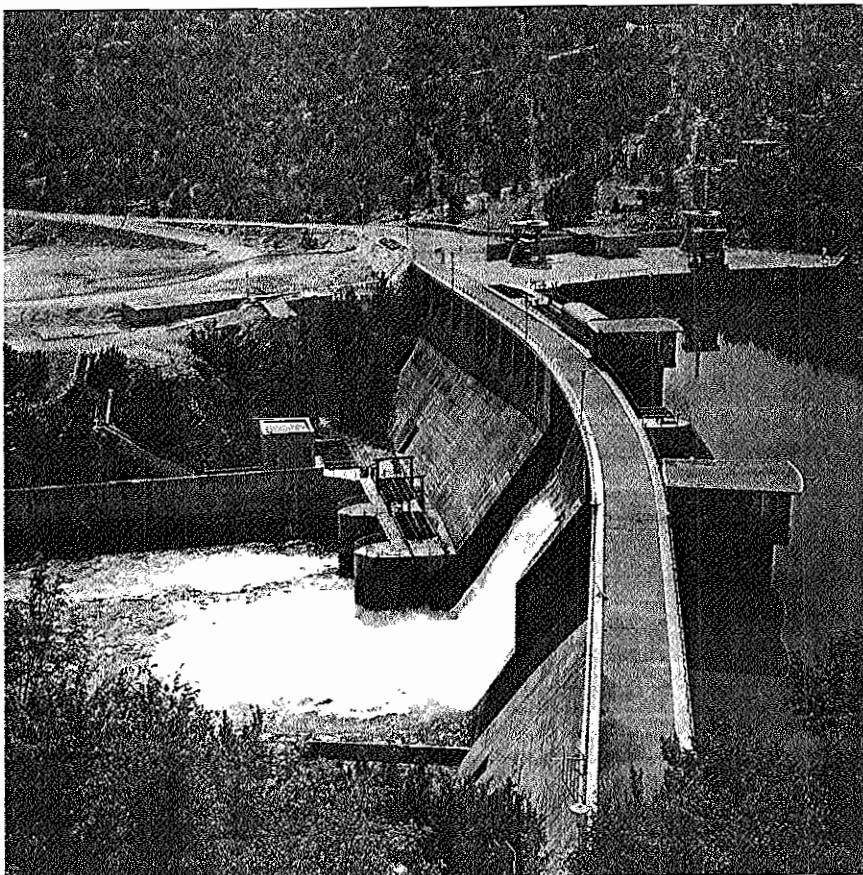
U hidrologiji se dimenzionalna analiza primjenjuje prvenstveno za ispitivanje dimenzionalne homogenosti iskustvenih formula, a potom i za provjeru teorijskih formula iz literature koje je onda, ako se ustanove pogreške u dimenzijama, moguće popraviti na odgovarajući način.

Neke hidrološke iskustvene formule - naročito one za izračun velikih voda - nisu dimenzionalno homogene, već su u njima međusobni odnosi neovisnih i ovisne varijable usklađeni različitim koeficijentima. Ustanovljavanje dimenzionalne nehomogenosti kod takvih formula ne mora nužno značiti da ih treba odbaciti, ali upućuje na oprez pri njihovu korištenju. Rezultate izračuna po dimenzionalno nehomogenim formulama neophodno je provjeriti na više različitih načina ili primjenom nekoliko različitih formula.

Na kraju treba napomenuti da je dimenzionalnom analizom moguće odrediti međusobne odnose samo nekih dimenzija. Nije moguće odrediti veličine bezdimenzionalnih koeficijenata, već njihove veličine treba poznavati iz iskustva. Primjerice, kontrolom dimenzija brzinske visine $h = \frac{v^2}{2g}$ lako se ustanovljava odnos dimenzija $\frac{L^2 T^{-2}}{L T^{-2}} = L$, ali konstanta 2 u formuli mora biti unaprijed poznata.



Slika 2.33 Brana Bajer na Ličanki (M. Žugaj, 1957.)



Slika 2.34 Brana Prančevići na Cetini (prospekt Elektroprojekta, 1979.)

3 OSNOVE METEOROLOGIJE

3.1 Uvod

Meteorologija je grana geofizike koja se bavi Zemljinom atmosferom proučavajući procese i pojave koji se u njoj odvijaju. Kao i druge znanosti, meteorologija se razvijala postupno, a ovdje se ukratko navodi nekoliko bitnih podataka o njezinu razvoju.

Meteorološkim fenomenima vezanim uz hidrologiju bavi se **hidrometeorologija**, koja proučava promjene u atmosferi i na Zemlji u hidrološkome ciklusu, izvodeći njihove međusobne zakonitosti.

Počeci meteorologije - slično kao i počeci hidrologije - sežu u stari vijek; već u drevnoj Kini, Indiji, Egiptu i Grčkoj prikupljali su se podaci o vjetrovima i oborinama. Smatra se da je osnivač meteorologije Aristotel, budući da je on napisao prvi udžbenik meteorologije.

U ljetopisima iz srednjega vijeka postoje zapisi o tadašnjim vremenskim pojavama i značajnim nepogodama, ali mjerenja meteoroloških veličina nema sve do 17. stoljeća.

Prva meteorološka motrenja i mjerenja pomoću instrumenata poduzimaju u drugoj polovici 17. stoljeća Galilejevi učenici na akademiji u Firenzi. U 17. stoljeću razvijaju se fizikalne znanosti (naročito termodinamika). Uvode se ljestvice na termometrima (G. D. Fahrenheit i A. Celsius), a E. Halley izvodi na osnovi Boyle-Marriotteova zakona formulu za izračun visine nekog mjesta na temelju mjerenja tlaka zraka.

Krajem 18. stoljeća H. D. Saussure u Alpama ispituje promjene meteoroloških elemenata s visinom. U 19. stoljeću H. Helmholtz počinje u meteorologiji primjenjivati principe i zakone mehanike fluida, dajući tako zamah naglome razvoju meteorologije (D. Poje, 1982.a).

U 20. stoljeću, a naročito nakon Drugoga svjetskog rata, mreža meteoroloških stanica se povećava, a meteorološki podaci i odgovarajući zaključci na osnovi njihovih obrada postaju neophodni u privredi, industriji, tehnici te hidrologiji.

U Hrvatskoj se regularna mreža meteoroloških stanica počinje po uzoru na austrijsku službu osnovati u drugoj polovici 19. stoljeća. Do 1900. godine dio je prikupljenih meteoroloških podataka pripadao austrijskoj meteorološkoj službi, dio mađarskoj službi, a dio je bio u mornarici i kod privatnika. Tek su 1901. godine prikupljeni meteorološki podaci stavljeni pod nadzor Meteorološkoga opservatorija Zagreb Grič¹, čiji je predstojnik A. Mohorovičić iste godine provjerio i objavio te podatke.

¹ Prva meteorološka mjerenja započeo je 1. Stožir 1.12.1861. godine.

U Prvome svjetskom ratu mreža meteoroloških stanica u Hrvatskoj jako se smanjila pa se nakon 1920. godine počinje s ujezinom obnovom. U Drugome svjetskom ratu stradao je također popriličan broj stanica, tako da je 1947. godine - kada je osnovan Republički hidrometeorološki zavod - u Hrvatskoj radilo pedesetak klimatoloških² i četrdesetak kišomjernih stanica (K. Pandžić i dr., 1998.). Od osnivanja, 1947. godine, pa sve do danas, Republički hidrometeorološki zavod neprekinuto radi, a 1991. mijenja naziv u Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske. (U pogl. 1.4 također se navodi promjena naziva ovoga Zavoda vezana uz njegov odjel za hidrološka istraživanja.)

Meteorologija se dijeli na četiri samostalne discipline:

- Fizička meteorologija (opća meteorologija)** bavi se općim zakonima atmosferskih pojava i procesa.
- Sinoptička meteorologija** analizira atmosferske procese sinoptičkom metodom. Na temelju analize vremena i niza fizikalnih podataka te primjenom numeričkih modela izrađuje se prognoza vremena.
- Klimatologija**, na osnovi rezultata višegodišnjih promatranja stanja vremena, metodama matematičke statistike određuje prosječno stanje za dulje razdoblje, odnosno definira klimu pojedinih mjesta i područja.
- Aerologija** se bavi metodama mjerenja za proučavanje procesa u slobodnoj atmosferi (iznad prizemnog sloja) do visine od oko 40 km. Najniži - prizemni sloj atmosfere - proučava **mikrometeorologija**, a **biometeorologija** se bavi utjecajima atmosfere na biljni i životinjski svijet, dok se dio koji se odnosi na čovjeka naziva **medicinskom meteorologijom** (D. Poje, 1982.a).

Atmosfera je plinoviti omotač oko Zemlje. Približna gornja granica atmosfere nalazi se na visini od oko 1000 km. S gornje strane atmosfera nije oštro ograničena, jer je zbog djelovanja gravitacije prizemni dio atmosfere gust, a gustoća zraka se s visinom postupno smanjuje. Usvojeno je da ukupna masa zraka iznosi $5,27 \cdot 10^{18}$ kg (I. Penzar i B. Penzar 1989.).

Atmosfera se sastoji od četiriju glavnih i triju prijelaznih slojeva.

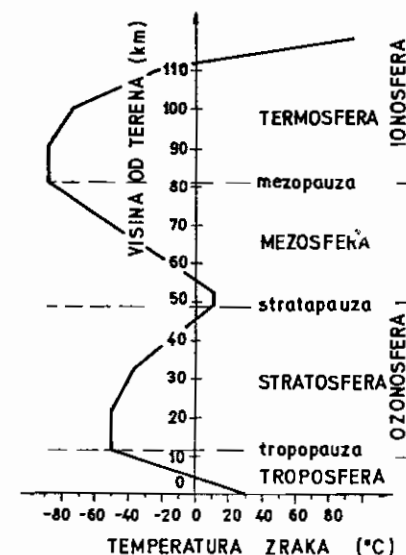
- Troposfera** je najniži sloj atmosfere, čija se debljina mijenja od približno 9 km (na polovima) do oko 17 km (na ekvatoru). Ona prihvaća isparenu vodu koja se tu hladi i vraća natrag na Zemlju. U troposferi se strujanja zraka kreću u horizontalnom i vertikalnom smjeru, tako da su ta strujanja uglavnom turbulentna. Zrak se u troposferi sastoji od 78 posto dušika, 21 posto kisika i 1 posto plemenitih plinova. Ovdje se zbivaju svi meteorološki i hidrološki značajni procesi. Između troposfere i sljedećega sloja, stratosfere, nalazi se uzak prijelazni pojas - **tropopauza**.

² Klimatoloških ili meteoroloških stanica - ovisno o njihovoj opremljenosti - ima sedam vrsta: meteorološki opservatorij, glavna, referentna, planinska i obična klimatološka stanica, te stanica za posebne namjene i kišomjerna stanica.

- Stratosfera** se nalazi iznad troposfere i udaljena je približno 50 km od Zemljine površine. Gibanja zraka u stratosferi su praktički horizontalna, pa ako u njezin donji dio uđe neki onečišćivač (dim iz vulkana ili freoni), on će se tamo zadržati mjesecima. Na gornjemu kraju stratosfere nalazi se prijelazni sloj - **stratopauza**.
- Mezosfera** je sloj atmosfere na visini od 50 do 80 km u kojemu se temperatura naglo smanjuje. Gornja granica mezofere - **mezopauza** - s temperaturom od oko -90 °C, najhladniji je dio atmosfere.
- Termosfera** počinje 80 km iznad Zemlje i u njoj je zrak vrlo rijedak, a dnevne su promjene temperature vrlo velike.

Na ulazu u atmosferu Sunčevo zračenje ioniziranjem kisika i dušika izbijaju elektrone iz njihovih atoma, pa tako nastaje **ionosfera** u kojoj se mogu širiti radiovalovi.

Na slici 3.1 prikazana je podjela atmosfere i vertikalna raspodjela temperature zraka.



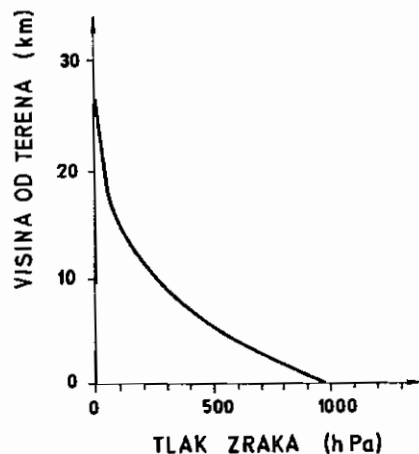
Slika 3.1 Promjena temperature s visinom u atmosferi (W. L. Donn, 1975.)

Molekule plinova od kojih se sastoji zrak stalno se gibaju i zbog toga neprekidno udaraju u predmete koji su u atmosferi. Ti su udari tako česti da djeluju kao neprekidna sila. Zrak je tekućina (fluid), pa ne može preuzeti tangencijalne napone. Zbog toga navedena sila uvijek djeluje okomito na površine predmeta u atmosferi i naziva se **tlak zraka** ili **atmosferski tlak**. Tlak se zraka računa obzirom na jedinicu površine i jednak je težini stupca zraka od te površine do gornje granice atmosfere. Jedinica za mjerenje atmosferskoga tlaka je hektopaskal (hPa), a dozvoljena je i upotreba jedinice milibar (mbar), koja po svojoj vrijednosti odgovara hektopaskalu.

U standardnoj atmosferi tlak zraka na razini mora iznosi 1013 hPa (1013 mbar) što odgovara visini stupca žive od 760 mm. (10 m V.S.).

Gustoća zraka ρ_z je 773 puta manja od gustoće vode ($\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$), a ovisi o njegovoj temperaturi, tlaku i vlažnosti. Suhi zrak na 45° geografske širine, pri temperaturi od 0 °C i tlaku od 1013 hPa, ima gustoću $\rho_z = 1,293 \text{ kg/m}^3$.

Atmosferski se tlak smanjuje s porastom visine, kao što je prikazano na slici 3.2. U blizini Zemljine površine može se uzeti da povećanje visine od 8 m uzrokuje smanjenje tlaka za približno 1 hPa.



Slika 3.2 Promjena atmosferskoga tlaka s visinom

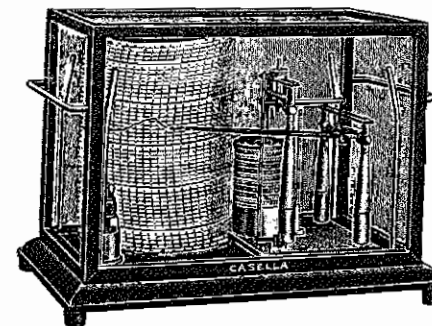
Tlak se zraka mjeri **živinim barometrima i aneroidima**.

Živin barometar radi na principu određivanja duljine stupca žive koji je u ravnoteži sa stupcem zraka istoga poprečnog presjeka i visine do gornje granice atmosfere. Barometarska se čitanja moraju popraviti naviše ili naniže za učinak temperature zraka u odnosu na standardnu kalibracijsku temperaturu.

Aneroid je metalni barometar, odnosno instrument sa sustavom opruga koje pružaju otpor sili tlaka zraka. U kutiji aneroida nalazi se razrijedeni zrak koji služi za izjednačavanje temperature, pa zato očitavanja veličine tlaka na aneroidu ne treba reducirati na 0 °C.

Veličine tlaka zraka bilježe se neprekidno (kontinuirano) na instrumentu koji se naziva **barograf**, a radi na principu aneroida (slika 3.3).

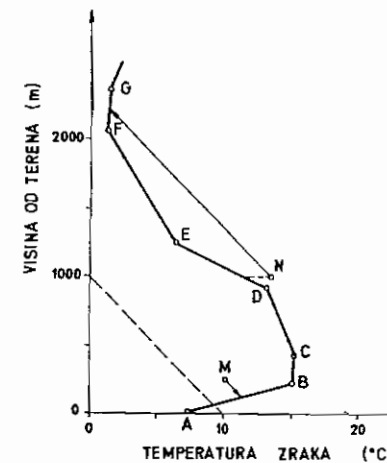
Vertikalna ili kosa strujanja u atmosferi zbivaju se **adijabatski**. U adijabatskome se procesu za povećanje volumena čestice zraka troši unutrašnja energija, pa se zbog toga čestice hlade. Nasuprot tome, pri adijabatskome stlačivanju unutrašnja se energija povećava, a temperatura čestice raste.



Slika 3.3 Barograf (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

Stabilnost atmosfere ovisi o uspravnome rasporedu temperature (temperaturni profil). Najstabilniji su slojevi atmosfere u kojima postoji **temperaturna inverzija** (porast temperature s visinom) ili **temperaturna izotermija** (temperatura se ne mijenja s visinom). Ako se temperatura zraka smanjuje s visinom za više od 1°C na 100 m, atmosfera u tom sloju je labilna. Labilna atmosfera pojačava vertikalna strujanja zraka, a stabilna ih prigušuje.

Na slici 3.4 prikazan je primjer temperaturnoga profila visine 2500 m. Od A do B je temperaturna inverzija; od B do C, te od F do G je temperaturna izotermija i u tim je slojevima atmosfera stabilna. U sloju od D do E temperatura zraka prilično naglo pada, što uzrokuje nestabilnost atmosfere. Čestica zraka M spušta se iz hladnijega sloja prema toplijem, a čestica N će se iz toplijega dijela atmosfere dizati prema hladnijem.



Slika 3.4 Primjer krivulje atmosferskoga stanja sa slojevima različite stabilnosti (B. Penzar, i sur., 1996.)

Klima ili **podneblje** je prosječno stanje atmosfere nad nekim područjem Zemljine površine u određenome razdoblju. Klima ovisi o klimatskim elementima, koji su meteorološke prirode, te o zemljopisnim faktorima.

Glavni se elementi klime sastoje od gibanja zraka (vjetra, temperatura zraka, atmosferska vlaga) te oborina svih vrsta (kiša, snijeg, led itd.). S hidrološkoga stajališta najzanimljiviji element su oborine, prvenstveno njihov postanak i raspored u vremenu i prostoru.

U atmosferi meteorološki faktori zajednički definiraju vrijeme i klimu. **Klimatologija** je jedna od disciplina meteorologije, koja na osnovi rezultata višegodišnjih promatranja stanja vremena metodama matematičke statistike određuje prosječno stanje za dulje razdoblje, odnosno definira klimu pojedinih mjesta i područja.

Prema tome, klima je rezultat prosjeka dugovremenih meteoroloških zbivanja.

Vrijeme je trenutno zbivanje u atmosferi.

Obzirom na temperaturu klima može biti: tropska, arktička itd., a po geografskome položaju područja razlikuju se primorska, kontinentalna klima itd.

S hidrološkoga se stajališta, klima određuje na temelju vlage u zraku. **Atmosferska vlaga** je samo vodena para pomiješana s ostalim plinovima u atmosferi, a pritom se kapljice vode i led izuzimaju. **Relativna vlažnost** je odnos postotka stvarnoga tlaka vodene pare i postotka tlaka vodene pare zasićenoga zraka pri nepromijenjenoj temperaturi.

Na osnovi prosječne vrijednosti relativne vlažnosti u zraku definirano je pet vrsta klime:

1. **Perhumidna klima** - relativna vlažnost u zraku iznosi preko 80 posto; u njoj raste tropsko bilje.
2. **Humidna klima** - 60 - 80 posto relativne vlažnosti; pogoduje rastu lisnatoga drveća.
3. **Subhumidna klima** - 40 - 60 posto relativne vlažnosti; pretežno travnata područja (npr. u Mongoliji).
4. **Semi-aridna klima** - 20 - 40 posto relativne vlažnosti; trnovito stepsko bilje niska uzrasta i rijetko raspoređeno po području.
5. **Aridna klima** - ispod 20 posto relativne vlažnosti; područja gotovo bez bilja.

3.2 Strujanja u atmosferi

Od strujanja u atmosferi i meteoroloških pojava najvažnije su ciklone i anticiklone. Njihovo je glavno svojstvo karakterističan tlak zraka, a kreću se uglavnom određenim smjerovima, pri čemu zna doći do izvjesnih poremećaja.

Ciklone ili **deprese** su područja niskoga tlaka zraka u atmosferi u izvan-tropskome pojasu, s minimumom u središtu. Javljaju se u širokim prostorima u kojima se naglo snižava tlak zraka, pa se zbog toga formiraju spiralni vrtlozi u kojima zrak

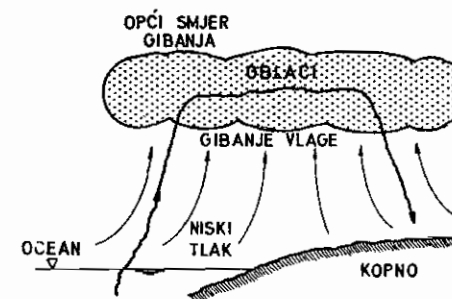
struji u smjeru suprotnome od smjera kazaljke na satu. Red veličine promjera razvijene ciklone je 1000 km. Uslijed sniženoga tlaka ciklone uzrokuju naoblaku i kišu, pa su one bitne za prijenos vlage i postanak oborina (slika 3.5a). Obično traju desetak dana

Za Srednju i Južnu Europu, pa tako i za Hrvatsku, velik utjecaj na klimu i postanak oborina imaju **Islandska** (nastaje u hladnom dijelu godine iznad Islanda i Grönlanda) i **Denovska ciklona** (nastaje i zadržava se iznad Sredozemnoga mora). Najniži tlak u cikloni bio je zabilježen 1924. godine u Reykjaviku i iznosio je 920 hPa (normalan tlak zraka iznosi 1013 hPa) (O. Bonaeci, 1994.a).

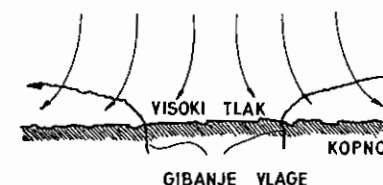
Anticiklone su područja visokoga tlaka u atmosferi, s maksimumom u središtu. One snažno pritišću prizemni sloj iznad kojega se formiraju i na taj način povećavaju uobičajeni tlak na tom području. Strujanje zraka u anticiklonama odvija se u smjeru kazaljke na satu, a one uzrokuju stabilno i lijepo vrijeme (slika 3.5b).

U našim krajevima djeluju **Azorska anticiklona** koja uzrokuje lijepo vrijeme i **Sibirska anticiklona**, koja uzrokuje lijepo sunčano ili hladno zimsko vrijeme. Najviši tlak u središtu Sibirske anticiklone zabilježen je u siječnju 1900. godine i, sveden na razinu mora, iznosio je 1080 hPa.

a) CIKLONA

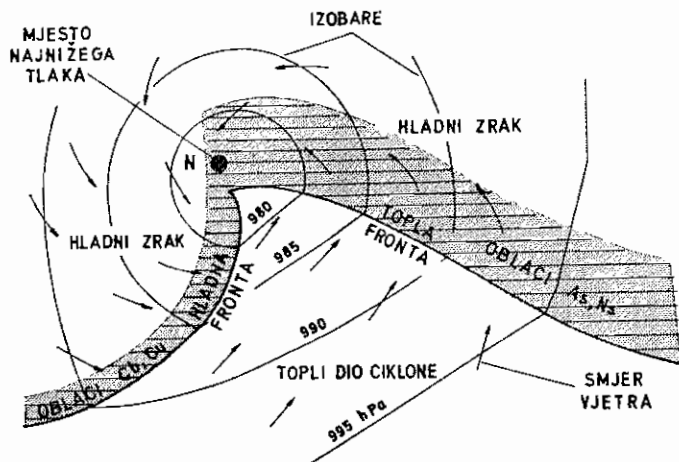


b) ANTICIKLONA



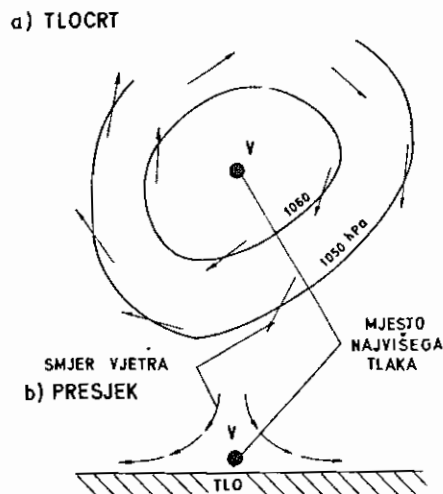
Slika 3.5 Premještanje vlage unutar ciklone (a) i gubitak vlage unutar anticiklone (b) (L. Bravar i M. L. Kavvas, 1991.)

Na slici 3.6 prikazan je tlocrt ciklone s izobarama (**izobara** je krivulja koja spaja mjesta jednake tlaka zraka), smjerovima vjetra te hladnom i toplom frontom. *N* je mjesto najnižega tlaka, a zatamnjena područja označavaju mjesta na kojima pada oborina.



Slika 3.6 Tlocrt ciklone (prema B. Penzar i sur., 1996.)

Na slici 3.7 prikazani su tlocrt s izobarama i smjerovima vjetra, te presjek anticiklone. *V* je mjesto najvišega tlaka.

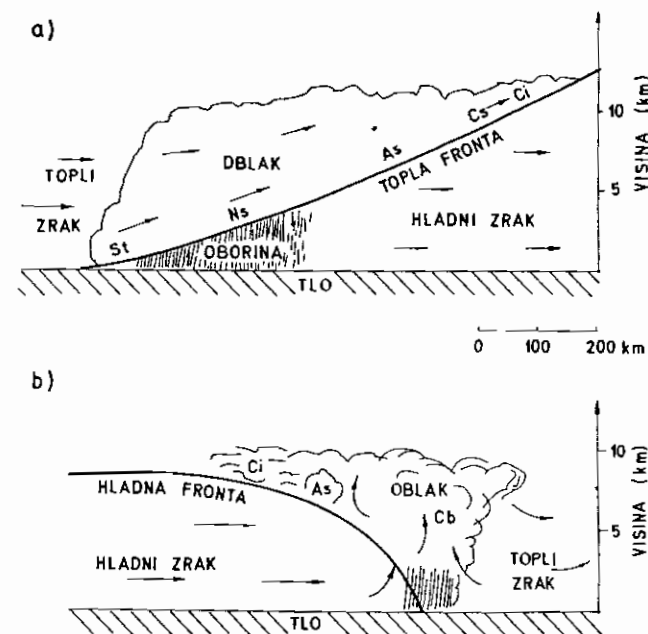


Slika 3.7 Tlocrt i presjek anticiklone (B. Penzar, i sur. 1996.)

Kruženje **zračnih masa** u atmosferi nastaje uslijed nejednolika grijanja i hlađenja površine Zemlje, zbog čega se one ne zadržavaju u svojim **izvorišnim područjima**. **Frontalna ploha** je granica između različitih zračnih masa i njezina širina obično iznosi 10 - 15 km. U prostoru je uvijek koso položena, tako da je nagnuta (pod ostrim kutom) prema hladnome zraku. Linija presjecišta frontalne plohe (koja je razvijena u atmosferi) s površinom Zemlje naziva se **fronta**. Pod pojmom **stvaranja fronte** ili **frontogeneze** podrazumijeva se proces oblikovanja i nestajanja toplih i hladnih fronta. Fronte se razvijaju isključivo u ciklonama (O. Bonacci, 1994.a). Prema tome, fronta je prijelomni sloj između dviju zračnih masa nejednakih temperatura. Razlikuju se tri vrste fronta:

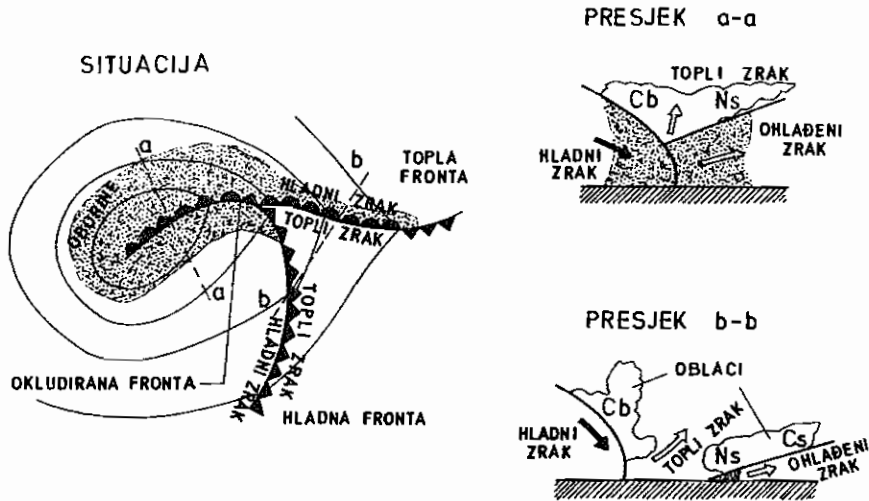
1. **topla fronta**, koja nastupa kada na mjesto hladnoga zraka dolazi topli
2. **hladna fronta**, kada hladni zrak prodire na mjesto toplog
3. **okluzija**, koja se javlja u razvijenoj fazi ciklone.

Na slici 3.8 prikazani su presjeci kroz toplu i hladnu frontu. Označene vrste oblaka su: *St* - Stratus (daje slabu oborinu ali rijetko), *Ns* - Nimbostratus (daje trajnu, jednoličnu oborinu), *As* - Altostratus (daje vrlo slabu oborinu), *Cs* - Cirrostratus (ne daje oborinu); *Ci* - Cirrus (ne daje oborinu); *Cb* - Cumulonimbus (daje pljuskovite oborine ali rijetko).



Slika 3.8 Presjeci kroz a) toplu i b) hladnu frontu s oblacima, oborinom i smjerovima strujanja (B. Penzar i sur., 1996.)

Okluzija ili okludirana fronta javlja se u razvijenoj fazi ciklone (slika 3.9). Obično nastaje kada hladna fronta sustigne toplu. Promjer okluzije može biti do 300 km. (Oznake oblaka opisane su na primjeru slike 3.8).



Slika 3.9 Razvoj okludirane fronte u cikloni (O. Bonacci, 1994.a)

Budući da je topli zrak pun vlage potisnut u gornje hladne slojeve, naglo se stvaraju oblaci i dolazi do obilne kiše ovisno o zasićenosti zraka. Nakon stvaranja potpune okluzije ciklona zamire, odnosno nestaje.

3.3 Zračenje Sunca i Zemlje

Sunčevo zračenje je izvor energije i atmosfere i Zemlje, pa je prema tome najvažniji meteorološki element.

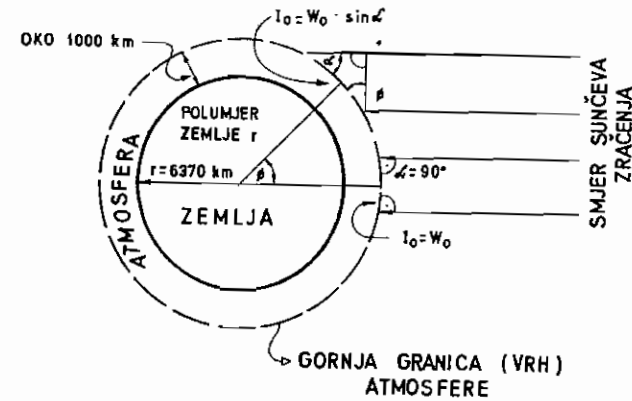
Za pokretanje procesa koji se odvijaju na Zemlji najveći dio energije emitira se sa Sunca, a znatno manji utjecaj imaju izvori energije iz unutrašnjosti Zemlje. Procjenjuje se da temperatura Sunčeve površine iznosi oko 6000 K. Apsolutna se temperatura izražava u Kelvinima (K) i njezin odnos s temperaturom u stupnjevima Celzijusa (°C) je:

$$K = °C + 273,15 \quad (3.1)$$

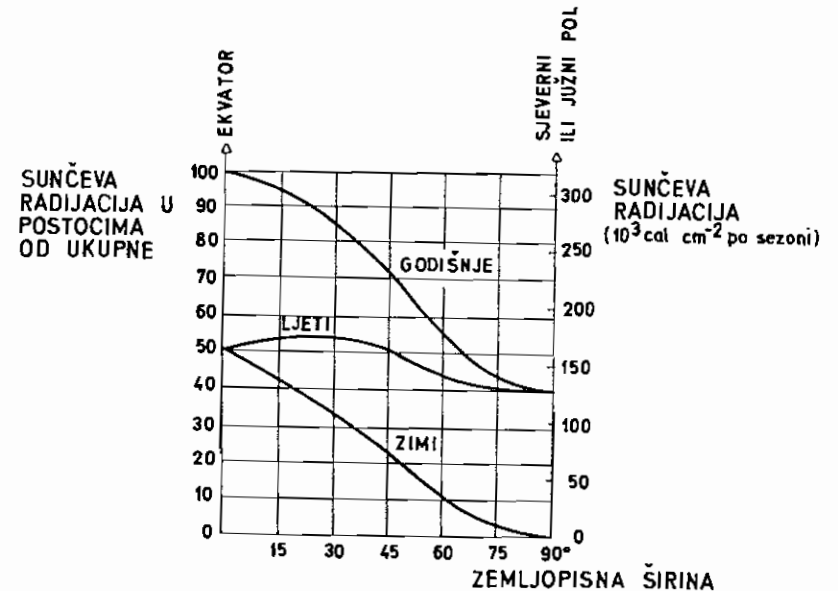
Budući da Sunce svoju energiju emitira radijalno, Sunčevo se zračenje često naziva **radijacijom**. Od ukupne emitirane energije sa Sunca na Zemlju dolazi tek oko $5 \cdot 10^{-10}$ posto. Budući da se udaljenost Zemlje od Sunca tijekom godine mijenja, u geofiziku je uveden pojam **solarne konstante** W_0 , standardne mjere zračenja sa Sunca. **Intenzitet efektivne radijacije** I_0 u nekoj točki je:

$$I_0 = W_0 \sin \alpha \quad (3.2)$$

gdje je α kut koji ulaz zračenja sa Sunca tvori s gornjom granicom atmosfere. Prema Svjetskoj meteorološkoj organizaciji (WMO) vrijednost solarne konstante je $W_0 = 83,0 \text{ kJm}^{-2}\text{min}^{-1}$ ($1 \text{ J} = 0,239 \text{ cal}$). Projekcija Sunčeva zračenja na plohlu tangencijalnu na gornju granicu atmosfere dana je na slici 3.10.



Slika 3.10 Projekcija solarnoga zračenja na tangencijalnu ravninu na gornjoj granici atmosfere (O. Bonacci, 1994.a).



Slika 3.11 Varijacije zračenja sa Sunca na gornjoj granici atmosfere (C. J. Wiesner, 1970.).

Energija koja tijekom dana sa Sunca dolazi na gornju granicu atmosfere ovisi o trima čimbenicima:

1. udaljenosti Zemlje od Sunca
2. kutu upada Sunčevih zraka na površinu Zemlje
3. duljini svijetloga dijela dana.

Na gornjoj granici atmosfere radijacija sa Sunca ima vrlo velike varijacije ovisno o zemljopisnoj širini i godišnjemu dobu, kao što je prikazano na slici 3.11.

Sunčeva energija pri svom ulasku u atmosferu uvelike ovisi o zemljopisnoj širini i godišnjem dobu i na taj način nastaje **solarna klima**. Pod utjecajem **klimatskih čimbenika (modifikatora)**, koji se po svojem značaju dijele na tri reda i posebne čimbenike, iz solarne se klime oblikuje **realna (stvarna) klima** na Zemljinoj površini.

Čimbenici prvoga reda su:

- a) procesi u atmosferi
- b) nejednolika raspodjela kopna i mora na površini Zemlje
- c) veličina, oblik i razvednost kontinenata.

Čimbenici drugoga reda su:

- a) visina i smjer pružanja planinskih lanaca
- b) reljef zemljišta i položaj mjesta u odnosu na Sunce.

Čimbenici trećega reda su:

- a) vegetacija
- b) jezera
- c) gradovi
- d) snježni pokrivač.

Posebni čimbenici klime, čiji je utjecaj vrlo velik, su:

- a) atmosfera
- b) rotacija Zemlje.

Razlikuju se dva tipa Sunčeva zračenja:

1. **elektromagnetsko zračenje**
2. **zračenje čestica ili korpuskularno zračenje.**

Elektromagnetsko zračenje (valne duljine od $0,3 \cdot 10^{-4}$ do $3 \cdot 10^{-4}$ cm) je neprekidno, približno istoga intenziteta te stalne brzine širenja i ono je u Sunčevu zračenju dominantno. Zračenje čestica čija je energija promjenljiva je zanemarivo u odnosu na elektromagnetsko zračenje.

Sunce zrači uglavnom kratkovalni dio spektra. Atmosfera selektivno preuzima elektromagnetske valove čija je valna duljina $0,2 - 0,4 \mu$ ($1 \mu = 10^{-6} m$) (T. Šegota i A. Filipčić, 1996.), pri čemu primarnu ulogu imaju ugljični dioksid i vodena para. Na Zemlju stiže samo jedan dio energije Sunca koji uđe u atmosferu, a drugi dio se odbija, apsorbira ili raspršuje. Odnos odbijene (reflektirane) radijacije i ukupne upadne kratkovalne radijacije koja dopiže na površinu Zemlje naziva se **albedo** i označava simbolom *a*.

Tablica 3.1 Ukupno zračenje Sunca (gramkolorija po cm^2 na dan) (C. L. Wiesner, 1970.)

ZEMLJOPISNA ŠIRINA	DATUM U GODINI															
	21. III	13. IV	6. V	29. V	22. VI	15. VII	8. VIII	31. VIII	23. IX	16. X	8. XI	30. XI	22. XII	13. XI	4. II	26. II
90°		436	795	1029	1109	1024	788	431	158	7	25	74	50	75	25	7
80°	160	436	783	1014	1092	1009	777	431	158	133	25	210	181	211	150	135
70°	316	541	771	967	1042	962	764	535	312	281	150	210	181	211	150	284
60°	460	654	833	962	1008	957	825	648	455	426	295	358	326	361	298	432
50°	592	754	893	987	1019	983	885	747	585	561	442	507	480	509	447	570
40°	707	831	937	1001	1021	996	928	822	697	561	442	507	480	509	447	570
30°	798	891	957	996	1004	989	949	882	788	683	581	507	480	509	447	570
20°	866	921	951	963	963	958	943	911	856	783	706	646	623	649	712	792
10°	908	924	920	907	899	903	913	914	897	860	813	770	755	775	819	870
0°	922	899	862	828	814	824	855	889	912	913	898	877	868	881	904	923
10°	908	849	783	728	708	725	776	838	897	937	954	959	961	964	964	949
20°	866	773	680	611	584	608	674	763	856	934	987	1017	1029	1023	997	946
30°	798	674	559	479	449	477	554	665	788	903	993	1051	1072	1056	1002	915
40°	707	554	425	339	306	338	421	549	697	844	972	1058	1091	1063	982	853
50°	592	420	284	199	170	198	282	416	585	765	928	1044	1088	1048	936	775
60°	460	277	144	70	48	70	143	274	455	663	865	1113	1077	1022	872	672
70°	316	131	24	70	48	70	24	130	312	548	801	1023	1113	1028	809	555
80°	166	7	24	70	48	70	24	7	158	442	814	1072	1166	1077	820	447
90°											825	1088	1183	1094	833	447

Tlo i atmosfera reflektiraju dio Sunčeve energije u obliku dugovalnoga zračenja (trecstričko zračenje), valnih duljina 3 - 50 mm, što odgovara infracrvenome dijelu spektra.

Kao relativni i bezdimenzionalni odnos, albedo ili koeficijent refleksije pokazuje dio energije koji se nakon odbijanja s površine Zemlje izravno vraća u atmosferu. Dio Sunčeve energije koji dolazi do površine Zemlje R_z može se izračunati pomoću iskustvene formule:

$$R_z = R_c (0,803 - 0,340 C - 0,458 C^2) \quad (3.3)$$

gdje je R_c vrijednost ukupna zračenja Sunca na ulasku u atmosferu koja se ovisno o zemljopisnoj širini i danu u godini, određuje prema vrijednostima u tablici 3.1, a C je dio neba prekriven oblacima (u dijelovima jedinice).

Energija koju tijelo na površini Zemlje prima R_E dobije se kada se od energije koja dopre do površine Zemlje R_z oduzme albedo a , prema izrazu:

$$R_E = R_z (1 - a) \quad (3.4)$$

U tablici 3.2 dane su različite vrijednosti albeda u prirodi.

Tablica 3.2 Albedo nekih podloga u prirodi (izbor iz T. Šegota i A. Filipčić, 1996.)

Površina	Albedo a (%)	Površina	Albedo a (%)
svježi snijeg	70 - 90	asfalt	15
stari snijeg	40 - 70	zelena trava	16 - 27
snijeg koji kopni	30 - 65	suha trava	16 - 19
oblaci	5 - 81	grad kao cjelina	10 - 20
riječni kvarcni pijesak	29	crnogorična šuma	6 - 19
granit	12 - 18	bjelogorična šuma	16 - 27

Trajanje sijanja Sunca (insolacije) mjeri se **heliografima**. Na slici 3.12 prikazan je Campbell-Stokesov heliograf. Taj se instrument sastoji od pune staklene kugle promjera 10 cm koja služi kao zbirna leća. Nakon prolaska kroz kuglu Sunčeve se zrake fokusiraju i spaljuju crni papir. Kako Sunce putuje po nebeskome svodu, trag paljenja se po traci pomiče u suprotnome smjeru od smjere gibanja Sunca. Prema duljini spaljenoga traga na traci određuje se trajanje insolacije u toku dana.

Osim heliografa - kojima se mjeri trajanje sijanja Sunca - postoje još četiri skupine instrumenata za mjerenje zračenja Sunca: izravno se zračenje mjeri **pirheliometrima** (Sunčeve zrake upadaju okomito na prijamnu plohu mjernoga instrumenta), raspršeno se zračenje mjeri **difuzometrima** (prijamna je ploha okrenuta prema gore i zasjenjena od izravnoga obasjavanja), ukupno ili globalno zračenje se mjeri **piranometrima**



Slika 3.12 Campbell-Stokesov heliograf (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

(prijamna ploha je horizontalna i okrenuta prema gore, te nije zasjenjena), a odbijeno se zračenje mjeri **albedometrima** (prijamna je ploha horizontalna, okrenuta prema terenu na visini od 2 m).

Za mjerenje osvijetljenja rabe se **luksometri**, kod kojih kao prijamni dio najčešće služi fotonaponska ćelija.

Zemlja zrači energiju približno kao crno tijelo i gotovo cijeli njezin spektar spada u dugovalno zračenje. Temperatura Zemlje iznosi 250 - 300 K. Dominantnu ulogu u apsorpiranju dugovalne radijacije u atmosferi igra vodena para, odnosno vlaga u atmosferi. Zračenje Zemlje traje neprekidno i ono zagrijava prizemni sloj zraka. Uloga atmosfere u određivanju energetske bilance Zemlje izuzetno je važna jer ona svojim protuzračenjem štiti Zemlju od hladenja. (Bez atmosfere temperatura na Zemlji bila bi niža nego sada za oko 40 °C.)

U novije vrijeme na znanstvenoj se osnovi razmatra i zagrijavanje Zemlje izazvano antropogenim čimbenicima - ispuštanjem industrijskih i agrotehničkih plinova (greenhouse gases) u atmosferu, te pojačanim tzv. **efektom staklenika** - i moguće klimatske promjene.

Efekt staklenika i inače je jedno od važnih svojstava atmosfere, bitno za sve oblike života na Zemlji. Bez njega bi Zemlja bila oko 30 °C hladnija i život kakav je danas na njoj ne bi bio moguć (O. Bonacci, 1994.).

Očekuje se da bi u današnje vrijeme pojačana emisija plinova koji izazivaju pojačani efekt staklenika mogla utjecati na povišenje temperature na Zemlji u cjelini. U atmosferi su, u odnosu na predindustrijsko razdoblje, značajno povećane koncentracije ugljičnoga dioksida, metana, dušičnoga monoksida i kloro-fluorouglikovodika (O. Bonacci, 1995.).

Prosječna temperatura zraka danas je oko 0,5 °C viša od prosječne temperature zraka u 19. stoljeću. Postojećim klimatskim modelima nije moguće obuhvatiti sve vrlo složene klimatske uvjete na Zemlji, što u velikoj mjeri smanjuje realnost i pouzdanost prognoza dugoročnih klimatskih promjena. Za 21. stoljeće se pretpostavlja da će uvjeti biti topliji od onih u 20. stoljeću, ali pritom prvenstveno treba imati na umu vrlo veliku prirodnu varijabilnost klime i vrlo velike razlike u klimatskim karakteristikama na Zemlji. Suvremeni klimatski modeli predviđaju porast temperature zraka za nekoliko Celzijevih stupnjeva, a to bi moglo imati dalekosežne posljedice za život na Zemlji (K. Pandžić i dr. 1993.).

Količina topline koja može prispjeti na Zemlju ovisi o intenzitetu radijacije Sunca, položaju promatranoga mjesta obzirom na Sunce, ukupnoj udaljenosti Zemlje od Sunca i kutu upada toplinskih zraka na promatrano mjesto.

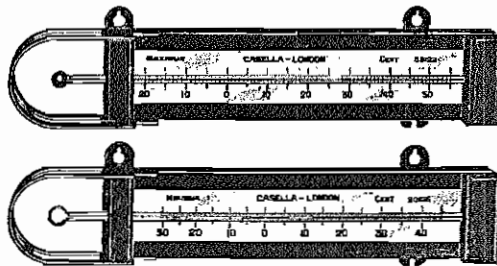
Temperatura zraka je podložna promjenama u kratkim vremenskim razdobljima, a mjeri se s točnošću do jedne desetine stupnja (°C).

U mreži meteoroloških stanica u Hrvatskoj za mjerenje temperatura zraka koriste se:

- obični živin termometar
- maksimalni živin i minimalni alkoholni termometar³
- termograf.

Važno je napomenuti da postoje suhi i mokri termometri, koji su sastavni dio psihrometra. Psihrometar je meteorološki instrument za određivanje relativne vlažnosti, a opisan je u poglavlju 3.4.

Maksimalni i minimalni termometar prikazani su na slici 3.13.



Slika 3.13 Maksimalni i minimalni termometar (Meteorological Instruments, Casella, 1963)

U maksimalnome termometru živa ulazi u proširenu cjevčicu (slika 3.13 a) pa se, nakon što dosegne najvišu temperaturu, više ne može vratiti. Zbog toga je maksimalni termometar prije ponovnoga mjerenja potrebno protresti.

³ U praksi se često rabe i nazivi maksimum termometar i minimum termometar. Bolji nazivi bili bi termometar maksimuma i termometar minimuma koji se ne rabe.

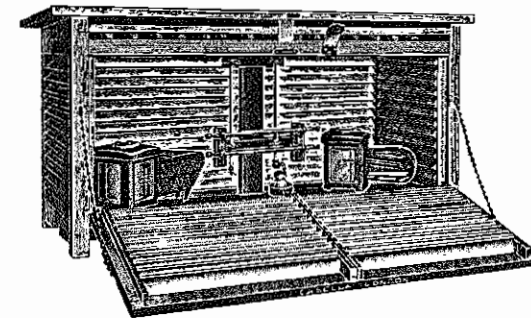
U minimalnom se termometru (slika 3.13 b) nalazi etilni alkohol koji stvara meniskus u kapilari. Alkohol vuče štapić - indeks - prema rezervoaru i indeks ostaje kod najniže temperature. Za vrijeme mjerenja minimalni termometar mora biti horizontalan, a kada se postavi vertikalno, indeks doklizi do meniskusa alkohola i tada je minimalni termometar pripremljen za novo mjerenje.

Na osnovi motrenja najviše i najniže temperature zraka u jednome danu na maksimalnome t_M i minimalnome termometru t_m srednja dnevna temperatura t je:

$$t = \frac{t_M + t_m}{2} \quad (3.5)$$

Temperatura zraka može se bilježiti i neprekidno, instrumentom koji se zove **termograf**. Termograf sadržava bimetalni prsten koji služi kao senzor i na temelju njegova širenja i sužavanja na odgovarajućoj se traci bilježi temperatura. Traka se mijenja jedanput dnevno, a zapis temperatura zraka na traci naziva se **termogram**. Kada se termogram za pojedini dan integrira, odredi se srednja dnevna temperatura.

Termometre i termograf se zaštićuje smještanjem u meteorološki zaklon, koji je prikazan na slici 3.14, a taj se zaklon (termometrijska kućica) redovito postavlja 2 m iznad terena.



Slika 3.14 Meteorološki zaklon (slijeva nadesno: higrograf, maksimalni i minimalni termometar, higrometar i termograf) (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

Amplituda (raspon) ili opseg mjesečne temperature zraka je razlika između najviše i najniže temperature zraka u mjesecu.

Srednja godišnja temperatura zraka St_g je prosjek (aritmetička sredina) srednjih mjesečnih temperatura zraka dotične godine:

$$St_g = \frac{St_{mi} + St_{mII} + St_{mIII} + \dots + St_{mXII}}{12} \quad (3.6)$$

Normalna godišnja temperatura zraka Nt_r je prosjek srednjih godišnjih temperatura zraka St_k u nizu od n godina:

$$Nt_r = \frac{St_{k1} + St_{k2} + \dots + St_{kn}}{n} \quad (3.7)$$

Važan element toplotne bilance zemljišta i prizemnoga sloja zraka je temperatura zemljišta i nju se mjeri **geotermometrima** na standardnim dubinama od 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm. Kočbanje se temperature s dubinom smanjuje, a ovisi i o tome je li tlo prekriveno vegetacijom. Tlo s vegetacijom zagrijava se manje od tla koje nije prekriveno vegetacijom. Utjecaj vegetacije na temperaturu tla osjeća se do dubine od približno 50 cm.

Hidrološkim istraživanjima mogu biti zanimljivi i podaci o temperaturi vode. Temperatura vode mjeri se običnim termometrom s donjom granicom od 0 °C do -5 °C. Termometri za mjerenje temperature vode radi zaštite se ugrađuju u metalni oklop. Na dnu oklopa izvedena je izbušena zaštitna čašica kako bi voda mogla kolati oko donjega dijela termometra. Mjerenje temperature vode provodi se redovito jedanput dnevno u sredini riječnoga toka, a za vrijeme mjerenja termometar se na određenoj dubini zadržava tri do pet minuta.

3.4 Vlaga u atmosferi

Vlaga u atmosferi je isključivo vodena para, odnosno voda u plinovitoj stanju i stoga predstavlja jedan od plinova koji tvore smjesu zraka. Vlaga je rezultat isparavanja vode i funkcionalno je povezana s temperaturom. Pri višoj temperaturi isparavanje je jače, pa više vodene pare može dospjeti u atmosferu. Vlaga u atmosferi bitan je element stvaranja oborina.

Vlažnost zraka izražava se pomoću sljedećih pet pojmova:

- 1) **apsolutne vlažnosti** a_v (g/m³)
- 2) **relativne vlažnosti** R (%)
- 3) **deficita zasićenosti ili deficita vlažnosti** D (%), (mbar)
- 4) **tlaka vodene pare** e (mbar)
- 5) **točke rose ili rosišta** τ (°C)

ad 1) **Apsolutna vlažnost** a_v je masa vodene pare u jedinici volumena zraka (g/m³).

Ova se veličina ne koristi u praktične svrhe, jer se do nje teško dolazi čak i u laboratorijskim uvjetima.

Apsolutna vlažnost je:

$$a_v = \frac{e}{T} 217 \quad (3.8)$$

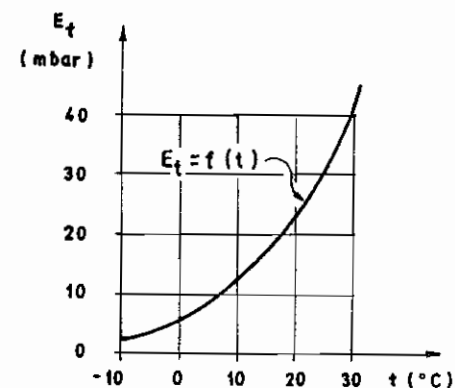
gdje je e (mbar) tlak vodene pare, a T (°C) apsolutna temperatura.

ad 2) **Relativna vlažnost** R je, kao što je ranije rečeno, odnos postoitka stvarnoga tlaka vodene pare e i tlaka vodene pare zasićenoga zraka E_t pri nepromijenjenoj temperaturi t .

$$R = 100 \frac{e}{E_t} \quad (3.9)$$

Tablica 3.3 Tlak vodene pare zasićenoga zraka E_t pri različitim temperaturama zraka t

t (°C)	- 10	0	4	10	20	30
E_t (mbar)	2,87	6,10	8,13	12,3	23,4	42,4



Slika 3.15 Tlak vodene pare zasićenoga zraka E_t u ovisnosti o temperaturi zraka t

ad 3) **Deficit vlažnosti** D predstavlja manjak vodene pare u zraku do potpuna zasićenja. Deficit vlažnosti je najveći u toplome dijelu godine.

$$D = 100 - R \quad (\%) \quad (3.10a)$$

$$D = E_t - e \quad (\text{mbar}) \quad (3.10b)$$

Povećanjem deficita vlažnosti raste mogućnost isparavanja.

ad 4) **Tlak vodene pare** e je razlika tlaka zraka koji sadržava vodenu paru p_u i tlaka suhoga zraka p' , a određuje se izrazom:

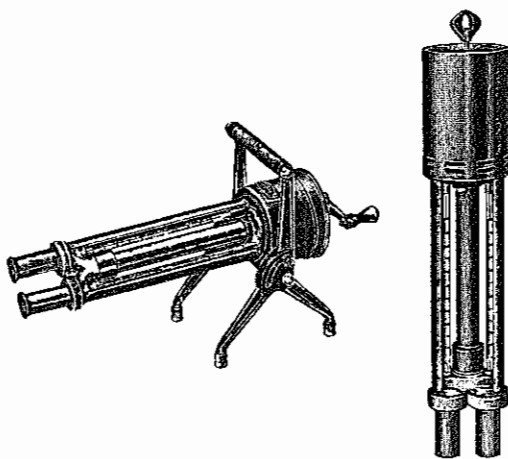
$$e = p_u - p' \quad (\text{mbar}) \quad (3.11)$$

Zrak je zasićen (saturiran) kada jedinica volumena zraka sadržava maksimalnu

količinu vodene pare pri promatranoj temperaturi. Kada u jedinici volumena zraka ima više vodene pare nego što je potrebno za puno zasićenje, zrak je supersaturiran.

ad 5) **Rosište** τ ($^{\circ}\text{C}$) je temperatura do koje se zrak mora hladiti pri konstantnom tlaku zraka i konstantnoj specifičnoj vlazi da nastupi kondenzacija. U tom je slučaju $e = E_s$ i dolazi do pojave rose.

Instrumenti za mjerenje vlage u zraku nazivaju se **psihrometrima**. Najstariji je Augustov psihrometar, koji se sastoji od suhoga (običnog) i mokroga (rezervoar žive omotan musclinom navlaženim destiliranom vodom) termometra. Termometri se nalaze na stalku, a Augustov psihrometar se smješta u meteorološki zaklon. Može se koristiti i instrument s usisivačem zraka, tzv. aspiracijski psihrometar. Za prijenos na terenu naročito je pogodan Assmanov psihrometar, prikazan na slici 3.16.



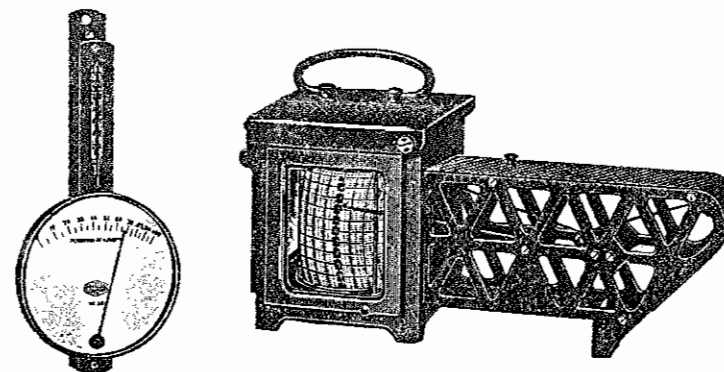
Slika 3.16 Assmanov psihrometar (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

Kod mokroga termometra temperatura je niža nego kod suhoga ili jednaka njegovoj, pa se iz razlike tih temperatura određuje vlažnost na temelju psihometrijske formule, čiji je osnovni oblik:

$$e = E_s - A (t_s - t_m) H \quad (3.12)$$

gdje su: e tlak vodene pare; E_s tlak vodene pare zasićenoga zraka pri temperaturi t_s , A konstanta ovisna o brzini ventilacije; t_s temperatura suhoga termometra, t_m temperatura mokroga termometra i H tlak zraka (stanje barometra).

Vlaga u zraku može se mjeriti i **higrometrom** (slika 3.17). Higrometar mjeri vlažnost na osnovi stezanja i rastezanja ljudske kose i izravno pokazuje vlažnost zraka. Pri temperaturama zraka nižim od 0°C higrometar je točniji od psihrometra.



Slika 3.17 Higrometar i higrograf s ljudskom kosom (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

3.5 Vjetar

Vjetar se definira kao horizontalno strujanje zraka u atmosferi, a razmjerno mala vertikalna komponenta strujanja se zanemaruje. Karakteristično je da se brzina vjetra mjeri instrumentima (anemometar, anemograf) kojima se može jedino mjeriti horizontalno gibanje zraka. Zbog hrapavosti podloge i fizikalnih svojstava zraka strujanje vjetra je turbulentno. Uloga vjetra važna je u stvaranju oborina. Strujanje zraka izazvano je razlikama u zagrijavanju raznih predjela na površini Zemlje (S. Škreb i dr., 1942.).

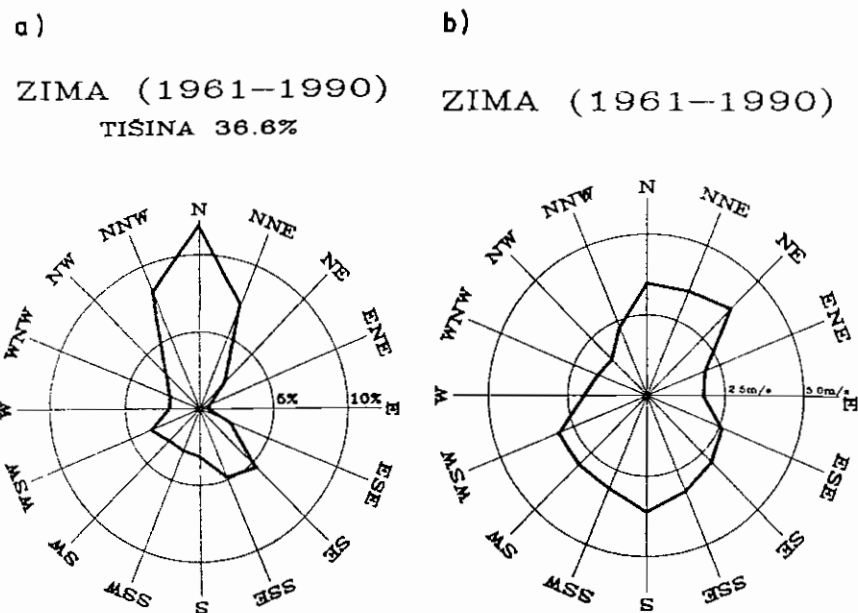
Vjetar je vektorska veličina određena smjerom i jačinom. Zbog značaja u procesima isparavanja i izmjene temperature, vjetar ima važnu ulogu u stvaranju oborina. Jačina vjetra izražava se prema Beaufortovoj (Boforovoj) skali i iznosi od 0 do 17 bofora (tablica 3.4).

Smjer vjetra se označava u odnosu na strane svijeta s kojih zrak struji. Podjela se sastoji iz 8, 16 ili 32 smjerova sukladnih podjeli na kompasu. Grafički prikaz tih smjerova uz naznaku tišine (kad nema vjetra) naziva se **ružom čestine (učestalosti) smjerova vjetra**.

Postoje dva tipa ruže vjetrova: **ruža brzina vjetra** i **ruža čestina (učestalosti) smjerova vjetra**. Na slici 3.18 prikazane su ruže vjetrova učestalosti i srednje brzine vjetra za meteorološku stanicu Gospić za zimu u razdoblju od 1961. do 1990. godine.

Ako postoje mjerenja, u Hrvatskoj se koriste podaci 30 godišnjeg razdoblja od 1961. do 1990. godine, a često puta u praksi zadovoljava razdoblje od 10 godina.

Ruže čestina smjerova vjetra važne su zbog ekoloških posljedica djelovanja prvenstveno velikih industrijskih objekata, a ruže brzina vjetra važne su za dimenzioniranje građevinskih objekata (npr. visoki dimnjaci, mostovi).



Slika 3.18 Gospić: ruže čestina smjerova (a) i brzine (b) vjetra

Tablica 3.4 Podjela vjetrova po jačini - izraženo u beaufortima (B)

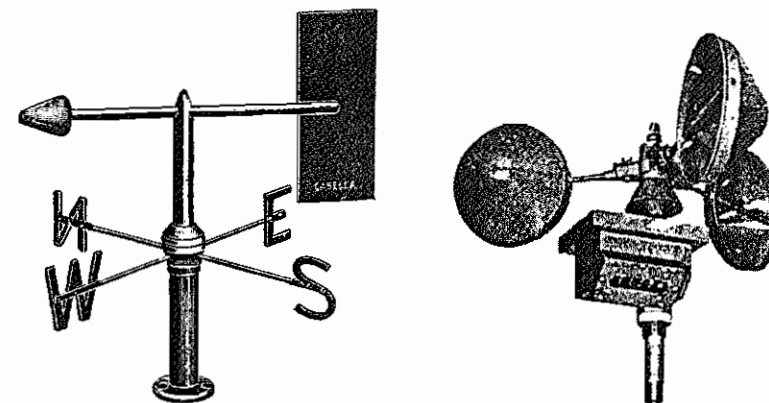
Stupanj jačine (B)	Naziv vjetra	Srednja brzina v (m/s)	Glavni učinci vjetra na kopnu
0	tišina	0 - 0,2	dim ide uspravno uvis
1	lagani povjetarac	0,3 - 1,5	smjer po dimu
2	povjetarac	1,6 - 3,3	osjeća se na licu
3	slabi vjetar	3,4 - 5,4	lišće se njiše
4	umjereni vjetar	5,5 - 7,9	podize prašinu
5	umjereni jak vjetar	8,0 - 10,7	njišu se tanja stabla
6	jaki vjetar	10,8 - 13,8	njišu se velike grane
7	vrlo jak vjetar	13,9 - 17,1	njišu se stabla
8	olujni vjetar	17,2 - 20,7	lome se grane
9	oluja	20,8 - 24,4	laka oštećenja zgrada
10	žestoka oluja	24,5 - 28,4	čupa drveće; velike štete
11	orkanska oluja	28,5 - 32,6	velika razaranja
12	orkan	32,7 - 36,9	katastrofalna razaranja
13-17	uraganski vjetar	37,0 - 61,2	katastrofalna razaranja

(Izvorna Beaufortova podjela je od 1 do 12 B.)

Formula za izračun srednje brzine vjetra v (m/s) na temelju srednje mjesečne jačine vjetra u beaufortima (B) je:

$$v = 0,835 \sqrt{B^3} \quad (\text{m/s}) \quad (3.13)$$

Smjer vjetra određuje se **vjetrokazom** ili vjetrovljom. *Instrument za mjerenje brzine vjetra ili mjerenje brzine i smjera vjetra je anemometar*, a *instrument za neprekidno bilježenje smjera i brzine vjetra zove se anemograf*. Na slici 3.19 prikazani su vjetrokaz, anemometar i anemograf.



Slika 3.19 Vjetrokaz i anemometar (Meteorological Instruments, Casella, 1963.) i shematski prikaz anemografa

U Hrvatskoj se rabi Fuessov anemograf. Traka Fuessova anemografa ima 10-minutnu podjelu, a njime se mjere tri karakteristike vjetra. Na prvome, gornjemu dijelu trake označeni su smjerovi puhanja vjetra, u srednjemu dijelu je označen prevaljeni put (cjelokupni interval na traci je 10 km), a na trećemu, donjem dijelu trake bilježe se brzine vjetra.

U Hrvatskoj su moguće pojave vrlo jakih vjetrova; u Kutini je, primjericice, zabilježena brzina vjetra od 46 m/s; u području Bakarskoga zaljeva 1983. godine čak 54,3 m/s; a na Palagruži je jedna zabilježena brzina juga iznosila preko 50 m/s (D. Poje, 1985.).

3.6 Isparavanje - evapotranspiracija

Isparavanje ili **evaporacija** je *prelaženje vode u atmosferu u obliku vodene pare sa slobodne vodne površine, iz tla i s površine biljaka*.

Osnovni čimbenici isparavanja su meteorološke prirode: temperatura zraka, temperatura vode, vjetar, deficit vlažnosti zraka, intenzitet Sunčeva sijanja i nadmorska

visina ili atmosferski tlak, te kemijske osobine vode i fizikalni činitelji - osobine površina s kojih se vrši isparavanje.

Evapotranspiracija je zajednički naziv za isparavanje vode s tla i iz biljaka, odnosno količina vode koja je iz tla otišla u atmosferu isparavanjem i transpiracijom biljaka. Razlikuju se **moguća (potencijalna) i stvarna (realna) evapotranspiracija**. **Moguća evapotranspiracija** je maksimalna moguća evapotranspiracija i nije ograničena količinom vode, a **stvarna evapotranspiracija** ili **deficit otjecanja** je kumulativna razlika između oborina palih na sliv i otjecanja.

Postoji pet oblika isparavanja:

- isparavanje sa slobodne vodne površine
- isparavanje s gola tla
- isparavanje s tla zaštićena vegetacijom
- isparavanje prekinute oborine (od različitih zapreka)
- transpiracija bilja.

Ovih pet oblika isparavanja zajedno čini ukupnu potrošnju vode na isparavanje. Isparavanje je odlazak vodene pare sa slobodne (otvorene) površine pri temperaturi nižoj od temperature vrenja, a pri povišenoj temperaturi podloge i zraka. Za jačega vjetra ili kada je zrak suh isparavanje se odvija brže nego kada je vjetar slab, a zrak vlažan.

Glavna se razlika između isparavanja s vodne površine i transpiracije sastoji iz toga što je isparavanje s vodne površine stalno, dok isparavanje iz bilja ovisi o količini raspoložive vode u tlu i događa se danju kada su pore otvorene.

Dok količine palih oborina znatno variraju od godine do godine, isparavanje je stalniji proces, naročito isparavanje s površina koje imaju mogućnost nadoknađivanja vode. Osim o temperaturi, tlaku vodene pare, brzini vjetra i količini vlage, isparavanje ovisi i o kakvoći vode. Isparavanje mineraliziranih voda smanjuje se za postotak mineralizacije i to vrijedi do 30 posto mineralizacije. Čista voda isparava više od morske vode.

Najvažniji čimbenici koji djeluju na isparavanje su deficit vlage u zraku i temperatura. Znatna utjecaj ima i dubina vode, te razlika u temperaturi između vode i zraka. Isparavanje prekinute oborine (djelovanje kuća, vegetacije, cesta i sl.) može biti i do 25 posto manje od isparavanja bez prekidanja. Gusto bilje može zadržati i do 200 mm vode godišnje, ali kod gola, pjeskovita tla isparavanje može biti praktički jednako onome sa slobodne vodne površine, ako je razina podzemne vode toliko visoka da voda može kapilarno putovati. Ako tlo nije zasićeno vodom (saturirano), isparavanje ovisi o razini podzemne vode i količini koja dopijeva u područje korijena biljaka. Ako se podzemna voda nalazi 150 - 300 cm ispod površine tla, odnosno ispod korijena biljaka, ona neće isparavati.

Deficit (manjak) vlage je bitan činitelj koji određuje isparavanje. Sposobnost zraka da primi vodenu paru povećava se s povećanjem temperature.

Isparavanje je izravno proporcionalno deficitu vlažnosti D , a obrnuto proporcionalno barometarskom tlaku B . Za isparavanje E J. Dalton je postavio odnos:

$$E = c \frac{D}{B} \quad (3.14)$$

gdje je c koeficijent.

U tablici 3.4 izneseni su karakteristični hidrometeorološki parametri za dva klimatski različita područja.

Tablica 3.5 Karakteristični hidrometeorološki parametri različitih klimatskih područja (O. Bonacci, 1984.)

Redni broj	Karakteristični parametar	Višegodišnji presjek (mm)	
		aridna klima (Irak)	humidna klima (Nizozemska)
(1)	Bruto oborina P	150	750
(2)	Evaporacija (sa slobodne vod. površ.)	2250	650
(3)	Moguća evapotranspiracija	1850	525
(4)	Stvarna evapotranspiracija	100	450
(5)	Otjecanje P_e (efektivna oborina) (1) - (4)	50	300

Prosječni otjecajni koeficijent c , definiran kao odnos efektivne i bruto oborine je:

$$\text{za Irak: } c = \frac{P_e}{P} = \frac{50}{150} = 0,33 \quad (3.15)$$

$$\text{za Nizozemsku: } c = \frac{P_e}{P} = \frac{300}{750} = 0,40 \quad (3.15a)$$

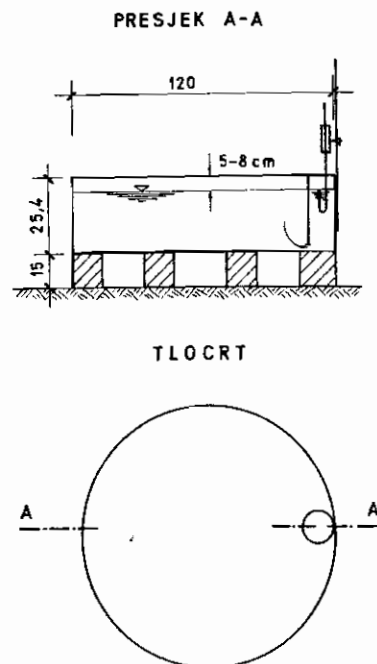
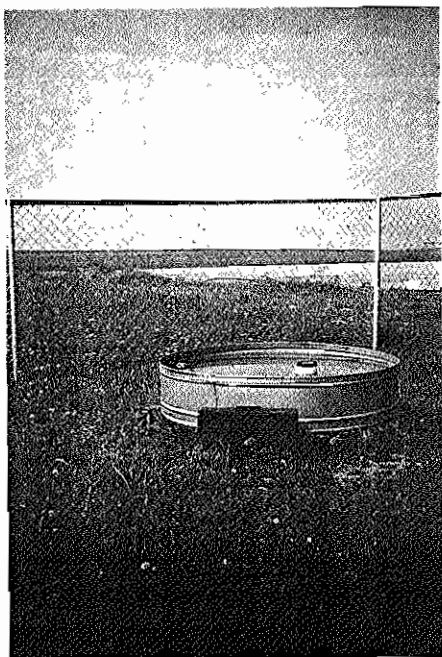
Instrumenti za mjerenje količine vode koja u određenome vremenskom intervalu ispari u atmosferu nazivaju se isparitelji ili evaprimetri. Najstariji isparitelj je Wildov, a kod nas se rabe Picheov isparitelj (slika 3.20) i isparitelj klase (tipa) A (slika 3.21).

Na Picheovu se isparitelju dnevne količine isparene vode određuju od 7 sati jednoga do 7 sati drugoga dana, a razine vode u isparitelju očitavaju se u 7 i 19 sati svakoga dana. Isparitelj se vješa u meteorološku kućicu, a sastoji se iz savinute cijevi promjera 1 cm, s uskim prolazom za zrak, koji ulazi u isparitelj mjehurić po mjehurić i ispunjava prazninu nastalu uslijed isparavanja kroz upijajući papir. Skala za očitavanje na cijevi dana je u mm ili cm^3 .



Slika 3.20 Picheov isparitelj s ravnom cijevi (Meteorological Instruments, Casella, 1963.)

Isparitelji s vodne površine su posude različitih dimenzija napunjene vodom, koje mogu biti postavljene na drveno postolje (roštilj) na površini zemlje, ukopane u zemlju ili postavljene na plutajuću splav na vodenoj površini.



Slika 3.21 Isparitelj klase A (fotografija J. Milković, 1999.)

Isparitelj klase A mjeri isparavanja sa slobodne vodne površine, a određivanje isparene vode i očitavanja provode se kao i kod Picheova isparitelja. Posuda isparitelja klase A u kojoj se nalazi voda promjera je 120 cm, dubina joj je 25 cm, a ukoliko nije ukopan, postavlja se 15 cm iznad terena na drveno postolje kako bi zrak mogao slobodno strujati ispod isparitelja. U isparitelju se nalazi komora za umirenje vode, koju čini valjkasta posuda promjera 9 cm i visine 20 cm, a stoji na valjkastome postolju na trima vijcima koji omogućavaju postavljanje komore u horizontalan položaj. Prilikom mjerenja u posudu se komore stavlja mikrometerski vijak kojim se mjeri količina isparene vode iz isparitelja (mm) između dva uzastopna mjerenja. Voda u isparitelju ne smije biti u sjeni, a životinjama i pticama mora biti onemogućen pristup.

Redovito se isparitelj klase A postavlja unutar meteorološke stanice u kojoj se obavezno nalazi i kišomjer, a često i ombrograf, te instrumenti za mjerenje temperature zraka, tlaka zraka i brzine vjeta (po propisu 2 m iznad terena), a po potrebi se mjere trajanje sijanja Sunca i ukupno (globalno) zračenje Sunca. U isparitelju se obavezno mjeri temperatura vode.

Osim isparitelja klase A često se rabi i isparitelj GGI 3000 koji je ukopan u zemlju, te bazen ukopan u zemlju standardne površine 20 m². Dosad provedena ispitivanja pokazala su da se najbolji rezultati postižu mjerenjima u bazenima površine 20 m². Te su vrijednosti najbliže stvarnim vrijednostima isparavanja iz akumulacijskih jezera (WMO, 1966. i 1973.).

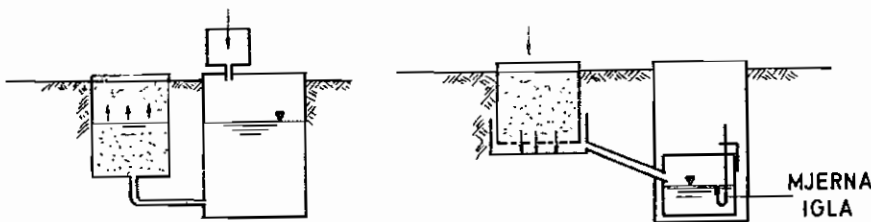
No taj način mjerenja ujedno je i najteži i najskuplji.

Mjerenja ispariteljem klase A imaju određene prednosti. Isparitelj klase A razmjerno je jeftin, jednostavno ga je postaviti i održavati, lako se primijeti ako posuda isparitelja postavljenoga na drveno postolje propušta vodu i može ga se jednostavno i brzo pokrpati. Glavni mu je nedostatak da daje uvećane vrijednosti isparavanja. Prema preporukama Svjetske meteorološke organizacije (WMO, 1966. i 1973.), izravno dobivene podatke isparavanja za korištenje u daljnjim izračunima treba ispraviti pomoću koeficijenta redukcije za preračunavanje u vrijednosti isparavanja s akumulacijskih jezera. Veličina se koeficijenta redukcije mijenja tijekom sezone mjerenja, a njegova srednja vrijednost u umjerenome geografskom području - u kojemu se nalazi i Hrvatska - iznosi $k = 0,70$ (J. Milković, 1999.).

Uređaj kojim se mjeri ukupna evapotranspiracija, odnosno transpiracija bilja i isparavanje tla, naziva se **lizimetar**. Prema tome, lizimetrom se evapotranspiracija mjeri neposredno iz tla. Shematski prikaz jedne vrste lizimetra dan je na slici 3.22.

Lizimetar se sastoji iz čelične posude ispunjene zemljom i različitom vegetacijom (ukoliko se izostavi vegetacija, dobivaju se podaci o isparavanju s gola tla). Lizimetar ima perforirano dno i poseban rezervoar za skupljanje ocedne vode. Potrošnja vode određuje se mjerenjem količine vode koja je potrebna za održavanje stalne vlažnosti tla u posudi lizimetra. Što je površina lizimetra veća, mjerenje je sigurnije. Lizimetri mogu imati dubinu i do 3,0 m, a površina im može biti do 20 m². Uz lizimetar se uvijek mora nalaziti i kišomjer.

a) BEZ PERFORIRANOGA DNA b) S PERFORIRANIM DNOM



Slika 3.22 Lizimetar

U Hrvatskoj se za agrometeorološka mjerenja najčešće upotrebljavaju Popovljevi mjerni i Garnierov volumenski lizimetar.

Općenito se mjerenja isparavanja provode na razmjerno malome broju meteoroloških stanica, a naročito je malo izmjerenih podataka o evapotranspiraciji (lizimetarski podaci). Motrenja se redovito ne provode sustavno za pojedina područja, pa rezultati značajno variraju. Zbog toga su se razvili različiti iskustveni (empirijski) pristupi i metode za određivanje isparavanja s vodne površine i evapotranspiracije. Navode se dvije formule:

1. **Meyerova formula** iz 1915. godine za izračun mjesečnih isparavanja sa slobodne vodne površine:

$$E = 11,25 E_p (1 - R) (1 + 0,225 v) \quad (\text{mm/mjesec}) \quad (3.16)$$

gdje je:

E_p (mbar) - tlak vodene pare zasićenoga zraka na temperaturi t

R - relativna vlaga (u dijelovima jedinice $\frac{R(\%)}{100}$)

v (m/s) - brzina vjeta na 2 m iznad površine vode.

Veličine E_p , R i v ulaze u izračun sa svojim srednjim mjesečnim vrijednostima.

2. **Turcova formula** za procjenu realne evapotranspiracije u jednoj točki. Njome se izračunava deficit otjecanja D (mm). Formula je izvedena na osnovi podataka sa približno 250 slivova (L. Turc, 1953):

$$D = \frac{P}{\left(0,9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{0,5}} \quad (\text{mm}) \quad (3.17)$$

gdje je:

P (mm) - oborina

$L = 300 + 25 t + 0,05 t^2$

t (°C) - temperatura zraka

Kao vremenska osnovica za primjenu Turcove formule preporuča se godina dana, pa se u tom slučaju uzimaju srednja godišnja oborina i srednja godišnja temperatura zraka. Za kraća vremenska razdoblja Turc je izvao složenije odnose između karakterističnih parametara bitnih za određivanje evapotranspiracije. Zbog složenosti procesa evapotranspiracije, Turcova formula daje tek približne rezultate.

Od velika broja iskustvenih pristupa, koji, kao i Meyerova i Turcova formula, koriste standardne meteorološke podatke, za izračun dnevne evapotranspiracije često se rabi Penmanova metoda, a za izračun mjesečnih evapotranspiracija - i, preko njih, sezonske i godišnje evapotranspiracije - Thornthwaiteova i Blaney-Criddeleova metoda (D. Srebrenović, 1986., Z. Kos, 1989.).

3.7 Oborina

3.7.1 Postanak oborine

Oborina ili padalina je tekući ili čvrsti proizvod kondenzacije vodene pare koji pada iz oblaka ili se iz zraka taloži na tlo.

Da bi oborina mogla nastati atmosfera mora biti obogaćena higroskopičnim jezgrama⁴, odnosno finim higroskopičnim česticama čiji su promjeri najčešće veliki do 1μ , a rijetko i do 5μ ($1\mu = 10^{-6}$ m). Za stvaranje vodene kapi od 3 mm potrebno je približno 24 sata. Ovakva kondenzacija još nije u stanju proizvesti oborinu, nego su za to potrebni poticaji kojih ima dvije vrste:

1. proces spajanja pojedinih kapi vode
2. proces ledenih kristala.

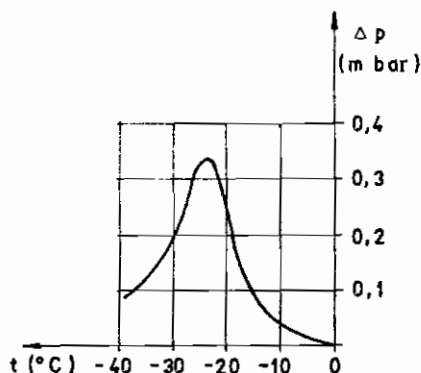
Na kap vode u atmosferi djeluju dvije sile: sila teža i trenje. Veće kapi zbog veće brzine sustižu manje, rastu na njihov račun i stvaraju turbulentno strujanje iza sebe. Ako vodene kapi narastu do kritične veličine, one mijenjaju svoj oblik, rasprskavaju se i tako nastaje sitna kišica.

Pod određenim uvjetima u atmosferi vodene kapi mogu postojati i na temperaturi ispod 0 °C. Proces se odvija na osnovi razlike tlaka oko čestice. Pritom nastaju velike kapi, a ako se one smrznou, dolazi do pojave tuče.

Ledene jezgre su po svome sastavu minerali ili ilovače (kaolin, montmorilit, ilit), a mogu biti i pomiješane s morskom soli. Kada se stvore ledene jezgre, u pothlađenome oblaku dolazi do neravnoteže - tlak pare iznad kapi viši je od tlaka iznad jezgri. Voda teži isparavanju i kondenzaciji na ledenim jezgrama, pa stoga dolazi do povećanja jednih čestica na račun drugih. Na slici 3.23 prikazan je dijagram razlika tlakova između vode i ledenih jezgri Δp u ovisnosti o temperaturi zraka t .

Za stvaranje oborine moguće je koristiti i umjetna stimulacijska sredstva. Umjetno zasićenje osniva se na principu ledenih jezgri, pri čemu kao njihov nadomjestak služe kristali srebrnoga jodida.

⁴ Higroskopska tvar je čvrsta ili tekuća materija koja iz svoje okoline može vezati vodu (vlagu).



Slika 3.23 Razlika tlakova između vode i ledenih jezgri Δp u ovisnosti o temperaturi zraka t

Oblak se sastoji od koloidnih i vodenih čestica, a ukoliko vodene čestice u njemu ne teže kondenzaciji, oblak je koloidno stabilan. Ako pak vodene čestice u oblaku teže kondenzaciji, oblak je koloidno nestabilan. Koloidna je nestabilnost oblaka od velike važnosti za stvaranje oborina.

Kišne kapi vrlo brzo nakon svojega nastanka dobivaju veliku brzinu. Ulaskom u gušću atmosferu njihov se okrugli oblik spljoštava, a brzina smanjuje.

Napominje se da i bez koloidnih čestica u oblaku može doći do kondenzacije i stvaranja kapi veličine do 2 mm. Takve kapi ne dospjevaju na Zemlju, već ispare na svome putu do nje.

3.7.2 Vrste oborina

Oborine se dijele na horizontalne i vertikalne.

Horizontalne oborine se pojavljuju u obliku inja, mraza, magle i rose. Iako horizontalne oborine nisu zanimljive za otjecanje vode u vodotocima, one u određenim uvjetima inogu biti zanimljive za vodoopskrbu. Rosa je najznačajnija horizontalna oborina koja je izvor vode i u sušnim se predjelima njezine godišnje količine kreću od 10 do 150 mm. Za mjerenje rose postoje posebni instrumenti. Mjerenja u Švedskoj su pokazala da godišnje količine rose mogu iznositi i do 20 posto godišnjih oborina.

Magla je također zanimljiva oborina. Prema O. Bonacciju (1994.a), oblaci i magla su (citaj): "Oblak je hidrometeor sastavljen od vidljivih čestica i/ili leda izdignut iznad površine Zemlje. Može se definirati kao jedan od stadija kruženja vode u prirodi, sastavljen od mnoštva vidljivih kapljica vode i/ili ledenih kristala izdignutih iznad Zemlje. Većina oblaka ne sadržava više od 2 do 3 grama vode u tekućem ili krutom stanju u 1 m³ volumena oblaka. Prema tome, kompletna kondenzacija oblačne mase

visine 4 km, koja se rijetko postiže, ne može izlučiti više od 12 000 g/m², što odgovara količini oborine od 12 mm. Važno je stoga istaći da se tijekom padanja, kako kratkotrajnih tako i dugotrajnih oborina trajno zbiva proces prihranjivanja oblaka vlagom iz njegove okoline. Vodena para iz okoline uzlaznim strujanjem ulazi u oblak, na većim se visinama hladi i kondenzira i na taj način obnavlja oblak, omogućavajući da se iz njega izluče veće količine oborina.

Osnovna razlika između oblaka i magle jest u činjenici što je oblak volumen zraka u slobodnoj atmosferi, a magla je volumen zraka koji leži uz tlo ili u prizemnom sloju. Maglom se smatra svaka zamućenost zraka pri kojoj se predmeti inogu vodoravno dohledati samo na daljinu od 1 km. Dok se magla generalno sastoji samo od sitnih kapljica kondenzirane vode u početnom stadiju stvaranja, oblak se sastoji i od većih kapljica vode i od kristala leda. Sloj zraka u kojem su kapljice vode i kristali leda brojni, gubi prozirnost, a kroz njega se smanjuje vidljivost. Boja oblaka ovisi o tome odakle je osvijetljen." (završna citat).

Nakon hvatanja u specijalne mreže koje imaju žljebove za odvod magla se može koristiti u vodoopskrbi. O. Bonacci (1994.b) navodi primjer jednoga sela u žileu u kojemu se za vrijeme maglovitih dana na taj način skuplja voda. Takva je voda jeftinija od vode koja se doprema cisternama doprema u to udaljeno čileansko selo.

Vertikalne oborine pojavljuju se u obliku kiše, snijega i tuče (grada).

Zanimljiva je **sitna jednolika kiša**, promjera kapi do 0,5 mm, brzine padanja kapi $v < 0,7$ m/s. Ukoliko dugo traje, može utjecati na otjecanje.

Za otjecanje vode važna je kiša čiji je promjer kapi veći od 0,5 mm. Takva se kiša po intenzitetu dijeli na tri vrste:

- slaba kiša**: satni intenzitet do 2,5 mm
- umjerena kiša**: intenzitet od 2,5 do 8,0 mm/sat
- jaka kiša**: intenzitet preko 8,0 mm/sat.

Tuča se dijeli na dvije vrste:

- mala tuča**: promjer zrna do 5 mm
- tuča**: promjer zrna preko 5 mm. Tuča ima nepravilan oblik do veličine kokošnjega jajeta. Javlja se u kasno proljeće ili u ljeto s velikim olujama. Nikada nije uzrokovana niskim temperaturama zraka neposredno iznad tla.

Zamrznuta oborina koja nastaje kada kiša pada na tlo čija je temperatura ispod ledišta naziva se **poledica**.

Susnježica nastaje kada se kapi kiše prolazeći kroz hladan zrak smrzavaju i pretvaraju u led, a na tlo padaju kao vlažne ledene kuglice promjera od 1 do 4 mm.

U vertikalne oborine spadaju i **snježne pahuljice** i **snježne kuglice**. Ovisno o gustoći snijega, moguće je da 1 cm visine snijega daje od 0,5 do 2,0 mm tekuće oborine. U praktičnim se izračunima, ako nije poznata gustoća snijega, za vodeni ekvivalent snijega prosječno uzima da 1 cm snijega daje 1,0 mm tekuće oborine.

3.7.3 Tipovi oborina

Postoje tri tipa oborine:

1. **Ciklonske oborine** - nastaju kao posljedica snažnih vrtložnih strujanja u atmosferi (pri svim vrstama zračnih depresija); olujna su karaktera i velika intenziteta.
2. **Konvektivne oborine** - nastaju podizanjem toploga zraka bogat vlagom iznad Zemlje. Uslijed hlađenja dolazi do brze kondenzacije i stvaranja oborina. Njihov je glavni pokretač radijacija sa Sunca i reradijacija sa Zemlje. Mogu biti većeg intenziteta od ciklonskih.
3. **Orografske oborine** - nastaju podizanjem topli zraka uz planinske zapreke (planinske barijere). Redovito su jače na uzlaznoj nego na silaznoj strani planine.

3.7.4 Mjerenje oborina

Količina izmjerene oborine koja padne na tlo iskazuje se u milimetrima (mm) koji zapravo predstavljaju litre na četvorni metar (l/m^2)⁵.

Glavni instrumenti za mjerenje oborina su: **kišomjer**, **ombrograf** ili **pluviograf** i **totalizator**.

Kišomjer je opći naziv za bilo koji uređaj kojim se mjeri količina pale oborine. U sužem smislu naziv **kišomjer** odnosi na uređaj za mjerenje dnevne količine oborina. Oborina se mjeri jedanput dnevno - ujutro u 7 sati izmjeri se količina od prethodnoga dana.

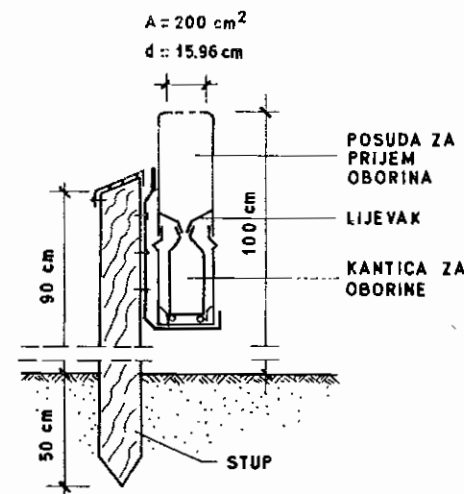
Ombrograf je zajednički naziv za instrumente koji bilježe količinu i trajanje tekuće i krute oborine. Za bilježenje tekuće oborine rabi se **pluviograf**, a za krute **nifograf**. No u praksi se vrlo često pod pojmom ombrograf podrazumijeva instrument za mjerenje tekuće oborine, odnosno pluviograf.

Velik je broj različitih tipova kišomjera, a svaki se kišomjer sastoji iz triju osnovnih dijelova: lijevka, posude za oborinu i menzure za mjerenje oborine. U Hrvatskoj se najviše rabi Hellmannov kišomjer, čiji je presjek shematski prikazan na slici 3.24.

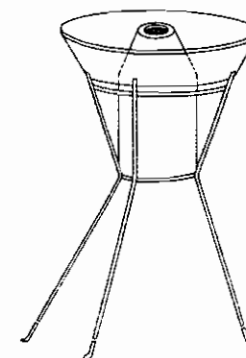
Promjer gornjega dijela lijevka Hellmannova kišomjera je 160 mm, tako da površina ulaza za oborinu iznosi 200 cm^2 . Standardizirana menzura ima milimetarsku podjelu, a svaka oznaka na menzuri predstavlja 1 mm oborine u prirodi. Ovim se kišomjerom ne mogu mjeriti količine oborine manje od 0,1 mm, a u prirodi 0,1 mm predstavlja samo tragove oborine. Uobičajeno je da se kišomjer (mjereno od ulaza lijevka) postavi 1 m iznad tla.

Za mjerenje oborine u nepristupačnim, naročito planinskim krajevima rabi se totalizator (slika 3.25).

⁵ Zbog toga što se l/m^2 izražavaju kao mm često se puta umjesto "količina" kaže "visina oborne". Ovakav "nesporazum" nastaje kada se uslijed kraćenja izgubi smisao izvorne jedinice



Slika 3.24 Shematski prikaz Hellmannova kišomjera (O. Bonacci, 1994.a)



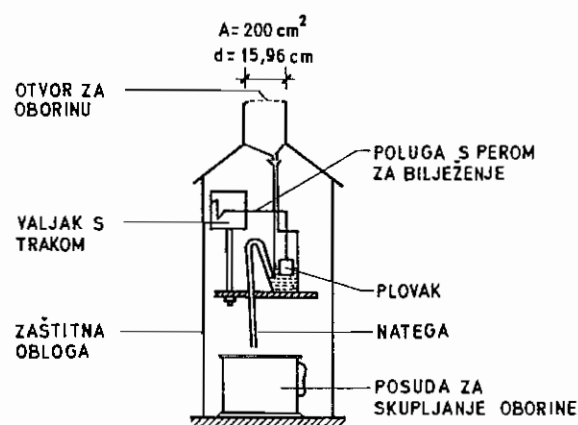
Slika 3.25 Totalizator (I. Penzar i B. Penzar, 1989.)

Totalizator se nakon duljih razdoblja - npr. svaka tri mjeseca ili duže sve do godinu dana - prazni, pa zbog toga ima velik rezervoar. Ulazno grlo totalizatora promjera je 160 mm, njegova ulazna površina je 200 cm^2 , a zaštićeno je limenim obročem. Rezervoar za prikupljanje oborine visok je 450 mm, a promjer mu je 500 mm. Totalizator se postavlja na tri čvrsto postavljena nogara, a ulazno je grlo uzdignuto 5 - 6 m od terena kako bi ga se osiguralo od oštećenja. U rezervoaru se nalazi parafinsko ulje za zaštitu vode od isparavanja, a protiv smrzavanja se može staviti klor-kalcij koji do temperature od $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ otapa snijeg. Rezervoar totalizatora je, po potrebi, zaštićen od smrzavanja ugrađenom šupljom gumenom cijevi, koja kompenzira širenje leda i sprečava pucanje stijenke rezervoara.

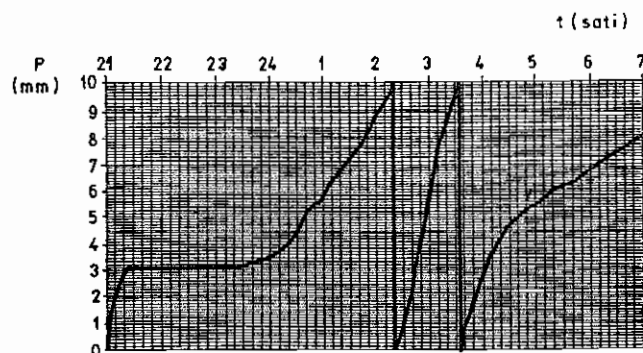
Otvor totalizatora površine 200 cm^2 pogodan je za Europu, a za tropske su predjele pogodniji veći otvori - površine do 2000 cm^2 .

Dok je kod totalizatora zbog rijetkih mjerenja oborine (reda veličine nekoliko mjeseci) nemoguće očitati intenzitet oborine (npr. visinu oborine u minuti ili satu), kod ombrografa (pluviografa) je to moguće utvrditi u svakom času. Ombrograf je uređaj za automatsko bilježenje oborine na papirnoj traci namotanoj na bubanj koji pokreće satni mehanizam (slika 3.26), a danas se može bilježiti i na čipu, odnosno suvremenome mediju. Ombrograf mora raditi i kada nema kiše.

a) HELLMANOV TIP OMBROGRAFA



b) PLUVIOGRAFSKA TRAKA



Slika 3.26 Ombrograf (pluviograf) i pluviografska traka (O. Bonacci, 1994.a)

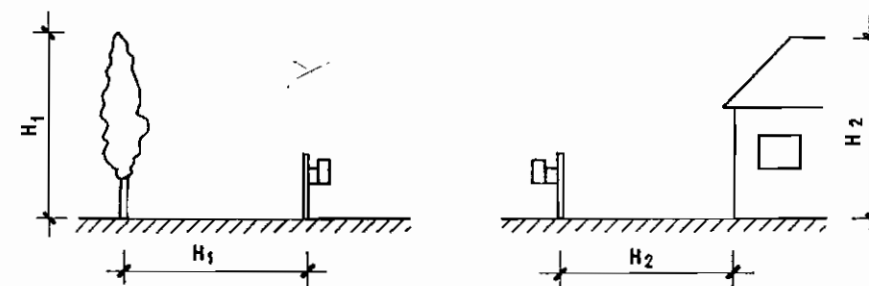
Pri mjerenju oborine mogu se pojaviti dvije vrste pogrešaka:

1. slučajne (povremene) pogreške
2. sustavne (stalne) pogreške.

Slučajna se pogreška redovito odnosi na motritelja i ona se obično ne ponavlja, tako da redovito nije od velike opasnosti za rezultate mjerenja oborina.

Sustavne su pogreške mnogo opasnije zbog toga što se zbrajaju, pa godišnje mogu predstavljati značajne količine oborina.

Kišomjer može biti krivo postavljen u odnosu na zapreku; na slici 3.27 je prikazana potrebna udaljenost kišomjera od zapreke.



Slika 3.27 Potrebna udaljenost kišomjera od zapreke

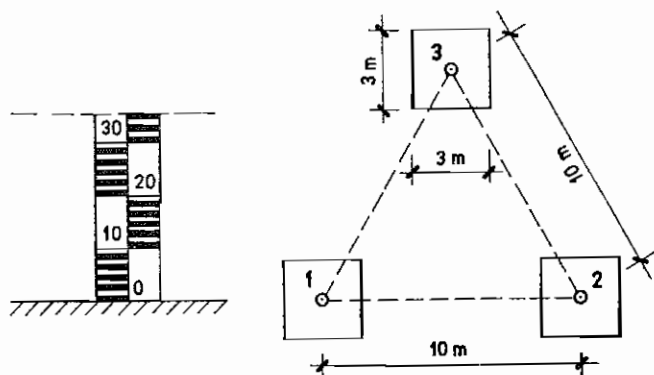
Kišomjeri, osim onih sa specijalnom mrežicom, ne mjere svu količinu magle, kao ni horizontalni leteći snijeg, mraz i inje, a te količine mogu biti znatne: 100 - 150 mm godišnje, pa zanemarivanje tih oborina predstavlja znatnu pogrešku u izračunavanju veličine godišnje oborine.

U obradama za izradu karata izohijeta nisu bili posebno analizirani, a niti otklonjeni, utjecaji sustavnih pogrešaka koje nastaju pri mjerenju oborina. **Izohijeta** je linija koja spaja točke u kojima je visina oborine u danom razdoblju jednaka. Veličina sustavne pogreške ovisi o tipu kišomjera, stupnju zaštićenosti mjernoga mjesta od vjetra, udjelu snijega u ukupnoj količini oborina i ostalim klimatskim uvjetima (J. Milković, 1986.).

Najveći utjecaj na sustavnu pogrešku u mjerenju oborine ima vjetar. Deficit u izmjerenim količinama ovisi o brzini vjetra i mikrostrukturi oborine, pa se taj utjecaj može izbjeći zaštitom kišomjera od vjetra. Kišomjeri redovito iz zaštitnih razloga nisu ukopani. Prema propisima, visina otvora kišomjera iznad tla je jedan metar, osim u područjima gdje je snijeg viši pa kišomjer može biti postavljen na dva metra iznad terena, a visina totalizatora je tri metra iznad tla. (Ukopani kišomjeri mogli bi poslužiti kao osnovni mjerni uređaji - etaloni - za procjenu gubitaka uslijed deformacije polja vjetra iznad kišomjera, ali samo za količine tekuće oborine.) Ukupne veličine svih komponenti sustavne pogreške, među kojima je dominantan gubitak uslijed

vjetra, najčešće se kreću od 10 do 20 posto izmjerenih količina oborina. Ostali gubici, koji imaju manji utjecaj, su: vlaženje unutrašnjih stijenci lijevaka i kantice kad se prazne, gubici uslijed isparavanja i isprskavanja iz kišomjera (O. Bonacci, 1987.b)

Kod oborine pale u obliku snijega visina snijega mjeri se ravnalom ili snjegomjerom. **Snjegomjer** je letva (podjela na 1 cm) s koje se očitava visina snijega, a postavlja se u tria stalnim položajima (slika 3.28). Sadržaj vode u snijegu određuje se vaganjem, a uzorak snijega uzima se specijalnom šupljom vadicom



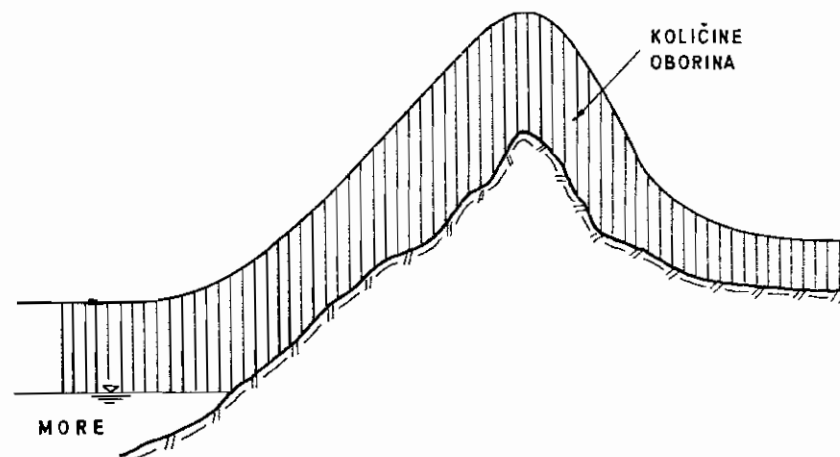
Slika 3.28 Snjegomjer i položaji triju stalnih snjegomjera

3.7.5 Čimbenici koji djeluju na količinu oborine

Na količinu oborine na nekom području djeluje pet glavnih čimbenika:

1. **Utjecaj zemljopisne širine** - povećanju zemljopisne širine količina oborine opada.
2. **Utjecaj mora** - povećanjem udaljenosti od mora količina oborine opada (npr. oborine u Rijeci i u Karlovcu).
3. **Utjecaj konfiguracije tla** - ovaj utjecaj naročito dolazi do izražaja u planinskim predjelima zbog hlađenja zračnih masa bogatih vlagom. Na stranama okrenutim prema moru, gdje pušu vjetrovi s većom količinom vlage, dolazi do pojave većih oborina (shematski prikaz na slici 3.29).
4. **Utjecaj šuma** - ovaj utjecaj može biti značajan, ali je dosta raznolik. Veliko prostranstvo šuma uglavnom djeluje na apsolutnu količinu oborina i povećava je za 9 - 13 posto u odnosu na slobodni prostor na istoj zemljopisnoj širini i topografskoj visini.
5. **Utjecaj velikih gradova** - jaka industrijalizacija je izvor velikih količina higroskopičnih jezgri na kojima se provodi kondenzacija vlage. Zbog toga su u velikim gradovima količina oborina 10 - 12 posto veće nego na slobodnoj površini na

istoj zemljopisnoj širini i topografskoj visini. Ovdje treba spomenuti da je u gradovima, zbog razlika na pojedinim lokacijama, potrebno postaviti više kišomjernih stanica nego na slobodnom prostoru. Primjerice u Zagrebu se količine oborina na stanicama Grič, Borčec, Maksimir i Pleso značajno međusobno razlikuju, a velike razlike u količinama oborine bile su ustanovljene čak i na vrlo bliskim lokacijama: primjerice, na meteorološkoj stanici Grič i na kišomjeru u dvorištu samostana u Frankopanskoj ulici (koji je prije desetak godina uklonjen).



Slika 3.29 Shematski prikaz utjecaja konfiguracije tla na količinu oborina

3.7.6 Potreban broj kišomjernih stanica

Općenito je broj kišomjernih stanica koji predstavlja razumnu količinu tih mjernih instrumenata - prosječno jedna kišomjerna stanica na svakih 80 - 100 km². Za Hrvatsku to iznosi oko 650 stanica. Pritom valja imati na umu da kišomjerne stanice u ravničarskim predjelima s ujednačenim oborinskim režimom mogu biti raspoređene rjeđe, dok je u planinskim područjima neophodno da mreža kišomjernih stanica bude znatno gušća.

U iznimnim je okolnostima, npr. za studije mikroklimatskih uvjeta (za termoelektrane, lječilišta, odmarališta i sl.) ili za odvodnju iz urbanih prostora, potrebno na tim lokacijama osnivati odgovarajuće meteorološke stanice (s kišomjerom), pa se na taj način broj kišomjernih stanica povećava.

Broj meteoroloških stanica općenito je neujednačen, a prvenstveno ih nedostaje u teže pristupačnim područjima. Sa stajališta oborinskih podloga za simulacije otjecanja korištenjem matematičkih modela naročito je malo podataka o količinama i intenzitetima oborina u planinskim predjelima (D. Trninić, 1981.).

3.7.7. Određivanje srednje količine oborine na slivu

Količina oborine na slivu V_A je umnožak površine sliva A i srednje visine oborine P koja padne na sliv. Površina sliva A je u (km^2), a količina oborine P u (mm), pa je volumen kiše V_A :

$$V_A = A \cdot 10^6 \cdot P \cdot 10^{-3}$$

$$V_A = A \cdot P \cdot 10^3 \text{ (m}^3\text{)} \quad (3.18)$$

Uz količinu oborine P (mm), važna veličina za izračune u kojima se koriste oborinski podaci je **intenzitet oborine** i , koji se definira kao kvocijent količine oborine P u određenome vremenu t :

$$i = \frac{dP}{dt}, \quad i = \frac{P}{t} \quad (3.19)$$

Za intenzitet oborine najčešće se rabe sljedeće jedinice: (mm/min), (mm/sat) i (mm/dan).

Za određivanje srednje visine oborina na slivu koriste se različite metode (O. Bonacci, 1994.):

1. metoda aritmetičke sredine
2. metoda Thiessenovih poligona
3. metoda trokuta
4. metoda izohijeta
5. hipsometrijska metoda
6. metoda izbora težina pomoću izohijeta
7. metoda postotaka srednje višegodišnje oborine
8. Spreen metoda
9. Sacramento metoda.

Ovdje su ukratko opisane metoda aritmetičke sredine, metoda Thiessenovih poligona i metoda izohijeta.

Ukoliko na nekom slivu postoji n stanica za mjerenje količina oborine, veličina prosječne oborine na slivu P određena **metodom aritmetičke sredine** dobije se kao prosjek količina oborina svih stanica na tom slivu:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (3.20)$$

Kada se primjenjuje **Thiessenova metoda**, za svaku se kišomjernu stanicu odredi njezino utjecajno područje (poligon) u slivu tako da se stranice poligona definiraju kao simetrale spojnica pojedinih stanica. Takvim se postupkom određuju utjecajni

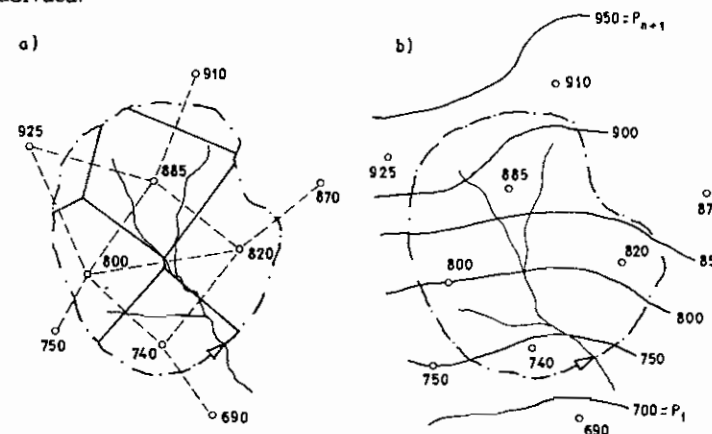
poligoni oko svih stanica na slivu (slika 3.30a). Za definiranje poligona stanica na rubnim dijelovima sliva uključene su i kišomjerne stanice izvan sliva. Za n stanica na slivu srednja oborina P na slivu površine A jc:

$$P = \frac{P_1 a_1 + P_2 a_2 + \dots + P_n a_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A} \quad (3.21)$$

$$\left(A = \sum_{i=1}^n A_i \right)$$

gdje su P_i i A_i količina oborine i površina utjecajnoga poligona i -te kišomjerne stanice. Ova je metoda pogodna za korištenje pri nejednolikoj raspodjeli kišomjernih stanica u prostoru i u ravničarskim područjima bez izraženije promjene topografskih i meteoroloških faktora (A. H. Thiessen, 1911.).

Metoda izohijeta je način određivanja linija jednakih količina oborine - izohijeta, na osnovi vrijednosti u pojedinim kišomjernim stanicama linearnom ili subjektivnom interpolacijom. Izohijete se uvijek crtaju za cijele vrijednosti: npr. svakih 50, 100, 200, pa i 500 mm, tako da se interpoliraju između vrijednosti oborine na stanicama na slivu (slika 3.30b). Pritom jednostavna linearna interpolacija može dati neprilodno izlomljene izohijete. Subjektivna interpolacija se češće upotrebljava i pri njezinoj se primjeni vodi računa o topografskim uvjetima, udaljenosti od mora i ostalim podacima o kojima ovise veličine oborina. Točnost ovoga postupka ovisi o gustoći mreže kišomjernih stanica, podacima vezanim uz promjene veličina oborine i iskustvu obrađivača.



Slika 3.30 Thiessenova metoda (a) i metoda izohijeta (b)

Srednja oborina P na slivu površine A je:

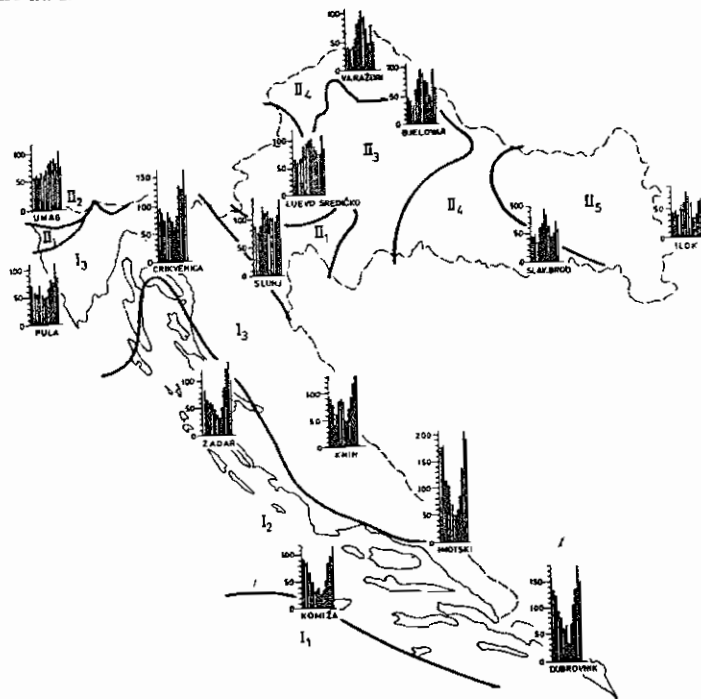
$$P = \frac{1}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \left(\frac{P_1 + P_2}{2} A_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} A_2 + \dots + \frac{P_n + P_{n+1}}{2} A_n \right) = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \frac{P_i + P_{i+1}}{2} A_i \quad (3.22)$$

gdje su P_i i P_{i+1} izohijete (npr. ako je razmak između izohijeta 100 mm $P_i = 800$ mm, a $P_{i+1} = 900$ mm), a A_i je površina sliva između izohijeta.

Na slici 3.30 prikazane su Thiessenova metoda i metoda izohijeta određivanja srednjih oborina na slivu.

3.7.8 Godišnji hod oborine

Na meteorološkim se stanicama redovito mjere dnevne količine oborine. Zbrajanjem dnevnih količina oborine dobiju se mjesečne količine, a njihovim zbrajanjem godišnje količine. Niz od 12 mjesečnih količina daje **godišnji hod oborine**. Ako ga se računa kao prosjek iz dugogodišnjih mjerenja, onda je to **srednji godišnji hod oborine**. Na slici 3.31 dano je nekoliko karakterističnih srednjih godišnjih hodova oborine za Hrvatsku.



Slika 3.31 Glavni tipovi godišnjega hoda oborine u Hrvatskoj (I. Penzar i B. Penzar, 1989.).

Prema tipu godišnjega hoda oborine Hrvatska se može podijeliti na dva glavna područja:

- I. Južni dio Hrvatske, koji najmanje kiše ima ljeti.
- II. Sjeverni dio Hrvatske, koji najmanju mjesečnu količinu oborine ima u hladnome razdoblju (I. Penzar i B. Penzar, 1989.).

Prema tome, na slici 3.31 prikazani su karakteristični slučajevi dvaju pluviometričkih sustava: maritimnoga - I i kontinentalnoga - II.

3.7.9 ITP i PTP krivulje

ITP krivulja je krivulja koja prikazuje vjerojatnost pojavljivanja različitih kratkotrajnih intenziteta oborine za različita trajanja oborina na danoj lokaciji. ITP je kratica pojma intenzitet oborine - trajanje oborine - ponavljanje oborine. ITP krivulje predstavljaju familiju krivulja u kojoj svaka krivulja ima odgovarajuće povratno razdoblje, na apscisi je trajanje kiše (redovito je skala od 5 min do 24 sata), a na ordinati intenzitet kiše. Zbog dimenzija trajanja i intenziteta kiše pri crtanju ITP krivulja za osi koordinatnoga sustava vrlo je pogodno koristiti logaritamsko mjerilo.

Uz ITP krivulje postoje i **PTP krivulje**, koje se od ITP krivulja razlikuju po tome što se na ordinatu umjesto intenziteta oborine i nanose količine oborine P . **PTP krivulja** prikazuje vjerojatnost pojave različitih visina oborina za različita trajanja oborina na danoj lokaciji. PTP krivulja ili klimatska funkcija vjerojatnosti određena je izrazom:

$$P = a t_k^n \quad (3.23)$$

gdje je: P (mm) - oborina; t_k (min) - trajanje kiše; a i n su parametri koji se određuju po metodi najmanjih kvadrata.

S istim oznakama, izraz na ITP krivulju kojom je definiran intenzitet oborine i (mm/min), je:

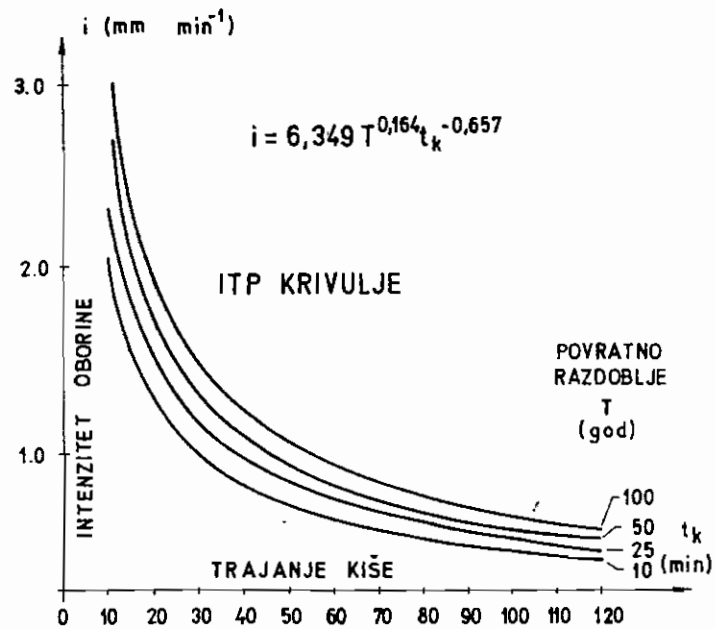
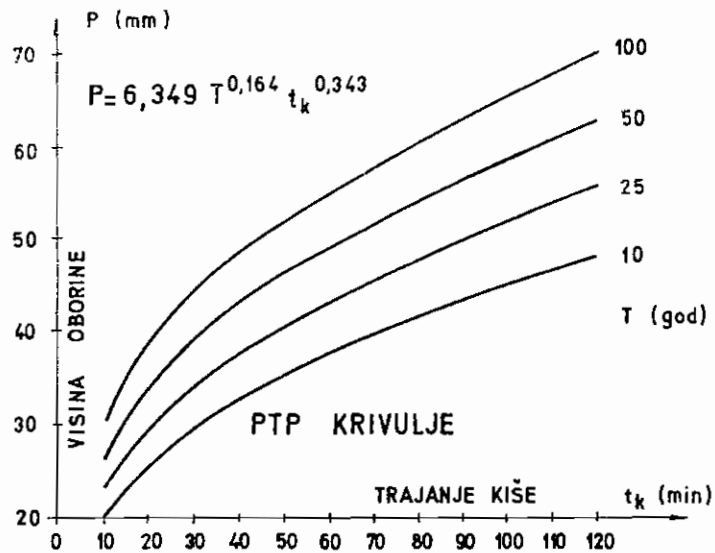
$$i = a t_k^{1-n} \quad (3.24)$$

PTP krivulje definiraju se za različita povratna razdoblja i mogu poslužiti kao drugačiji prikaz ITP krivulja. (Ranije su, u skladu sa simbolom H za visinu oborina, PTP krivulje bile označavane kao HTP krivulje.)

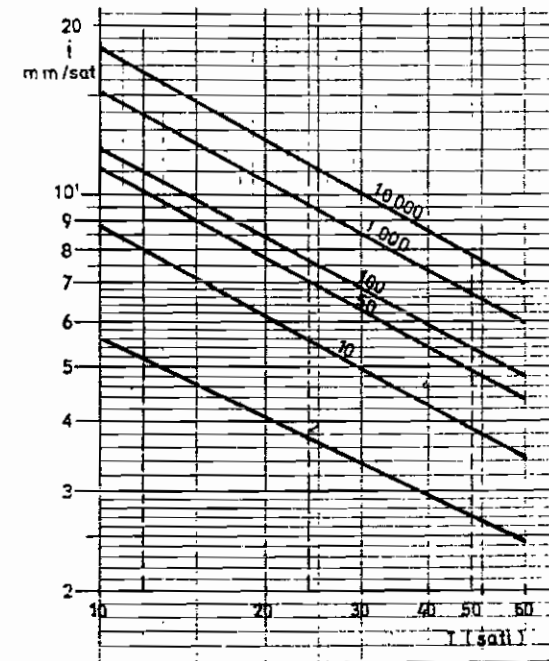
Na slici 3.32 prikazane su PTP i ITP krivulje u linearnome mjerilu, a na slici 3.33 ITP krivulje u logaritamskome mjerilu.

ITP krivulje jedna su od osnovnih podloga za određivanje velikih voda različitih povratnih razdoblja s malih slivova (npr. racionalna formula).

Projektni pljusak je količina i prihvaćena raspodjela oborine u vremenu na razmatranome slivnom području, što se koristi za određivanje projektne velike vode. Pljusak za projektiranje povezan je s povratnim razdobljem i veličinom otjecanja izazvanom tim pljuskom, uz pretpostavku da oboje imaju isto povratno razdoblje.

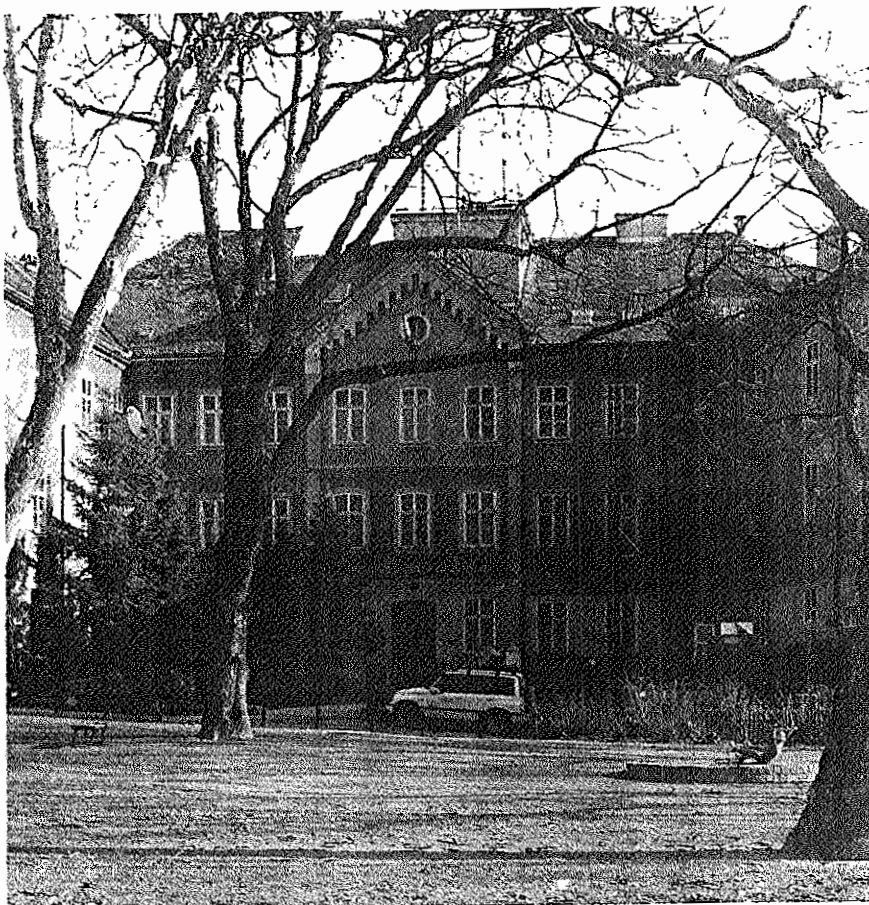


Slika 3.32 PTP i ITP krivulje za meteorološku stanicu Sisak u razdoblju 1951. - 1978., (O. Bonacci, 1994.a)



Slika 3.33 ITP krivulje za stanicu Parg (u logaritamskome mjerilu)

Ovisno o odvodnome sustavu, projektni pljusak može se definirati kao maksimalan protok za projektiranje odvodnih cijevi, ili kao volumen vode za dimenzioniranje veličine retencijskih i akumulacijskih bazena. Kod prvoga tipa projektnoga pljuska bitno je realno definirati vrh hidrograma mjerodavnoga velikog vodnog vala, odnosno odrediti hidrogram s najnepovoljnijim vršnim ili maksimalnim protokom. Na osnovi drugoga tipa projektnoga pljuska određuje se veliki vodni val najvećega volumena (volumen vodnoga vala je površina ispod hidrograma vodnoga vala), mjerodavan za dimenzioniranje retencijskoga ili akumulacijskoga prostora.



Slika 3.34 Meteorološki opservatorij Grič u Zagrebu

4 HIDROLOGIJA POVRŠINSKIH VODA

4.1 Osnovni pojmovi

Hidrologija površinskih voda ili **potamologija** je grana hidrologije koja proučava površinske tokove i njihove hidrološke režime, uključujući riječnu dinamiku, te pojave erozije i pronosa nanosa.

Hidrološki ili **vodni režim** su varijacije (različitosti, promjene) u stanju i karakteristikama vodnoga toka koje se u vremenu i prostoru redovito ponavljaju i koje prolaze kroz faze, npr. sezonske.

Vodni režim općenito je sve što se s vodom zbiva na određenome slivu: površinsko otjecanje po slivu i u vodotoku, isparavanje, procjeđivanje u gornje površinske slojeve litosfere, prokapljivanje do podzemnih vodonosnih slojeva, te poniranje i podzemno otjecanje u poroznoj sredini ili podzemnim vodotocima. Podzemni vodotoci u kojima voda teče sa slobodnim vodnim licem ili pod tlakom jedno su od glavnih obilježja krških područja.

Otjecanje je dio oborine koji se pojavljuje kao vodotok. Dio oborine pale na sliv koji sudjeluje u otjecanju naziva se **efektivnom** ili **neto oborinom**, ili **oborinom koja otječe**.

Protok je količina vode što prolazi kroz poprečni presjek vodotoka u jedinici vremena. Prema odabranoj jedinici vremena razlikuju se sekundni, minutni, satni i dnevni protok. Za veće količine vode obično se rabi jedinica (m^3/s), a za male protoke (l/s). **Poprečni presjek vodotoka** ili, kraće, **presjek** ili **profil vodotoka** je presjek okomit na os tečenja vodotoka u kojemu se provode hidrološka istraživanja.

U nekim se hidrološkim analizama unaprijed određuje tzv. **reperni protok**, koji predstavlja temeljni protok iznad kojega se promatra otjecanje (npr. pri analizama velikih i malih voda).

Jedan od temeljnih pojmova kojima se opisuje otjecanje je **srednja voda** ili **prosječni protok**, koji se definira kao aritmetička sredina protoka iz dugogodišnjega razdoblja.

Srednji godišnji protok je aritmetička sredina srednjih dnevnih protoka razmatrane godine, a srednji mjesečni protok je aritmetička sredina srednjih dnevnih protoka razmatranoga mjeseca.

Prosječni mjesečni protok je aritmetička sredina svih srednjih mjesečnih protoka za razmatrani mjesec u razdoblju obrade protoka.

Ako se u nekom profilu vodotoka želi provoditi redovita motrenja (vodostaji) i mjerenja hidroloških veličina (protoci, temperatura vode, pronos nanosa), potrebno je osnovati hidrološku stanicu. **Hidrološka stanica** je mjesto gdje se obavljaju motrenja i mjerenja hidroloških veličina. Najjednostavnija hidrološka stanica je **vodokaz** s kojega se vodostaji obično očitavaju jedanput dnevno (u Hrvatskoj u 7³⁰ ujutro) i ti se podaci prihvaćaju kao srednji dnevni vodostaji¹, te izvanredno više puta dnevno (za vrijeme pojavljivanja velikih voda). Za neprekidano bilježenje vodostaja rabi se **limnigraf**, a neprekidani zapis vodostaja na limnigrafskoj traci naziva se **limnigramom**.

Hidrološki se podaci mogu obrađivati u kalendarskim (od 1.1. do 31.12.) ili hidrološkim godinama. **Hidrološka godina** je neprekidno 12-mjesečno razdoblje, odabrano na takav način da su sve promjene na početku i na kraju hidrološke godine minimalne. U njoj se odigravaju svi hidrološki fenomeni koji su u vezi s promjenama. Na taj se način dobiva predodžba o vodostaju od najnižega do najvišega, odnosno protoku u godini. Hidrološka godina počinje 1. listopada ili 1. studenoga, ovisno o tome jesu li najniži vodostaji u rujnu ili listopadu, a nakon toga se počinju pojavljivati veće vode.

Jedno od osnovnih svojstava hidroloških pojava je **cikličnost**, odnosno ponavljanje u eklusima ili serijama. Primjerice, za rijeku Liku sušna se razdoblja, reda veličine desetak godina, ponavljaju približno svakih 40 godina.

4.2 Glavne karakteristike hidroloških pojava

Osnovni dijelovi hidrološkoga procesa su:

ulaz vode - odziv sredine kroz koju voda prolazi (akumuliranje) - izlaz.

Otjecanje vode je vrlo složena prirodna pojava i zbog toga se u hidrološkim analizama primjenjuju i **deterministički** (određeni) i **stohastički** (slučajni, probabilistički) pristupi.

Determinističko-stohastički proces je metoda analize hidroloških procesa koja se koristi determinističkim pristupom kako bi se ispitalo odgovore hidroloških sustava pomoću različitih parametara te stohastičkim pristupom koji hidrološke procese i fenomene opisuje i analizira pomoću metoda teorije vjerojatnosti.

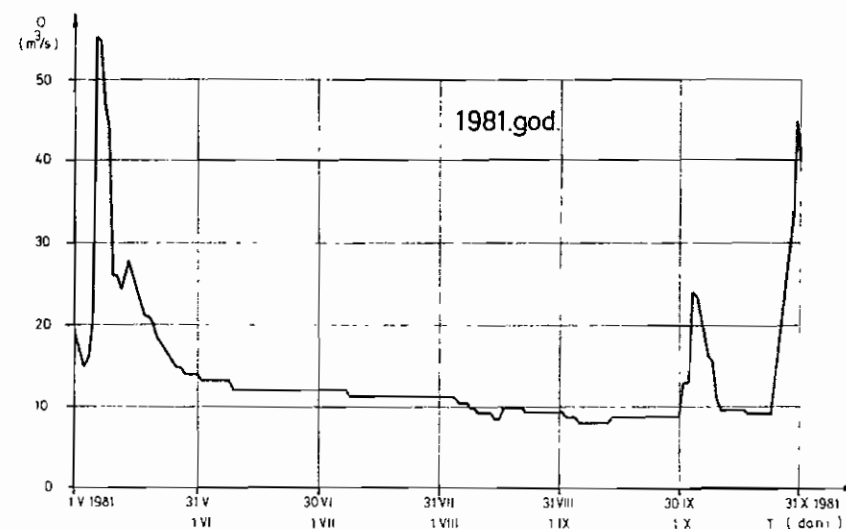
Deterministički procesi u hidrologiji rezultat su zakonitosti mehanike fluida i fizičkih zakona. Ovi se procesi odnose na hidrološke pojave koje se opisuju ograničenim brojem varijabli i mogu se jednoznačno povezati funkcionalnim vezama (npr. protočna krivulja je funkcionalna veza između vodostaja i protoka). **Stohastički procesi u hidrologiji** određeni su zakonima slučajnosti (npr. oborine, otjecanje i sl.). Zajednička primjena determinističkih i stohastičkih procesa najbolje opisuje prirodne

¹ U novije se vrijeme vodostaje nastoji očitavati dvaput dnevno (jutarnji i večernji vodostaj), pa njihov prosjek predstavlja srednji dnevni vodostaj

hidrološke procese i neophodna je za dobivanje pouzdanih znanstvenih i praktičnih informacija važnih za planiranje, korištenje, održavanje i kontrolu raspoloživih voda.

Zbog vrlo velika broja različitih utjecaja na postanak hidroloških veličina kojima se opisuje otjecanje, one se mogu prihvatiti kao **slučajne promjenljive veličine** (slučajne varijable). Hidrološki podaci za ispitivanje osobina slučajnih varijabli dijele se na četiri vrste:

1. **Historijski ili kronološki podaci** za neprekidne (kontinuirane) ili prekidne (diskretne) vremenske nizove (serije). Članovi vremenskih (kronoloških) nizova imaju postupan vremenski slijed, a dobivaju se na temelju izravnih motrenja i mjerenja na terenu. U tu vrstu spada većina podataka koji se u hidrologiji obrađuju. Kao primjer neprekidne varijable, na slici 4.1 prikazan je hidrogram srednjih dnevnih protoka rijeke Omble u profilu Komolac u razdoblju od 1. svibnja do 31. listopada 1981. godine

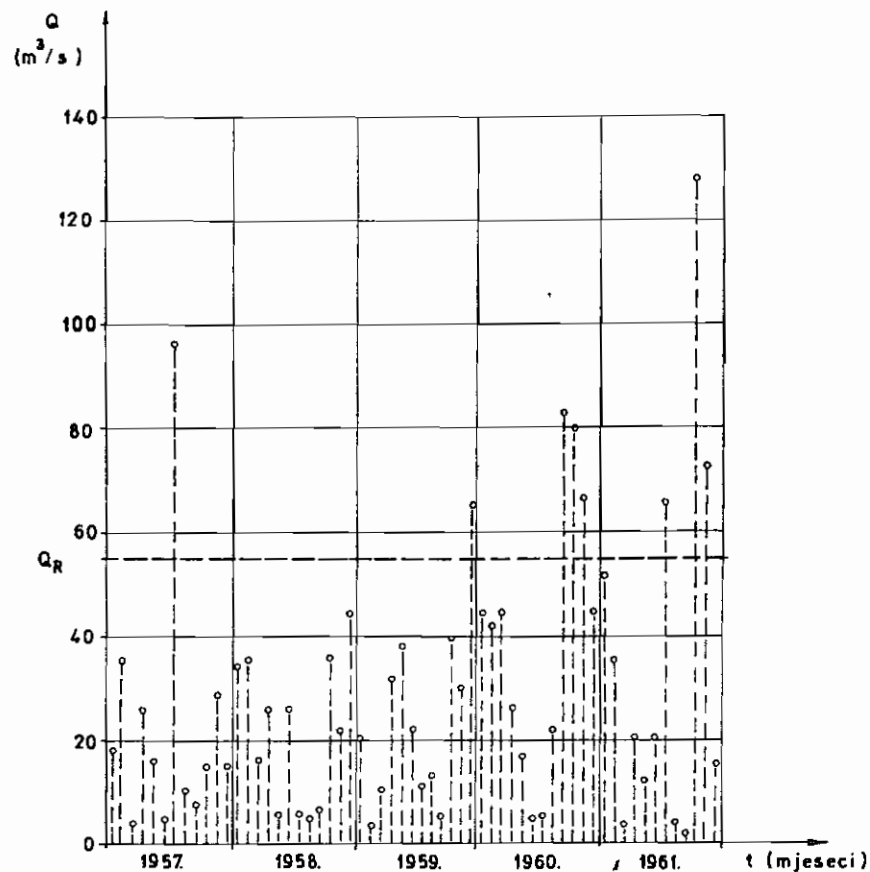


Slika 4.1 Primjer neprekidne varijable: hidrogram srednjih dnevnih protoka Omble u profilu Komolac (1.5.-31.10.1981.)

U hidrološkoj se praksi neprekidne varijable često tretiraju kao prekidne - razlaganjem na intervale i grupiranjem. Primjerice, srednji dnevni protoci dobivaju se na temelju protočne krivulje iz srednjih dnevnih vodostaja koji se, pak dobivaju osrednjavanjem dnevnih limnigrama. Srednje veličine mogu se prikazivati kao stepeničasti dijagrami - što je obzirom na njihovu osrednjenost ispravno. Mogu se prikazivati i kao prekidne varijable, ali često ih se prikazuje kao neprekidnu varijablu. Na taj se način zorno prikazuje i ističe neko važno svojstvo hidrološkoga

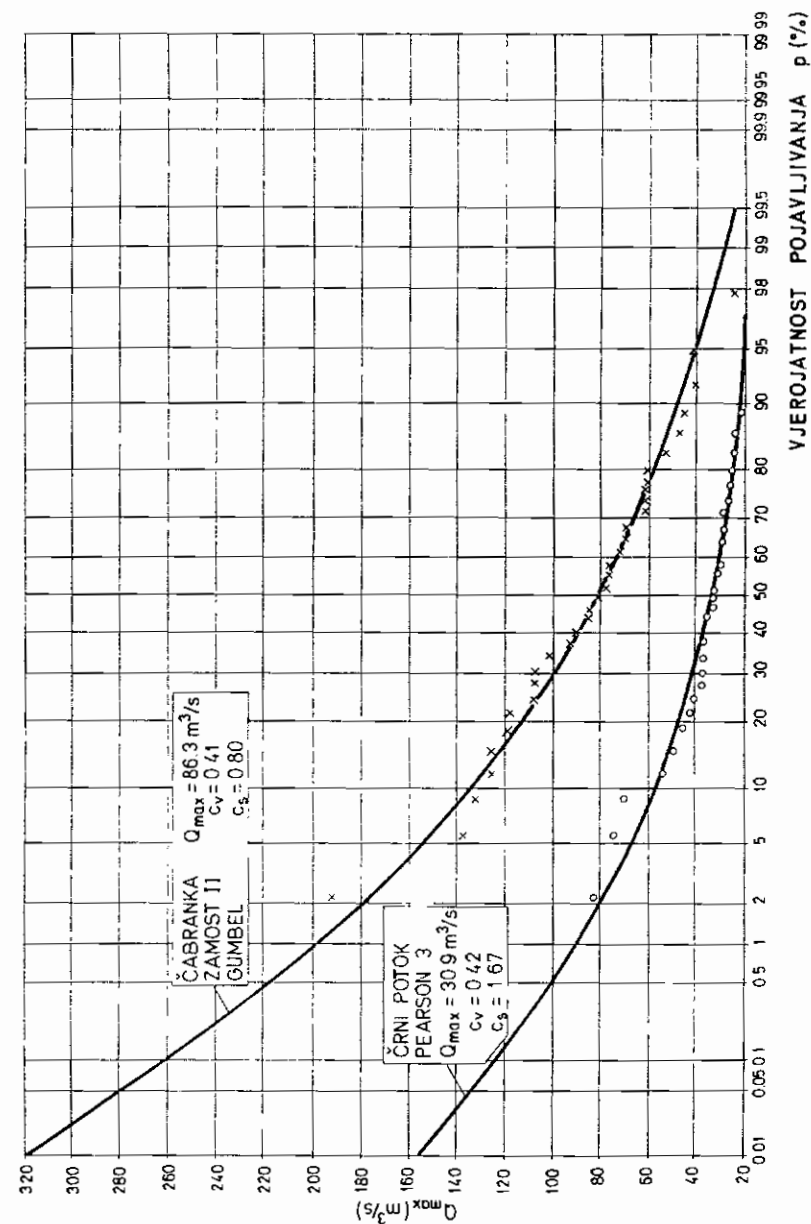
niza, a to je u slučaju hidrograma na slici 4.1 prvenstveno varijabilnost srednjih dnevnih protoka Ombie u razmatranome razdoblju.

Na slici 4.2 je niz maksimalnih mjesečnih protoka Čabranke u profilu Zamost II prikazan kao prekidna varijabla. Niz na slici 4.2 počinje s 1957.-om godinom, a na ordinati je označen i reporni protok iznad čije se vrijednosti od 55,0 m³/s usvajaju protoci za izračunavanje maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja.



Slika 4.2 Primjer prekidne varijable: maksimalni mjesečni protoci Čabranke u profilu Zamost II

U praksi se često puta prekidne varijable tretiraju kao neprekidne. U takvim se slučajevima vrijednostima prekidne varijable pridružuje odgovarajuća funkcija, primjerice raspodjela vjerojatnosti koju se izvodi na temelju prekidnih izračunskih podataka (slika 4.3).



Slika 4.3 Primjer prekidne varijable prikazane kao neprekidne: krivulje raspodjele maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II i Črnog potoka (Slovenija) u profilu Črni potok

2. **Podaci mjereni duž tokova ili površinski (u prostoru).** Duž tokova se može mjeriti pronos riječnoga nanosa i koncentracija nekoga obilježivača ili zagađenja. Primjer površinskoga mjerenja je mjerenje razine podzemnih voda u piezometrima na određenoj površini terena. Ova je mjerenja po potrebi moguće ponavljati, ali pritom su novčana sredstva obično ograničavajući čimbenik.
3. **Laboratorijski ili terenski eksperimentalni podaci.** Simuliranje otjecanja na fizikalnim modelima slivova u laboratorijskim uvjetima rijetko kada ima smisla provoditi. Simulacije na hidrološkim modelima u laboratoriju provode se slično kao i na hidrauličkim fizikalnim modelima. Pritom valja imati na umu da je u laboratorijskim uvjetima vrlo teško - a često i nemoguće - simulacijama na modelu čak i maloga sliva obuhvatiti sve uvjete otjecanja koji prirodno mogu nastati, a bitni su za određivanje mjerodavnih parametara. Osim u laboratoriju, i na terenu je moguće organizirati opsežna meteorološka i hidrološka motrenja i mjerenja na malim - **eksperimentalnim slivovima**. Eksperimentalni se slivovi odabiru kao reprezentativni između slivova nekoga područja i na njima se najčešće nastoji definirati odnos oborine - otjecanje velikih voda.
4. **Simultana (istovremena) mjerenja.** Simultana mjerenja protoka vode najčešće se provode duž vodotoka, kako bi se ustanovilo promjene protoka duž toka. Ova su mjerenja naročito važna za ustanovljavanje gubitaka vode iz korita krških vodotoka koji teku u podzemlje. Državni hidrometeorološki zavod RH sustavno je provodio simultana mjerenja protoka vode u karakterističnim profilima pojedinih važnijih krških vodotoka u Hrvatskoj: Lokvarki, Gornjoj Dobri, Zrmanji, Gaeki, Lici, Krki i Cetini (A. Stepinac, 1969., O. Bonaacci, 1981.).

4.3 Osnove statistike i računa vjerojatnosti u hidrologiji

4.3.1 Osnovni statistički parametri

U hidrologiji se najčešće rabe sljedeći osnovni statistički parametri:

1. **Centar**, sredina niza, prosjek ili aritmetička sredina:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

gdje je n broj članova niza, a x_i je i -ti član niza.

2. **Srednje kvadratno odstupanje**, varijanca ili moment drugoga reda:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.2)$$

3. **Standardno odstupanje** ili standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

Za mali broj podataka umjesto σ koristi se nepristrana procjena:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.4)$$

Kod hidroloških nizova obično je $n = 30$, a vrijednosti σ i s se redovito međusobno vrlo malo razlikuju pa je svejedno koji od njih se koristi.

4. **Koeficijent varijacije:**

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (4.5)$$

5. **Koeficijent asimetrije:**

$$c_s = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (4.6)$$

gdje je m_3 moment trećega reda:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (4.7)$$

Vrijednosti koeficijenta asimetrije mogu biti pozitivne i negativne. Koeficijent asimetrije c_s je mjera za asimetriju. Na temelju njegovih apsolutnih vrijednosti oeenjuje se asimetričnost raspodjele. Obično se uzima (V. Vranić, 1965.) da je:

- kada nema asimetrije: $0,00 < c_s < 0,10$
- kada je asimetrija mala: $0,10 < c_s < 0,25$
- kada je asimetrija srednja: $0,25 < c_s < 0,50$
- kada je asimetrija velika: $c_s < 0,50$

Formula (4.6) za koeficijent asimetrije sadrži centralni moment trećega reda (4.7) s eksponentom 3, pa su zbog velika utjecaja ekstremnih vrijednosti potrebni što dulji nizovi za njegovo pouzdano određivanje. Taj je problem manje izražen za srednje godišnje protoke (nizovi s ujednačenijim vrijednostima), ali do izražaja dolazi za nizove maksimalnih i naročito minimalnih godišnjih protoka (pogl. 4.17) u slučajevima kada se jedan član niza ili nekoliko njih znatno razlikuju od prosjeka.

U hidrološkoj se praksi rijetko koriste parametri izvedeni iz statističkih momenata većih od trećega reda. To su koeficijent spljoštenosti (ili krutosti) γ , kojim se opisuje oštrina ili spljoštenost vrha krivulje učestalosti:

$$\gamma = \frac{m_4}{\sigma^4} \quad (4.8)$$

i eksces:

$$E = \gamma - 3 \quad (4.9)$$

Eksces predstavlja krutost razmatranoga niza u odnosu na normalnu raspodjelu čiji je standard krutosti $q = 3$. Parametri γ i E izravno ovise o centralnome momentu četvrtoga reda:

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^4 \quad (4.10)$$

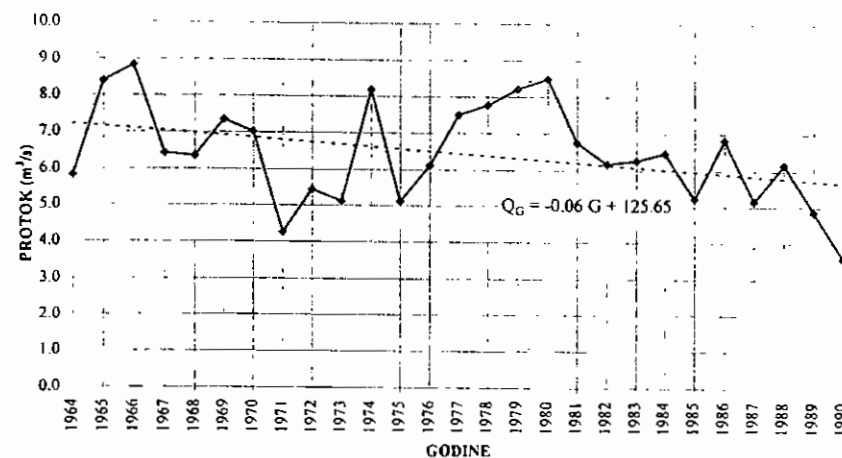
Budući da hidrološki nizovi rijetko imaju preko 50 članova, njihovi koeficijentni spljoštenosti i ekscesi - zbog četvrtice potencije centralnoga momenta - nisu dovoljno pouzdani karakteristični parametri, pa se rijetko upotrebljavaju u praksi.

4.3.2 Općenito o obradi podataka

Meteorološke i hidrološke podloge sačinjavaju podaci dobiveni motrenjem i mjerenjem. Od prikupljenih podataka sastavlja se **slijed podataka**, koji predstavlja podatke poredane redosljedom kojim su bili opaženi ili izmjereni. Primjeri slijedova podataka su: maksimalne godišnje oborine različitih intenziteta (jedno-, dvo- i trodnevne), ukupne godišnje oborine, maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci i sl. Slijed se podataka može prihvatiti kao niz ili niz vrijednosti slučajne varijable (promjenljive veličine), koji predstavlja podatke o nekim pojavama po redosljedu (kronološki) ili veličini i na njega se mogu primijeniti metode matematičke statistike ako su ispunjeni sljedeći uvjeti:

1. **Članovi niza su slučajne veličine.** Meteorološke i hidrološke veličine može se smatrati slučajnima zbog vrlo velika broja različitih utjecaja o kojima one ovise.
2. **Članovi niza su međusobno neovisni.** Član kronološkoga niza ne smije utjecati na veličinu člana koji slijedi. Primjerice, za godišnje ekstremne vrijednosti u hidrološkim godinama redovito se može usvojiti da su međusobno neovisne.
3. **Niz mora biti homogen.** Homogenost ili istovrsnost podataka je potrebno ispitati, ako postoje razlozi za to (npr. promjene u vodnom režimu, promjene u profilu vodotoka i sl.). Ispitivanja homogenosti provode se različitim testovima, npr. Wilcoxonovim testom, Kolmogorovljevim testom i sl., a nehomogenost u nizu podataka se također može ustanoviti i metodom **dvostrukih sumarnih količina** (double-mass analysis) koja je opisana u poglavlju 4.5.7. **Nehomogenost je razlika između stvarne vrijednosti i vrijednosti varijable kakva bi bila da nije bilo promjene.** Wilcoxonov test homogenosti test rangova opisan je nakon navođenja ovih pet uvjeta koje niz mora ispunjavati da bi se na njega moglo primijeniti statističke metode.

4. **Članovi niza moraju biti stacionarni.** Različite promjene uzrokuju nestacionarnost koja se na podatke odražava preko trendova, periodičnosti itd. **Trend je usmjerivanje (padajuće ili rastuće) u vremenskim nizovima. On je sustavna i neprekidna pojava koja se proteže kroz cijeli vremenski niz. U sklopu hidrološkoga niza periodičnost predstavlja pravilni ili promjenljivi oblici koji se dnevno, sezonski, godišnje ili višegodišnje pravilno izmjenjuju.** Zbog nestacionarnosti tijekom vremena može doći do značajnih promjena veličina karakterističnih parametara (prosjeak, koef. varijacije, koef. asimetrije itd.). Periodičnost se ispituje različitim testovima, npr. Fischerovim testom. Na slici 4.4 prikazan je padajući trend srednjih godišnjih protoka rijeke Butišnice u profilu Golubić u razdoblju od 1964. do 1990. godine. Na istoj je slici dana je i jednadžba trenda u kojoj je nezavisna varijabla G kalendarska godina, a zavisna varijabla Q (m^3/s) je srednji godišnji protok.



Slika 4.4 Trend srednjih godišnjih protoka Butišnice u profilu Golubić u razdoblju od 1964. do 1990. godine

5. **Niz mora biti dovoljno dug.** Kada se primjenjuju hidrološki postupci temeljni problem predstavlja procjenjivanje jesu li raspoloživi nizovi osnovnih hidroloških podataka dovoljno dugi za donošenje pouzdanih zaključaka. U raspoloživoj literaturi preporučuju se različita minimalna razdoblja motrenja i mjerenja, koja su prikazana u tablici 4.1. Duljina hidrološkoga niza može se provjeriti na osnovi veličine pogreške koeficijenta varijacije σ_{cv} , prema formuli koju preporuča UNESCO (1982.):

$$\sigma_{cv} = c_v \sqrt{\frac{1 + 2c_v^2}{2n}}$$



gdje je c_v koeficijent varijacije, a n broj članova niza. Ukoliko je $\sigma_{cv} \leq 0,10$, niz se može smatrati dovoljno dugim za korištenje.

Uz isti kriterij ($\sigma_{cv} \leq 0,10$) može se prema D. Srebrenoviću (1970.b) rabiti nešto stroža Kricky-Menkelova formula (s istim oznakama kao u prethodnoj formuli):

$$\sigma_{cv} = \frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1+3c_v^2} \quad (4.12)$$

Kada se primjenjuju formule (4.11) ili (4.12), moraju se poštivati tri uvjeta:

- članovi niza međusobno su neovisni
- razmatrani je niz homogen
- raspodjela članova niza je asimetrična.

Ispitivanja duljine homogenih hidroloških nizova moguće je provesti na temelju varijacija njihovih članova oko prosjeka.

Minimalni broj godina motrenja (5 - 15) koji se, prema podacima iz tablice 4.1, preporučuje za regionalnu analizu, uvelike se razlikuje od uobičajenoga pravila u hidrološkoj praksi, da se, kada se primjenjuju metode matematičke statistike, u hidrologiji koriste nizovi ulaznih podataka od najmanje 30 godina.

Tablica 4.1 Minimalan broj godina opažanja hidroloških veličina prema različitim autorima

Autor	Minimalan broj godina motrenja	Napomena
V. Jevđević (1956.)	srednji protoci: 10 maksimalni protoci: 30	za hidrološke obrade
D. Srebrenović (1970.b)	srednji protoci: 25 maksimalni protoci: 40	za hidrološke obrade
D. Srebrenović (1986.)	30	za hidrološke obrade
K. N. Mutreja (1986.)	10 ili više	za regionalne hidrološke analize
V. M. Ponce (1989.)	obično 10 do 15, a ne manje od 5	za regionalne hidrološke analize
R. S. Gupta (1989.) prema T. Darlympleu (1960.)	5 ili više	za regionalne hidrološke analize

U praksi hidrološke stanice često rade mnogo kraće od 30 godina. Kraćim je nizovima moguće u regionalnim analizama obuhvatiti više stanica neke regije, pa stoga i bolje definirati glavna obilježja otjecanja vode. Pritom treba ispravno ocijeniti realnost rezultata i pouzdanosti dobivenih zakonitosti, jer se preporuke iz literature najčešće ne odnose na pojedinačne regije. Prema tome, minimalan broj godina motrenja potrebno je posebno analizirati za svako pojedino područje, ovisno o svrsi obrade (R. Žugaj, 1993.a).

Kada razmatrani hidrološki niz zadovoljava navedenih pet uvjeta, na njegove se podatke mogu primijeniti metode matematičke statistike.

Između karakterističnih hidroloških parametara (deskriptora), kao najvažnijih u određivanju karakteristika niza izdvajaju se prosječna vrijednost, standardno odstupanje, te koeficijenti varijacije i asimetrije ($\bar{X}, \sigma, c_v, c_s$).

Primjerice, prosječne vrijednosti protoka \bar{Q} su najbolje procjene očekivanih vrijednosti (osim \bar{Q} srednja voda se može označavati i kao Q_{50} , Q_{50}). Uspoređeni međusobno srednji protoci izmjereni u različitim razdobljima u istoj hidrološkoj stanici osnovni su pokazatelji značajnih razlika između razmatranih nizova. Nedostatak prosjeka kao deskriptora je utjecaj ekstremnih vrijednosti na njega (npr. u kraćim nizovima vrlo velik ili vrlo malen ekstrem može biti posve slučajaj, što nepovoljno utječe na realnost procjene prosjeka takvoga niza). Standardno odstupanje s , s istom dimenzijom kao i članovi niza, najčešće je upotrebljavan parametar u opisivanju rasipanja članova niza. Koeficijent varijacije c_v , definiran kao $c_v = s/\bar{Q}$ bezdimenzionalan je parametar, koji može poslužiti za uspoređivanje različitih nizova jer isključuje utjecaj veličina srednjih vrijednosti. Ranije opisani koeficijent asimetrije c_s , o čijoj veličini i predznaku ovisi nagib raspodjele, pri određivanju je opće raspodjele vjerojatnosti, uz prosjek i standardno odstupanje, važan parametar koji se upotrebljava u hidrologiji (V. Jevđević, 1977.). Osnovni statistički parametri \bar{X} , s , c_v i c_s opisani su u poglavlju 4.3.1.

Važnu informaciju pri uspoređivanju dvaju hidroloških nizova iz različitih razdoblja daje ocjena čine li razmatrani nizovi iz različitih razdoblja homogeni niz. Za ispitivanje homogenosti pogodan je, zbog svoje objektivnosti i jednostavnosti, Wilcoxonov neparametarski test (test rangiranja), stoga je on ovdje ukratko opisan. Osnovne pretpostavke za provođenje toga testa su:

- članovi osnovnih skupova međusobno su neovisni
- rasporedi osnovnih skupova su neprekinuti
- oblici rasporeda skupova su nepoznati (K. A. Brownie, 1960.)

Kada se primjenjuje ovaj test, oblici rasporeda razmatranih skupova ne pretpostavljaju se unaprijed. U tome je njegova praktična prednost u odnosu na većinu klasičnih metoda parametarskih testiranja homogenosti, koje polaze od pretpostavke da je razmatrana varijabla ili normalno raspoređena ili da prati neku drugu raspodjelu s poznatim parametrima.

Osnovni skupovi - originalni, s n_1 članova, i modificirani, s n_2 članova - izdvajaju se iz ukupnoga skupa od $n = n_1 + n_2$ članova.

Dokazano je da suma rangova modificiranoga niza velikih skupova slijedi normalnu raspodjelu, a takva aproksimacija je prihvatljiva kada su n_1 i n_2 veći od 7 (A. A. Mood i F. A. Graybill, 1963.). Uz ovu pretpostavku očekivana vrijednost sume rangova modificiranoga niza $E_{(s)}$ je:

$$E_{(s)} = \frac{n_2(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad (4.13)$$

Standardno odstupanje sume rangova modificiranoga niza σ_s je:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \quad (4.14)$$

a suma rangova modificiranoga niza S_o je:

$$S_o = \sum_{i=1}^{n_1} k_i \quad (4.15)$$

k_i je rang člana modificiranoga niza kada se članovi modificiranoga i originalnoga niza poredaju po veličini.

Na temelju izraza (4.13), (4.14) i (4.15) opaženo standardno jedinično odstupanje U_o je:

$$U_o = \frac{S_o - E(S)}{\sigma_s} \quad (4.16)$$

Nultoj ili osnovnoj pretpostavci - da nema značajnih promjena u podacima - suprotstavlja se alternativna pretpostavka - da postoje značajne promjene uzrokovane prirodnim ili umjetnim načinom.

Uz uvažavanje razine povjerenja $\alpha = 0,05$, donja i gornja granica prihvatanja nulte pretpostavke usvajaju se prema normalnoj raspodjeli:

$$\left(U_{\frac{1}{2}\alpha}^1 = -1,96\right) < U_o < \left(U_{1-\frac{1}{2}\alpha}^1 = +1,96\right) \quad (4.17)$$

Prema tome, ako se vrijednosti opaženoga standardnog jediničnog odstupanja U_o nalaze unutar donje i gornje granice $\pm 1,96$ (unutar kritičnih vrijednosti), može se s vjerojatnošću većom od 95 posto usvojiti da je niz homogen (95 posto vrijednosti standardne normalne raspodjele je u intervalu od $z = -1,96$ do $z = +1,96$ (pogl. 4.3.3). Ukoliko je vrijednost U_o izvan granica $\pm 1,96$, vjerojatnost za prihvaćanje nulte pretpostavke je manja od 95%, pa je takav niz, prema usvojenome kriteriju, nehomogen.

Test rangiranja ranije je opisao R. Marković (1971.), potkrijepivši ga primjerom ispitivanja homogenosti maksimalnih godišnjih protoka Drave u profilu Varaždin.

Opisani je postupak prikazan na primjeru ispitivanja homogenosti niza srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine u razdoblju rada te stanice od 1963. do 1990. godine (tablica 4.2).

Kada se ispituje homogenost, prvenstveno treba utvrditi razlog ispitivanja, odnosno podijeliti osnovni niz na originalni i modificirani. Najčešći razlozi su promjene u vodnome režimu ili postojanje sustavne pogreške pri određivanju protoka. U primjeru srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine razlog za ispitivanje homogenosti niza bila je pojava duga sušnog razdoblja nakon 1980. godine.

Prosijek sume rangova modificiranoga uzorka:

$$E(S) = \frac{n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{2} = \frac{10 (18 + 10 + 1)}{2} = 145$$

Tablica 4.2 Srednji godišnji protoci Krke u profilu Marasovine u razdoblju od 1963. do 1990. godine, ispitivanje homogenosti Wilcoxonovim testom (izvor podataka: BHP)

Godina	Q (m ³ /s) kronološki	Q (m ³ /s) po veličini orig. i mod. niz	Q (m ³ /s) po veličini zajednički niz	Rang k	Broj članova originalnoga i modificiranoga niza
1963.	23,7	30,0	30,0	1	originalni niz: $n_1 = 18$ $SQ = 25,0 \text{ m}^3/\text{s}$ $\sigma = 4,10 \text{ m}^3/\text{s}$ $c_v = 0,16$
1964.	23,8	30,0	30,0	2	
1965.	28,0	29,3	29,3	3	
1966.	30,0	28,8	28,8	4	
1967.	20,4	28,6	28,6	5	
1968.	21,7	28,0	28,0	6	
1969.	27,3	27,5	27,5	7	
1970.	29,2	27,3	27,3	8	
1971.	19,5	26,7	26,7	9	
1972.	21,2	26,1	26,1	10	
1973.	16,5	23,8	23,8	11	
1974.	30,0	23,7	23,8	12*	
1975.	21,3	21,7	23,7	13	
1976.	26,1	21,3	21,8	14*	
1977.	26,7	21,2	21,7	15	
1978.	28,6	20,4	21,7	16*	
1979.	27,5	19,5	21,3	17	
1980.	28,8	16,5	21,2	18	
1981.	21,7	23,8	20,6	19*	modificirani niz: $n_2 = 10$ $SQ = 19,4 \text{ m}^3/\text{s}$ $\sigma = 2,64 \text{ m}^3/\text{s}$ $c_v = 0,14$
1982.	20,0	21,8	20,4	20	
1983.	17,6	21,7	20,0	21*	
1984.	23,8	20,6	19,5	22	
1985.	16,9	20,0	19,3	23*	
1986.	21,8	19,3	17,6	24*	
1987.	19,3	17,6	16,9	25*	
1988.	20,6	16,9	16,5	26	
1989.	16,2	16,2	16,2	27*	
1990.	16,1	16,1	16,1	28*	

Standardno odstupanje sume rangova modificiranoga uzorka:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 10 (18 + 10 + 1)}{12}} = 20,86$$

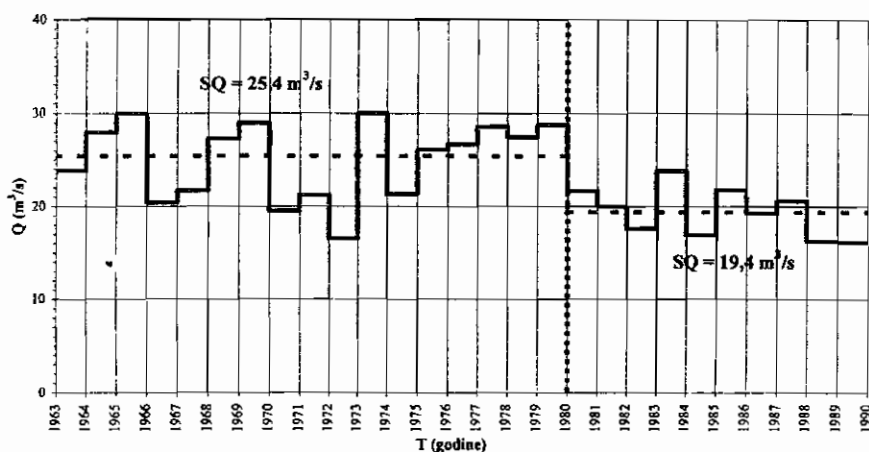
Suma rangova modificiranoga uzorka:

$$S_o = \sum_{j=1}^{n_2} k_j = 12 + 14 + 16 + 19 + 21 + 23 + 24 + 25 + 27 + 28 = 209$$

Standardno jedinično odstupanje.

$$U = \frac{S_o - E(S_o)}{\sigma_s} = \frac{209 - 145}{20,86} = 3,07 > U_o = 1,96$$

Na osnovi provedenoga testa može se zaključiti da razmatrani niz srednjih godišnjih protoka nije homogen. Prema tome, srednji godišnji protoci Krke u profilu Marasovine iz razdoblja od 1963. do 1990. godine čine dva niza: jedan iz razdoblja od 1963. do 1980., a drugi u razdoblju od 1981. do 1990. godine (slika 4.5).



Slika 4.5 Hidrogram srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine; nizovi u razdobljima od 1963. do 1980. i od 1981. do 1990. godine

Dok se za članove niza srednjih godišnjih protoka redovito može usvojiti da su međusobno neovisni, za nizove ekstremnih godišnjih protoka treba obratiti pozornost na datume njihova pojavljivanja. Primjerice, ako su se maksimalni godišnji protoci pojavili krajem prosinca jedne i na samome početku druge godine, sigurno je da je velika voda iz prosinca prethodne godine imala određeni utjecaj na maksimalni protok u siječnju, pa taj podatak nije neovisan o prethodnome. Takve se situacije mogu izbjeći obradom hidroloških godina.

Jesu li nizovi srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine dovoljno dugi za statističku obradu, jednostavno je provjeriti na temelju izraza (4.11) ili (4.12). Primjerice, za niz od 1963. do 1980. godine, gdje je koeficijent varijacije $c_v = 0,16$, a broj članova $n = 18$, pogreška koeficijenta varijacije σ_{c_v} je prema izrazu (4.2):

$$\sigma_{c_v} = \frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1 + 3c_v^2} = \frac{0,16}{\sqrt{2(18-1)}} \sqrt{1 + 3 \cdot 0,16^2} = 0,028 < \sigma_{c_v}^o = 0,10$$

Prema provedenome ispitivanju, niz srednjih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine iz razdoblja od 1963. do 1980. godine je dovoljno dug da bi se na njega mogle primijeniti metode matematičke statistike.

Primjenom statističkih metoda na nizove koji zadovoljavaju navedenih pet uvjeta određuju se različite vjerojatnosti pojavljivanja sa sljedećim ciljem:

Osnovni cilj primjene računa vjerojatnosti u hidrologiji je definiranje povratnoga razdoblja neke određene veličine (meteorološke ili hidrološke) iz niza izmjerenih podataka ili, pak, ekstrapolacijom, ako je ta veličina veća od najvećega izmjerenog podatka.

Varijable X može poprimiti vrijednosti $x_1, x_2, \dots, x_r, \dots, x_n$, s nekom vjerojatnošću $p_1, p_2, \dots, p_r, \dots, p_n$. Na ovaj je način definiran pojam prekidne slučajne varijable.

Skup svih izmjerenih vrijednosti slučajne varijable (neprekidne ili prekidne) naziva se **uzorkom**.

Poredaju li se članovi niza po veličini s obzirom na opadanje - $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$ - vjerojatnost pojavljivanja m -te ili veće vrijednosti je:

$$P_{(A)} = \frac{m}{n} \quad (4.18)$$

gdje je n broj članova niza.

Suprotno od toga, vjerojatnost $p_{(B)}$ da se pojavi vrijednost x_m ili manja vrijednost je:

$$P_{(B)} = \frac{n - m + 1}{n} \quad (4.19)$$

pa iz odnosa:

$$P_{(A)} + P_{(B)} = 1 \quad (4.20)$$

slijedi:

$$P_{(A)} = 1 - \frac{n - m + 1}{n} = \frac{m - 1}{n} \quad (4.21)$$

Prema tome, vjerojatnost m -toga člana nalazi se između:

$$\frac{m}{n} \text{ i } \frac{m - 1}{n}$$

Kod velikog broja članova niza n ta je razlika mala, ali u praksi je rijetko $n > 40$. Zbog toga je H. A. Foster (1934.) uveo pojam kompromisne vjerojatnosti:

$$p = \frac{m - 0,5}{n} \quad (4.22)$$

koja se često rabi, ali joj se može prigovoriti da posljednjemu članu niza n daje neodgovarajuće povratno razdoblje $2n$. **Povratno razdoblje p** ili $P.P.^2$ je dugoročan prosječni interval vremena ili broj godina u kojemu će se jedna pojava dogoditi, s time da ga može i nadmašiti (npr. maksimalni godišnji protok).

Osim Fosterove kompromisne vjerojatnosti za vjerojatnost pojave n -toga člana niza postoji još niz različitih formula od kojih se ovdje navode samo neke od njih:

$$\text{N. N. Čegodajev: } p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \quad (4.23)$$

$$\text{A. Hazen: } p = \frac{2m - 1}{2n} \quad (4.24)$$

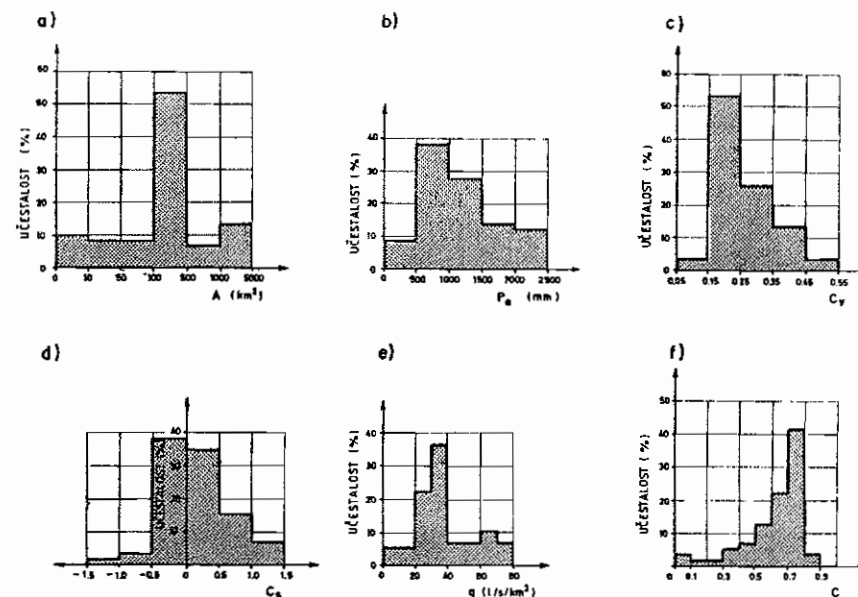
$$\text{W. Weibull: } p = \frac{m}{n + 1} \quad (4.25)$$

U sredini su raspodjele razlike u vjerojatnostima pojavljivanja prema formulama (4.22) - (4.25) beznačajne. No na krajevima raspodjele - što je vrlo važno - razlike u vjerojatnosti pojavljivanja prema različitim formulama poprimaju značajne vrijednosti. Pri izboru odgovarajuće formule nema nekih posebnih pravila i preporuka, pa tu važnu ulogu igra iskustvo obradivača.

Učestalost neke vrijednosti slučajne varijable je broj koji pokazuje koliko puta se ta vrijednost varijable pojavila. Prema tome, **učestalost** ili **frekvencija** je broj pojavljivanja neke vrijednosti prekidne (diskretne) varijable u nekome određenom razdoblju opažanja. Grafički prikaz učestalosti i prekidne varijable u koordinatnom sustavu zove se **raspodjela učestalosti** ili **histogram**. U hidrologiji histogrami predstavljaju vrlo važne grafičke prikaze, kojima se ilustrira zastupljenost pojedinih vrijednosti unutar raspona vrijednosti koje poprima pojedini razmatrani karakteristični parametar. Učestalosti je uobičajeno svrstati u razrede (klase) i grafički prikazati u obliku stepeničastih dijagrama, pa je u tom smislu UNESCO (1992.) dao vrlo preciznu definiciju histograma:

Histogram učestalosti je dijagram učestalosti jedne varijable s pravokutnicima. Ti su pravokutnici postavljeni na apscisnoj osi. Njihova je širina jednaka intervalu razreda, a visina predstavlja učestalost. Površina pravokutnika proporcionalna je učestalosti razreda (klase).

Ako se broj pojavljivanja neke prekidne slučajne varijable ili učestalost podijeli s ukupnim brojem pojava dobije se **relativna učestalost** ili vjerojatnost pojavljivanja p te varijable. Zbroj vjerojatnosti pojavljivanja svih varijabli mora biti jednak jedinici: $\sum p = 1$.



Slika 4.6 Histogrami karakterističnih parametara u hrvatskome kršu: a) veličine slivova A ; b) prosječne godišnje efektivne oborine P_e ; c) koeficijenti varijacije srednjih godišnjih protoka c_v ; d) koeficijenti asimetrije srednjih godišnjih protoka c_s ; e) srednji specifični dotoci q i f) koeficijenti otjecanja srednjih voda c (R. Žugaj, 1995. b)

Na slici 4.6 prikazani su histogrami relativnih učestalosti šest karakterističnih parametara regionalne analize provedene za 58 hidroloških profila u kršu Hrvatske.

Hidrološke obrade - čiji su sastavni dio grafički prikazi, prema tome i histogrami - trebaju prvenstveno dati dovoljno informacija. Na temelju histograma mogu se izvesti važni opći zaključci, kako to slijedi iz primjera sa slike 4.6.

U hrvatskome je kršu, prema histogramu učestalosti na slici 4.6a, najveća zastupljenost slivova veličine $A = 100 - 500 \text{ km}^2$ - u 54 posto slučajeva (nepravilna je podjela na osi A na slici 4.6a usvojena radi preglednosti). Vrijednosti prosječnih godišnjih efektivnih oborina (oborine koje otječu), dane na slici 4.6b, vrlo su niske u samo 9 posto slučajeva ($P_e < 500 \text{ mm}$) i to zbog poniranja vode na slivovima i u koritima vodotoka. Najčešće su efektivne oborine, u 39 posto slučajeva, između 500 i 1000 mm, a u 28 posto slučajeva od 1000 do 1500 mm. U 53 posto slučajeva vrijednosti koeficijenta varijacije srednjih godišnjih protoka c_v , dane na slici 4.6c, u granicama su od 0,15 do 0,25.

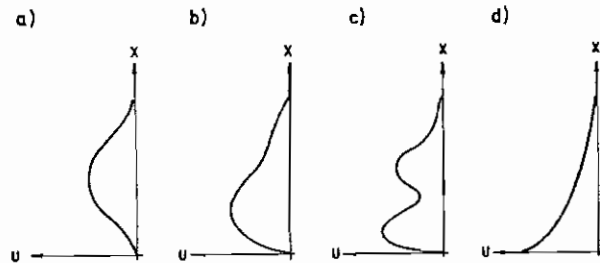
Koeficijenti asimetrije srednjih godišnjih protoka c_s , kako pokazuje slika 4.6d, najčešće se - u 38 posto slučajeva - kreću od -0,5 do 0, a u 35 posto slučajeva od 0 do 0,5. Na osnovi njihova histograma može se zaključiti da se koeficijenti asimetrije

² P.P. je kratica naziva "povratni period"

dobro prilagođavaju normalnoj raspodjeli (opisanoj u pogl. 4.3.3). Srednji specifični dotoci na slici 4.6e u 23 posto slučajeva su $q = 20 - 30 \text{ l/s/km}^2$, a najčešće (u 37 posto slučajeva) $q = 30 - 40 \text{ l/s/km}^2$. Otjecajni koeficijenti c u 41 su posto slučajeva vrlo visoki - od 0,70 do 0,80 (slika 4.6f) - i znatno su veći nego u nekrškim područjima. Glavni razlog tome jest da na većini krških slivova oborina brzo ponire i uglavnom teče kroz podzemlje, a površinska hidrografska mreža je rijetka i glavni vodotoci su kratki, pa su zbog toga gubici uslijed isparavanja manji nego na nekrškim slivovima.

Učestalosti pojavljivanja mogu se aproksimirati nekom neprekidnom krivuljom koja se naziva **krivulja učestalosti**.

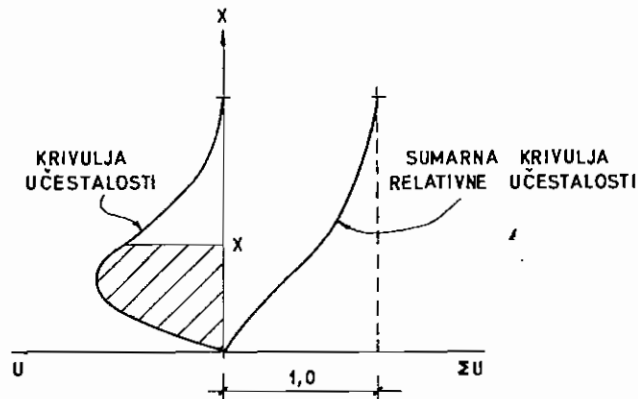
Krivulje učestalosti mogu se pojaviti u različitim oblicima, četiri osnovna oblika prikazana su na slici 4.7.



Slika 4.7 Osnovni oblici krivulja učestalosti: a) simetričan ili normalan oblik; b) asimetričan oblik s jakim maksimumom; c) asimetričan oblik s dvama maksimumima; d) jednostran oblik

U analizama pojava u prirodi uglavnom se rabe asimetrične krivulje učestalosti. Jednostran oblik krivulje učestalosti (slika 4.7d) rabi se u opisima vodotoka koji presušuju, pa je taj oblik čest u kršu.

Ukupan zbroj relativnih učestalosti jednak je jedinici, kako je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8 Krivulja učestalosti i sumarna krivulja relativne učestalosti

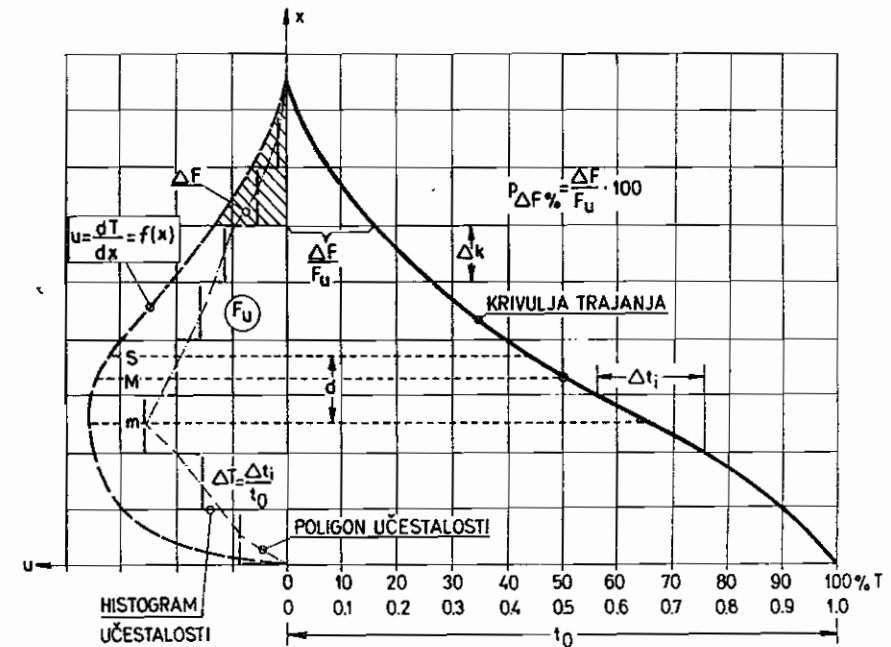
Zbrojna ili kumulativna učestalost neke vrijednosti je zbroj učestalosti svih vrijednosti manjih ili jednakih toj vrijednosti ili obrnuto.

Na isti je način definirana **zbrojna relativna učestalost** ili **zbrojna vjerojatnost**.

Kumulativna vjerojatnost može se grafički prikazati u linearnome koordinatnom sustavu ili na papiru vjerojatnosti (slika 4.3).

Kumulativna učestalost predstavlja trajnost i grafički ju se može prikazati krivuljom trajanja, a ta krivulja spada među najvažnije grafičke prikaze u hidrologiji. **Krivulja trajanja** je krivulja koja pokazuje postotak vremena ili broj dana u godini tijekom kojih je vodostaj ili protok jednak danim količinama ili veći od njih, bez obzira na kronološki red (kronologiju).

Na slici 4.9 prikazane su krivulje učestalosti i trajanja.



Slika 4.9 Krivulje učestalosti i trajanja

Ako krivulja učestalosti ima jednadžbu:

$$U = f(x) \quad (4.26)$$

iz nje se može odrediti sljedeće karakteristične veličine:

1. **Sredina S** definira se kao prosjek
2. **Medijan M** je vrijednost koja odgovara 50-postotnoj vrijednosti integralne krivulje (krivulje trajanja):

$$\int_{-\infty}^{k_m} f(k) dk = \int_{k_m}^{+\infty} f(k) dk \quad (4.27)$$

3. **Mod** m je vrijednost najučestalijega pojavljivanja i odgovara maksimumu krivulje učestalosti:

$$\frac{df(k)}{dk} = 0 \quad (4.28)$$

Razmak unutar kojega se kreću vrijednosti prosjeka, medijana i moda naziva se **radijus krivulje učestalosti** d .

Raspon uzorka k je razlika između najmanje i najveće vrijednosti.

Krivulja trajanja je integralna krivulja krivulje učestalosti, a **krivulja učestalosti** je diferencijalna krivulja krivulje trajanja. Prema tome, površina bilo kojega dijela pod krivuljom učestalosti ΔF određuje ujedno i trajanje T na osnovi te površine:

$$T = \frac{\Delta F}{F_u} 100 \quad (\%) \quad (4.29)$$

gdje je F_u ukupna površina pod krivuljom učestalosti.

Jedinica koja se rabi za obračun trajanja je godina dana ili 100 posto trajanja.

4.3.3 Gaussova (normalna) raspodjela

Gaussova ili normalna raspodjela je matematički određena, simetrična, dvo-parameterska raspodjela neprekinute slučajne varijable, zvonolika oblika. Pretpostavlja se da dobro aproksimira slučajne pogreške.

Raspodjele meteoroloških i hidroloških veličina najčešće nisu simetrične, ali normalna je raspodjela važan čimbenik korelacijske analize, procjene intervala povjerenja, generiranja hidroloških nizova itd.

Međusobne veze varijabli s normalnom raspodjelom su linearne i vrednuju se na temelju koeficijenta korelacije. Kada su raspodjele nesimetrične, podaci se mogu normalizirati različitim transformacijama: $y = x^a$ ili $y = \ln x$, odnosno transformacijom $y = \log x$, kojoj odgovara teorijska log-normalna (Galtonova) raspodjela.

Prema Gaussovom zakonu, raspodjela ili gustoća vjerojatnosti je:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (4.30)$$

gdje je $\pi = 3,14$; σ standardno odstupanje, $e = 2,718$ baza prirodnoga logaritma, a \bar{x} prosjek članova niza. Transformacijom Gaussove funkcije:

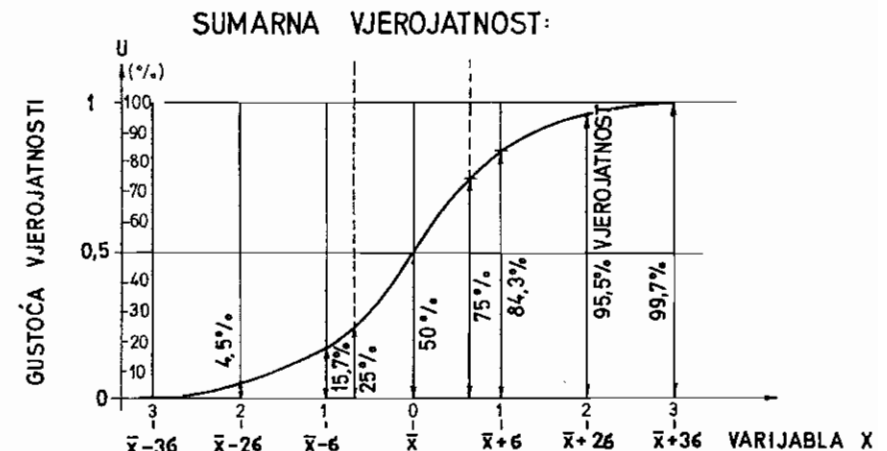
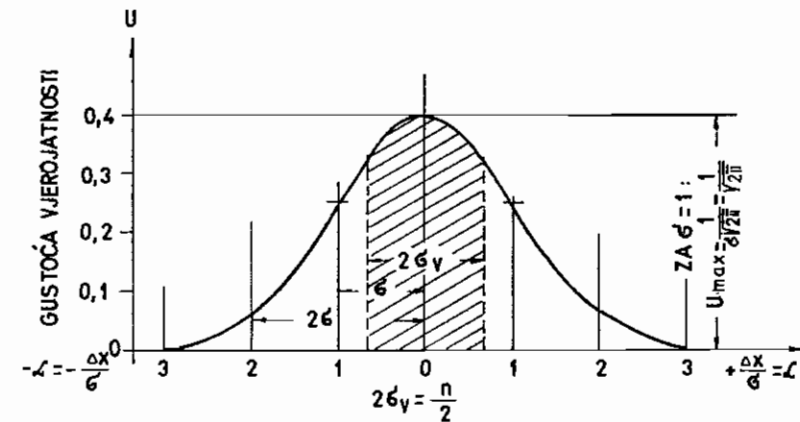
$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (4.31)$$

dobije se **standardna normalna raspodjela**:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (4.32)$$

Grafički prikaz krivulje standardne normalne raspodjele dan je na slici 4.10.

ELEMENTI NORMALNE KRIVULJE RASPODJELE



Slika 4.10 Standardna normalna raspodjela

Varijanca standardne normalne raspodjele je $\sigma^2 = 1$, a prosjek je nula. Vrijednost $P(z)$ maksimalne ordinate je:

$$P(z) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} = 0,399 \quad (\sigma = \sqrt{1}) \quad (4.33)$$

Površina ispod krivulje na slici 4.10 jednaka je jedinici, a ta površina predstavlja broj vrijednosti n . Ako se ta površina podijeli na dva jednaka dijela, 50 posto vrijednosti (članova skupa) nalazi se u intervalu:

$$\bar{x} - 0,6745\sigma \text{ i } \bar{x} + 0,6745\sigma \quad (4.34)$$

Veličina σ_v naziva se **vjerojatno odstupanje** (unutar kojega se nalazi 50 posto vrijednosti):

$$\sigma_v = \pm 0,6745\sigma \quad (4.35)$$

Maksimalno odstupanje σ_{max} je:

$$\sigma_{max} = \pm 3\sigma \quad (4.36)$$

Maksimalno odstupanje je u intervalu $(\bar{x} - 3\sigma \text{ i } \bar{x} + 3\sigma)$, u kojemu se nalazi 99,73 posto pojava - gotovo svi članovi razmatranoga skupa. Karakteristične površine ispod krivulje standardne normalne raspodjele za različita reducirana odstupanja dane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Karakteristične površine ispod krivulje standardne normalne raspodjele

Z	P ($\bar{x} - Z\sigma < x < \bar{x} + Z\sigma$)
0	0,0000
0,6745	0,5000
1	0,6827
1,645	0,9000
1,96	0,9500
2,0	0,9546
3,0	0,9973
4,0	1,0000

(Površine ispod krivulje standardne normalne raspodjele može se naći u tablicama statističkih priručnika.)

U hidrologiji se vjerojatno odstupanje često definira kao interval u kojemu se pojavljuje 95 posto podataka, i njemu odgovara razina povjerenja $\alpha = \pm 5\%$ ($\alpha = 0,05$), jer se normalnom raspodjelom mogu dobro aproksimirati odstupanja ulaznih podataka od izvedene zakonitosti:

$$\sigma_p = \pm 1,96\sigma_v \quad (4.37)$$

Razina povjerenja α je vjerojatnost da raspon povjerenja uključuje prave vrijednosti. σ_p je **relativno odstupanje**.

Kada se ustanovljuje vjerojatno odstupanje izračunskih podataka (izmjenjenih protoka) σ_p od protočne krivulje (koja je izvedena na osnovi tih podataka), relativno odstupanje σ_{oQ} je:

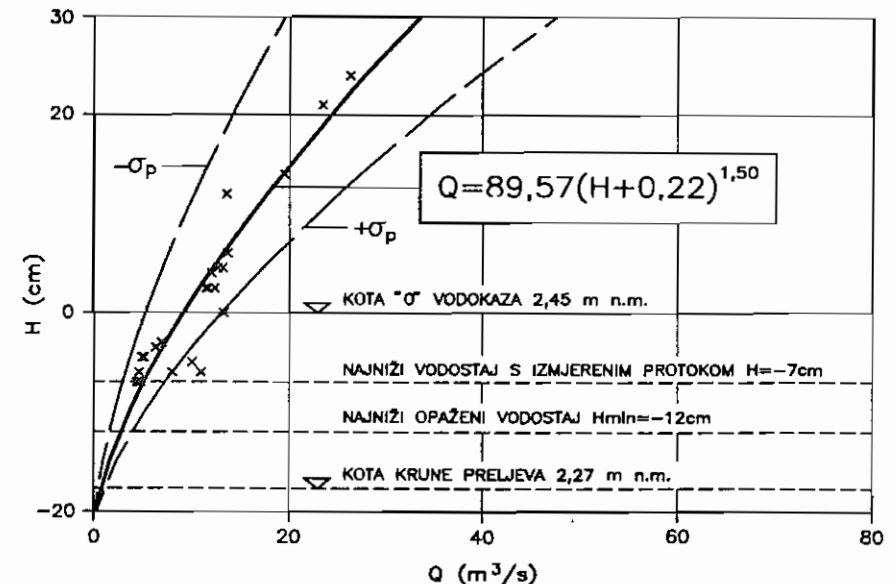
$$\sigma_{oQ} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i - Q}{Q} \right)^2}{n}} \quad (4.38)$$

gdje je Q_i izmjereni protok vode, Q protok prema protočnoj krivulji $Q = f(H)$, a n broj mjerenja protoka.

Vjerojatno odstupanje unutar kojega se nalazi 95 posto ulaznih izračunskih podataka σ_{pQ} (razina povjerenja $\alpha = 5\%$ ili $\alpha = 0,05$) je:

$$\sigma_{pQ} = \pm 1,96\sigma_{oQ} \quad (4.39)$$

Donji dio protočne krivulje Omble u profilu Komolac s granicama vjerojatnoga odstupanja prikazan je na slici 4.11.



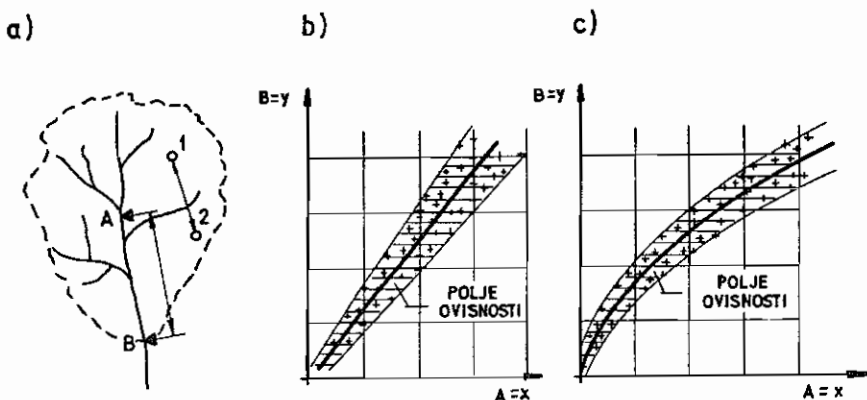
Slika 4.11 Protočna krivulja Omble u profilu Komolac u području malih voda ($\sigma_p = \pm 41,7\%$)

4.4 Korelacijska analiza

4.4.1 Općenito o korelaciji

Korelacija ili **povezanost** je odnos ili međuovisnost dviju mjerljivih varijabli. U korelacijskoj je analizi razmatrani statistički niz predstavljen parovima vrijednosti (x, y) .

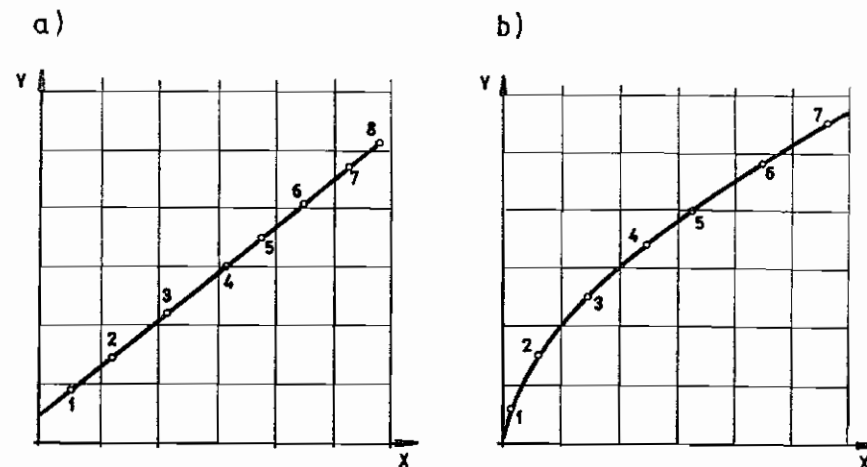
Kada se međusobna ovisnost članova dvaju kolektiva s vrijednostima x_i i y_i predoči grafički, može se uočiti kakva veza postoji među njima. U hidrologiju se korelacijski račun uvodi za nadopunjavanje podataka na stanicama na kojoj je došlo do prekida motrenja ili kada treba produljiti niz postojećih podataka. U takvu se slučaju ispituju korelacijske veze podataka prikupljenih na stanicama na kojoj nije bilo motrenja i podataka prikupljenih na stanicama za koje su nizovi dovoljno dugi. Radi li se o hidrološkim stanicama, najjednostavnije je i redovito najpogodnije ako se koreliranje podataka provodi preko najbliže stanice na istome vodotoku (slika 4.12a). Mogu se razlikovati linearna (slika 4.12b) i nelinearna korelacija (slika 4.12c).



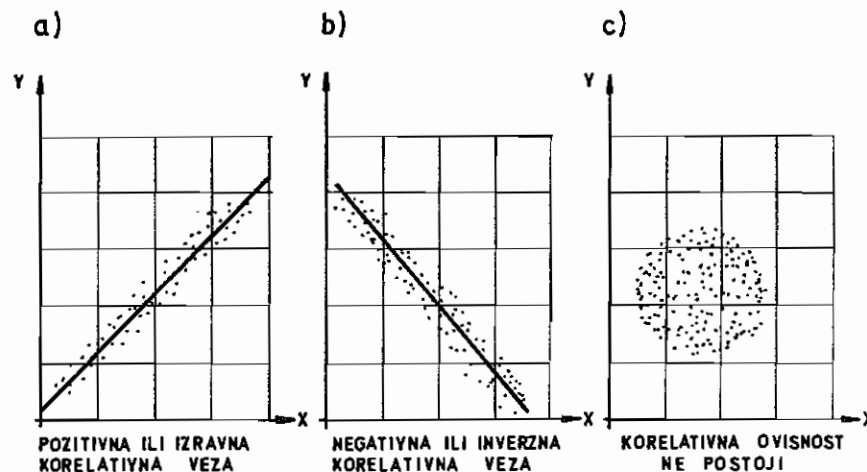
Slika 4.12 Primjer hidroloških (A i B) i meteoroloških (1 i 2) stanica na nekome slivu čiji se podaci mogu korelirati

Veze između dviju pojava mogu biti:

1. funkcionalne; na slici 4.13 (a i b)
2. približne ili korelacijske - u kojima postoji rasipavanje (disperzija) podataka u određenome smjeru (s tendencijom), kako je prikazano na slici 4.14; u slučaju a) za pozitivnu ili izravnu korelacijsku vezu i u slučaju b) za negativnu ili inverznu korelacijsku vezu
3. nikakve - kada korelacijska veza ne postoji. Taj je slučaj prikazan na slici 4.14c.



Slika 4.13 Primjeri funkcionalnih veza: a) linearne i b) nelinearne



Slika 4.14 Slučajevi različite orijentacije korelacijskih veza i slučaj kada korelacijski odnos ne postoji

Korelacijski odnosi dviju slučajnih varijabli mogu biti linearni:

$$y = ax + b$$

ili nelinearni, u hidrologiji najčešće u obliku:

$$y = ax^b$$

Ukoliko se ispituje međuovisnost više od dviju varijabli radi se o **više-strukoj korelaciji** ili **više-strukoj povezanosti**. Zahvaljujući postojanju odgovarajućih

programa za elektronička računala, višestruku se korelaciju može koristiti srazmjerno jednostavno, a naročito je pogodna za produljivanje ili nadopunjavanje visina mjesečnih ili godišnjih oborina.

U nekim slučajevima ima smisla provesti **autokorelaciju**, odnosno unutrašnju korelaciju između članova niza poredanih u vremenu i prostoru.

Razmatra li se ovisnost jednoga o drugome stohastičkom procesu ili odnos između dvaju stohastičkih procesa, onda je to **kroskorelacija** ili **unakrsna povezanost slučajnih varijabli**.

U hidrologiji se najčešće primjenjuje linearna korelacija između dviju varijabli, pa je ona opisana u poglavlju 4.3.2.

Dok se pod pojmom korelacija podrazumijeva odnos između dviju varijabli, **regresija** ili **regresijska analiza** je statistička metoda razvijena za ispitivanje unutarnje ovisnosti ili odnosa između dviju ili više mjerljivih varijabli. Najčešći opći oblik regresijske analize je linearna regresija.

4.3.2 Linearna korelacija

Ranije - prije pojave elektroničkih računala - u izračunavanjima linearne korelacijske veze između dvaju nizova s vrijednostima (x_i, y_i) razmatralo se dva slučaja. U prvome, kada broj parova x i y u oboma kolektivima nije bio velik, svi su parovi bili uključivani u račun za dobivanje korelacijskih elemenata. U drugome slučaju, za velik broj parova vrijednosti x i y , razmatralo se u intervalima Δx i Δy s prosječnim vrijednostima \bar{x} i \bar{y} , a broj članova u jednome polju Δx , Δy definirao je učestalost u tom polju. Regresijska analiza provodila se na temelju učestalosti u pojedinim poljima.

U današnje vrijeme, zbog izravna uključivanja podataka iz baza podataka u odgovarajuće programe za regresijsku analizu, broj ulaznih izračunskih podataka ne predstavlja nikakav problem, pa se ovdje opisuje izračun u koji su uključeni svi članovi razmatranih nizova. Problem se svodi na određivanje jednadžbi regresijskih pravaca koje u općem obliku glase:

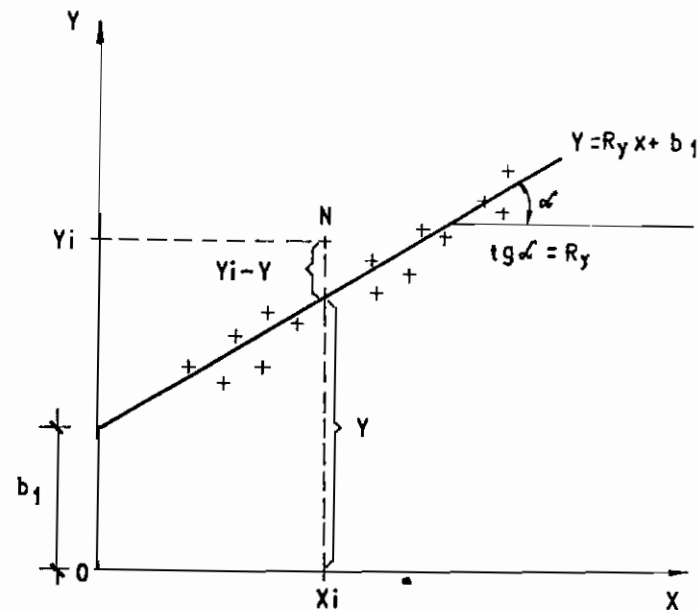
$$y = R_y x + b_1 \quad (4.40)$$

$$x = R_x y + b_2 \quad (4.41)$$

Na slici 4.15 prikazan je regresijski pravac (4.40).

Udaljenost točke N - na slici 4.15 s koordinatama x_i i y_i - od regresijskoga pravca je $y_i - y$, što vrijedi i za sve ostale točke. Suma kvadrata svih udaljenosti mora imati najmanju vrijednost kako bi pravac (4.40) bio regresijski pravac, odnosno kako bi se mogao najbolje prilagoditi svim točkama. Prema tome, ta suma mora biti minimalna i ona se određuje iz uvjeta:

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = \sum_i (y_i - R_y x_i - b_1)^2 \quad (4.42)$$



Slika 4.15 Regresijski pravac $y = R_y x + b_1$

Nepoznate veličine u jednadžbi (4.42) su R_y i b_1 . Uvjet da jednadžba (4.42) ima najmanju vrijednost je zahtjev da parcijalni diferencijali po R_y i b_1 budu jednaki nuli. Parametri R_y i b_1 određuju se na temelju dviju jednadžbi:

$$n b_1 + R_y \sum x_i = \sum y_i \quad (4.43)$$

$$\sum x_i b_1 + R_y \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \quad (4.44)$$

gdje je n broj članova parova vrijednosti x i y .

Za $\sum x_i = n \bar{x}$ i $\sum y_i = n \bar{y}$ gdje su \bar{x} i \bar{y} prosječne vrijednosti, iz jednadžbi (4.43) i (4.44) dobije se:

$$R_y = \frac{\sum (x_i y_i) - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum (\Delta x_i)^2} \quad (4.45)$$

Regresijski pravci prolaze kroz točku s koordinatama \bar{x} i \bar{y} pa jednadžba prvoga regresijskog pravca glasi:

$$y - \bar{y} = R_y (x - \bar{x}) \quad (4.46)$$

Uvrsti li se za koeficijent regresije R_y izraz (4.45), dobije se:

$$y - \bar{y} = \frac{\sum (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum (x_i - \bar{x})^2} (x - \bar{x}) \quad (4.47)$$

Na isti se način dobiva koeficijent smjera drugoga regresijskog pravca:

$$R_x = \frac{\sum (x_i y_i) - n \bar{x} \bar{y}}{\sum y_i^2 - n \bar{y}^2} = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum (\Delta y_i)^2} \quad (4.48)$$

$$x - \bar{x} = R_x (y - \bar{y}) \quad (4.49)$$

odnosno njegova jednadžba:

$$x - \bar{x} = \frac{\sum (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum (\Delta y_i)^2} (y - \bar{y}) \quad (4.50)$$

Regresijski koeficijenti R_x i R_y su koeficijenti uz ovisne varijable u regresijskoj jednadžbi. U linearnoj regresiji oni predstavljaju nagibe regresijskih pravaca prema osi x , odnosno y .

Srednja kvadratna odstupanja (disperzija) članova s_x i s_y obaju kolektiva x i y , od srednjih vrijednosti \bar{x} i \bar{y} iznose:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.51)$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.52)$$

Srednja pogreška regresije y po x , odnosno x po y je srednje kvadratno odstupanje izračunskih podataka u odnosu na regresijske pravce y po x i x po y . Njezina veličina pokazuje u kolikoj se mjeri ulazni izračunski podaci rasipaju u odnosu na regresijske pravce. Srednja pogreška regresije pravca $y = f(x)$ je:

$$S_y = \pm \sigma_y \sqrt{1 - r^2} \quad (4.53)$$

Srednja pogreška regresije pravca $x = f(y)$ je:

$$S_x = \pm \sigma_x \sqrt{1 - r^2} \quad (4.54)$$

gdje je r koeficijent korelacije i bitan je za ocjenu vrijednosti korelacijske veze.

Ako se regresijski pravci međusobno poklapaju, onda je:

$$\frac{1}{R_y} = R_x \quad \text{ili} \quad (4.55)$$

$$R_x R_y = 1 \quad (4.56)$$

Zatvaraju li regresijski pravci međusobno određeni kut, umnožak $R_x R_y$ kreće se između vrijednosti -1 i $+1$.

Umnožak $R_x R_y$ predstavlja mjeru povezanosti kolektiva x i y . **Koeficijent korelacije** r je srednja geometrijska vrijednost umnoška $R_x R_y$, pa je:

$$r = \sqrt{R_x R_y} \quad (4.57)$$

Uvrsti li se za R_x i R_y izraze (4.48) i (4.49), dobije se:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum \Delta x_i \Delta y_i}{\sqrt{\sum \Delta x_i^2 \sum \Delta y_i^2}} \quad (4.58)$$

Srednja kvadratna odstupanja iznose:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta x_i)^2} \quad (4.59)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta y_i)^2} \quad (4.60)$$

pa je:

$$r = \frac{\sum (\Delta x_i \Delta y_i)}{n \sigma_x \sigma_y} \quad (4.61)$$

ili

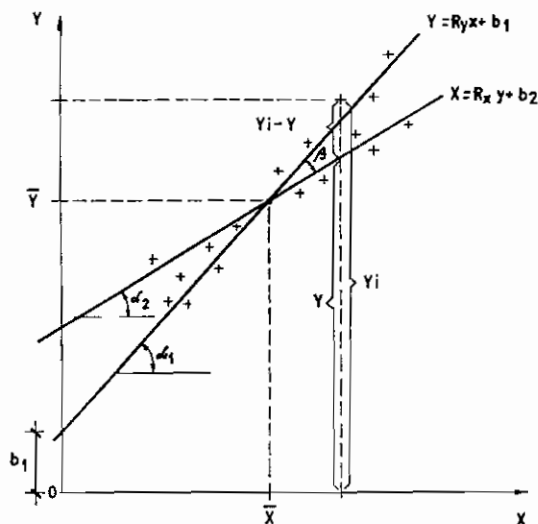
$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum (x_i y_i) - \bar{x} \bar{y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4.62)$$

Prema tome, za izračun koeficijenta korelacije r može se koristiti bilo koja od jednadžbi (4.57), (4.58), (4.61) i (4.62).

Regresijski pravac po svojoj definiciji mora odgovarati pravcu koji se najbolje prilagođava raspršnim točkama u smislu metode najmanjih kvadrata. Ovo se prilagođavanje kod jednoga regresijskog pravca najbolje odražava u smjeru osi y , a kod drugoga u smjeru osi x .

Prema računu vjerojatnosti, regresijski pravci moraju ispunjavati uvjet prema kojemu je suma kvadrata odstupanja svih točaka x, y od pravca minimalna. Iz ovoga slijedi da se regresijski pravac koji daje najbolje vrijednosti y u odnosu na x razlikuje od pravca koji daje najbolje vrijednosti x za dane vrijednosti y .

Regresijski pravci međusobno zatvaraju određeni kut β , a u odnosu na horizontalnu os kutove α_1 i α_2 , kako je prikazano na slici 4.16.



Slika 4.16 Regresijski pravci

Kut β je jednak razlici kutova α_1 i α_2 pa je:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2} \quad (4.63)$$

Koeficijent korelacije r je mjerodavan za ocjenu vrijednosti korelacijske veze i kreće se u granicama od -1 do +1. Veličina r je stupanj do kojega se veze između razmatranih varijabli približuje linearnoj ovisnosti. Ako je:

$$r^2 = 1,0$$

onda je:

$$S_x^2 = 0 \quad \text{i} \quad S_y^2 = 0,$$

a to znači da je suma kvadrata udaljenosti točaka (x_i, y_i) od pripadnih točaka na

pravcu jednaka nuli, odnosno da svi parovi (x_i, y_i) leže na pravcu, pa za $r = \pm 1$ postoji funkcionalna veza (V. Vranić, 1965.).

D. Srebrenović (1986.) daje kriterij za ocjenu korelacijskih veza:

- za $r = \pm 1$ odnos je potpuno definiran linearnom funkcijom
- za $|1| > |r| > 0,75$ korelacijska je veza čvrsta
- za $|0,75| > |r| > 0,50$ korelacijska je veza slaba
- za $|0,50| > |r|$ korelacijski je odnos tek naznačen i obično nema praktične vrijednosti za daljnje proračune.

U hidrologiji se općenito smatra da se korelacijski odnos može koristiti ako je apsolutna vrijednost r veća od 0,60.

Korelacijski koeficijent r ima pozitivnu vrijednost od 0 do 1 kada varijable x i y zajedno rastu ili padaju. Kada x raste, a y pada, i obratno, vrijednosti r padaju od 0 do -1.

Srednja pogreška (standardno odstupanje) koeficijenta korelacije je:

$$\sigma_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (4.64)$$

Vjerojatna pogreška koeficijenta korelacije je:

$$\sigma_v = \pm 0,6745 \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (4.65)$$

Vjerojatna vrijednost koeficijenta korelacije kreće se u granicama:

$$r \pm \sigma_v = r \pm 0,6745 \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (4.66)$$

Praktična vrijednost koeficijenta korelacije je:

$$r_p = r \pm 4\sigma_v \quad (4.67)$$

Korelaciju je potrebno oprezno koristiti kada je broj parova vrijednosti x i y malen. U toni se slučajno odnos smatra pouzdanim ako su $r + 4\sigma_v$ i $r - 4\sigma_v$ istoga predznaka.

Primjerice, za osam parova vrijednosti ($n = 8$) izveden je koeficijent linearne korelacije $r = 0,64$. Vjerojatna pogreška koeficijenta korelacije tada je:

$$\sigma_v = \pm 0,6745 \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} = \pm 0,6745 \frac{1-0,64^2}{\sqrt{8}} = 0,14$$

Granice praktične vrijednosti koeficijenta korelacije su:

$$r + 4\sigma_v = 0,64 + 4 \cdot 0,14 = 1,20 \quad \text{i} \quad r - 4\sigma_v = 0,64 - 4 \cdot 0,14 = 0,08$$

Kako izračunate granice imaju isti predznak, korelacija zadovoljava usvojeni kriterij.

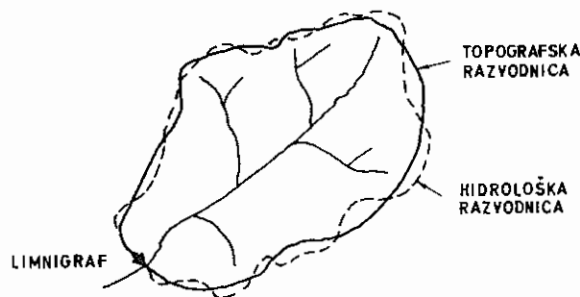
4.5 Sliv

Sliv je područje čije površinsko otjecanje ima odljev vode. U širem smislu sliv predstavlja svu one kopnene površine s kojih vodne mase ulaze u oceane, mora ili jezera. U užem smislu, sliv je površina s koje se voda slijeva prema glavnome sabiraču (recipijentu) - vodotoku. Vodne količine se promatraju u određenoj točki - protjecajnome profilu razmatranoga vodotoka.

Sliv je određen razvodnicom (vododjelnicom), koja može biti topografska ili hidrološka. **Razvodnica je granična linija koja dijeli susjedne slivove. Topografska razvodnica je granična linija koja u geološki povoljnim uvjetima dijeli susjedne slivove po najvišim točkama terena, a određuje se na topografskoj karti na temelju položaja slojnica. Veličina sliva je površina s koje voda dotječe u vodotok. Površina se sliva određuje na temelju topografske karte digitaliziranjem ili planimetriranjem.**

U geološki nepovoljnim uvjetima, primjerice u kršu, razvodnica vrlo često ne ovisi samo o topografiji, već prvenstveno o geološkim i hidrogeološkim uvjetima. Takva **hidrološka** ili **hidrogeološka razvodnica** obično nije stalna, već se njezin položaj mijenja ovisno o razinama podzemnih vodostaja. U takvim se slučajevima razmatra **utjecajni sliv** koji se odnosi na podzemno i površinsko otjecanje. U kršu se može razlikovati **izravni (neposredni)** i ukupni **utjecajni sliv**.

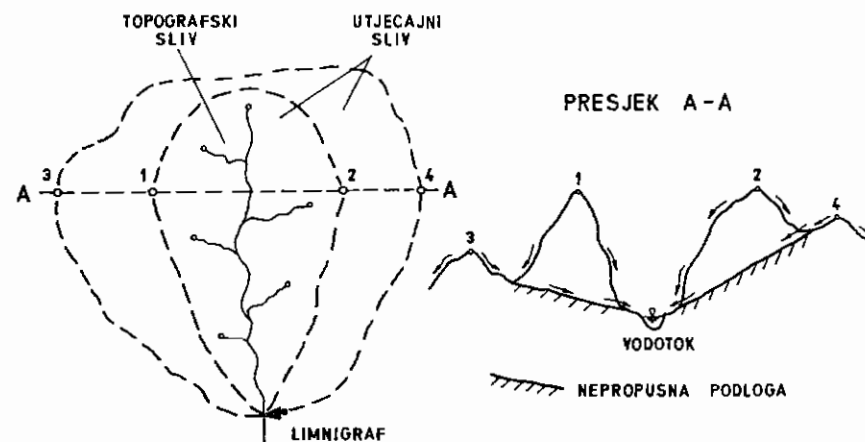
Na slici 4.17 prikazana su dva slučaja u kojima se topografska i hidrološka razvodnica ne poklapaju. U geološki se povoljnim uvjetima hidrološka i topografska razvodnica mogu djelomično razlikovati, ali njihove konačne površine ne razlikuju se bitno.



Slika 4.17 Topografska i hidrološka razvodnica.

Topografska ili orohidrografska razvodnica određuje se prema topografskoj karti na temelju položaja slojnica. Za to su naročito pogodne vrlo pregledne orohidrografske karte u mjerilu 1:50.000 i 1:25.000, na kojima su slojnice i vodotoci označeni dvjema različitim bojama. Za slivove veće od 400 km² pogodne su karte u mjerilu 1:100.000, a za slivove manje od 400 km² mjerilo može biti 1:50.000 ili manje.

Hidrološka, odnosno hidrogeološka razvodnica podzemnoga tečenja ograničava sliv koji se ne može odrediti na temelju razmatranja slojnica na karti. Na slici 4.18 prikazan je tipičan slučaj utjecajnoga sliva u kršu, gdje se topografska i hidrološka razvodnica bitno razlikuju.



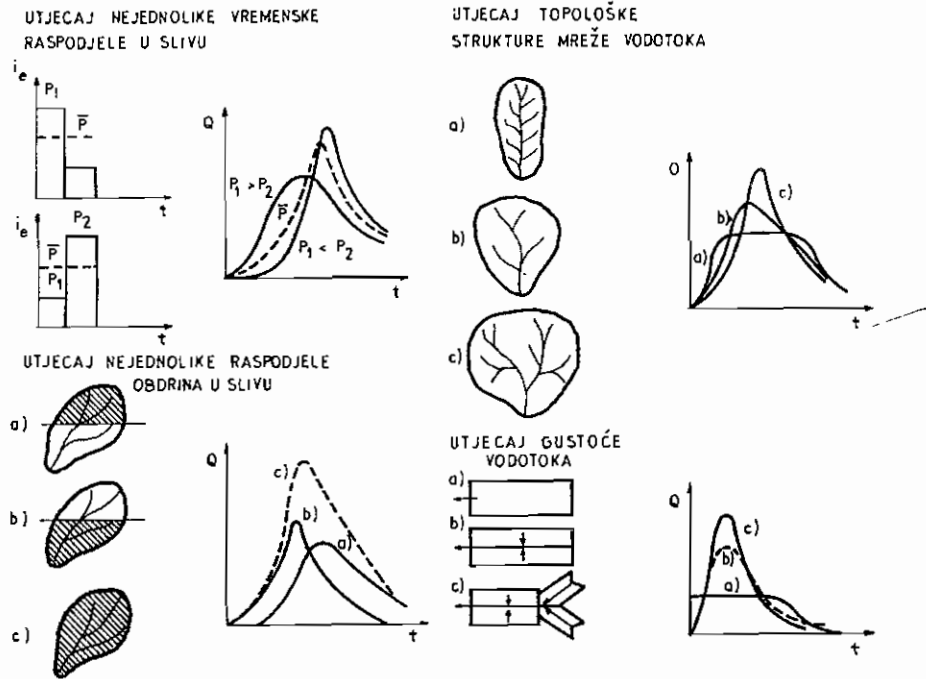
Slika 4.18 Utjecajni sliv

Budući da određivanje veličine utjecajnoga sliva u kršu može biti dodatno otežano činjenicom da hidrološka razvodnica nije stalna nego ovisna o razinama vode u podzemlju, razvodnica krških slivova smatra se tek približno određenom. Način određivanja hidrološke razvodnice vrlo je složen, pa je u analizi osim geoloških podloga potrebno koristiti i rezultate hidrogeoloških istraživačkih radova. Pod time se podrazumijeva korištenje rezultata istraživačkih radova na osnovi korištenja različitih obilježivača (trasera) - kemijskih, različitih boja ili radioaktivnih pokazivača - koji se ubacuju na mjesta poniranja vode, a potom se prati njihovo pojavljivanje na izvorima i u vodotocima.

Na otjecanje sa sliva bitno utječu sljedeći čimbenici:

- zemljopisni:** veličina i oblik sliva, pad i reljef terena te gustoća riječne mreže
- geološki:** sastav zemljišta s gledišta propusnosti i sadržaj vode u podzemlju
- biološki:** vrste raslinja, a posebice zastupljenost šumskih kultura na slivu
- klimatski:** oborine, temperatura, vlažnost zraka, vjetar, isparavanje i evapotranspiracija
- antropološki (tehnički):** čovjekov utjecaj na promjene vodnoga režima.

Na slici 4.19 prikazano je nekoliko karakterističnih slučajeva različitih oborinskih (oblik hijetograma i raspodjela oborina po slivu) i fizikalnih činilaca (oblik sliva i gustoća vodotoka na slivu), koji utječu na oblik hidrograma vodnoga vala u protjecajnome profilu vodotoka.



Slika 4.19 Karakteristični zemljopisni i klimatski utjecaji na oblik hidrograma otjecanja sa sliva (E. Čavlek, 1992.)

U hidrološkim se obradama često govori o **malim ili velikim slivovima**. Na pitanje koji se sliv smatra malim, a koji velikim nije jednostavno odgovoriti. Neki autori, kao graničnu spominju površinu od 1000 km², a češće se naziv mali sliv odnosi na slivove veličine do 400 km².

Mali se sliv u hidrološkome smislu ne smije određivati isključivo na temelju veličine površine, već se u obzir treba uzeti i druge osobine bitne za otjecanje vode. Bitno je svojstvo malih slivova da oborine koje su uzrokovale pojavljivanje velikih voda redovito padaju na cijeli sliv. Iako njihovi intenziteti nisu svugdje na slivu jednaki, ipak u otjecanju sudjeluje cijeli sliv. U slučajevima velikih slivova događa se da oborine jakih intenziteta, koje izazivaju pojave velikih voda, padnu samo na dio sliva, pa u otjecanju ne sudjeluje čitava slivna površina.

Što je oblik sliva bliži krugu, to je koeficijent koncentriranosti sliva K bliži jedinici. Za sliv iste površine, a izdužena oblika, sa znatno manjim koeficijentom koncentriranosti, mogućnost da oborina pokrije cijeli sliv je veća. (Koeficijent koncentriranosti K čijom se veličinom prikazuje oblik sliva opisan je u poglavlju 4.5.1). Slivovi s većim koeficijentom koncentriranosti mogu imati veću površinu nego izduženi slivovi, a da svejedno budu tretirani kao mali slivovi.

Prema tome, je li neki sliv malen ili velik određuje se na temelju čimbenika bitnih za otjecanje u svakome stvarnom slučaju zasebno. Raspoređivanje kiše po slivnoj površini ovisi o velikome broju lokalnih klimatskih i topografskih čimbenika, koji se vrlo razlikuju od slučaja do slučaja. Zbog toga treba svaki stvarni primjer proučiti na temelju rasporeda kiša po promatranoj slivnoj površini i na toj osnovi donijeti odgovarajuće zaključke. Za male je slivove bitno da se uz pretpostavku jednoliko rasporedene mjerodavne oborine po cijelome slivu (što znatno pojednostavljuje izračune), može dobiti realne vrijednosti velikih voda, dovoljno točne za praktične potrebe.

4.5.1 Oblik sliva

Oblici slivova mogu biti različiti i oni utječu na veličinu i trajanje hidrograma vodnih valova. Tako, primjerice, postoje izduženi, lepezasti, okrugli sliv i sl. O obliku sliva ovisi koncentracija vode, pa se zbog toga utjecaj oblika sliva opisuje **koeficijentom koncentriranosti sliva**. Za određivanje koeficijenta koncentriranosti sliva K postoje različite formule, nazvane po svojim autorima, a neke od njih su:

- prema D. Srebrenoviću:
$$K = \frac{2A}{OU} \quad (4.68)$$

- prema R. E. Hortonu:
$$K = \frac{A}{L^2} \quad (4.69)$$

- prema H. Graveliusu:
$$K = \frac{0,28 O}{A^{0,5}} \quad (4.70)$$

U formulama (4.68), (4.69) i (4.70) korištene su sljedeće oznake: A (km²) je veličina sliva, O (km) opseg sliva, U (km) udaljenost težišta sliva od protjecajnoga profila i L (km) duljina vodotoka (slika 4.20).



Slika 4.20 Skica sliva s osnovnim elementima za definiranje koeficijenta koncentriranosti

4.5.2 Srednja nadmorska visina sliva

Srednja nadmorska visina sliva H_o je vodoravna crta koja siječe hipsometrijsku krivulju tako da su površine iznad i ispod hipsometrijske krivulje i te crte jednake. Hipsometrijska krivulja je krivulja koja pokazuje koji je dio područja riječnoga sliva smješten do razmatranoga riječnog profila (slika 4.21a). Najčešće se hipsometrijska krivulja konstruira radi određivanja srednje nadmorske visine sliva do određenoga protjecajnog profila vodotoka. Srednja nadmorska visina sliva do nekoga profila vodotoka H_o je:

$$H_o = \frac{\sum H_i A_i}{A} \quad (\text{m n.m.}) \quad (4.71)$$

gdje je H_i (m n.m.) srednja nadmorska visina između dviju slojnica na slivu, A_i (km^2) površina između dviju slojnica na slivu, a A (km^2) veličina sliva.

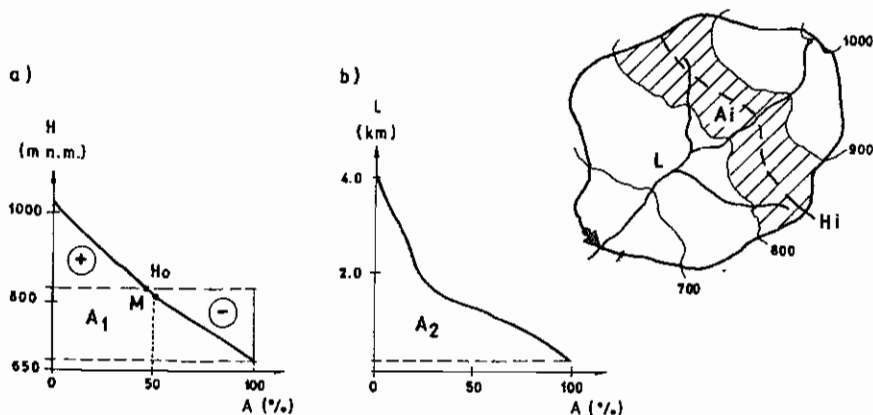
4.5.3 Pad sliva

Pad sliva može se definirati na temelju više postupaka, od kojih se najtočnijim smatra postupak **hipsometrijske analize**. U postupak ulaze sljedeće krivulje:

1. **hipsometrijska krivulja:** $A_1 = f(H)$ (slika 4.21a)
2. **krivulja površina:** $A_2 = f(L)$ (slika 4.21b)

gdje je H nadmorska visina, a L udaljenost slojnica koja se mjeri po glavnome vodotoku.

Pad sliva S je odnos površina ispod hipsometrijske krivulje $A_1 = f(H)$ i krivulje površina sliva (u odnosu na duljinu glavnoga vodotoka) $A_2 = f(L)$



Slika 4.21 Hipsometrijska krivulja (a) i krivulja površina (b)

$$S = \frac{A_1}{A_2} \quad (\text{m/km}^2), (\%) \quad (4.72)$$

Pad je sliva prvenstveno važan radi utjecaja na oblik i dolazak vodnoga vala, infiltracije vode u tlo i obnavljanja podzemne vode.

Ako se površinu pod krivuljom na slici 4.21a integrira i podijeli s osnovicom, dobiju se pravokutnik i točka H_o na hipsometrijskoj krivulji koja označava srednju nadmorsku visinu sliva.

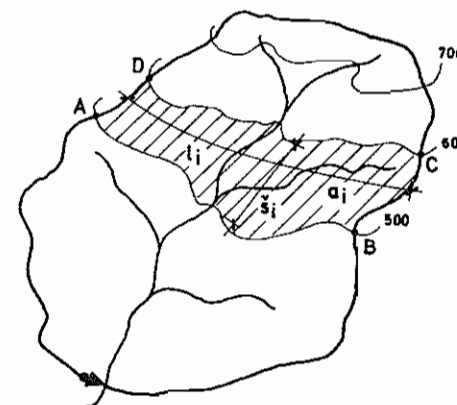
U polovici (50 posto veličine) sliva na hipsometrijskoj krivulji nalazi se medijana sliva M . Visina medijana sliva odgovara nadmorskoj visini polovice sliva. Redovito nema velike razlike u visini između srednje nadmorske visine sliva H_o i medijana sliva M , a u hidrološkoj se praksi u nekim slučajevima pojam medijana sliva rabi kao jedna od karakteristika sliva.

Srednji pad sliva može se odrediti na temelju razmaka slojnica (C. O. Wisler i E. F. Brater, 1967.).

Na slici 4.22 dana je skica sliva s glavnim elementima za određivanje pada sliva.

$$s_i = \frac{D}{\check{s}_i} = \frac{D}{a_i} = \frac{D l_i}{a_i} \quad (4.73)$$

$$\check{s}_i = \frac{a_i}{l_i} \quad (4.74)$$



Slika 4.22 Skica sliva sa slojnicama

Razmatra se sljedeće veličine:

- \bar{s}_i - srednja širina pojasa $ABCD$
- a_i - površina pojasa $ABCD$
- l_i - srednja duljina slojnice pojasa $ABCD$
- s_i - srednji pad pojasa $ABCD$
- D - razmak između slojnica (na slici 4.22: $D = 100$ m)
- L - ukupna duljina svih slojnica
- S - ukupni pad sliva
- A - ukupna površina razmatranoga sliva.

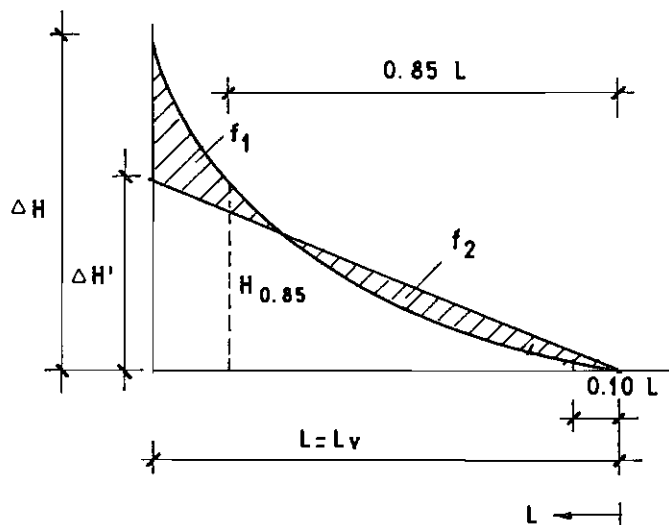
Ukupni pad sliva S je:

$$S = \frac{D l_1 a_1}{a_1 A} + \frac{D l_2 a_2}{a_2 A} + \dots + \frac{D l_n a_n}{a_n A} = \frac{D \sum l_i}{A} = \frac{DL}{A} \quad (4.75)$$

(U pogl. 4.16.5 D. Srebrenović je pad sliva definirao za izračunavanje otjecanja velikih voda na drugačiji način, izrazom 4.234.)

4.5.4 Pad vodotoka

Uzdužni pad vodotoka ili, kraće, **pad vodotoka**, određuje se na temelju geodetske snimke uzdužnoga presjeka vodotoka, a može se definirati na više načina. **Uzdužni presjek vodotoka** ili **profil vodotoka** je prikaz (tablični ili grafički) dionice ili cijeloga vodotoka duž osi protjecanja, dan u nadmorskim ili relativnim visinama.



Slika 4.23 Grafička predodžba pada vodotoka

U skladu s oznakama na slici 4.23, pad vodotoka I se može definirati na sljedeće načine:

$$1. \quad I_{max} = \frac{\Delta H}{L_v} \quad (\text{m/km}), (\%) \quad (4.76)$$

$$2. \quad I = \frac{\Delta H'}{L_v} \quad (\text{m/km}), (\%) \quad (4.77)$$

3. približna formula (prema M. S. Bensonu, 1959.):

$$I = H_{0,85L} - \frac{H_{0,1L}}{0,75 L_v} \quad (\text{m/km}), (\%) \quad (4.78)$$

gdje je H_{xL} apsolutna visina vodotoka na indeksom označenoj udaljenosti od ušća ($x = 0,10$; $x = 0,85$), a L_v ukupna duljina vodotoka.

4.5.5 Gustoća drenske mreže u slivu

Drensku mrežu predstavljaju svi vodotoci na nekom slivu: stalni, isprekidani i povremeni.

U stalnome je vodotoku otjecanje vode neprekidno, u isprekidanome vodotoku otjecanje vode se ostvaruje često i uzrokovano je kratkotrajnim oborinama, a u povremenome vodotoku voda otječe samo za vrijeme velikih oborina.

Apsolutna gustoća riječne mreže je ukupna duljina svih vodotoka u slivu ΣL .

Specifična gustoća riječne mreže D_i je ukupna duljina vodotoka ΣL podijeljena s ukupnom površinom sliva A :

$$D_i = \frac{\Sigma L}{A} \quad (\text{km/km}^2) \quad (4.79)$$

Može se razlikovati dobro, srednje i slabo dreniran sliv:

- ako je $D_i > 4$ km/km², sliv je bogat drenskom mrežom
- ako je $D_i = 1 - 4$ km/km², sliv je srednje dreniran
- ako je $D_i < 1$ km/km², sliv je siromašan drenskom mrežom

4.5.6 Koeficijent otjecanja, specifični i sumarni specifični dotoci

Koeficijent otjecanja c je odnos efektivne (neto) oborine P_e i oborine koja padne na sliv (bruto oborine) P :

$$c = \frac{P_e}{P} \quad (4.80)$$

Koeficijent otjecanja sa sliva predstavlja postotak otjecanja u odnosu na bruto količinu oborine koja padne na neko slivno područje. Za srednji protok je:

$$c = \frac{QT}{PA} \quad (4.81)$$

gdje je Q (m^3/s) srednji protok (mjesečni, godišnji, višegodišnji), T (s) trajanje srednjega protoka, P (m) oborina koja padne na sliv, a A (m^2) površina sliva.

Specifični dotok ili specifično otjecanje q je vrijednost protoka Q vode u protjecajnome profilu vodotoka podijeljena s površinom sliva do tog profila A .

$$q = \frac{Q}{A} \quad (m^3/s/km^2), (l/s/km^2) \quad (4.82)$$

Mogu se razlikovati **prosječni i ekstremni (maksimalni i minimalni) specifični dotoci sa sliva**. Specifični dotoci su parametri pogodni za međusobnu usporedbu otjecanja u profilima duž vodotoka ili usporedbu otjecanja s različitim slivova.

Postoji li na slivu nekog vodotoka nekoliko hidroloških stanica (barem tri), moguće je konstruirati krivulju specifičnih dotoka u ovisnosti o veličini sliva površine $q = f(A)$. Najuzvodniji dio sliva je najbogatiji vodom pa, iako protoci vode duž vodotoka (s povećanjem sliva) redovito rastu, veličine specifičnih dotoka prema nizvodnome dijelu trehaju opadati (slika 4.23a) - ukoliko voda nije dodana u vodotok u nizvodnome dijelu ili izgubljena iz njega u uzvodnome dijelu.

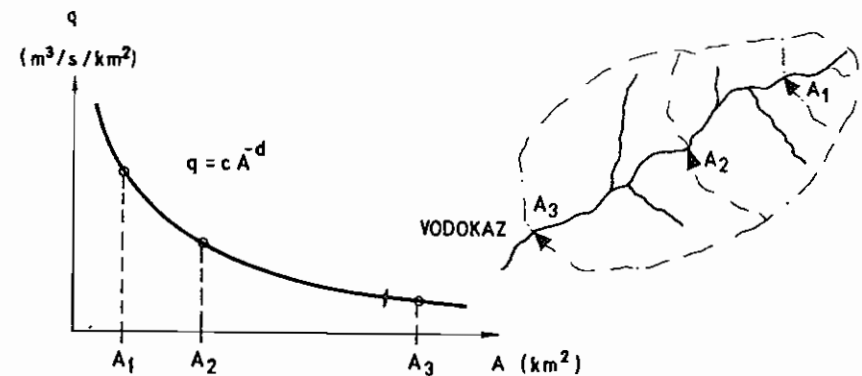
Uz sliku 4.24a se napominje da su A_1 , A_2 i A_3 površine sliva do odgovarajućih vodokaznih profila.

Za slivove sa sličnim otjecanjem moguće je krivulju specifičnih dotoka sa sliva kojemu postoji više podataka koristiti na slivu o kojemu postoji manje podataka ili ih uopće nema. Na temelju krivulja specifičnih dotoka moguće je odrediti specifični dotok, odnosno odgovarajući protok na bilo kojemu dijelu vodotoka koji je obuhvaćen krivuljom $q = f(A)$. Zakonitost opadanja specifičnih dotoka duž vodotoka nije linearna, pa je zbog toga pogrešno određivati srednje protoke na temelju odnosa površina sliva:

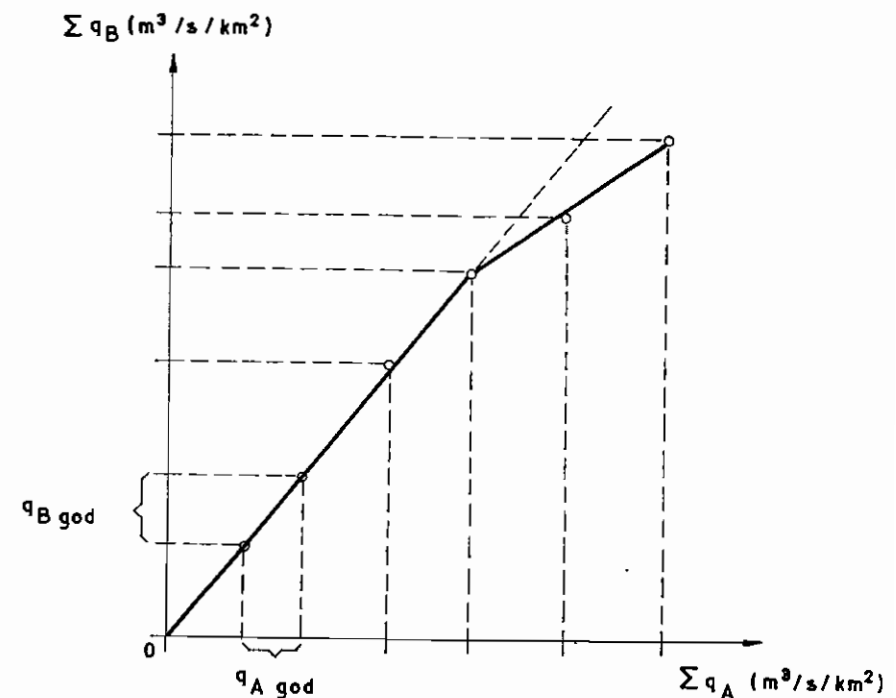
$$Q_1 : Q_2 = A_1 : A_2 \quad (4.83)$$

Kada se srednje godišnje specifične dotoke kronološki zbroji, dobije se **sumarne specifične dotoke** Σq . Istovremeni sumarni specifični dotoci u dva različita hidrološka profila sa sličnim vodnim režimima mogu se uspoređivati na temelju grafičke konstrukcije (slika 4.24b). Ukoliko su protoci na razmatranim stanicama točni, pravac koji izjednačava sumarne dotoke prolaziti će kroz ishodište koordinatnoga sustava, a otkloni prema osnovnoj liniji ne smiju biti veći od kuta od 5° . Niz se podataka na temelju osnovne linije može produljiti prema gore ili prema dolje ukoliko je niz jedne stanice kraći od niza druge stanice.

a)



b)



Slika 4.24 Krivulja specifičnih dotoka (a) i sumarni specifični dotoci (b)

Ukoliko se ustanovi lom linije sumarnih dotoka, to je siguran znak da je u jednome od razmatranih hidroloških nizova došlo do značajne promjene, pa je potrebno kontrolirati osnovne hidrološke podatke, ustanoviti razlog promjene i provesti odgovarajuće popravke.

Ako se opisani postupak propći, tako da vrijedi za nizove podataka koji se kronološki zbrajaju, dolazi se do pojma **dvostrukih sumarnih količina**, koje predstavljaju prikaz uzastopnih akumuliranih vrijednosti druge varijable (engl. double-mass analysis - što je fizikalno neispravno prevoditi kao dvostruke mase). Na temelju pravca koji prolazi kroz ishodište koordinatnoga sustava i kroz točke parova sumarnih količina, podatke se može provjeriti i potom provesti odgovarajuće nadopune nizova. Osim za prosječne dotoke, postupak je preporučljivo rabiti za provjeravanje i produljivanje nizova godišnjih-oborina.

4.6 Hidrometrija

Hidrometrija je znanost o mjerenju i analizi vode u svim njezinim oblicima pojavljivanja na Zemlji, uključujući metode, mjerne tehnike i instrumentarij što se koristi u hidrologiji.

Osnovni zadaci hidrometrije su: razrada metoda i hidrometrijskoga pribora, određivanje elemenata vodnoga režima, obrada podataka dobivenih mjerenjem te organizacija hidrometrijskih stanica u svrhu dobivanja optimalnih informacija.

Mjerenja površinskih voda redovito se provode u hidrometrijskim profilima. **Hidrometrijski profil** je poprečni profil u kojemu se dobivaju podaci o vodi u rijekama, jezerima ili akumulacijskim jezerima i retencijama na temelju jednoga ili više elemenata: vodostaja, otjecanja vode, pronošenja nanosa, temperature i drugih fizikalnih svojstava vode, karakteristika ledenoga pokrivača i kemijskih svojstava vode.

4.6.1 Mjerenje razina vode

Razina je vode određena vodostajem. **Vodostaj** je okomita udaljenost vodene površine vodotoka, jezera, akumulacijskoga ili retencijskoga jezera (ili opservacijskoga zdenca podzemnih voda) od pretpostavljene mjere (kota nule vodokaza).

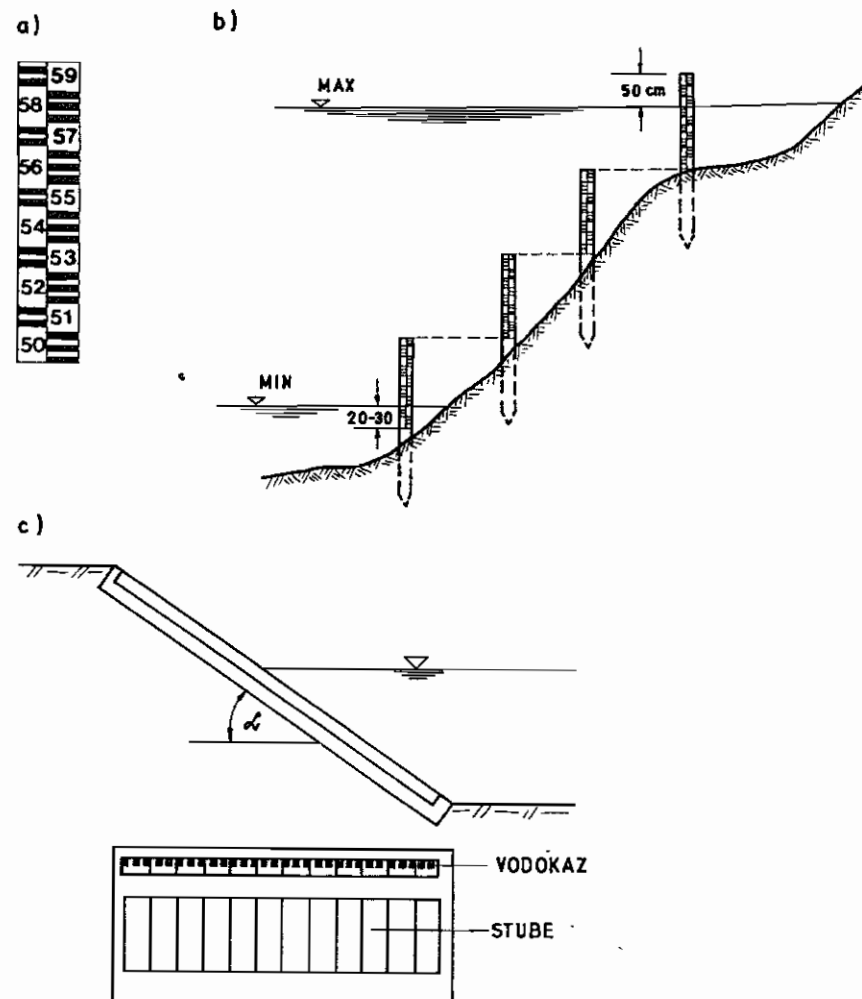
Vodostaje se može bilježiti na dva načina:

1. prekidno (nekontinuirano) na vodokazu
2. neprekidno (kontinuirano, permanentno) na limnigrafu.

Vodokaz, odnosno **vodokazna letva**, je stupnjevana skala koja se koristi kako bi se označila razina vodene površine u vodotocima, vodnim sprennicima itd. Na vodokazu se vodostaji očitavaju povremeno. Ukoliko ih se očitava jedanput dnevno, očitavanja treba provoditi redovito i u isto vrijeme (u Hrvatskoj u 7,30 ujutro). U

vrijeme pojavljivanja velikih voda vodostaji se mogu očitavati i češće, primjerice svakih pola sata ili svaki sat, i ta se očitavanja nazivaju izvanrednim očitavanjima.

Vodokaz je najjednostavniji uređaj za mjerenje razine vode. Izrađuje se od drveta, lijevanoga željeza, čeličnoga lima ili plastike. Najčešća je podjela na vodokaznoj letvi dvoecentimetarska. Brojevi upisani na vodokazu označavaju decimetre, a točnost očitavanja vodostaja je 1 cm. Na slici 4.25a prikazan je dio tipična vodokaza koji se rabi kod nas. Vodokaz može biti postavljen vertikalno - na jednome stupu - te stepenasto (slika 4.25b) i koso (slika 4.25c).



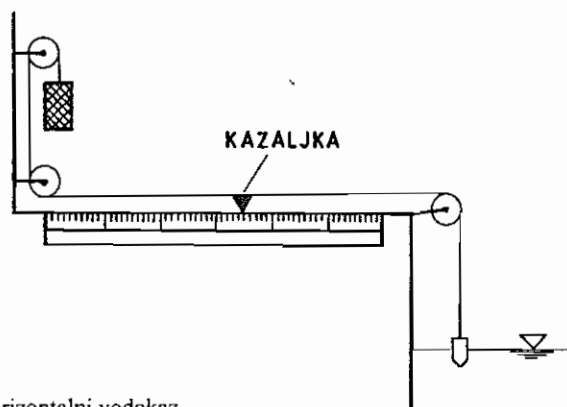
Slika 4.25 Vodokazi - šesti metar (a), stepeničasti (b) i kosi (c)

Kada se osniva vodokazna stanica, najprije se geodetski snimi protjecajni profil vodotoka u koji se postavlja vodokaz, nakon toga se postave jedan ili, po potrebi, više stupova - nosača i tek se onda na njih postavljaju mjerila. Početak - **kotu nule vodokaza** - potrebno je definirati u prostoru, odnosno odrediti nadmorsku visinu "0" na vodokazu.

Svaki vodokaz mora imati svoju stalnu geodetsku točku koja ima točno određenu nadmorsku visinu, određenu preko preciznog nivelmana. Stalna je geodetska točka učvršćena preko čeličnoga klina s glavom ubetoniranom u čvrst nepomični predmet (stijena, upomjak mosta, obalni zid, zgrada). Takva čvrsta točka osigurava točno obnavljanje kote nule vodokaza ako se vodokaz uništi.

Na slici 4.25c prikazan je kosi vodokaz koji se može izvesti ako je na kosoj obali izvedena ravna obloga. Ukoliko na pokosu u blizini vodomjernoga profila nema zapreka, moguće je u obalu ubetonirati kosu vodokaznu letvu koja mora biti dobro zaštićena od udara plivajućih predmeta. Za očitavanje vodostaja u cm potrebno je podjelu na kosome vodokazu povećati koeficijentom $1/\sin\alpha$, gdje je α kut vodokaza prema horizontali.

Na slici 4.26 shematski je prikazan horizontalni vodokaz, koji je osnova daljinskoga vodokaza.



Slika 4.26 Horizontalni vodokaz

Pravilna lokacija za postavljanje vodokaza je ravan dio vodotoka ili, radi zaštite, malen slijepi kanal. Zbog utjecaja uspora vodokaz treba postaviti daleko od ušća, a u blizinu ušća postavlja se samo kada se želi motriti varijacije u vodostajima. Treba izbjegavati postavljanje vodokaza na stupovima mostova, u blizini kanjona i na drugim suženim mjestima u vodotoku.

Za mjerenje razina vode s vrlo velikom točnošću do 0,1 mm koristi se **mjerna igla**. Taj se instrument sastoji od pokretne metalne šipke sa skalom na čijemu je donjem kraju igla. Šipka s iglom vertikalno se pomiče kroz vodilicu koja je pričvršćena za učvršćeno postolje. Za vrijeme mjerenja se šipka s iglom spušta sve dok vrh igle ne

dotakne površinu vode, nakon čega se na nonijusu instrumenta očitava razlika između nule nonijusa (referentne ravnine) i razine vode. Osim standardna rješenja, koje se sastoji od jednostavnoga promatranja kada će igla dotaknuti površinu vode, postoje i drugi načini određivanja dodira igle s površinom vode, npr. elektrooptička signalizacija.

Mjerne se igle za mjerenje razine vode rabe kada su potrebni precizni rezultati, prvenstveno u hidrotehničkim laboratorijima, kada se radi na hidrauličkim fizikalnim modelima. One su također sastavni dio različitih meteoroloških instrumenata: isparitelja klase A, lizimetra, itd. Kada se mjeri razina vode u kanalima i prirodnim vodotocima, mjerne se igle mogu koristiti za precizno određivanje pada vodnoga lica, ukoliko su uvjeti tečenja vode pogodni za njihovu primjenu.

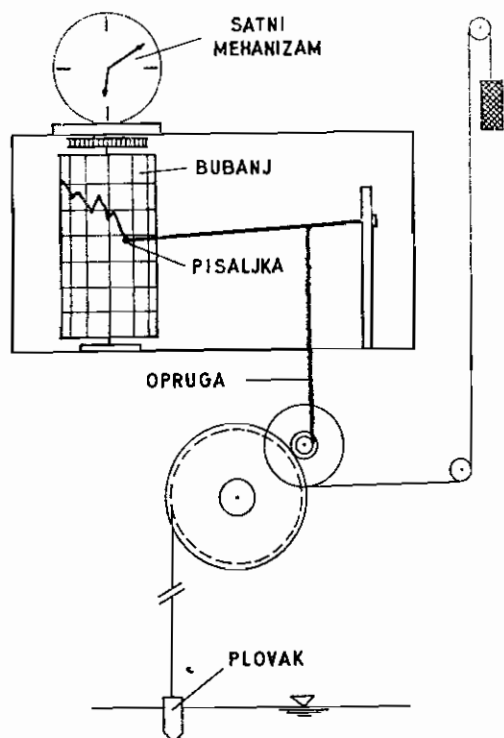
No vodokazna motrenja imaju i nekoliko vrlo ozbiljnih nedostataka. To se prvenstveno odnosi na očitavanja s vodokaza jedanput dnevno, koja se prihvaćaju kao srednji dnevni vodostaji. Takav podatak, naročito kada se radi o malim vodotocima, može zbog mogućih naglih promjena vodostaja tijekom dana značajno odstupati od stvarnih srednjih vrijednosti. Osim toga, na vodokazu se vrlo često ne stigne očitati maksimalan vodostaj, nego se zabilježi niža vrijednost, pa se na taj način dobiju potcijenjene podloge za proračun velikih voda. Konačno, vodokazna očitavanja ovise o savjesnosti motritelja, pa i s te strane može doći do pogrešnih podataka. Zbog navedenih se razloga vodostaje nastoji pratiti neprekidno, što omogućuje uporaba automatskih registratora ili limnigrafa.

Limnigraf je instrument koji neprekidno bilježi razine vode tijekom vremena - automatski registrator vodostaja. Na slici 4.27 shematski je prikazan standardni mehanički limnigraf s plovkom pričvršćenim za čeličnu žicu koja preko odgovarajućega sustava zupčanika i opruge pomiče pero po papirnoj traci na bubnju. Satni mehanizam okreće bubanj s papirom brzinom od 2 mm/sat. Papirnata se traka mijenja nakon svakoga punog okreta - svakih osam dana. Ovisno o tipu limnigrafa, bubanj može biti smješten vertikalno ili horizontalno.

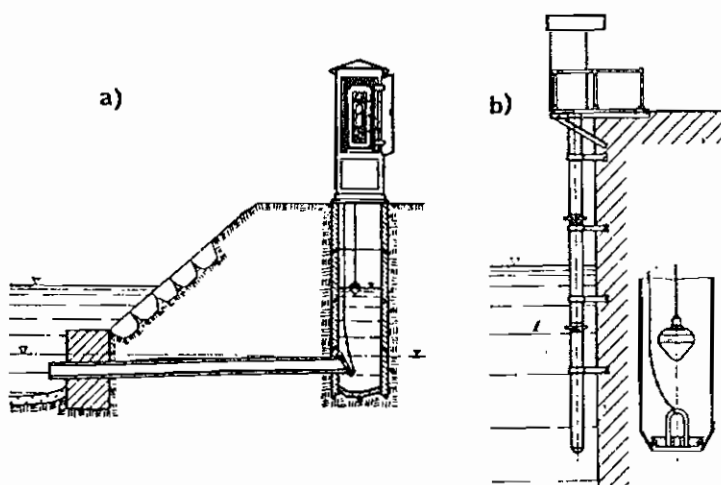
Promjer plovka za mjerenje površinskih voda u rasponu je od 75 do 150 mm, a promjer plovka za podzemne vode je 40 mm. Za mjerenja u otvorenim tokovima plovak je smješten u zdencu ili u zaštitnoj cijevi (pogodno za ugradnju na uspravnoj obali ili stupu mosta), kako je prikazano na slici 4.28. Prijenosni mehanizam i bubanj s trakom zaštićeni su odgovarajućom kutijom.

Ovisno o veličinama zupčanika, standardna mjerila bilježenja vodostaja na limnigrafskoj traci su 1:5 (za amplitudu vodostaja do 1,25 m), 1:10, 1:20 i 1:25 (mjeri amplitudu vodostaja do 6,25 m). Napominje se da je pri ombrografu prenošenje visina palih oborina u mjerilu 1:1.

Često se rabe limnigrافي kod kojih se traka premotava s jednoga na drugi valjak. Takav je, primjerice, limnigraf SEBA, tipa "Delta", čija je traka duljine 16 m. Trajanje bilježenja vodostaja može se odrediti od 32 dana do tri mjeseca. Mijenjanjem zupčanika mogu se regulirati mjerila bilježenja vodostaja od 1:5 do 1:50.

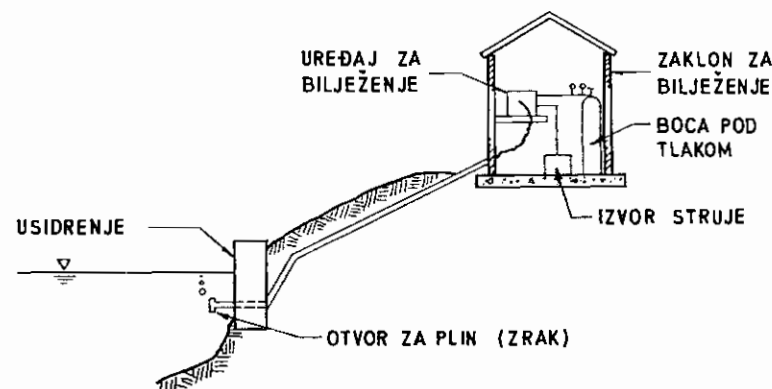


Slika 4.27 Shematski prikaz limnigrafa



Slika 4.28 Limnigraf s plovkom u cijevi (a) i s plovkom u zdencu (b) (S. Jovanović i dr., 1977.)

Mjerenje razine vode može se provoditi i pomoću tlačnoga limnigrafa (slika 4.29). Ono se ovdje temelji na bilježenju razlike tlakova stlačenog plina i hidrostatičkoga tlaka vode. Tlak plina je stalan, no hidrostatički se tlak mijenja ovisno o vodostaju, pa na taj način razina vode utječe na promjenu tlaka, koja se mjeri manometrom.



Slika 4.29 Tlačni limnigraf (M. P. Wanielista, 1990.)

Tlačni limnigrifi su znatno skuplji od limnigrafa s plovkom, ali su zato troškovi ugradnje tlačnoga limnigrafa manji od troškova ugradnje limnigrafa s plovkom, budući da u tom slučaju ne treba izvoditi zdenac ili zaštitnu cijev. Zbog toga su često tlačni limnigrifi ekonomičniji od limnigrafa s plovkom.

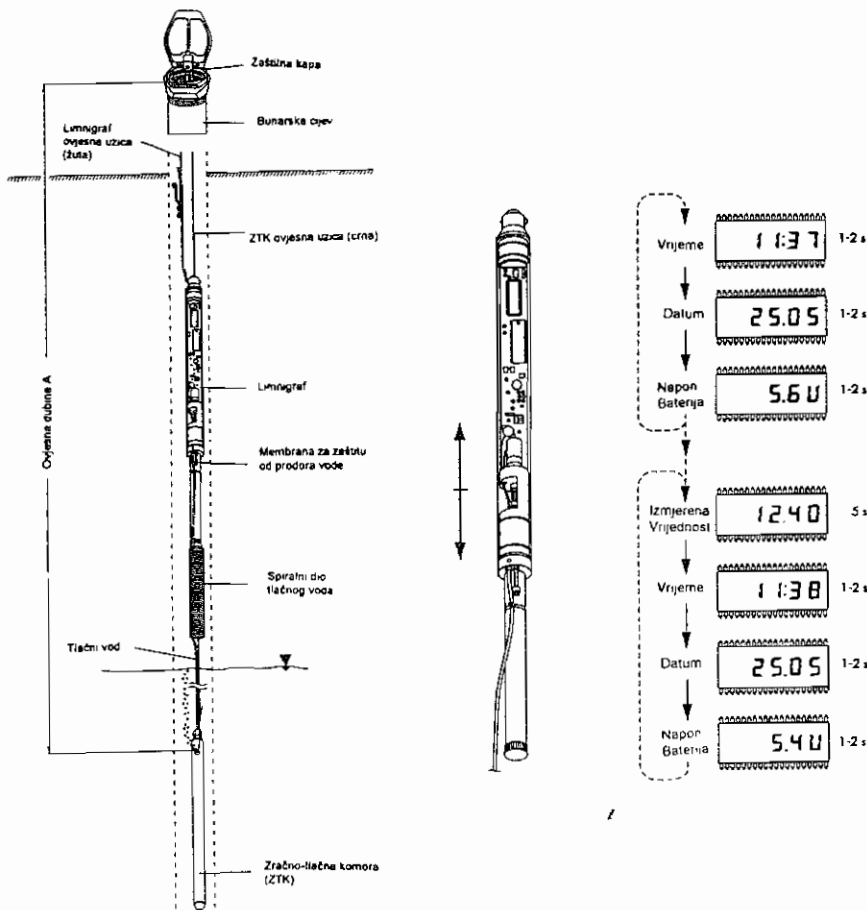
U novije se vrijeme rabe i elektronski limnigrifi, primjerice limnigraf OTT tipa THALIMEDES. Ovaj tip limnigrafa ima sustav plovka - protuuteg, a promjene razine vode preko plovka pokreću potencijometar. Napon s klizača potencijometra se analogno-digitalnim pretvornikom pretvara u numerički podatak koji prikazuje vodostaj. U unaprijed određenim vremenskim razmacima izmjeren vodostaj pohranjuje se u poluvodičku memoriju. Prikupljeni podaci prebacuju se u prijenosno računalo preko za to predviđena priključka. Na slici 4.30 prikazan je OTT-ov tlačni elektronski limnigraf tipa ORPHIMEDES.

Instrument za neprekidno bilježenje razina mora naziva se **mareograf** i ne razlikuje se od limnigrafa. Na slici 4.31 dan je shematski prikaz najstarije mareografske stanice u Hrvatskoj koja je postavljena u Bakru. M. Orlić i M. Pasarić (1998.) opisali su rad te stanice i ukazali na važnost prikupljenih podataka.

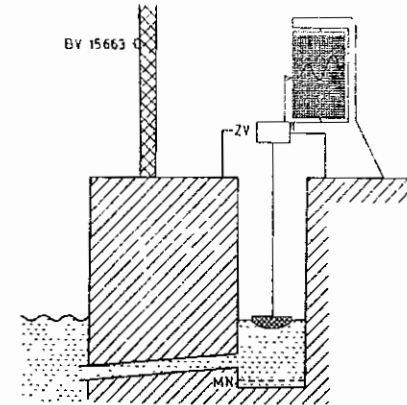
Mareograf je postavljen u Bakru 1929. godine i, uz prekid od 1939. do 1949., ta stanica radi i danas. Na mareografu u Bakru prikupljen je najdulji niz vodostaja mora u Hrvatskoj. Taj mareograf je preko biljega visine BV 15 663 na pročelju zgrade povezan s geodetskom mrežom. Vodostaji se broje od mareografske nule (MN), koja

odgovara nultome položaju pisaljke. Položaj mareografske nule definiran je prema znaku visine (ZV) uz mareograf. Udaljenost između (MN) i (ZV) je konstanta mareografa i za mareograf Bakar iznosi 311,8 cm. Promjer zdenca je 50 cm, visina zdenca je 2,70 m, promjer spojne cijevi je 10 cm, a njezina duljina je 10,8 m.

Svaki limnigraf, kao i mareograf, moraju se nalaziti u neposrednoj blizini vodokaza, prvenstveno radi motrenja vodostaja ako dođe do poremećaja u radu limnigrafa. Kada se mijenja papir i kada se kontrolira rad limnigrafa, limnigrafski zapisi se uvijek uspoređuju s vodokaznim podacima.



Slika 4.30 Elektronski limnigraf tvornice OTT tipa ORPHIMEDES ("Hidroing" d.o.o., Zagreb, specijalizirana tvrtka za ugradnju i održavanje instrumenata te obradu hidroloških podataka)



Slika 4.31 Shematski prikaz mareografske stanice u Bakru (M. Orlić i M. Pasarić, 1998.)

Vodostaje se može bilježiti i na određenoj udaljenosti od vodokaza, na **daljinskim vodokazima**. Daljinski vodokaz sadržava tri osnovna elementa:

1. pokazivač vodostaja
2. prijenosni dio ili dalekovod, koji prenosi vodostaje na određenu udaljenost mehaničkim, hidrauličkim, tlačnim ili električnim putem. Prijenos mehaničkim putem je do 30 m, hidraulički i tlačni prijenos može se rabiti do 300 m, a električni prijenos je gotovo neograničen. (Kada se rabi elektronski limnigraf, informacije se mogu prenositi putem radijske ili telefonske mreže.)
3. primalac vodostaja, odnosno limnigraf koji bilježi vodostaje. Limnigrami mogu biti neprekidani ili stepeničasti, ako se bilježe prema impulsima u određenim vremenskim razmacima.

4.6.2 Mjerenje količina vode

Metode mjerenja površinskoga otjecanja vode razvile su se u različitim oblicima i dijele se na četiri vrste:

1. izravno mjerenje protoka volumenskom metodom (posude različitih oblika i različitih volumena)
2. određivanje protoka na temelju mjerenja brzina vode (mjerenje brzina tečenja u pojedinim lamelama riječnoga profila, iz čega se kasnije izračuna odgovarajući protok vode)
3. mjerenje protoka različitim uređajima i preljevnim građevinama (protok se izračuna na temelju formule izvedene za takav mjerni uređaj)
4. mjerenje protoka uvođenjem pojedinih kemijskih, kolorimetričkih ili radioaktivnih elemenata (obilježivača) u vodotok (kuhinjska sol, različite intenzivne boje, radioaktivni obilježivači)

4.6.2.1 Volumenska (obujmena ili volumetrijska) metoda

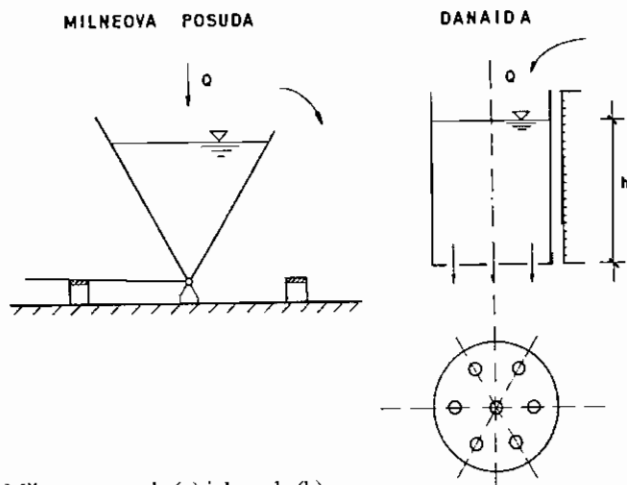
Volumenskom se metodom mogu mjeriti protoci malih vodotoka i izvora, a ti protoci su najviše 10 l/s. Ova se metoda najčešće primjenjuje u tariranju, odnosno određivanju protočne krivulje, trokutnih preljeva i njezinom je primjenom moguće postići vrlo visoku točnost.

Osnovni izraz za protok na temelju volumenske metode je:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (\text{l/s}) \quad (4.84)$$

gdje je V (l) volumen posude, a Δt (s) vrijeme punjenja posude.

Od velika broja različitih vrsta mjernih posuda ovdje se izdvajaju Milneova posuda i danaida, koje su prikazane na slici 4.32.



Slika 4.32 Milneova posuda (a) i danaida (b)

Milneova posuda djeluje kao automatski registrator, a sastoji se od dviju jednakih posuda. Kada se jedna posuda napuni do određene razine, automatski se prevrće i tada se počinje puniti druga posuda. Budući da je volumen posuda točno određen, bilježenjem vremena prevrtanja između dvaju pražnjenja, uz poznat volumen, vrlo je jednostavno odrediti protok.

Danaida je posuda s jednim ili više otvora, kako je prikazano na slici 4.32b. Svaki od otvora izveden je kao sapnica i normiran, tako da je točno definirano koliko vode pri određenoj razini u posudi kroz njega protječe. Kada se razina vode u danaidi ustali na određenoj visini h , postignuta je ravnoteža dotoka i istjecanja. Protok se određuje prema izrazu za istjecanje kroz otvore:

$$Q = \mu n A \sqrt{2gh} \quad (4.85)$$

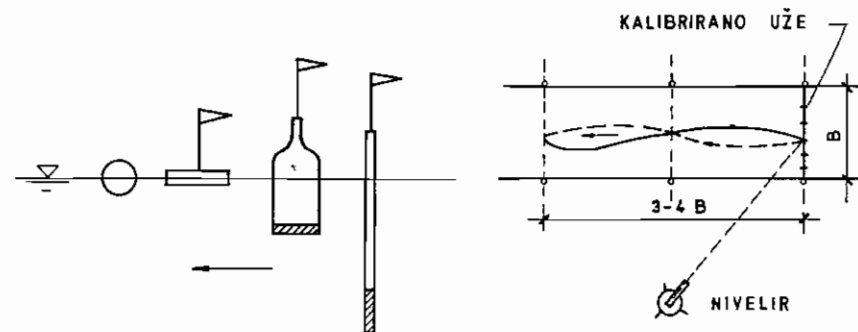
gdje je μ koeficijent istjecanja, n broj otvora kroz koje voda istječe, A površina otvora, g gravitacija, a h visina ustaljene razine vode u posudi.

4.6.2.2 Mjerenje brzina vode u vodotoku

Razlikuju se dvije osnovne vrste mjerenja brzina vode u vodotoku:

- mjerenje površinskih brzina
- mjerenje brzina u okomicama protjecajnog profila.

Brzine vode na njezinoj površini mogu se mjeriti plovcima. Plovcima za mjerenje brzina mogu biti različitih tipova. Na slici 4.33 prikazano ih je nekoliko: drvena kugla (a), drvena pločica sa zastavicom (b), boca opterećena sačmom na dnu (c) i drveni štap opterećen na uronjenome kraju olovom ili željezom (d). Plovcima (c) i (d) mjere se brzine vode na određenoj dubini. Na slici 4.33 prikazana je i dionica rijeke na kojoj se plovcima mjeri brzina vode.



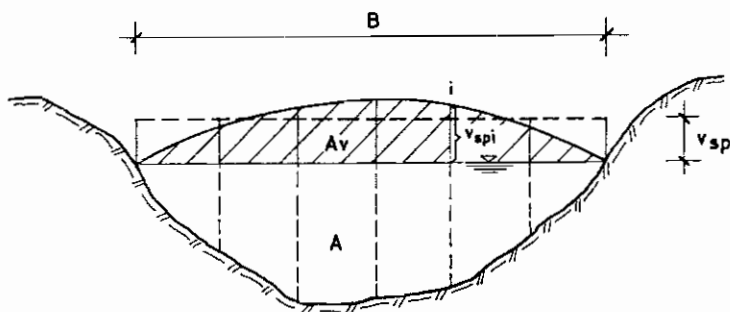
Slika 4.33 Hidrometrijski plovcima i dionica vodotoka na kojoj se mjeri brzina vode

Mjerenje brzine vode plovcima provodi se na ravnoj dionici rijeke. Duljina dionice l je 3-4 širine rijeke B i dijeli ju se na tri poprečna profila: ulazni, srednji - koji treba geodetski snimiti - i izlazni profil, u kojemu se mjeri vrijeme prolaska plovka. U ulaznome profilu nalazi se kalibrirano užje. Najčešće su za svaki metar užeta predviđena tri mjerenja, iz čije se aritmetičke sredine određuje površinska brzina u tom dijelu vodotoka. Za snimljeni srednji protjecajni profil može se grafički odrediti srednja površinska brzina v_{sp} , kako je prikazano na slici 4.34.

Iz površine brzina izmjerenih u pojedinim dijelovima profila dobije se srednja površinska brzina:

$$v_{sp} = \frac{A_v}{B} \quad (4.86)$$

gdje je A_v površina definirana izmjerenim površinskim brzinama v_{spi} duž vodnoga lica širine B .



Slika 4.34 Snimljeni profil vodotoka i grafičko određivanje srednje površinske brzine vode v_{sp}

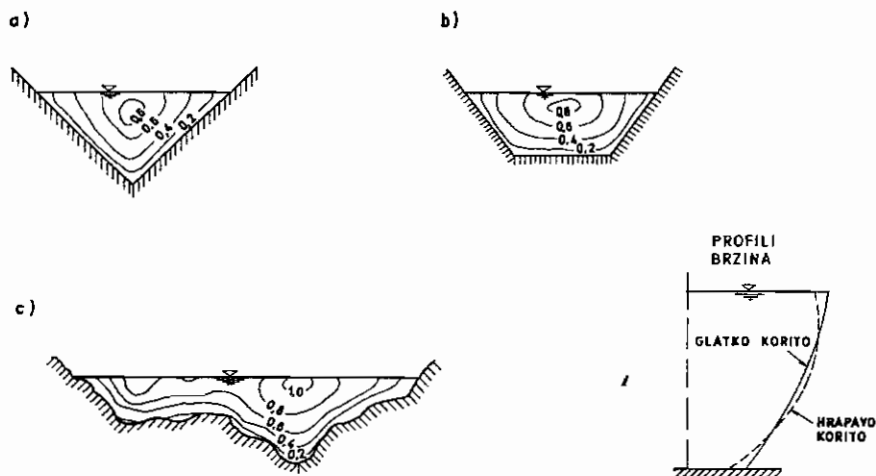
Za određivanje protoka vode kroz protjecajni profil, koji je po definiciji jednak umnošku površine živoga presjeka vodotoka i srednje profilske brzine, potrebno je srednju površinsku brzinu svesti na srednju profilsku brzinu. To se postiže uvođenjem redukcijskoga koeficijenta α , pa je protok kroz protjecajni profil:

$$Q = \alpha A v_{sp} \quad (4.87)$$

Najčešće je redukcijski koeficijent α u granicama:

$$0,78 < \alpha < 0,95,$$

pri čemu treba za mirne tokove usvajati veće, a za brze tokove manje vrijednosti redukcijskoga koeficijenta α .



Slika 4.35 Tipične izotahe za trokutni (a), trapezni (b) i prirodni neregularni (c) protjecajni profil vodotoka i profili brzina u okomici za glatko i hrapavu podlogu (prema V. T. Chowu, 1986.)

Raspodjela brzina u protjecajnim profilima otvorenih vodotoka redovito nije pravilna. Na slici 4.35 prikazane su, prema V. T. Chowu (1986.), linije jednakih brzina za karakteristične poprečne profile otvorenih vodotoka: trokutni, trapezni i prirodni neregularni profil. Linije jednakih brzina nazivaju se **izotahe**. Na slici 4.35 prikazani su i profili brzina po okomici za dva različita slučaja: za glatku podlogu i za hrapavu podlogu.

Ako je širina kanala u odnosu na dubinu $B = (3 - 5) h$, prema H. E. Bazinu se raspodjela brzina po okomici može definirati izrazom:

$$v = v_{max} - \frac{K}{h^2} \sqrt{I_e} h y^2 \quad (4.88)$$

gdje je v srednja brzina vode u okomici na dubini y , mjereno od površine vode, h dubina okomice, I_e pad energetske linije, v_{max} najveća brzina u okomici i K iskustveni koeficijent koji ovisi o hrapavosti korita.

Na temelju izraza (4.88), a u skladu sa slikom 4.35, slijedi da je srednja brzina vode u okomici v_o :

$$v_o = \int_0^h v dy \quad (4.89)$$

Izraz (4.88) se uvrsti u (4.89) i integrira u granicama od 0 do h , pa se dobije:

$$v_o = v_{max} - \frac{K}{3} \sqrt{I_e} h \quad (4.90)$$

Ako se s \bar{y} označi dubina koja odgovara srednjoj brzini u okomici v_o , na temelju izraza (4.88) se dobije:

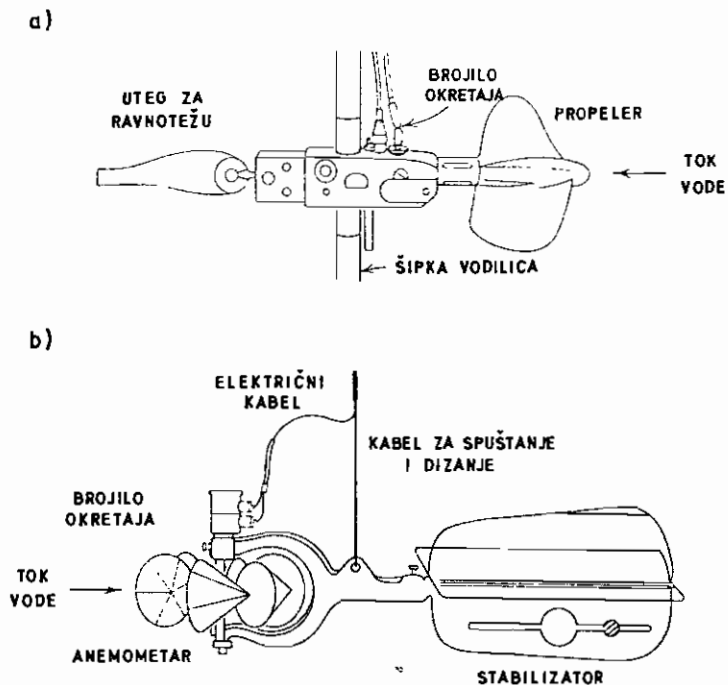
$$v_o = v_{max} - K \sqrt{I_e} h \left(\frac{\bar{y}}{h} \right)^2 \quad (4.91)$$

Desne strane jednadžbi (4.90) i (4.91) se izjednače i iz toga slijedi dubina \bar{y} na kojoj je brzina vode jednaka srednjoj brzini u okomici:

$$\bar{y} = \frac{h}{\sqrt{3}} = 0,58 h \quad (4.92)$$

U praksi se obično uzima da je $\bar{y} = 0,6 h$, a osim ovoga pristupa primjenjuju se i drugi postupci za određivanje raspodjele brzina po okomici (S. Jovanović i dr., 1977., O. Bonacci, 1979.).

Mjerenje brzina u okomicama protjecajnoga profila provodi se pomoću **hidrometrijskoga krila**. To se mjerenje temelji na pretpostavci da između brzine vode i broja okretaja propelera krila postoji funkcionalna zakonitost. Shematski prikazi dvaju osnovnih oblika hidrometrijskih krila dani su na slici 4.36.



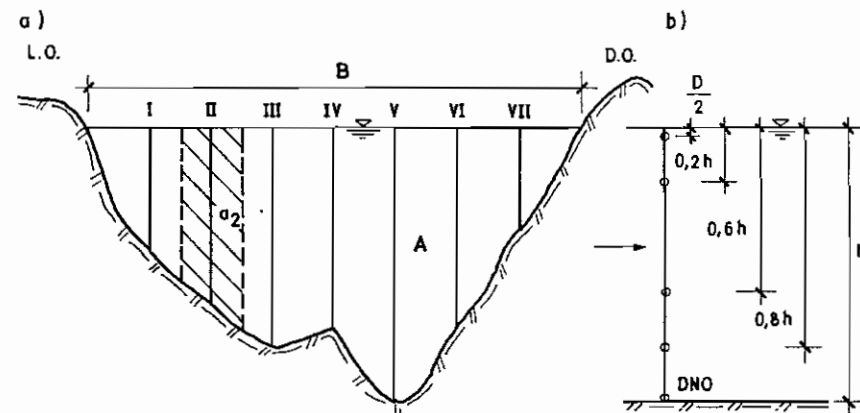
Slika 4.36 Hidrometrijska krila: krilo s propelerom (a); krilo s vijencem čašica (b) (M. P. Wanielista, 1990.)

Glavni su dijelovi hidrometrijskoga krila: propeler, osovina, tijelo krila, spojni mehanizam s brojilom i stabilizator krila. Krilo se može nalaziti na motki vodilici, a može biti i plivajuće, s utegom radi stabiliziranja. Promjeri propelera su od 3 do 30 cm.

Na dubinama manjim od 80 cm mjerenje brzine krilom na motki provodi se tako da se s krilom stoji u vodi. Na većim dubinama krilom se mjeri iz čamca; ako su brzine vode manje od 1,50 m/s, krilo može biti na motki, a kada su brzine vode veće od 1,50 m/s, mjeri se plivajućim krilom s utegom (L. A. Ott, 1948.).

Kada se brzine mjere hidrometrijskim krilom, najprije se protjecajni profil geodetski snimi, a nakon toga ga se podijeli na lamele u čijim se okomicama (u sredini pojedinih lamela) mjeri brzina vode. Broj okomica određuje se na temelju posebne analize hidrometrijskoga profila, a ovisi o obliku i veličini profila, te o hidrauličkim uvjetima. U velikim je i nepravilnim profilima sa složenim uvjetima protjecanja vode potrebno predvidjeti veći broj okomica nego u pravilnim profilima s mirnijim režimom otjecanja. Na temelju vlastitoga iskustva i stručne literature S. Jovanović i dr. (1977.) iznijeli su orijentacijski broj okomica u kojima se mjeri brzina vode u ovisnosti o širini hidrometrijskoga profila, ovdje dan u tablici 4.4.

Na slici 4.37a prikazan je hidrometrijski profil podijeljen na lamele, s odgovarajućim okomicama I, II, III, itd. u sredinama pojedinih lamela. Površine lamela su $A_1, A_2 \dots A_n$, ... A_n i njihov je zbroj jednak ukupnoj površini protjecajnoga profila A .



Slika 4.37 Hidrometrijski profil s okomicama za mjerenje brzine vode (a) i položaji hidrometrijskoga krila na okomici (b)

Tablica 4.4 Broj okomica za mjerenje brzina vode u hidrometrijskome profilu pri različitim širinama vodnoga lica (S. Jovanović i dr., 1977.)

Redni broj	Širina vodnog lica u profilu B (m)	Broj okomica za mjerenje brzine
1	do 50	do 6
2	50 – 100	7 – 9
3	100 – 200	10 – 13
4	200 – 500	14 – 17
5	500 – 1000	18 – 21
6	preko 1000	22 – 25

Najčešći položaji hidrometrijskoga krila u kojima se mjeri brzina vode označeni su na primjeru pet mjerenja u okomici na slici 4.37b. Brzina na površini vode v_p mjeri se tako da se hidrometrijsko krilo postavi na dubinu od pola promjera propelera $D/2$, a brzina vode pri dnu mjeri se na dubini od 10 cm od osi krila do dna.

Broj točaka na okomici protjecajnoga profila u kojima se mjere brzine vode ovisi o dubini vode. U tablici 4.5 prikazano je koliko se mjerenja po okomici preporuča provesti ovisno o dubini, na kojemu mjestu okomice ih se preporuča provesti i kako se proračunava srednja brzina vode na svakoj pojedinoj okomici.

Tablica 4.5 Izračun srednje brzine u okomici hidrometrijskoga profila

Broj mjerenja	Dubina vode H (m)	Mjesto mjerenja (od površine vode)	Srednja brzina vode u okomici v_o
jedno	0,30 - 0,60	0,6H	$v_o = v_{0,6}$
dva	0,60 - 3,0	0,2H i 0,8H	$v_o = 0,5(v_{0,2} + v_{0,8})$
tri	3,0 - 6,0	0,2H; 0,6H i 0,8H	$v_o = 0,25(v_{0,2} + 2 v_{0,6} + v_{0,8})$
tri	3,0 - 6,0	površina; 0,5H; dno	$v_o = 0,3 v_p + 0,5 v_{0,5} + 0,2 v_o$
pet	> 6,0	površina; 0,2H; 0,6H; 0,8 H; dno	$v_o = 0,1 (v_p + 3 v_{0,2} + 3 v_{0,6} + 2 v_{0,8} + v_o)$

Protok kroz hidrometrijski profil na osnovi srednjih brzina u okomicama može se odrediti iz jednadžbe protoka:

$$Q = k A_0 v_1 + k A_1 \frac{v_1 + v_2}{2} + \dots + k A_i \frac{v_i + v_{i+1}}{2} + \dots + k A_n v_n \quad (4.93)$$

U skladu sa slikom 4.37a, $v_p, v_{0,2}, v_{0,6}$ i v_n su srednje brzine u prvoj, drugoj, i -toj i zadnjoj okomici, A_1, A_2, A_i i A_n površine lamela u čijim su sredinama okomice na mjerenje brzine, a k je prijelazni koeficijent za usklađivanje brzina sa svatom slikom izotaha (izotahe su linije jednakih brzina). Ukoliko nema podataka, može se uzeti da je $k = 0,90$.

Protok kroz hidrometrijski profil može se odrediti i prema metodi A. P. Braslawskog na temelju izraza:

$$Q = \sum_i^n A_i v_i k_i \quad (4.94)$$

A_i je površina i -te lamela u hidrometrijskom profilu, v_i je srednja brzina u i -toj okomici, a k_i je koeficijent koji ovisi o odnosu srednjih brzina susjednih lamela iznosi:

$$k = \frac{3}{4} \frac{1 - n^4}{1 - n^3} \quad (4.95)$$

$$n = \frac{v_i}{v_{i+1}} \quad (4.96)$$

Tablica 4.6 Redukcijski koeficijent k u ovisnosti o odnosu susjednih brzina u okomicama hidrometrijskoga profila (prema A. P. Braslawskou)

$n = \frac{v_i}{v_{i+1}}$	k	$n = \frac{v_i}{v_{i+1}}$	k
0,00	0,750	0,60	0,833
0,10	0,751	0,70	0,867
0,20	0,755	0,80	0,907
0,30	0,765	0,90	0,952
0,40	0,781	0,95	0,975
0,50	0,804	1,00	1,000

Uvjet je da je $v_i < v_{i+1}$. Osim na početku, odnosno kraju hidrometrijskoga profila (uz obale), nema velikih razlika između srednjih brzina u okomicama susjednih lamela. Veličine koeficijenta k za različite odnose v_i i v_{i+1} dane su u tablici 4.6.

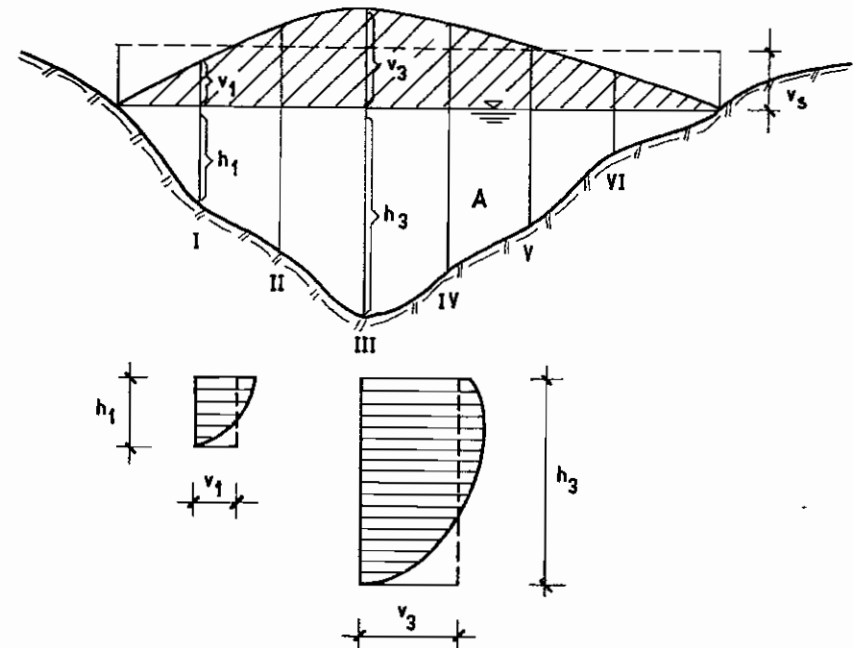
Protok kroz hidrometrijski profil može se odrediti **grafoanalitičkom metodom**. U tom slučaju treba izračunati specifične protoke q na svakoj okomici za koju je određena srednja brzina. Jedinica specifičnoga protoka q je ($m^3/s/m$). Ako se specifični protok q označava kao (m^2/s), dimenzionalno to nije pogrešno, ali na taj se način gubi smisao specifičnoga protoka koji je u m^3/s po jedinici širine profila, pa se ne valja upuštati u takva pojednostavljivanja jedinica. Osnovni izraz za izračun protoka na osnovi grafoanalitičke metode je:

$$Q = \int_0^B q dL \quad (4.97)$$

Radi praktične primjene prelazi se na konačne vrijednosti, pa je specifični protok q_i , u skladu s oznakama na slici 4.38:

$$q_i = h_i v_{oi}$$

gdje je h_i dubina u i -toj okomici, a v_{oi} srednja brzina u i -toj okomici.



Slika 4.38 Određivanje protoka grafoanalitičkom metodom

Protok Q dobije se zbrajanjem specifičnih protoka duž čitava protjecajnog profila čija je ukupna širina B :

$$Q = \sum_i^{m-1} \frac{q_i + q_{i+1}}{2} b_i \quad (4.98)$$

$$\left(B = \sum_i b_i \right)$$

4.6.2.3 Mjerenje protoka preljevima i različitim uređajima

Protok vode se može mjeriti preljevima i mjernim kanalima. Preljevi su općenito obrađeni u poglavlju 2.5.3.6, a ovdje se opisuju tri tipična slučaja koji se često primjenjuju u hidrotehničkoj praksi.

Protok se može mjeriti na svakome preljevu, ukoliko je on tariran, pa je na taj način određena i njegova jednadžba. Male se količine vode mjere oštrobriđnim preljevima, a za mjerenje velikih protoka pogodni su **pravokutni preljevi praktičnoga profila**; (npr. Creagerov ili Officerov).

Za izračunavanje protoka preko **pravokutnoga oštrobriđnog preljeva bez bočnoga suženja (kontrakcije)**, prikazana na slici 4.39a, može se osim formula (2.139), (2.140) i (2.141) koristiti i izraz:

$$Q = \frac{2}{3} K B \sqrt{2g} H_p^{3/2} \quad (4.99)$$

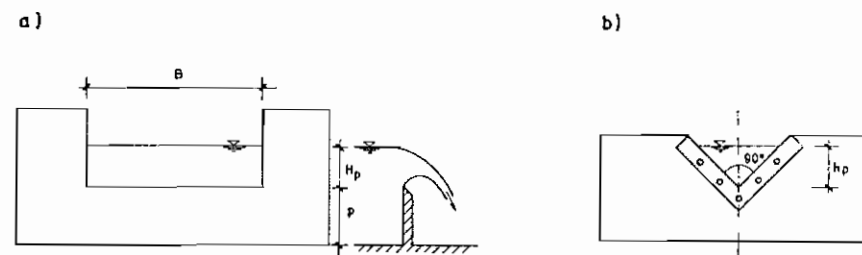
gdje je B (m) širina preljeva, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitacija, H_p (m) visina preljevnoga mlaza, a za koeficijent K se može usvojiti:

$$K = 0,602 + 0,075 \frac{H_p}{p} \quad (4.100)$$

gdje je p (m) visina preljeva.

Oštrobriđni preljevi mogu biti i trokutna oblika, kakav je često upotrebljavani **Thomsonov preljev**, na čijemu je dnu pravi kut (slika 4.39b). Za visine preljevnoga mlaza $50 < h_p < 180 \text{ mm}$ Thomsonova preljeva približno vrijedi:

$$Q = 1,343 h_p^{5/2} \quad h_p \text{ (m); } Q \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (4.101)$$



Slika 4.39 Oštrobriđni pravokutni preljev (a) i Thomsonov preljev (b)

Thomsonovim i ostalim oštrobriđnim preljevima mjere se mali protoci, a preko bezvakuumskih **preljeva praktičnoga profila** mogu se mjeriti protoci od nekoliko, pa do preko $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Bezvakuumski preljevi nastali su oblikovanjem krune preljeva prema najnižoj strujnici oštrobriđnoga preljeva za najvišega vodostaja, odnosno za najvećega protoka preko preljeva. Na taj se način, sprječava stvaranje vakuuma i uvlačenje zraka kada voda prelazi preko preljeva, uslijed čega bi dolazilo do kavitacije (pogl. 2.2.5) i razaranja betona od kojega se preljevi najčešće izrađuju. Protok vode kod ostalih nižih vodostaja uzrokuje samo tlačna naprezanja, a na njih je beton otporan. Protok preko preljeva praktičnoga profila je:

$$Q = m b \sqrt{2g} H_p^{3/2} \quad (4.102)$$

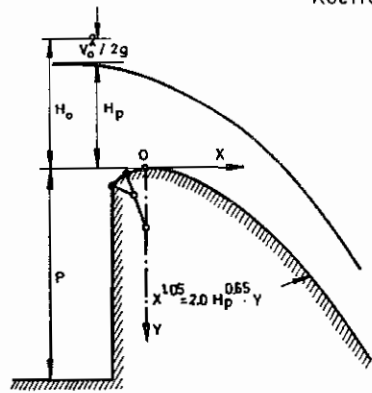
gdje je b (m) širina preljeva, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitacija, H_p (m) visina preljevnoga mlaza, a m je koeficijent preljevanja čija se vrijednost određuje iz dijagrama kakav je prikazan na slici 4.40. Može se koristiti i sličan, ali složeniji dijagram s posebnim krivuljama za popravak koeficijenta preljevanja, koji preporuča V. T. Chow (1986.), a izveden je na osnovi podataka Waterways Experiment Station (WEB) (1952.).

Ovisno o vrsti hidrotehničke građevine preljevi mogu imati različite oblike, koji su opisani u stručnoj literaturi (I. I. Agroskin i dr., 1973., M. M. Grishin, 1982.).

Osim na preljevima, protok se na osnovi mjerenja razine vode može mjeriti i na mjernim pragovima te u mjernim kanalima. Mjerni pragovi mogu imati široku (ravnu) preljevnu krunu ili oštru preljevnu krunu. Pragovi s oštrom preljevnom krunom omogućuju veću točnost mjerenja nego široki pragovi, a ujedno su i pogodniji za pronošanje nanosa.

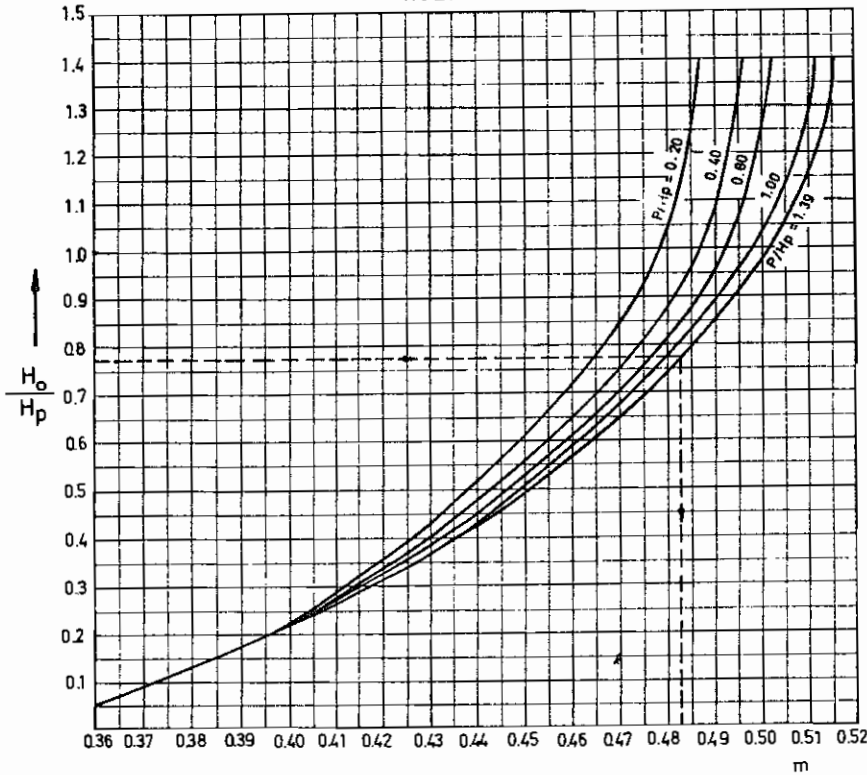
Mjerni se kanali, obzirom na tečenje u njima, dijele na dvije skupine: **Venturijeve mjerne kanale**, u kojima je režim toka miran, i **kanale sa silovitim tečenjem**. Na slici 4.41 prikazani su za isti tlocrt slučaj s mirnim vodnim režimom (a) i slučaj sa silovitim tečenjem (b).

PRELJEV SA ZAOBLJENOM KRUNOM
Koeficijent prelijevanja



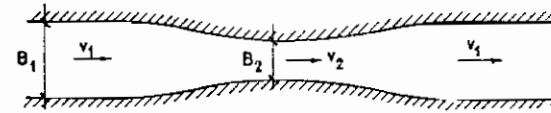
$$Q = m \cdot b \sqrt{2g} \cdot H_p^{3/2}$$

KOEFICIJENT PRELIJEVANJA m

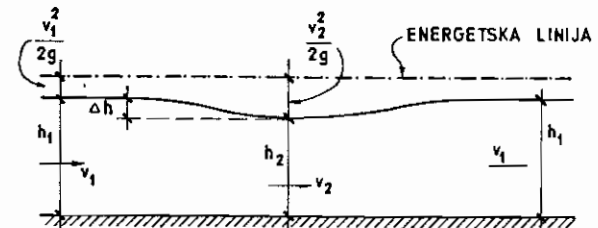


Slika 4.40 Preljev praktičnoga profila; dijagram za definiranje koeficijenta prelijevanja (G. Bata i dr., 1963.)

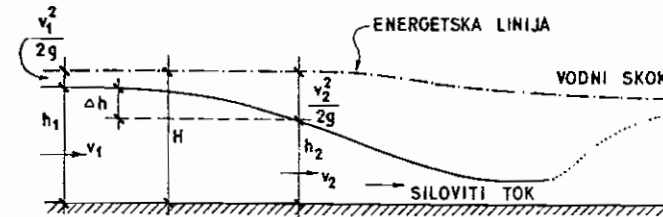
TLOCRT



a) UZDUŽNI PRESJEK VENTURIJEVOGA KANALA



b) UZDUŽNI PRESJEK KANALA SA SILOVITIM TEČENJEM



Slika 4.41 Vrste mjernih kanala

U slučaju (a) na slici 4.41, kada je uzdužni pad kanala manji od kritičnoga pada, tečenje u kanalu je mirno, a vodno lice ima oblik piezometarske linije u venturimetru (pogl. 2.5.2.1). Ukoliko je kanal fino hidraulički oblikovan, gubici mehaničke energije su vrlo mali, pa je protok kroz kanal pravokutnih protjecajnih profila:

$$Q = C_d B_2 h_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{B_2 h_2}{B_1 h_1}\right)^2}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.103)$$

gdje je C_d koeficijent protoka koji se određuje mjerenjima, a njegove se vrijednosti kreću u granicama $C_d = 0,95 - 0,99$ (B. Terek, 1998.), B_1 i B_2 , te h_1 i h_2 (m) su širine, odnosno dubine kanala u širokome i uskome dijelu, Δh (m) je razlika razina vode širokog i uskog dijela kanala, a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitacija.

Izraz (4.103) po svojoj strukturi odgovara izrazu za protok kroz venturimetar (2.107).

U poremećenome toku vode nastalim se suženjem kanala bez podizanja dna (slika 4.41 b) ili podizanjem dna u kanalu može izazvati najprije kritični, a nakon njega i siloviti režim tečenja. Takvi se mjerni kanali nazivaju **mjerni kanali kritičnoga toka**, a režim strujanja u njima zove se **modularni režim**.

Specifična energija u suženome presjeku na slici 4.41 b je:

$$H = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (4.104)$$

Iz izraza (4.104) slijedi da je srednja profilska brzina u suženome presjeku:

$$v_2 = \sqrt{2g(H - h_2)} \quad (4.105)$$

pa je protok kroz mjerni kanal:

$$Q = A_2 v_2 = A_2 B_2 h_2 = B_2 h_2 \sqrt{2g(H - h_2)} \quad (4.106)$$

U kanalima kritičnoga toka s modularnim režimom strujanja dubina je h_2 jednaka kritičnoj dubini h_c . Za kritično strujanje je prema (2.137) Froudeov broj $F_r = 1$, stoga je za pravokutni protjecajni profil kritična brzina v_c :

$$v_c = \sqrt{g h_c} \quad (4.107)$$

Ako se (4.107) uvrsti u (4.106), a uzimajući u obzir da je $h_2 = h_c$, dobije se:

$$\sqrt{g h_c} = \sqrt{2g(H - h_c)} \quad (4.108)$$

pa je nakon sređivanja dubina u suženome profilu:

$$h_c = \frac{2}{3} H \quad (4.109)$$

Izraz (4.109) uvrsti se u (4.106), a nakon sređivanja dobije se teorijska jednadžba istjecanja kroz mjerni kanal:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} H^{3/2} B \sqrt{2g} \quad (4.110)$$

Mjerni je kanal potrebno baždariti, pa stoga u izraz za protok (4.110) ulazi odgovarajući koeficijent protoka C_d . Specifičnu energiju presjeka H nije moguće mjeriti, pa se zbog toga u jednadžbu (4.110) uvodi i bezdimenzionalni koeficijent dolazne brzine strujanja C_v , koji je definiran izrazom:

$$C_v = \left(\frac{H}{h}\right)^{1,2} \quad (4.111)$$

gdje je h dubina vode neposredno ispred mjernoga dijela kanala.

Prema tome je opći oblik jednadžbe istjecanja kroz mjerni kanal:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} C_d C_v B \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (4.112)$$

Jednadžba istjecanja kroz mjerni kanal s modularnim režimom strujanja (4.112) ima isti oblik kao i jednadžba preko preljeva - Polenijska formula (2.139) - odnosno izrazi (4.99) i (4.102). Prema tome, i za kanale s kritičnim tokom protok se može odrediti mjerenjem same dubine vode h neposredno uzvodno od mjernoga dijela kanala.

Postoji velik broj različitih mjernih kanala. Jedan od najpoznatijih i najčešće rabljenih je **Parshallov mjerni kanal** (R. L. Parshall, 1950.). Međunarodna organizacija za standardizaciju standardom ISO 9826 definira 21 standardnu veličinu Parshallovih kanala, kojima se mogu mjeriti protoeci od 0,1 l/s do 93,0 m³/s (B. Terek, 1999.). Ovi mjerni uređaji imaju složen oblik i mora ih se izvoditi s vrlo velikom točnošću kako bi bili u skladu sa standardom. Standardni tipovi Parshallova kanala nisu geometrijski slični, pa se u stručnoj literaturi (G. Bata i dr., 1963.; V. T. Chow, 1986.) dimenzije kanala daju u tablicama, a veličine protoka za izmjerene razine vode dane su na odgovarajućim nomogramima.

Na slici 4.42 prikazan je standardni Parshallov mjerni kanal. Za modularni režim u vodotoku protok vode kroz kanal je:

$$Q = C_d B h_1^m \quad (4.113)$$

gdje je C_d koeficijent protoka, B (m) širina grla kanala, h_1 (m) dubina vode u suženju kanala (za precizna se očitavanja uz bunar izvodi mjerni zdenac) i m eksponent koji ovisi o širini grla Parshallova kanala.

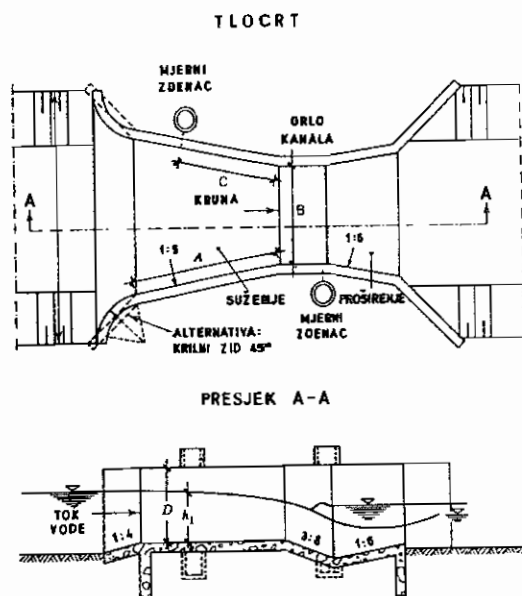
Izraz (4.113) ima općenit oblik, a koeficijent C_d u stvarnim slučajevima dobiva posebne vrijednosti. Za standardne Parshallove kanale širine grla $0,25 < B < 2,4$ m vrijedi izraz (B. Terek, 1998.):

$$Q = 0,372 B \left(\frac{h_1}{0,305}\right)^{1,569 B^{0,126}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.114)$$

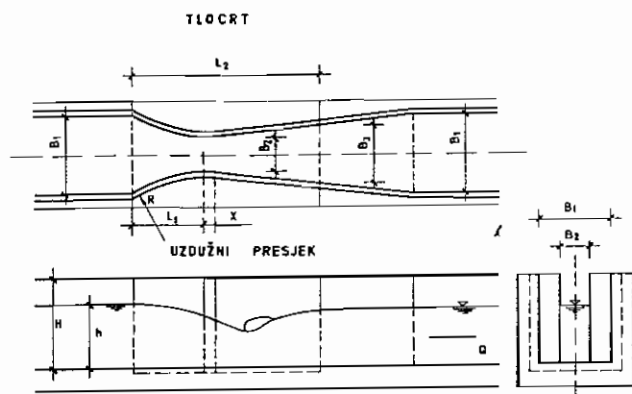
Na unaprijed pripremljenim mjestima u kanalima mogu se ugrađivati **Khafagi-venturi mjerni kanali** (A. Khafagi, 1942.). Ti su kanali projektirani tako da u grlu kanala uvijek dolazi do kritičnoga strujanja. Suženi ulazni dio kanala izveden je u

obliku kružnoga luka i njegova duljina L , jednaka je širini kanala na uzlazu B_1 . Širina suženoga mjernog grla kanala B_2 iznosi 40 posto širine dovodnoga kanala B_1 . Kanal se prema izlazu postupno proširuje - u omjeru 1:8. Zbog hidraulički povoljna oblika energetske gubici su gotovo zanemarivi, a točnost mjerenja protoka je u granicama od $\pm 4\%$. Tlocrt i uzdužni presjek

Khafagiventurijeva kanala prikazani su na slici 4.43.



Slika 4.42 Parshallov mjerni kanal



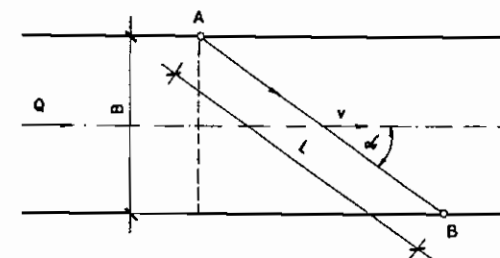
Slika 4.43 Khafagiventuri mjerni kanal (B. Terek, 1999.)

Protok kroz Khafagiventuri mjerni kanal je:

$$Q = 0,0174 B_2 h^{3/2} + 0,00091 h^{5/2} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.115)$$

gdje je B_2 (m) širina grla kanala, a h (m) dubina vode u dovodnom kanalu.

Ukoliko nije moguće izgraditi preljeve, pragove ili mjerne kanale, te ako zbog uspora ili povratnih strujanja nije moguće jednoznačno definirati odnos vodostaja i protoka, protok vode se može definirati na temelju **ultrazvučnoga mjerenja brzine**. Protok vode određuje se na temelju poznata (geodetski snimljenog) poprečnog presjeka kanala i mjerenjem polja brzina u tom presjeku ultrazvukom³. Na slici 4.44 prikazano je mjerenje brzine ultrazvukom u otvorenome kanalu.



Slika 4.44 Mjerenje brzine ultrazvukom u otvorenome kanalu

Mjerenje brzine strujanja tekućine ultrazvukom provodi se na osnovi razlike vremena preleta ultrazvučnih impulsa. Njih se naizmjenično koso šalje s jedne na drugu obalu - od sonde A do sonde B i natrag - kako je prikazano na slici 4.44. Zbog strujanja vode određenom brzinom, ultrazvučni impulsi kraće putuju kada ih se šalje nizvodno iz sonde A prema sondi B nego uzvodno od B do A. Protok Q kroz protjecajni profil definiran je izrazom:

$$Q = v A = h L \sin \alpha v = \frac{L^2 h \Delta t \operatorname{tg} \alpha}{2 t^2} \quad (4.116)$$

gdje je:

A (m²) površina poprečnoga presjeka kanala

v (m/s) srednja brzina vode u kanalu

h (m) srednja dubina kanala na dionici A-B

L (m) udaljenost između ultrazvučnih sondi A i B

$\Delta t = t_{BA} - t_{AB}$ (s) razlika vremena preljetanja ultrazvučnih signala

$t = \frac{t_{BA} + t_{AB}}{2}$ (s) srednje vrijeme preljetanja signala

α (°) kut između brzine toka (u omjeru osi) i smjera preleta signala.

³ Ultrazvuk su valovi slični valovima zvuka s frekvencijom iznad 20 000 Hz (nečujni za ljudsko uho).

Izraz (4.116) vrijedi za ultrazvučne sonde postavljene na $0,60h$ (na kojoj je dubina brzina približno jednaka srednjoj brzini). Točniji se rezultati postižu postavljanjem parova sonde na jednakim dubinama, tako da se dobiju srednje brzine u horizontalnim lamelama. Iz srednjih brzina u horizontalnim lamelama grafoanalitičkom se metodom odredi srednja profilna brzina, kao u poglavlju 4.6.3.2 na slici 4.38, samo što se umjesto s uspravnim, postupak provodi s horizontalnim lamelama.

Mjerenje brzine vode ultrazvukom može se provoditi u kanalima širine od 20 do 300 m, a za brzine od svega nekoliko milimetara u sekundi do gotovo neograničenih veličina. Obraštenost kanala, lebdeći nanos, različite nečistoće i mjehurići zraka snižuju točnost mjerenja jer dolazi do prigušenja, raspršivanja, upijanja, lomova ili odbijanja odaslanih signala. Ukoliko strujanje vode u kanalu nije okomito na protjecajni profil, dobivaju se nerealni rezultati, pa u tom slučaju sustav za mjerenje treba izvesti na poseban način (ukriženi postupak mjerenja, primjena ultrazvučnoga reflektora).

Ako se ispravno odaberu dubine iz kojih se šalje ultrazvuk i frekvencija ultrazvuka, a mjerenje provede na ravnoj dionici kanala ili regulirane rijeke sa stabilnim dnom, može se na opisani način postići točnost mjerenja brzine u granicama $\pm 5\%$, što je u hidrotehnici općenito prihvatljivo.

4.6.2.4 Mjerenje količine vode primjenom obilježivača

Obilježivač (traser) je materijal koji se lako može ustanoviti u vodi i u malim količinama. Obilježivačima se mogu mjeriti različite karakteristike površinskih i podzemnih tokova: protok, brzina tečenja, vrijeme otjecanja, starost vode, razrjeđenje itd.

U otvorene vodotoke najčešće se ubacuju različite boje, te kemijski i radioaktivni obilježivači. Mjerenje se provodi tako da se u jedan profil (profil A-A na slici 4.45) u vodotok ubaci poznata količina obilježene mješavine. Potom se nizvodno uzimaju uzorci vode i na temelju odnosa razrjeđenja u vodotoku u promatranome profilu i početne koncentracije odredi se protok.

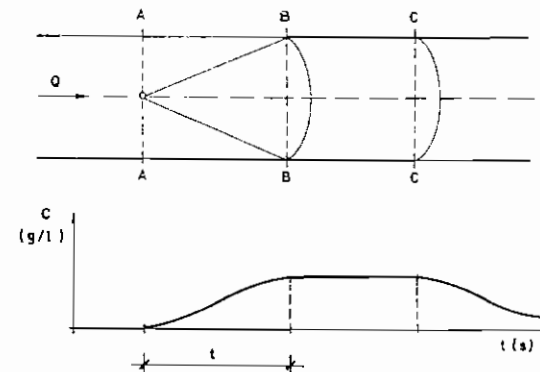
Protok vode Q određuje se na osnovi odnosa:

$$Q : Q_0 = C : c \quad (4.117)$$

$$Q = Q_0 \frac{C}{c} \quad (4.118)$$

gdje je Q_0 količina (protok) ubačene tekućine s obilježivačem, C početna koncentracija, a c koncentracija nakon miješanja s vodom u vodotoku.

Kada se primjenjuje ova metoda mjerenja važno je osigurati potpuno miješanje obilježivača s vodom u cijelome protjecajnom profilu. To se na slici 4.45 očituje između presjeka B-B i C-C. Potpuno miješanje je važno postići čim prije, kako bi se izbjeglo taloženje, kemijske reakcije ili raspadanje obilježivača. To je uglavnom moguće jer se ova metoda primjenjuje na bujične vodotoke s kaskadama, vrtložima, jako izraženim turbulentnim tečenjem i pri brzinama vode većim od 4,0 m/s.



Slika 4.45 Širenje obilježivača duž vodotoka kada je širenje postepeno

Ukoliko se radi o vrlo malim vodotocima, potrebno je popraviti izraz (4.118) za dodani protok ubačenoga obilježivača Q_0 , pa se iz omjera:

$$(Q + Q_0) : Q_0 = C : c \quad (4.119)$$

dobije točniji izraz:

$$Q = Q_0 \left(\frac{C}{c} - 1 \right) \quad (4.120)$$

Ukoliko u vodotoku postoji i prirodna koncentracija obilježivača X , i taj se parametar uvodi u izraz za protok:

$$QX + Q_0C = (Q - Q_0)c \quad (4.121)$$

Iz odnosa (4.121) slijedi da je protok:

$$Q = Q_0 \frac{C - c}{c - X} \quad (4.122)$$

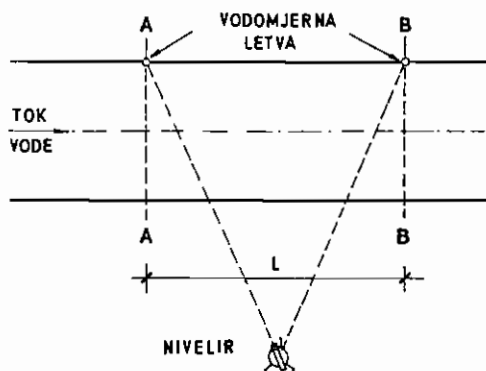
Prema tome, pri uporabi ove metode nije potrebno poznavati karakteristike protjecajnoga profila (njegove dimenzije), ali je, radi što boljšega miješanja, potrebno da u dionici na kojoj se mjeri ne postoje prostori u kojima se voda zaustavlja.

4.6.3 Mjerenje pada vodnoga lica

Mjerenje pada vodnoga lica ima smisla provoditi ukoliko se za tečenje na dijelu vodotoka na kojemu se mjeri može usvojiti da je jednoliko. Za jednoliko su tečenje pad dna vodotoka, pad vodnoga lica i pad linije energije jednaki, pa se izmjereni pad vodnoga lica može usvojiti kao pad linije energije.

Izmjereni pad vodnoga lica, odnosno preko njega definiran pad linije energije, dopuna je mjerenju brzina vode hidrometrijskim krilom. Na osnovi poznate geometrije protjecajnoga profila, te izmjerena pada i srednje brzine vode, moguće je izračunati hrapavost korita. Prema tome, ukoliko se pri stacionarnome stanju u vodotoku uz mjerenje brzine vode redovito izmjeri i pad vodnoga lica, moguće je teorijsko izračunavanje protoka.

Za mjerenje pada vodnoga lica potrebni su nivelacijski instrument i vodomjerne letve. Ako se pad mjeri u određenome razdoblju, letve se učvršćuju i preciznim niveliranjem se odrede njihove kote nule. Pad se mjeri očitavanjem vodostaja, najprije na letvi u presjeku A-A, a odmah nakon toga na letvi u presjeku B-B, kako je prikazano na slici 4.46.



Slika 4.46 Mjerenje pada vodnoga lica

Razlika u razinama vode Δh jednaka je:

$$\Delta h = y_A - y_B \quad (4.123)$$

gdje su y_A i y_B vodostaji u presjecima A-A i B-B u apsolutnim kotama (m n.m.).

Pad vodnoga lica I_o definiran je kao kvocijent razlike razina vode Δh na razmaku L :

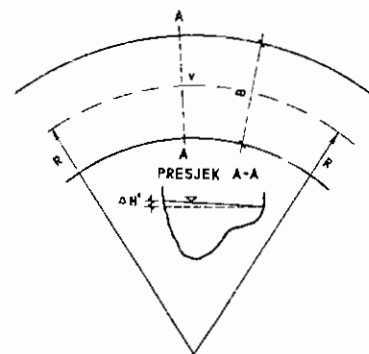
$$I_o = \frac{\Delta h}{L} 1000 \quad (\text{‰}) \quad (4.124)$$

Veličina Δh je mnogo manja od L , pa zbog toga točnost izmjerena pada vodnoga lica I_o prvenstveno ovisi o točnosti mjerenja razlike razina vode Δh .

Ukoliko se mjerni profil nalazi u krivini (slika 4.47), treba u obzir uzeti nadvišenje razine vode u krivini zbog djelovanja centrifugalne sile $\Delta h'$, koje je, prema približnoj formuli:

$$\Delta h' = 0,234 v \log \frac{R}{R-B} \quad (\text{m}) \quad (4.125)$$

gdje je v (m/s) srednja profilna brzina vode, R (m) polumjer krivine, a B (m) širina vodnoga lica.

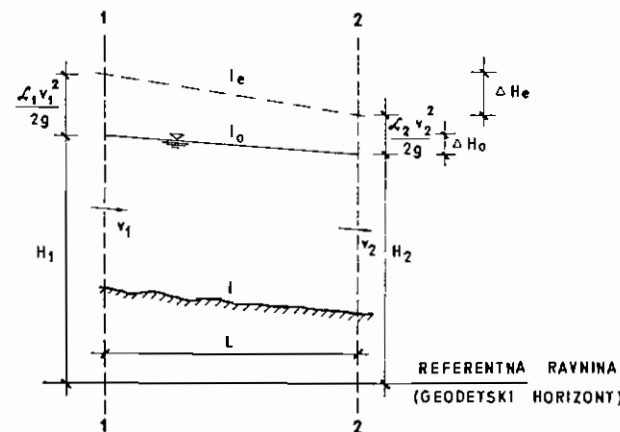


Slika 4.47 Osnovni elementi za izračunavanje nadvišenja u krivini

Za prirodne se vodotoke u skladu sa slikom 4.48 može postaviti Bernoullijeva jednadžba za dva protjecajna profila (pogl. 2.5.3, slika 2.24), pa je na toj osnovi pad linije energije I_e :

$$I_e = \frac{\Delta H}{L} = \frac{1}{L} \left[\left(H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) \right] \quad (4.126)$$

gdje je ΔH (m) gubitak mehaničke energije između presjeka 1-1 i 2-2; L (m) razmak profila 1-1 i 2-2; H_1 i H_2 (m) su razine vode u profilima 1-1 i 2-2 - računano od odabrane horizontalne ravnine (referentne ravnine); α_1 i α_2 Coriolisovi brojevi za popravak brzinskih visina u presjecima 1-1 i 2-2; v_1 i v_2 (m/s) srednje profilne brzine vode u presjecima 1-1 i 2-2, a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitacija.



Slika 4.48 Visinski oblik Bernoullijeve jednadžbe za otvoreni tok

Coriolisov broj ili koeficijent kinetičke raspodjele α je veličina kojom, zbog nejednolike raspodjele brzina po protjecajnome profilu, treba popraviti brzinsku visinu (pogl. 2.5.3.3). U otvorenim tokovima njegova je vrijednost najčešće $\alpha = 1,05 - 1,10$, a pri određivanju veličine α potrebno je poznavati raspodjelu brzina vode po protjecajnome profilu.

Pri usvajanju izmjerenoga pada vodnoga lica I_0 za pad linije energije I_e važno je da tečenje u koritu vodotoka stvarno odgovara jednolikome tečenju. U slučaju da taj uvjet nije ispunjen, doći će do netočna definiranja pada linije energije I_e i pogrešna određivanja vrijednosti hrapavosti korita (definirane Chezyjevim koeficijentom C ili Manningovim, odnosno Stricklerovim koeficijentima n i K).

4.6.4 Mjerenje nanosa

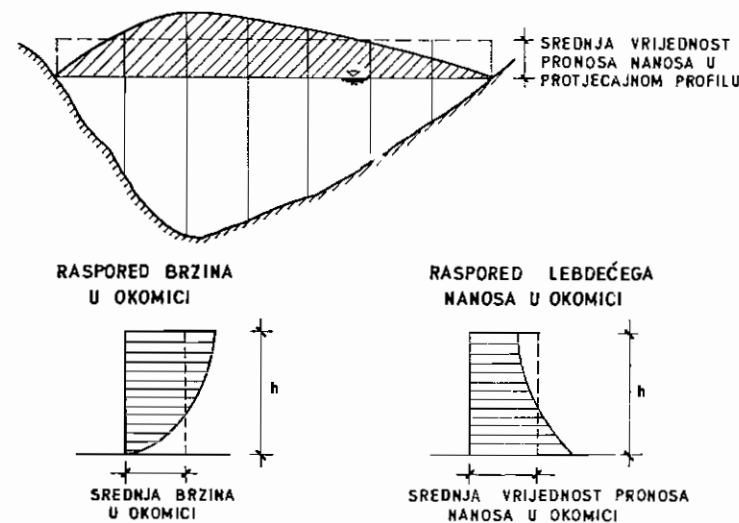
Ovisno o veličini čestica i brzini tečenja vode razlikuju se **lebdeći** (suspendirani) i **vučeni nanos**.

Pri provođenju analize i proučavanju pronosa nanosa u vodotoku treba odrediti količine nanosa koje voda pronosi u određenome vremenu. Zato je potrebno poznavati raspodjelu koncentracija lebdećega nanosa u protjecajnome profilu pri različitim vodostajima te granulometrijski sastav nanosa. Ti se podaci određuju analizom reprezentativnih uzoraka vode s nanosom, koje treba prikupiti na određenim reprezentativnim točkama hidrometrijskoga profila.

Pronošenje količina lebdećega nanosa izražava se kao masa (kg), (t) ili prostorno (m^3), a potrebno je poznavati i tzv. lebdeću masu nanosa.

Raspodjela lebdećega nanosa u protjecajnome profilu nije jednolika. Nanosa je općenito nešto više u dijelovima profila gdje su brzine tečenja veće, nego u dijelovima profila u kojima su brzine tečenja manje. Najviše je nanosa pri dnu, jer krupniji nanos teži pasti na dno, a u tom su dijelu profila brzine vode nešto manje nego u gornjemu dijelu. Prema tome, pri mjerenju pronosa i količina lebdećega nanosa nije dovoljno uzeti samo jedan uzorak vode. Zbog toga se uzorci uzimaju u okomicama hidrometrijskoga profila u kojemu se provodi i mjerenje brzina vode, tako da je uz podatke o nanosu obavezno definirati i protok vode kroz hidrometrijski profil. U okomicama hidrometrijskoga profila uzorci vode s nanosom obično se uzimaju na površini, u sredini i pri dnu.

Za svaki se uzorak određuje koncentracija nanosa u jedinicama $(g/l) \cdot 1000 = (g/m^3)$, na osnovi količine nanosa u uzorku koja se određuje mjerenjem isparavanja vode iz uzorka ili filtriranjem, tako da se filter s nanosom osuši i izvaži. Količinu lebdećega nanosa može se obračunati na isti način kao i srednje profilske brzine (grafoanalitička metoda u pogl. 4.6.2.2), kako je prikazano na sl. 4.49.



Slika 4.49 Određivanje srednje vrijednosti pronosa nanosa u hidrometrijskome profilu

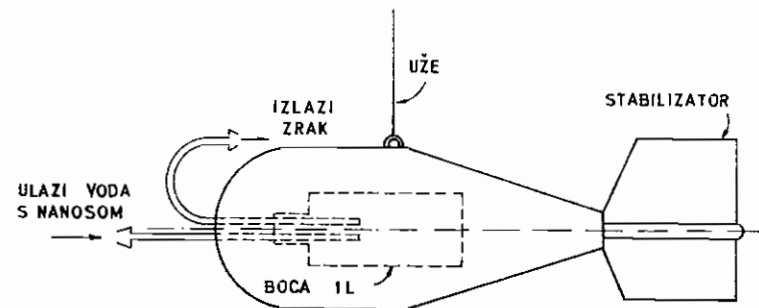
Uzorci lebdećega nanosa mogu se uzimati različiti hvatačima, koji se dijele u dvije osnovne skupine:

1. hvatači za trenutno uzimanje uzoraka
2. hvatači s polaganim punjenjem

Hvatači za trenutno uzimanje uzoraka sastoje se od cilindrične cijevi promjera $d = 10 - 15$ cm, volumena $V = 1 - 5$ l. Otvoreni se hvatač spusti na određenu dubinu i naglo zatvori, a nakon izvlačenja uzorak se izlije u određenu posudu i šalje na daljnju analizu. Ovaj način mjerenja nanosa ima određene nedostatke: uzorak nije reprezentativan zbog promjenljivosti koncentracija nanosa duž dubine, u cilindru hvatača može doći do podjele nanosa u otopini, kod pretakanja uzorka može doći do pogrešaka itd., pa se zbog toga ne preporuča korištenje ove vrste hvatača.

Unutar druge skupine, u kojoj su hvatači s polaganim punjenjem koje se redovito rabi za mjerenje lebdećega nanosa, razlikuju se **hvatači s bocom** i **vakuumski hvatači**.

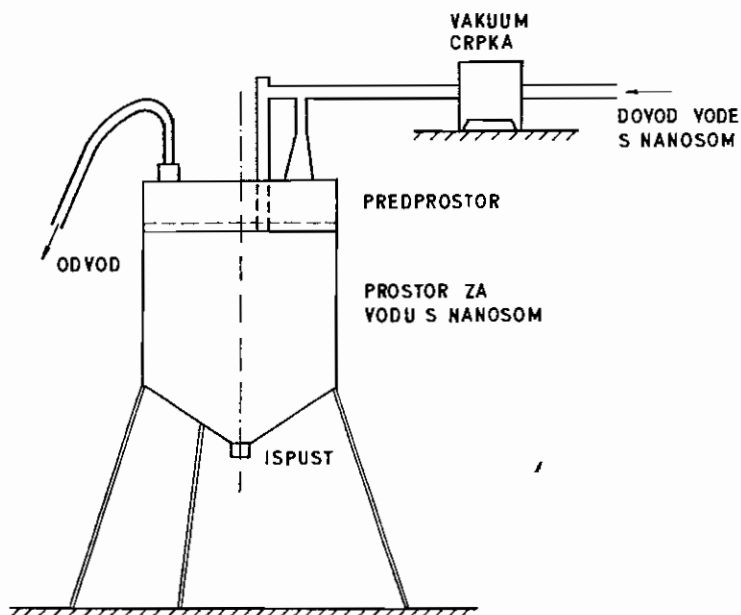
Hvatači s bocom vrlo su praktični uređaji i ima ih više vrsta, a boca u koju se hvata nanos volumena je $V = 0,5 - 2$ l. U vodu se mogu spuštati pomoću užeta ili na motki. Najčešće se uzimanje uzoraka provodi hvatačima s bocom od 1,0 l. U Rusiji se takav uređaj zove **batometar**, a taj se naziv često rabi i kod nas. Na slici 4.50 shematski je prikazan hvatač lebdećega nanosa s bocom. U tijelu hvatača je smještena boca u koju kroz jednu cijev ulazi voda s nanosom, a kroz drugu cijev za vrijeme punjenja izlazi zrak. Nakon zahvaćanja uzorka hvatač se izvlači na površinu, puna se boca vadi i šalje na analizu, a u hvatač se stavlja nova prazna boca i uzimanje uzoraka se nastavlja. Na ovaj se način uzorak uzima u jednoj određenoj točki okomice.



Slika 4.50 Shematski prikaz hvatača lebdećega nanosa s bocom

Ukoliko se hvatač nanosa s polaganim punjenjem spušta po okomici jednakom brzinom, uz uvjet da je stupanj punjenja takav da je brzina vode s nanosom koja ulazi u bocu jednaka brzini toka u svakoj točki mjeme okomice, onda se iz zahvaćenoga uzorka dobije srednja koncentracija lebdećega nanosa po okomici hidrometrijskoga profila. U takvu se slučaju hvatač nanosa s bocom zove **hvatač-integrator**.

Druga vrst hvatača lebdećega nanosa je vakuumski hvatač, shematski prikazan na slici 4.51.

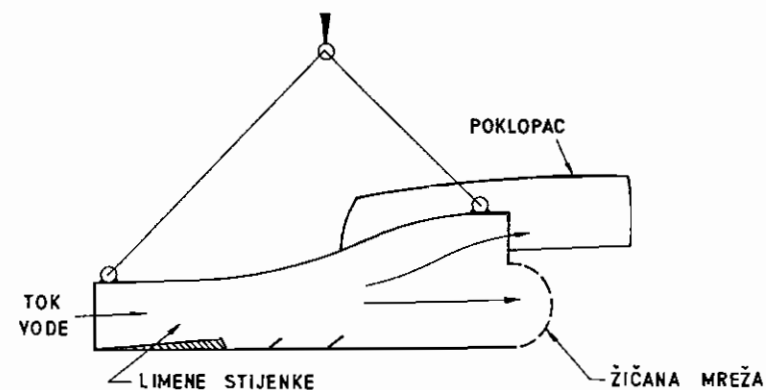


Slika 4.51 Vakuumski hvatač lebdećega nanosa

Voda koja se crpi iz vodotoka najprije ulazi u pomoćnu komoru vakuumskega hvatača lebdećega nanosa. Tek kad se u dovodu postignu odgovarajući podtlak i potrebna brzina, tok vode se prebacuje u komoru za uzorak. Nakon uzimanja uzorka, dovod vode se opet prebacuje u pomoćnu komoru, a ulazna cijev se postavlja u novu točku protjecajnoga profila. Voda s nanosom ispušta se iz komore za uzorak u određene posude i šalje na analizu, a voda iz pomoćne komore se vraća u vodotok, pa se postupak može ponoviti.

Vakuumski hvatači imaju komore za uzimanje uzorka i do 40 l, pa su, zbog većega volumena, podaci o nanosu dobiveni njihovom uporabom točniji od podataka dobivenih pomoću hvatača s bocom.

Za mjerenje količine i pronosa vučenoga nanosa u vodotoku rabi se **mehanički hvatač vučenoga nanosa**. Mehanički hvatač vučenoga nanosa najčešće se sastoji od jednoga metalnog sanduka s otvorom na prednjoj strani kroz koji, kada ga se spusti na dno vodotoka, ulazi vučeni nanos. Brzina vode u unutrašnjosti hvatača je smanjena, pa se zbog toga nanos zadržava u hvataču. Nakon određena vremena hvatač se vadi iz vodotoka i iz njega se uzima zahvaćeni nanos. Na slici 4.52 prikazan je mađarski mehanički hvatač vučenoga nanosa "Karolyi", koji se često rabi u izvornoj izvedbi ili s određenim preinakama.



Slika 4.52 Mehanički hvatač vučenoga nanosa "Karolyi"

Na temelju provedenoga mjerenja, elementarni protok vučenoga nanosa g određuje se prema formuli:

$$g = \frac{P}{b \Sigma t} \quad (\text{kg/m}^3/\text{s}) \quad (4.127)$$

gdje je P (kg) količina ukupno zahvaćenoga nanosa; b (m) širina ulaznoga otvora, a t (s) vrijeme zahvaćanja uzorka.

4.7 Protočna krivulja

Protočna krivulja, krivulja protoka ili konsumpcijska krivulja je odnos između vodostaja i protoka u protjecajnome profilu vodotoka, koji se može izraziti u obliku jednadžbe, krivulje ili tablice (jedne ili više njih).

Opći izraz za određivanje protočne krivulje je:

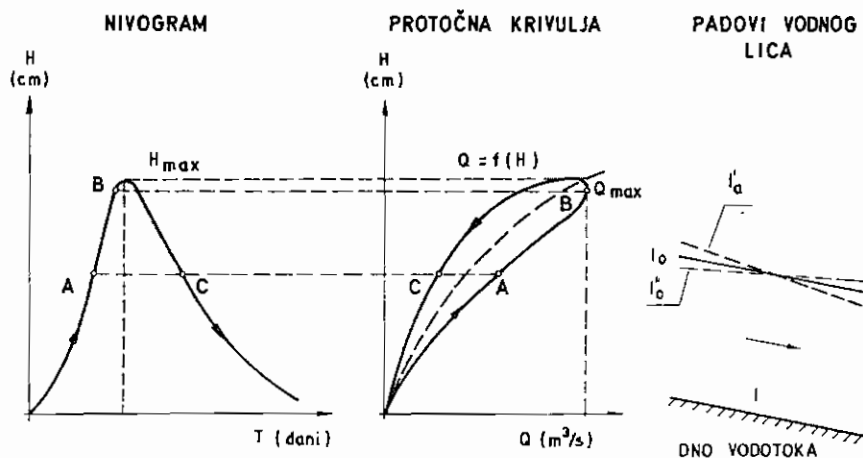
$$Q = f(H) \quad (4.128)$$

gdje je H (m) vodostaj; a Q (m^3/s), (l/s) protok.

Za definiranje protočne krivulje potrebno je poznavati (izmjeriti) neki minimalan broj protoka pri različitim vodostajima.

Protočna krivulja je vrlo važna zakonitost u hidrologiji, na osnovi koje se iz poznatih (zabilježenih) vodostaja određuju odgovarajući protoci vode. O protočnoj krivulji ovisi realnost srednjih dotoka (dnevni, dekadni, mjesečni, godišnji) i prosjeka cijeloga razdoblja motrenja vodostaja, te maksimalnih i minimalnih protoka.

Pri otjecanju vode u prirodnim je uvjetima redovito izražena nestacionarnost. Na slici 4.53 prikazano je stvaranje petlje protočne krivulje za vrijeme velikoga vodnog vala.



Slika 4.53 Stvaranje petlje za vrijeme velikoga vodnog vala

Za vrijeme podizanja vodnog vala pad vodnoga lica je strm, a brzina vode raste, pa zbog toga raste i protok. Za vrijeme opadanja (recesije), pad vodnoga lica je blaži nego kada val raste; brzina vode je manja, pa je za vodostaj jednak onome kada val raste protok znatno manji.

Prema tome, pad vodnoga lica za vrijeme podizanja vodnog vala veći je od pada vodnoga lica pri osrednjenome stanju: $I'_o > I_o$ (točka A na slici 4.53). Za vrijeme

opadanja (recesije) vodnoga vala, pad vodnoga lica je manji nego pri osrednjenome stanju: $I'_o < I_o$ (točka C na slici 4.53). Prema tome, padovi vodnoga lica izmjereni za vrijeme porasta ili opadanja vodostaja ne odgovaraju padu linije energije pri osrednjenome stanju. Na toj se osnovi ne može realno definirati hrapavost korita pri osrednjenome stanju u vodotoku (po Chezyju ili Manningu), pa zbog toga nije moguće hidraulički odrediti protočnu krivulju (pogl. 2.5.3.2).

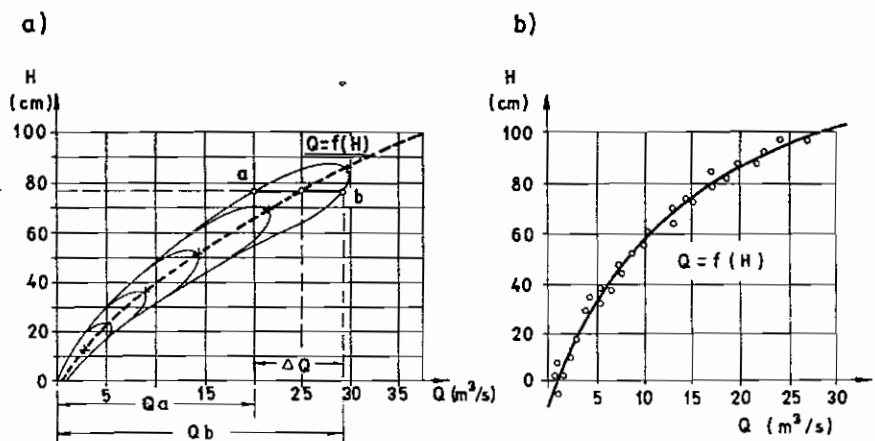
Unutar petlje može nastati neograničeno mnogo protjecanja. Stoga je potrebno odrediti težišnicu sustava krivulja (petlji) i to je protočna krivulja $Q = f(H)$. Na slici 4.54a prikazana je protočna krivulja kao težišnica vodnih petlji, a na slici 4.54b je protočna krivulja konstruirana kao prosječna krivulja na osnovi izmjerenih protoka - vodomjerenja⁴. Pri razmatranju podataka dobivenih mjerenjem protoka vode važno je ustanoviti je li vodostaj u trenutku mjerenja bio u porastu, mirovanju (što je najpovoljnije) ili opadanju.

Uz mjerenja protoka uobičajene su oznake:

↗ za vodostaj u porastu

↔ za vodostaj u mirovanju (stagniranju)

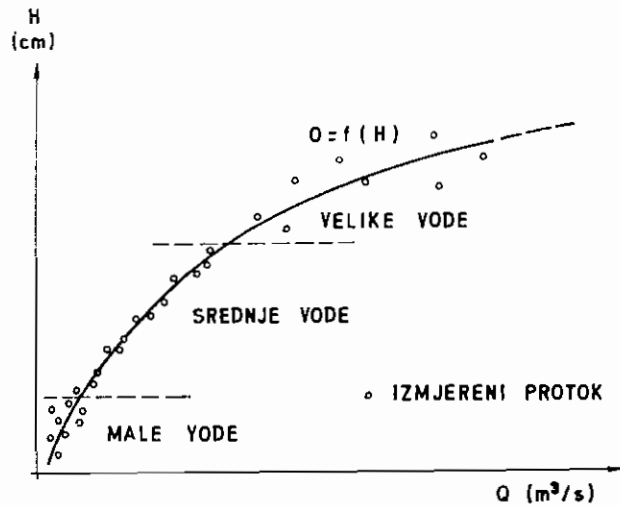
↘ za vodostaj u opadanju.



Slika 4.54 Protočna krivulja kao rezultat vodnih petlji (a) i izravno povučena protočna krivulja (b)

Izmjereni protoci redovito imaju veća rasipavanja oko osrednjene krivulje u području malih i velikih voda, nego u području srednjih voda (slika 4.55). Relativno i vjerojatno odstupanje (unutar kojega se pojavljuje 95% vodomjerenja) izračunskih podataka od izvedene zakonitosti definiraju se na osnovi izraza (4.38) i (4.39), opisanih u pogl. 4.3.3.

⁴ Vodomjerenjem se određuje protok vode kroz hidrometrijski profil. U sklopu vodomjerenja treba za određeni vodostaj izmjeriti brzine vode u protjecajnome profilu i na temelju njih odrediti srednju profilsku brzinu. Umnožak srednje profilске brzine i površine protjecajnoga profila predstavlja protok vode kroz protjecajni profil.



Slika 4.55 Rasipavanje vodomjerenja oko protočne krivulje

Načini predočavanja protočnih krivulja mogu biti:

I Grafičko određivanje

U slučaju da postoji dovoljan broj izmjerenih protoka pri različitim vodostajima, tako da rasipavanje točaka nije veliko, može se izvući težišnica između tih točaka. Takva se krivulja može prihvatiti ako su mjerenja obuhvatila cijelu amplitudu vodostaja - od najnižega do najvišega zabilježenog vodostaja (slika 4.54b).

Približan grafički način određivanja protočne krivulje ne rabi se često, jer je uobičajeno pretpostaviti analitički oblik i izračunati krivulju iz izmjerenih parova vrijednosti (H , Q) metodom najmanjih kvadrata. Tako određena krivulja redovito se prikazuje grafički, zajedno s izračunskim podacima.

II Analitičko određivanje

Analitički se protočna krivulja može definirati najčešće za dva oblika:

1. analitički oblik (kvadratna parabola):

Pretpostavi se da je protok Q funkcija vodostaja H i parametara a , b , c , ... n :

$$Q = f(H, a, b, c, \dots, n) \quad (4.129)$$

razvijanjem (4.129) u red dobije se:

$$Q = a + bH + cH^2 + dH^3 + \dots + nH^n \quad (4.130)$$

U izrazu (4.130) četvrti član i svi članovi iza njega su vrlo mali, pa ih se zbog toga može zanemariti. Tako se dobije 1. oblik protočne krivulje (kvadratna parabola):

$$Q = a + bH + cH^2 \quad H \text{ (m); } Q \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (4.131)$$

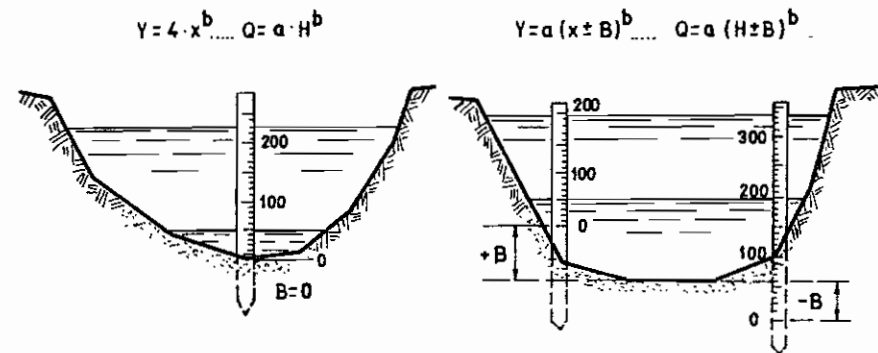
2. analitički oblik ($y = ax^b$):

Općenito se pretpostavi oblik:

$$Q = aV^b \quad (4.132)$$

gdje je V dubina vode, a a i b su parametri.

Obzirom na položaj nule vodokaza, u profilu vodotoka mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja, koji su prikazani na slici 4.56.



Slika 4.56 Položaj nule vodokaza u profilu vodotoka

Ako se nula vodokaza poklapa s dnom profila, dubina vode V jednaka je vodostaju H pa u tom slučaju vrijedi oblik:

$$Q = aH^b \quad (4.133)$$

Ukoliko se nula vodokaza ne poklapa s dnom profila nego je od dna udaljena za razmak B , općenito je:

$$Q = a(H \pm B)^b \quad (4.134)$$

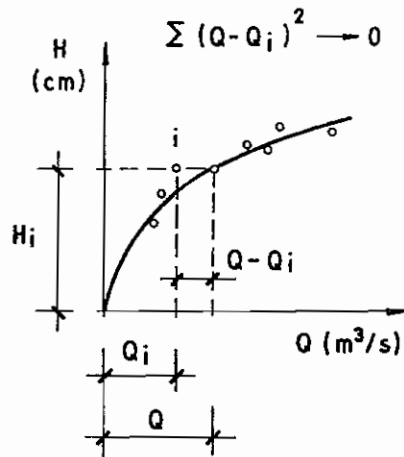
ako je nula vodokaza iznad riječnoga dna:

$$Q = a(H+B)^b \quad (4.134a)$$

ako je nula vodokaza ispod riječnoga dna:

$$Q = a(H-B)^b \quad (4.134b)$$

Za analitičko određivanje nepoznatih parametara a , b i c protočne krivulje $Q = f(H)$ na osnovi izmjerenih podataka H i Q najčešće se koristi metoda najmanjih kvadrata. Pri izabiranju analitičkoga izraza za protočnu krivulju (1. ili 2. oblik) prednost ima oblik koji se bolje prilagođava izračunskim podacima (vodomjerenjima). Nepoznat parametre treba odrediti tako da je $\sum(Q - Q_i)^2 = \text{minimum}$, kako je prikazano na slici 4.57.



Slika 4.57 Određivanje protočne krivulje metodom najmanjih kvadrata

Tri osnovne jednačbe za definiranje parametara a , b i c protočne krivulje oblika $Q = a + bH + cH^2$ su:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = c \sum_{i=1}^n H_i^2 + b \sum_{i=1}^n H_i + a n \quad (4.135)$$

$$\sum_{i=1}^n H_i Q_i = c \sum_{i=1}^n H_i^3 + b \sum_{i=1}^n H_i^2 + a \sum_{i=1}^n H_i \quad (4.136)$$

$$\sum_{i=1}^n H_i^2 Q_i = c \sum_{i=1}^n H_i^4 + b \sum_{i=1}^n H_i^3 + a \sum_{i=1}^n H_i^2 \quad (4.137)$$

gdje je n broj izmjerenih protoka, a H_i (m) i Q_i (m³/s) su stvarni vodostaji i odgovarajući izmjereni protoci. Važno je napomenuti da se vodostaje očitava i crta na grafičkim prikazima protočnih krivulja u centimetrima. No u izračunavanju pomoću jednačbe protočne krivulje vodostaje se zbog dimenzionalne homogenosti - jer je protok u m³/s - mora uzeti u metrima. (Kada se protok izračunava iz izraza za protočnu krivulju, vodostaje se također uzima u metrima.)

Postupak rješavanja jednačbi (4.135), (4.136) i (4.137) može se provesti tabelarno - kako je prikazano u tablici 4.7.

Tablica 4.7 Postupak rješavanja osnovnih jednačbi za protočnu krivulju oblika $Q = a + bH + cH^2$

Broj mjerena protoka	H_i (m)	Q_i (m ³ /s)	H_i^2	H_i^3	H_i^4	$H_i Q_i$	$H_i^2 Q_i$
1							
2							
3							
n							
Σ	--	--	--	--	--	--	--

Nakon što se sume pojedinih veličina iz tablice 4. uvrste u jednačbe (4.135), (4.136) i (4.137), izračunaju se parametri a , b i c , uvrste u jednačbu $Q = a + bH + cH^2$ i onda su u jednačbi protočne krivulje a , b i c konstante, a vodostaj H je promjenljiva veličina.

Za definiranje parametara a i b protočne krivulje oblika $Q = aH^b$ ili $Q = a(H \pm B)^b$ dvije osnovne jednačbe su:

$$n \log a + b \sum_{i=1}^n [\log(H_i \pm B)] = \sum_{i=1}^n \log Q_i \quad (4.138)$$

$$\log a \sum_{i=1}^n [\log(H_i \pm B)]^2 + b \sum_{i=1}^n [\log(H_i \pm B)] = \sum_{i=1}^n [\log Q_i \log(H_i \pm B)] \quad (4.139)$$

gdje je n broj mjerenja protoka, a H_i i Q_i su stvarni vodostaji i protoci.

Postupak rješavanja jednačbi (4.138) i (4.139) može se provesti tabelarno - prema tablici 4.8.

Tablica 4.8 Postupak rješavanja osnovnih jednačbi za protočnu krivulju oblika $Q = a(H \pm B)^b$

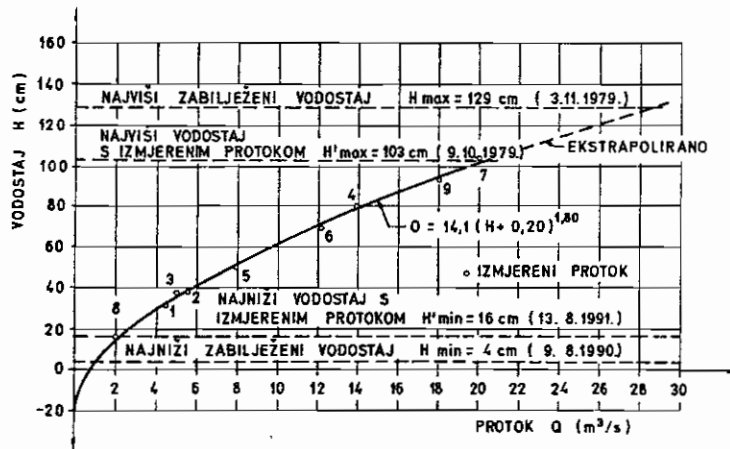
Broj mjerena protoka	$H_i \pm B$ (m)	Q_i (m ³ /s)	$\log H_i \pm B$	$\log Q_i$	$\log (H_i \pm B)^2$	$\log Q_i \log (H_i \pm B)$
1						
2						
3						
n						
Σ			--	--	--	--

Nakon uvrštavanja suma iz tablice 4.8 u jednadžbe (4.138) i (4.139), izračunaju se parametri a i b i uvrste u jednadžbu $Q = a(H \pm B)^b$, pa su nakon toga u jednadžbi protočne krivulje a i b konstante, a je vodostaj H (m) je promjenljiva veličina.

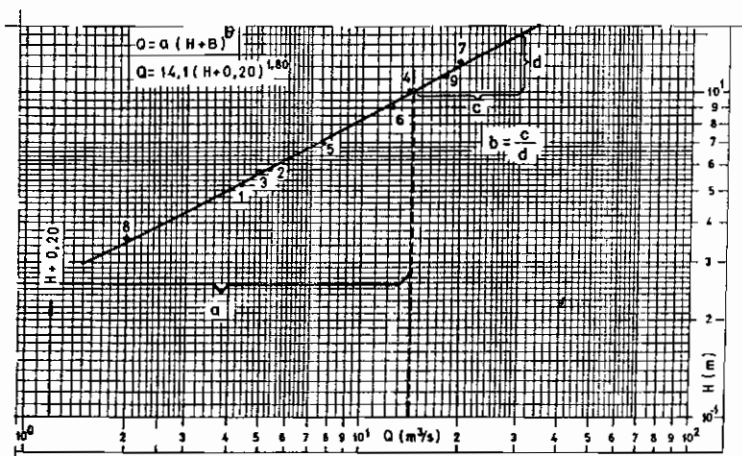
Protočna krivulja $Q = a(H \pm B)^b$ nacrtana u log-log koordinatnome sustavu, je pravac:

$$\log Q = \log a + b \log (H \pm B) \quad (4.140)$$

Protočna krivulja oblika $Q = a(H + B)^b$ u linearnome je koordinatnom sustavu prikazana na slici 4.58, a u log-log koordinatnome sustavu na slici 4.59.

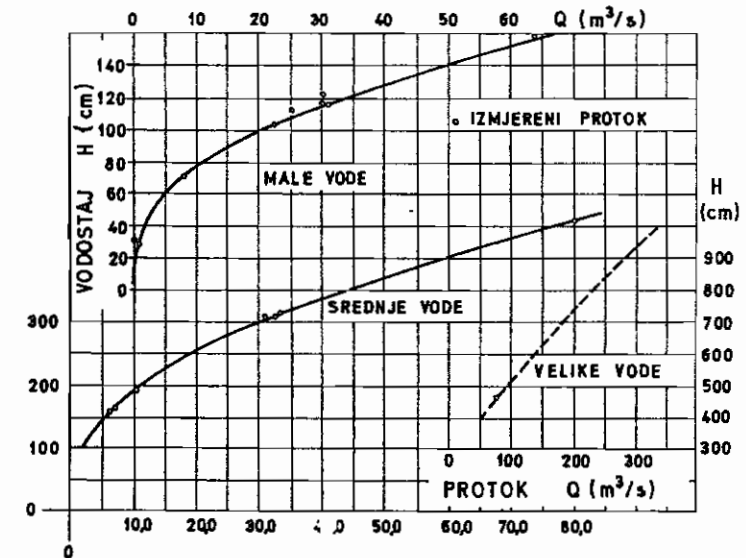


Slika 4.58 Protočna krivulja oblika $Q = a(H + B)^b$ u linearnome koordinatnom sustavu



Slika 4.59 Protočna krivulja oblika $Q = a(H + B)^b$ u log-log koordinatnome sustavu

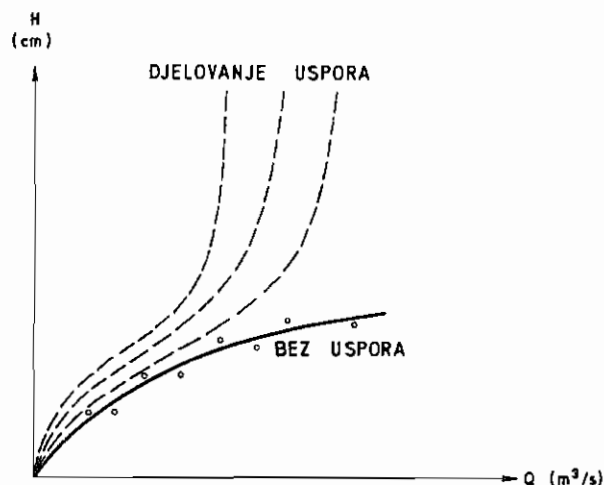
Protočna se krivulja, radi preglednosti, može u različitim mjerilima vodostaja i protoka prikazati na jednome dijagramu. Takva je krivulja prikazana na slici 4.60, a na njoj su razdvojena područja malih, srednjih i velikih voda.



Slika 4.60 Protočna krivulja za područja malih, srednjih i velikih voda

U nekim se slučajevima protočna krivulja sastoji iz više dijelova, koji su definirani različitim jednadžbama. Na taj su način, ovisno o ulaznim proračunskim podacima (vodostaji i odgovarajući izmjereni protoci), bolje definirane zakonitosti $Q = f(H)$ po pojedinim područjima unutar amplitude u kojoj se kreću vodostaji u hidrometrijskome profilu. Pojedini dijelovi (segmenti) protočne krivulje nadovezuju se jedan na drugi, pa se - ovisno o njihovu broju - takva krivulja naziva dvo-, tro- ili višedijelnom protočnom krivuljom.

U određenim hidrauličkim uvjetima, kada se u hidrometrijskome profilu stvori uspor uslijed nizvodnoga djelovanja, protočnu se krivulju ne može jednoznačno definirati. Na slici 4.61 prikazani su primjeri protočnih krivulja u hidrometrijskome profilu koji se nalazi uzvodno od ponora, a do njega djeluje uspor krškoga podzemlja. U slučaju kada je razina vode u podzemlju niska, protočnu je krivulju moguće realno definirati. No kada je kapacitet ponora premalen ili kada se razine podzemne vode dovoljno dignu, stvaraju se određeni uspori koji djeluju na konsumpcijski odnos u uzvodnome hidrometrijskom profilu. Tada se protočna krivulja ne može jednoznačno odrediti i poprima različite oblike (crtkano na slici 4.61).



Slika 4.6 Protočna krivulja u hidrometrijskome profilu krškoga vodotoka uzvodno od ponora

Pri određivanju protočne krivulje, pogotovo u slučajevima kada su izražena rasipavanja izračunskih parova vrijednosti H i Q oko izvedene zakonitosti $Q = f(H)$, preporuča se odrediti vjerojatno odstupanje unutar kojega se nalazi 95 posto ulaznih izračunskih podataka (razina povjerenja $\alpha = 5\%$). Vjerojatno se odstupanje izračunava prema izrazu (4.39), a postupak je opisan na kraju poglavlja 4.3.3. Granice vjerojatnoga odstupanja $\pm \sigma_{pQ}$ crtaju se, zajedno s ulaznim izračunskim podacima H i Q , na grafičkome prikazu protočne krivulje, kako je prikazano na slici 4.11.

4.7.1 Produljivanje protočne krivulje

Produljivanje ili ekstrapolacija protočne krivulje je postupak određivanja protočne krivulje u području u kojemu nema protoka izmjerenih u ovisnosti o vodostaju - za velike, a prema potrebi i za male vode.

Velike se vode rijetko pojavljuju - obično u uvjetima nepovoljnim za mjerenje protoka - a vrlo visoki vodostaji redovito kratko traju. Na većini hidrometrijskih profila zabilježi se tijekom godine razmjerno malo visokih vodostaja. Zbog toga moguće razlike između različitih pristupa produljivanju protočnih krivulja vrlo malo utječu na točnost srednjih godišnjih protoka. Odstupanja ne prelaze nekoliko postotaka vrijednosti srednjega protoka, što je redovito prihvatljivo kada se radi o veličinama srednjih voda.

No kada se na osnovi ekstrapolacije protočne krivulje definiraju maksimalni godišnji protoci, koji predstavljaju ulazne podatke za izračunavanje maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja, onda je nužno da odabrana metoda ekstrapolacije daje realne rezultate.

Standardni načini ekstrapoliranja protočnih krivulja u osnovi se razlikuju prema karakterističnim hidrauličkim parametrima na temelju kojih se definira ekstrapolirani dio protočne krivulje, zbog čega nastaju velike razlike u vrijednostima protoka ekstrapoliranih različitim metodama. U stručnoj se literaturi postupak preporučuje odabrati na temelju onoga hidrauličkog parametra koji ima najbolju lineariziranu vezu s vodostajima ili protocima. Ekstrapolirani dio protočne krivulje smatra se pouzdanim u području do 20 posto raspona vodostaja s izmjerenim protocima (T. Petković, 1975.).

Ovakav pristup u obzir uzima isključivo podatke iz profila za koji se ekstrapolacija provodi. Osim toga, kriterij odabiranja načina ekstrapoliranja - na temelju najbolje linearizacije veza hidrauličkih parametara s vodostajima ili protocima - nije teorijski potvrđen. Ispravniji je pristup provjeravanje rezultata ekstrapolacije protočne krivulje usporedbom s podacima iz profila sličnih obilježja otjecanja u sklopu regionalnih hidroloških analiza. Na temelju odgovarajućih regionalnih zakonitosti moguće je podacima dobivenima ekstrapolacijom i podacima iz profila u kojima postoje mjerena protoka velikih voda potvrditi ekstrapolaciju, koja pri ovakvu pristupu može biti znatno veća od 20 posto raspona vodostaja s izmjerenim protocima.

Jedan od često upotrebljivanih postupaka je **Stevensova metoda** ekstrapolacije za visoke vodostaje (J. C. Stevens, 1907.). Protok kroz profil vodotoka je, prema izrazu (2.53):

$$Q = A v \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

gdje je A (m^2) površina protjecajnog profila, a v (m/s) srednja profilaska brzina određena Chezyjevom formulom (2.111):

$$v = C \sqrt{R I_e}$$

Hidraulički radijus je $R = \frac{A}{O}$, gdje je O (m) omočeni obod, a I_e je pad linije energije, koji je pri jednolikome tečenju jednak padu vodnoga lica i padu dna; $I_e = I_o = I$, a C ($\text{m}^{0.5}\text{s}^{-2}$) je Chezyjev koeficijent.

Stoga je protok, prema izrazu (2.118):

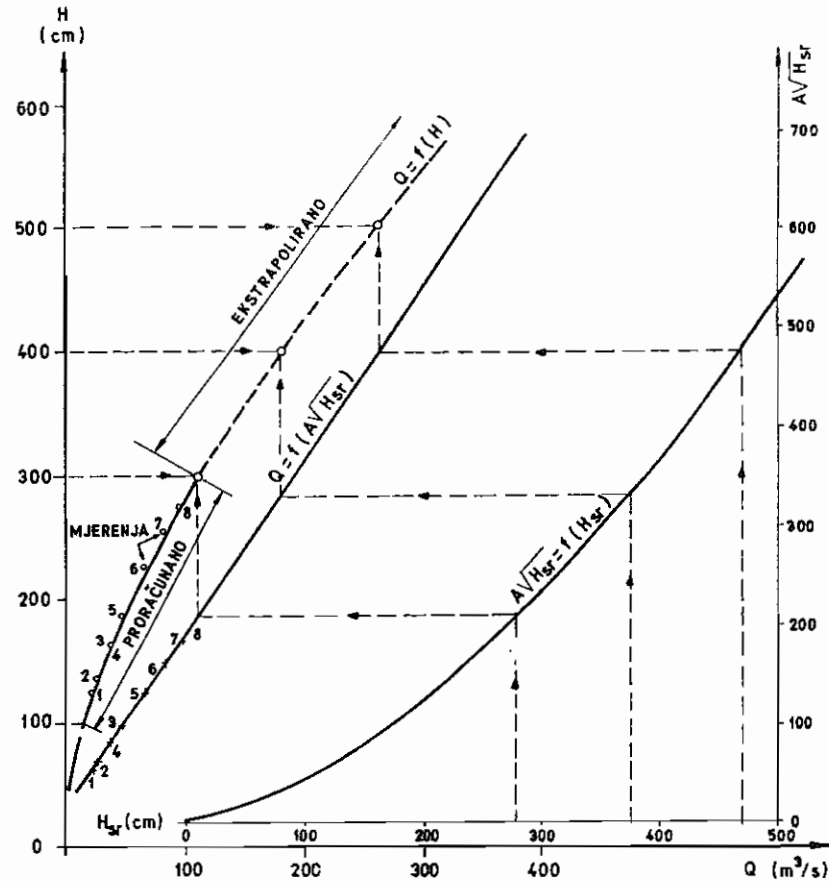
$$Q = A C \sqrt{R I}$$

Za široka i duboka riječna korita se konstanta k usvaja:

$$k = C \sqrt{I} \quad (4.141)$$

a omočeni obod O širokih korita također je približno jednak širini vodnoga lica u protjecajnome profilu B :

$$O = B \quad (4.142)$$



Slika 4.62 Ekstrapolacija protočne krivulje po Stevensovoj metodi

Tablica 4.9 Tablica izračunavanja stvarnoga slučaja prema Stevensovoj metodi

H (cm)	ΔA (m^2)	A (m^2)	B (m)	$H_{sr} = \frac{A}{B}$ (m)	$\sqrt{H_{sr}}$	$A\sqrt{H_{sr}}$	Q (m^3/s)	NAPOMENA
100	40,9	40,9	41,9	0,976	0,988	40,4	14,3	izračunano
200	41,3	82,2	43,7	1,88	1,37	113	53,0	
300	41,8	124	45,0	2,75	1,66	206	110	
400	47,0	171	46,1	3,71	1,93	329	177	ekstrapolirano
500	50,0	221	48,0	4,60	2,15	474	262	

Obzirom da je površina protjecajnoga profila:

$$A = B H_{sr} \quad (4.143)$$

gdje je H_{sr} (m) srednja profilna dubina, za hidraulički se radijus R (m) može usvojiti:

$$R = \frac{A}{O} = \frac{B H_{sr}}{B} = H_{sr} \quad (4.144)$$

Prema tome, uz ovakva pojednostavljenja protok kroz profil je:

$$Q = A k \sqrt{H_{sr}} \quad (4.145)$$

Postupak se grafički provodi (slika 4.62) na sljedeći način:

Nakon definiranja zakonitosti $Q = f(A\sqrt{H_{sr}})$ i $A\sqrt{H_{sr}} = f(H_{sr})$ za odgovarajuće se vrijednosti H_{sr} , A i Q od najvišega vodostaja s izmjerenim protokom zakonitost $Q = f(A\sqrt{H_{sr}})$ produlji po pravcu koji određuju točke $(A\sqrt{H_{sr}}, Q)$. Potom se krivulju $A\sqrt{H_{sr}} = f(H_{sr})$ izračuna za nekoliko vrijednosti između najvišega vodostaja s izmjerenim protokom H_{max} i najvišega zabilježenog vodostaja VVV , a onda ju se nacrtava. Nakon toga se za različite vodostaje $H > H_{max}$ grafički preko krivulje $A\sqrt{H_{sr}} = f(H_{sr})$ i pravca $Q = f(A\sqrt{H_{sr}})$ produlji protočna krivulja u području visokih vodostaja.

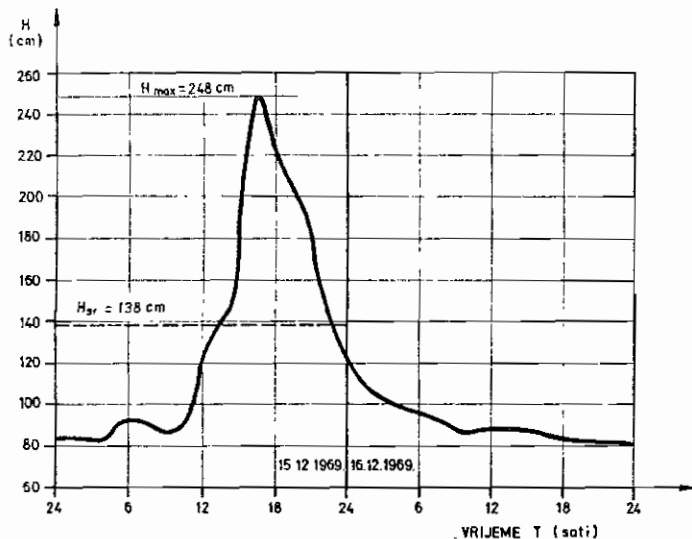
Brojčani primjer uz sliku 4.62 obrađen je u tablici 4.9.

4.8 Procesi otjecanja

Za poznavanje varijabilnosti otjecanja vode u vodotocima važno je poznavati čimbenike koji utječu na glavne hidrološke parametre. Stoga je osnovno polazište hidroloških obrada i analiza poznavanje podataka o oborinama, isparavanju, transpiraciji, vlazi u zemljištu, infiltraciji i sl.

Procese otjecanja i njihova bitna obilježja najbolje prikazuju nivogrami i hidrogrami. Oni vizuelan i stvarni prikaz promjena tečenja daju kronološkim redom.

Nivogram ili hod vodostaja je osnovni hidrološki grafikon koji prikazuje vodostaje u ovisnosti o vremenu. Nivogramom se također smatra neprekidno bilježenje vodostaja što ga zapisuje poseban uređaj za bilježenje razina vode ili podizanje (elevaciju) slobodnoga vodenog objekta u odnosu na postavljenu razinu. Jednokratno čitanje vodostaja s vodokaza prikazuje se kao srednji dnevni vodostaj (kada nema drugih vrijednosti). Kada je bilježenje vodostaja na limnigrafu neprekidno, nakon obrade limnigrafskih traka definira se srednje dnevne vodostaje i nivogram se crta u obliku srednjih dnevnih vodostaja. *Neprekinuti zabilježeni vodostaji na limnigrafskoj traci nazivaju se limnigram.* Kada se za grafički prikaz usvoji neprekinute vodostaje, dobije se **neprekinuti** ili **kontinuirani nivogram** (slika 4.63). Iz nivograma se dobiju dvije temeljne hidrološke krivulje: **krivulja učestalosti vodostaja** i **krivulja trajanja vodostaja**.



Slika 4.63 Nivogram velikoga vodnog vala Miljašić Jaruge u profilu Poljak (sjeveroistočno od Zadra).

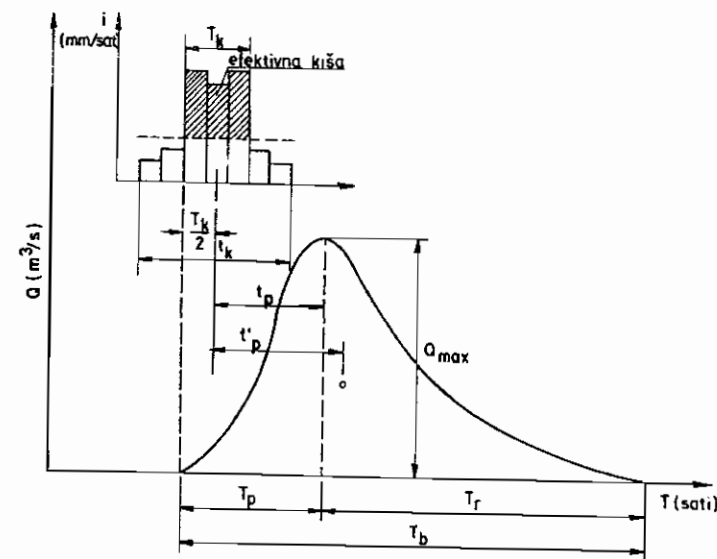
Hidrogram ili hod protoka je grafički prikaz protoka vode u ovisnosti o vremenu, a dobije se kada se iz zabilježenih vodostaja preko protočne krivulje odrede odgovarajući protoci vode. Na temelju hidrograma određuju se **krivulja učestalosti protoka** i **krivulja trajanja protoka** (pogl. 4.3). Na slici 4.64 prikazan je hidrogram otjecanja. Uz hidrogram vodnoga vala često se prikazuje i **hijetogram** (grafički prikaz visina ili intenziteta oborina u vremenu) koji je izazvao otjecanje vode definirano hidrogramom.

Prema tome, osnovni grafički prikazi u hidrologiji su:

1. hod vodostaja ili nivogram
2. krivulje učestalosti i trajanja vodostaja
3. hijetogram
4. hod protoka ili hidrogram
5. krivulje učestalosti i trajanja protoka.

Pojavljivanje vode u vodotocima u prirodnim se uvjetima ostvaruje u tri slučaja:

1. **Oborina pada izravno na vodu** u rijeci i njezinim pritjecima.
2. Oborina pala na sliv uzrokuje **izravni dotok vode**, koji po površini terena dospjeva u mrežu vodotoka bez **infiltracije** u tlo i **perkolacije** do vodom zasićenih slojeva. **Infiltracija** je tečenje vode kroz zemljinu površinu u poroznoj sredini, a **perkolacija** je tečenje kroz nezasićenu poroznu sredinu do zasićene sredine. (Npr. voda u tlu pod utjecajem gravitacije perkolira kroz zonu aeracije do podzemne vode u zasićenoj zoni.)



Slika 4.64 Hidrogram i hijetogram: t_k je trajanje kiše; T_k trajanje efektivne kiše; t_p vrijeme zakašnjenja; Q_{max} vršni (maksimalni) protok; T_b vremenska baza hidrograma; T_p vrijeme podizanja hidrograma; T_r vrijeme recesije (opadanja) hidrograma (u nekima se slučajevima za vrijeme zakašnjenja uzima razmak od težišta hijetograma do težišta hidrograma t_p).

3. Oborinska voda se infiltrira i perkolira u dublje slojeve, te jedan dio nje nakon određenoga vremena (nekoliko dana, tjedana, mjeseci) prispjeva u riječno korito kao **dotok potpovršinske i podzemne vode**.

Za neka je područja karakteristično da se izravni (površinski) dotok vode ne može odijeliti od dijela potpovršinskoga dotoka koji se infiltrira kroz propusni sloj i teče lateralno (sa strane) prema riječnome koritu, dok drugi dio vode perkolira do razine podzemne vode. Količina vode koja ispod površine terena teče lateralno prema koritu vodotoka često prispjeva u vodotok tako brzo da je nije moguće odijeliti od površinskoga tečenja (2. slučaj).

Kada kiša počne padati na više ili manje propusno, a obraslo tlo, prije nego što dođe do otjecanja postoje tri faze:

1. U vrijeme kada oborina počinje padati, oborinska voda je različitim zaprekama (npr. raznovrsno raslinje, zgrade, prometnice) sprečavana u stizanju na tlo. Ovo se stanje naziva **prekinutom oborinom**, a beznačajno je za kiše jakih intenziteta i duga trajanja, ali je za kiše slabih intenziteta često puta vrlo značajno.
2. **Infiltracija F** u tlo kada je ovlaženje zapreka dovoljno. **Maksimalna količina vode koju zemljište pod različitim okolnostima može upiti naziva se infiltracijski kapacitet** i označava simbolom f .

3. **Zadržavanje vode u depresijama.** Voda se slijeva u velik broj manjih ili većih depresija i tek nakon njihova zapunjenja počinje površinsko otjecanje. Količina vode zadržana u depresijama na slivu S_d može ispariti ili se jedan njezin dio potroši na bilje, a jedan dio se može infiltrirati u tlo. Vode u depresijama na slivu ni u kom slučaju ne obogaćuju površinsko otjecanje.

Razlika između ukupne oborine P i oborine zaprekama sprečavane u prispjivanju na tlo P_i naziva se **oborinom tla** i označava kao P_g :

$$P_g = P - P_i \quad (\text{mm}), (\text{m}^3) \quad (4.146)$$

Ako kiša nastavi padati i nakon što se depresije na slivu popune, a oborinska voda premaši infiltracijski kapacitet tla f , pojavljuje se tzv. **višak kiše** ili **zaliha** p_c , kao razlika ukupne pale oborine P i zbroja infiltracijskoga kapaciteta f , te sadržaja vode u depresijama S_d :

$$p_c = P_g - (f + S_d) \quad (\text{mm}), (\text{m}^3) \quad (4.147)$$

Višak kiše p_c najprije stvara **površinsko zadržavanje** D , a zatim po površini sliva teče prema koritima vodotoka. Ovakvu tečenju redovito su uzrok kiše jakih intenziteta.

Voda sadržana u riječnim tokovima je **riječna akumulacija** S_c .

Rekapitulacija oznaka za raspodjelu oborinske vode:

P	ukupna (bruto) oborina
P_i	prekinuta oborina (na zaprekama)
$P_g = P - P_i$	oborina koja prispje na tlo
F	oborina koja infiltrira u tlo
f	infiltracijski kapacitet (maksimalna količina vode koju tlo pod danim uvjetima može upiti)
$p_c = P_g - (f + S_d)$	višak kiše (razlika ukupne oborine tla i infiltracijskoga kapaciteta, te količine vode u depresijama)
S_d	količina vode zadržana u depresijama
D	površinsko zadržavanje vode uslijed pojavljivanja viška kiše
S_c	voda sadržana u vodotocima (riječna akumulacija)

Kada se navedene veličine razmatraju zajedno, najčešće se kao njihova jedinica rabi (mm), a rjeđe (m³).

4.9 Oblici pojavljivanja vode u tlu

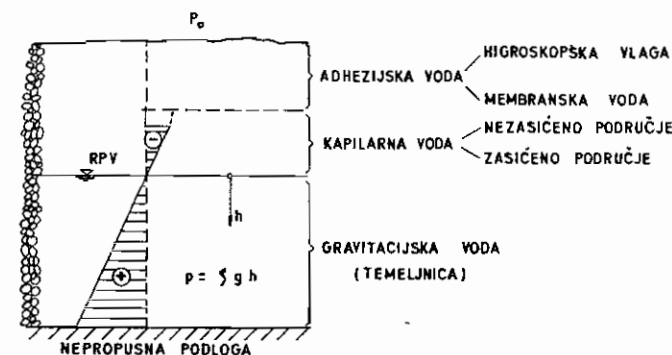
Voda se u tlu prema A. V. Lebedevu dijeli na četiri vrste:

1. **Vodena para.** Ona potpuno ispunjava pore između čestica tla i giba se iz područja višega prema području nižega tlaka.
2. **Higroskopska vlaga** ili **higroskopska voda** nastaje kondenzacijom vodene pare na česticama tla. Kada suho tlo dođe u doticaj s vlažnim zrakom, njegove čestice

upijaju vlagu i volumen tla se povećava, sve dok se ne postigne **maksimalan higroskopski učinak**. Pod tim uvjetima pjeskovito tlo može povećati svoj volumen oko 1 posto u odnosu na suho stanje. Za muljevito tlo to povećanje iznosi oko 7 posto, a za ilovače čak do 17 posto. Smatra se da se higroskopska voda može gibati u tlu samo ako se pretvori u paru.

3. **Pelikularna (membranska) voda** se stvara na česticama tla uslijed djelovanja molekularne sile adhezije⁵. Pelikularna se voda vrlo čvrsto drži uz čestice tla i od njih ju je moguće odvojiti akceleracijom koja je 70.000 puta veća od gravitacije. Prema tome, gravitacija nema nikakav utjecaj na gibanje pelikularne vode. Pelikularna voda može postupno teći od gušćega prema rjeđemu, odnosno tanjemu sloju i smrzava se pri temperaturi od -1,5 °C, a iščezava pri sušenju tla.
4. **Gravitacijska voda** je *podzemna voda u području zasićenja (saturacije)*, a sadrži *kapilarnu vodu*. Gravitacijska se voda u tlu nalazi u trima pojasevima (zonama):
 - a) **Kapilarna zona** ili **kapilarna zavjesa** se javlja iznad razine podzemne vode. Voda se prema površini tla kapilarno može dizati, ovisno o sastavu tla, od 0,30 do 3,0 m. Sadržaj vlage u području dizanja vode kao posljedica kapilarnosti je konstantan.
 - b) **Međuzona** se nalazi između kapilarne i površinske zone. U njoj je sadržaj vlage približno konstantan, osim za vrijeme perkolacije vode za jakih kiša.
 - c) **Površinska zona** je definirana po svojoj moći (dubini) s obzirom na dosezanje biljnoga korijenja. U površinskoj se zoni vlaga mijenja od potpuna zasićenja - neposredno poslije kiše - do minimalna sadržaja vlage postignuta na kraju dugotrajne suše.

Na slici 4.65 su pojave vode u tlu prikazane na nešto jednostavniji način, prikladan za hidrodinamičke izračune podzemnih voda.



Slika 4.65 Različiti oblici pojavljivanja vode u tlu

⁵ Adhezija je sila kojom se privlače molekule dvaju raznorodnih tijela kada su ona u tijesnu dodiru.

Na slici 4.65 dane su sljedeće oznake:

p_o je atmosferski tlak; h (m) dubina gravitacijske vode; $p = \rho g h$ (N/m²) hidrostaticki tlak podzemne vode, gdje je $\rho = 1000$ kg/m³ gustoća vode; $g = 9,81$ m/s² gravitacija; RPV je oznaka za razinu podzemne vode. U kapilarnoj se zoni javlja podtlak, odnosno tlak manji od atmosferskoga tlaka p_o , pa dolazi do kapilarnoga dizanja vode.

Maksimalna količina vode koju tlo neodređeno vrijeme može zadržati usprkos djelovanju gravitacije naziva se zemljišni kapacitet i označava kao F (ista se oznaka rabi za oborinu koja se infiltrira u tlo).

Količina vode koja je potrebna da se sadržaj vlage u zemljištu dovede do zadovoljenja zemljišnoga kapaciteta je tzv. deficit vlage zemljišta i označava se simbolom d_v .

Za vrijeme kiše svaki postojeći deficit vlažnosti tla u nekoj točki mora biti potpuno namiren, a tek se nakon toga može započeti proces obnove, odnosno doprinos podzemnoj vodi. Pri intenzivnu korištenju podzemne vode, njezino obnavljanje u prirodnim uvjetima redovito traje vrlo dugo.

U normalnim uvjetima razina podzemne vode prema izlazu iz podzemlja (prema rijekama, jezerima, morima) opada više ili manje jednoliko. Gibanje je podzemne vode obično vrlo polagano, a brzine tečenja ovise o sastavu tla i gradijentu tlaka. Zbog toga su doprinosi podzemne vode riječnome toku nakon oborina redovito vrlo spori.

4.10 Pražnjenje podzemlja

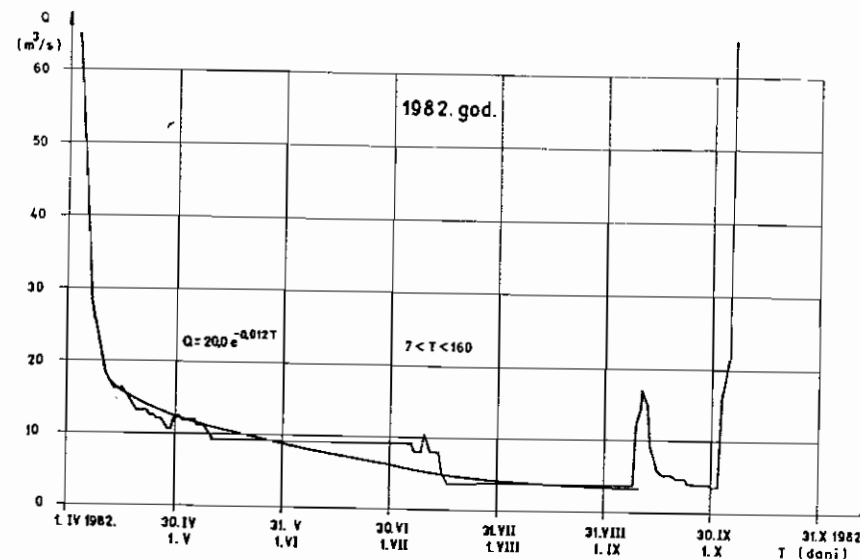
Za vrijeme kada nema površinskoga otjecanja uslijed djelovanja bilo koje vrste ili oblika oborina, tečenje vode u rijeci ostvaruje se isključivo zahvaljujući djelovanju podzemne vode. To dovodi do stalna snižavanja vodostaja i stalna smanjivanja protoka vode u rijeci, koje traje sve dok se ne pojavi oborina dovoljne izdašnosti da potakne površinsko otjecanje ili obnavljanje podzemne vode.

Kada bi podzemna voda na kraju razdoblja površinskoga otjecanja bila na svojoj maksimalnoj razini, te kada se iduća oborina ne bi pojavila toliko dugo da bi došlo do presušenja riječnoga toka, rezultirajući hidrogram bi predstavljao **krivulju pražnjenja podzemne vode ili krivulju iscrpljenja**.

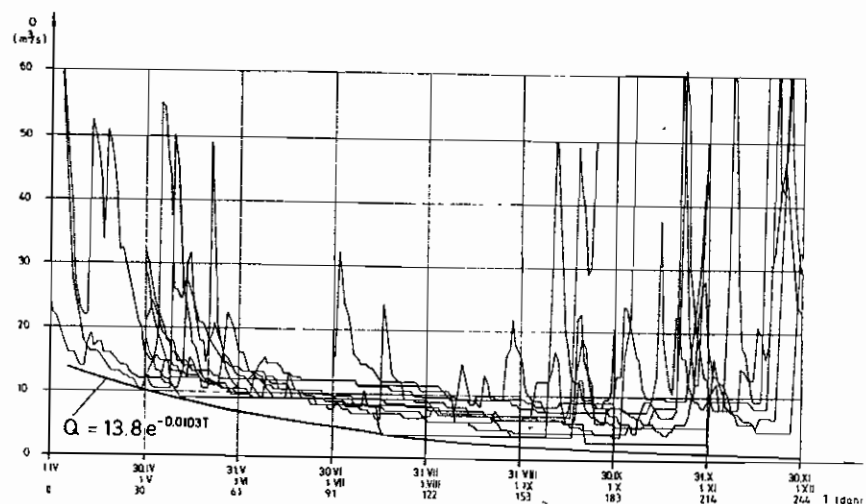
U predjelima s čestim oborinama rijetko je moguća pojava beskišnoga razdoblja dovoljno duga trajanja, koje bi omogućilo neprekidani razvoj potpune krivulje pražnjenja. Takva se krivulja može definirati na temelju dovoljno duga recesijskoga dijela hidrograma (slika 4.66), a može se definirati i anvelopna linija na temelju najnižih protoka zabilježenih u sušnome razdoblju (slika 4.67), koja će davati najnepovoljnije stanje. Analitički oblik recesijske krivulje dao je E. Maillet (1905):

$$Q = Q_o e^{-\alpha T} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.148)$$

gdje je Q_o (m³/s) protok u početnome trenutku recesije; $e = 2,718$ je baza prirodna logaritma; α je recesijski koeficijent; T (dani) je trajanje recesije.

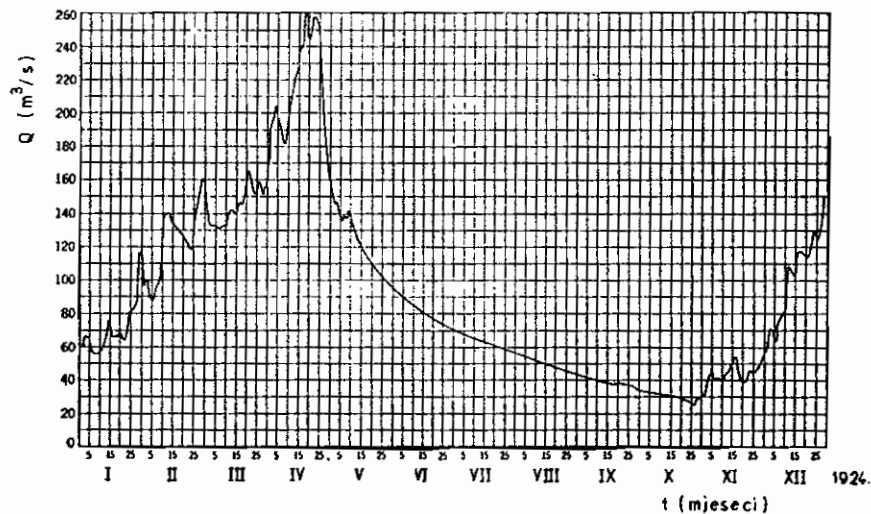


Slika 4.66 Hidrogram srednjih dnevnih protoka Omble u profilu Komolac (IV. - X. 1982.) s krivuljom pražnjenja



Slika 4.67 Hidrogrami malih voda Omble u profilu Komolac u razdoblju (1981. - 1990.) s anvelopnom krivuljom najnižih protoka (anvelopna krivulja je definirana tako da su hidrogrami svake pojedine godine crtani jedan preko drugoga)

Dobar uvid u podzemno pražnjenje ili recesiju daju hidrografi tropskih rijeka, jer je u tim područjima kišno i sušno doba strogo razdvojeno, tako da je u sušnome razdoblju približna trajanja šest mjeseci krivulja pražnjenja podzemlja jasno određena (slika 4.68).



Slika 4.68 Karakteristični godišnji hidrogram rijeke Lualaba (jedan od krakova rijeke Kongo) u Zairu (C. O. Wisler i E. F. Brater, 1967.)

4.11 Podjela vodotoka

Prema tečenju vode koje ovisi o fizikalnim i klimatskim uvjetima sliva, C. O. Wisler i E. F. Brater (1967.) vodotoke općenito dijele na tri vrste:

- Efemerni (kratkotrajni) vodotoci** s povremenim tečenjem bez utjecaja podzemne vode. Efemerne rijeke primaju vodu samo za vrijeme trajanja jakih kiša i neposredno (kratko vrijeme) nakon njih, te vodu nastalu topljenjem snijega. Redovito nemaju dobro definirano riječno korito, nego slijede depresije u tlu. Tlo kojim teku je nepropusno, a razina podzemne vode je uvijek ispod riječnoga korita (slika 4.69a), po cijeloj dužini riječnoga toka.
- Intermitentni (povremeni) vodotoci** s povremenim ili isprekidanim otjecanjem vode i s djelomičnim uplivom podzemne vode (slika 4.69b). U ovim rijekama voda općenito teče u vlažnome dijelu godine, a u sušnome razdoblju one presušuju. Primaju površinsku vodu, a dok su razine podzemne vode iznad dna riječnoga korita - i podzemnu. Za vrijeme suhih razdoblja, razine podzemne vode padaju ispod riječnoga dna i intermitentne rijeke presušuju.

- Perenijalni (trajni, stalni) vodotoci** imaju stalni tok vode. U vodotocima sa stalnim tečenjem razine podzemne vode ne padaju ispod dna riječnoga korita, pa se ono opskrbljuje i površinskom i podzemnom vodom (slika 4.69c).

Riječni tok promatran u cjelini može u nekim svojim dijelovima spadati u intermitentne (vrsta b), a u nekim dijelovima u perenijalne vodotokove (vrsta c), ovisno o površinskom i podzemnom dotoku i geološkim uvjetima. Površinsko dotjecanje u vodotok uzrokuje jake promjene razina vode u koritu, dok je utjecaj podzemnih voda na promjene vodostaja znatno manji.

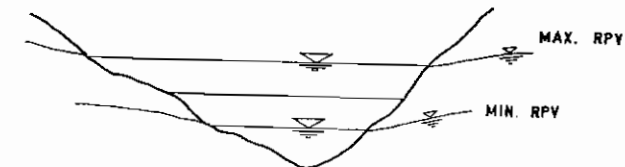
1. EFEMERNI VODOTOK



2. INTERMITENTNI VODOTOK



3. PERENIJALNI VODOTOK



Slika 4.69 Efemerni (a), intermitentni (b) i perenijalni vodotok (c)

4.12 Promjenljivost razina vode u vodotocima

Učinak kiše koja padne na sliv i na vodotok ovisi o prirodi kiše i fizikalnim karakteristikama sliva. Uzimajući u obzir promjene vodostaja, odnosno tečenja, R. E. Horton (1914.) je dao četiri oblika otjecanja u vodotoku (od 0 do 3). Osnovne oznake su:

- P ukupne oborine
- P_g oborine pale na tlo
- F ukupna infiltracija
- f infiltracijski kapacitet
- i intenzitet kiše

p_c višak kiše: $p_c = i - f$
 d_v deficit vlažnosti tla
 Q_s površinsko otjecanje
 Q_u doprinos podzemne vode

Oblik 0

Ovo je oblik u kojemu nema promjena tečenja vode u rijeci. Kišni intenzitet i je manji od kapaciteta infiltracije f , a ukupna infiltracija F je manja od deficita vlažnosti tla d_v , pa nema niti prirasta u podzemnoj vodi.

Ovaj tip tečenja je karakterističan za lagane kiše u sušnom razdoblju godine, kada tlo ima maksimalan infiltracijski kapacitet, odnosno najveći deficit vlažnosti.

Napominje se da oblik 0 ipak može imati određeni utjecaj na vodno stanje u rijeci i to kada je rezultat djelovanja kiše koja izravno padne na riječno korito pa može uzrokovati porast vodostaja, naročito ako je u rijeci već bilo vode.

Oblik 1

U ovome je slučaju, kao i u prethodnome, intenzitet kiše i manji od infiltracijskoga kapaciteta f , pa ne dolazi do površinskoga otjecanja. Ukupna je infiltracija F veća od deficita vlažnosti tla d_v , pa dolazi do stanovitoga prirasta u podzemnoj vodi, što je popraćeno povećanjima razine i pada krivulje vodnoga lica podzemne vode. Prema tome, deficit vlažnosti tla je manji od ukupne oborine ($d_v < P$), pa je doprinos podzemnoj vodi jednak razlici oborine i deficita vlažnosti tla ($Q_u = P - d_v$).

Razine vode u rijeci mogu se mijenjati uslijed djelovanja obojne pale izravno na riječno korito. U izvjesnim povoljnim geološkim uvjetima može doći i do površinskoga otjecanja, ali u tom su slučaju promjene razina vode u rijeci vrlo male - gotovo neprimjetne.

Oblik 1 tečenja vode u koritu vodotoka karakterističan je za lagane proljetne kiše ili nešto jače ljetne kiše kratkih trajanja.

Oblik 1 tečenja u rijeci može rezultirati trima različitim slučajevima, a u svakome od tih slučajeva prirast vode u riječnome koritu zbiva se u vremenskom intervalu $m - n$ (prema slici u tablici 4.10). Normalno pražnjenje podzemne vode prekida se na početku intervala u točki m , a nastavlja se na kraju intervala u točki n , dok krivulja $m - n$ prikazuje stanje kakvo bi bilo da nije došlo do prirasta u podzemnoj vodi.

U slučaju 1a količina prirasta u podzemnoj vodi je manja od količine vode koja se istovremeno normalno prazni iz podzemlja. Prema tome, pražnjenje se podzemlja nastavlja, ali u smanjenim količinama.

U slučaju 1b količina prirasta u podzemnoj vodi i normalno pražnjenje su jednaki, pa je istjecanje vode u vremenskom intervalu $m - n$ konstantno po svojoj količini.

U slučaju 1c količina prirasta u podzemnoj vodi premašuje količinu pražnjenja podzemlja, uslijed čega dolazi do povišenja razina podzemne vode i povećanja količine istjecanja.

Tablica 4.10 Oblici tečenja u vodotocima (R. E. Horton, 1914.)

Oblik	0	1	2	3
intenzitet kiše i	$< f$	$< f$	$> f$	$> f$
deficit vlažnosti zemljišta d_v	$> p$	$< p$	$> F$	$< F$
površinski dotok Q_s	-	-	$Q_s = p_c = i - f$	$Q_s = p_c$
doprinos podzemne vode Q_u	-	$P - d_v$	-	$F - d_v$
porast otjecanja u vodotoku	-	samo od podz. vode	samo od površ. vode	od površ. i podz. vode

Oblik 2

Kod ovoga oblika tečenja vode u koritu vodotoka kišni intenzitet i premašuje infiltracijski kapacitet f , pa dolazi do površinskoga otjecanja Q_s . Ukupna infiltracija F je manja od deficita vlažnosti tla d_v , pa nema doprinosa podzemnoj vodi, niti povećanja istjecanja iz podzemlja. Za vrijeme porasta vodostaja u rijeci, podzemno pražnjenje se normalno nastavlja, a u točki n postiže se stanje kakvo bi bilo da se u slivu uopće ništa nije zbivalo. Nakon potpuna prestanka utjecaja površinskoga dotoka, vodostaj će u rijeci u točki n biti niži nego u početku rasta i to stoga što se u vremenskom intervalu $m - n$ smanjila i količina vode koja u vodotok dolazi iz podzemlja.

Tečenje u vodotoku prema obliku 2 najčešće se zbiva u vegetacijskome razdoblju, naročito sredinom ljeta, kada je deficit vlažnosti tla d_v obično velik, a infiltracijska količina F premalena da bi zadovoljila manjak vode u tlu. Ovakva su zbivanja posljedica kratkih intenzivnih pljuskova na slivu.

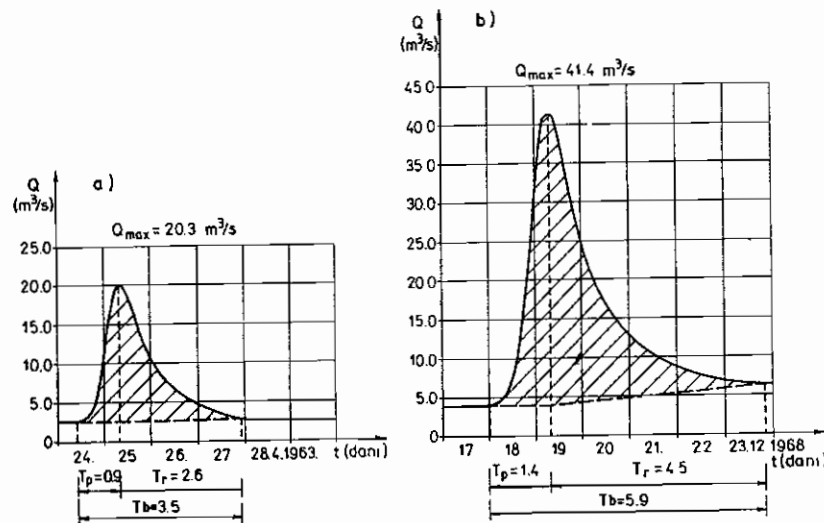
Oblik 3

Kod oblika 3 tečenja u vodotoku, kišni intenzitet i premašuje infiltracijski kapacitet f - kao i kod oblika 2 - pa dolazi do površinskoga otjecanja Q_s . U ovome slučaju ukupna infiltracija F premašuje deficit vlažnosti tla d_v , i stoga nužno dolazi do povišenja razina podzemne vode. Točka n , koju označava gdje završava nastali vodni val, je točka u kojoj se opadanje (recesija) hidrograma $c - n$ podudara s krivuljom normalnoga opadanja protoka koje bi točka n dosegla u vremenu $m - n$ da nije bilo oborine.

U obliku 3 postoje tri podslučaja, kao i u obliku 1, a svaki je od njih ovisan o količini prirasta podzemne vode.

Opadanje tečenja na kraju vodnoga vala oblika 3 završava na višem ili barem pomaknutom položaju od onoga u obliku 2, a stanje na kraju vodnoga vala može, ali ne mora biti više od početnoga stanja vodnoga vala (točka n može biti ispod točke m , u razini ili iznad nje - prema slici oblika 3 u tablici 4.10). U slučaju a i b oblika 3, stanje kod kojega je ponovno uspostavljeno normalno opadanje tečenja u riječnome koritu neće biti više od početnoga stanja; ono će biti više u slučaju c.

Je li porast vodostaja, odnosno protoka u riječnome koritu, oblika 2 ili 3, može se ustanoviti tako da se normalna krivulja opadanja produži ispod povišenih vodostaja ili protoka. Ako se opadajući dio nivograma ili hidrograma vrati na normalnu krivulju opadanja, porast je vodostaja, odnosno protoka u rijeci, oblika 2. Ako se opadajući dio nivograma, odnosno hidrograma ne vrati na normalni tok opadanja, nego završi na višoj razini, radi se o obliku 3.



Slika 4.70 Hidrogrami velikih vodnih valova Kupčine u profilu Strmac: a) oblik 3b; b) oblik 3c.

Prodoči li se hidrogram vodnoga vala grafički u odgovarajućemu mjerilu, može se za zadovoljavajućom sigurnošću utvrditi kojemu od opisanih oblika pripada porast protoka, odnosno vodostaja u vodotoku (slika 4.70).

4.13 Hidrogram i njegovi sastavni dijelovi

Hidrogram je kao jedan od osnovnih grafičkih prikaza u hidrologiji definiran i opisan u poglavlju 4.8. U ovome se poglavlju razmatra razdvajanje hidrograma na njegove glavne sastavne dijelove. **Razdvajanje, separacija ili analiza hidrograma je razdvajanje izravnoga (površinskog) od podzemnoga dotoka.**

Dotjecanje vode u vodotok sastoji se iz dvaju glavnih dijelova: **izravnoga dotoka**, kada voda teče do korita po površini terena, i **baznoga (temelnog) dotoka**, koji dolazi u korito tekući ispod površine terena. Bazni se dotok sastoji od **potpovršinskoga dotoka iz plićih zona** i **podzemnoga dotoka iz dubljih zona u tlu**. Potpovršinski tok vode je onaj dio vode koji se infiltrira kroz površinu tla i teče gornjim horizontima tla dok ga ne preuzme korito vodotoka ili dok ne izađe na površinu na nekome drugom mjestu, nižem od mjesta infiltracije. Potpovršinska komponenta otjecanja svojstvena je svim slivovima, a ovisi o strukturi tla.

U područjima gdje tlo u zoni aeracije sadrži dovoljno vlage, tako da je moguć prolaz gravitacijske vode prema dolje, dio oborine dopijeva do razine podzemne vode. Dotok iz podzemne vode stiže do korita najsporije od svih komponenti, no njegov se doprinos vodotoku ne smije zanemariti.

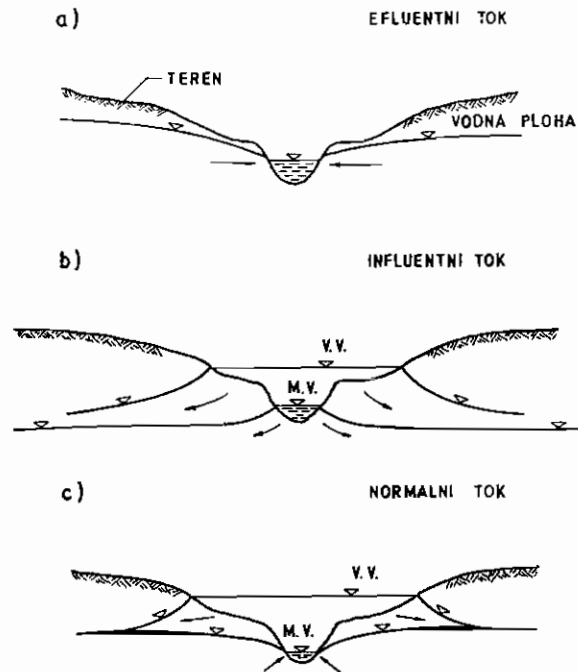
Razlikuju se tri tipa strujanja vode iz podzemlja u vodotok i obrnuto, koja su prikazana na slici 4.71:

1. **efluentni tok** je strujanje vode iz podzemlja u vodotok
2. **influentni tok** je strujanje vode iz vodotoka u podzemlje
3. **normalni tok** nastaje kada se za niskih vodostaja vodotok prihranjuje iz podzemlja, a za srednjih i visokih vodostaja voda iz vodotoka struji u podzemlje.

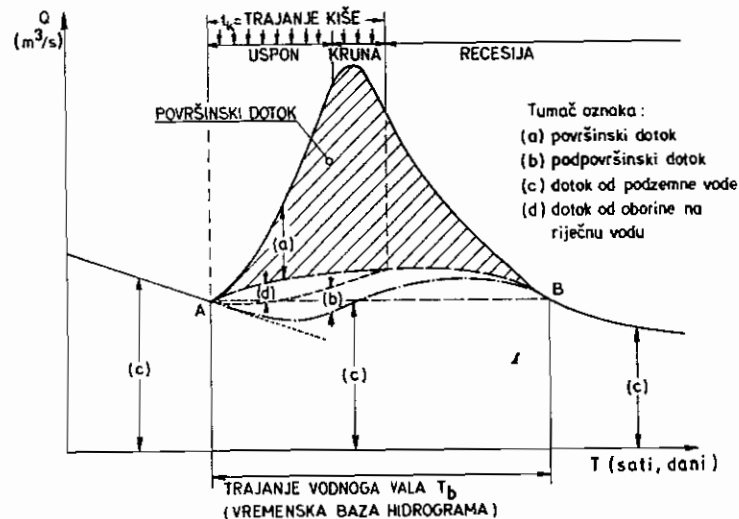
Vodotoci s efluentnim strujanjem općenito imaju razmjerno bogate male vode i razmjerno malenu razliku između niskih i srednjih protoka. U vodotocima s influentnim strujanjem razlike između srednjih i velikih voda su znatno veće nego u vodotocima s efluentnim strujanjem. Influentno strujanje se javlja kada je razina podzemne vode niža od razine vode u vodotoku (hidrogram na slici 4.73), a za efluentno strujanje razina podzemne vode mora biti viša od vodostaja u vodotoku.

U različitim se hidrološkim profilima hidrogrami otjecanja redovito međusobno značajno razlikuju, pa ih je zbog toga potrebno obraditi i analizirati za svaki profil posebno.

Kada se hidrogramom prikazuju vodni valovi u znatno kraćemu vremenu nego što je godina, često je potrebno odvojiti izravni (površinski) dotok u vodotok od baznoga (potpovršinskog i podzemnog) dotoka. Hidrogram je općenito sastavljen iz dijelova, kako je prikazano na slici 4.72. Pritom su najveći intenziteti kiše za vrijeme podizanja vodnoga vala, a kiša može trajati i nešto duže od trajanja protoka definiranoga vrhom hidrograma.



Slika 4.71 Tipovi strujanja iz vodotoka u podzemlje i iz podzemlja u vodotok



Slika 4.72 Glavni dijelovi hidrograma otjecanja

Hidrogram je grafički prikaz protoka vode u odnosu na vrijeme. Prikazuje količine vode koje otječu vodotokom prije, za vrijeme i poslije kiše. Sastavljen je od jedne do četiriju bitnih komponenata, ovisno o tome kakvi su uvjeti otjecanja na slivu. Komponente hidrograma su:

- a) površinski (izravni) dotok
- b) međudotok (potpovršinski)
- c) podzemni dotok
- d) oborina pala na korito vodotoka.

U nekim slučajevima javlja se još jedna - dodatna komponenta: **oborina kondenzirana na slivu** (snijeg). Naglo otapanje snijega, pogotovo ako je u kombinaciji s jakim kišama, može izazvati velike vodne valove (npr. na rijeci Lici).

S praktične strane konstruiranje hidrograma ne predstavlja problem budući da su vodostaji zabilježeni na limnigrafskoj traci kao zapis, limnigram, i iz njega se dobije odgovarajući nivogram, koji je na osnovi protočne krivulje jednostavno pretvoriti u hidrogram. No kada treba odrediti pojedine komponente hidrograma, posebno je složeno određivanje baznoga dotoka.

Osnovni elementi hidrograma su uspon, kruna i recesija (opadanje). Oblik hidrograma ovisi o trajanju kiše, području sliva zahvaćena kišom, promjenljivosti intenziteta kiše i obliku sliva. Vremensku bazu hidrograma T_b definira vrijeme od početka porasta hidrograma do vremena kada je površinsko otjecanje gotovo jednako nuli.

Vrijeme podizanja vodnoga vala T_p je vrijeme od početka izravnoga dotoka iz oborine do vršnoga (maksimalnog) protoka vodnoga vala, a **vrijeme recesije** ili **opadanja vodnoga vala** T_r je vrijeme od vršnoga (maksimalnog) protoka vodnog vala do kraja vodnoga vala (slika 4.74).

Vremenska baza ili trajanje hidrograma je prema tome:

$$T_b = T_p + T_r \quad (4.149)$$

Vrijeme podizanja hidrograma T_p razlikuje se od vremena koncentracije sliva T_c , koje predstavlja vrijeme potrebno da voda stigne od najudaljenije točke sliva do protjecajnoga profila vodotoka. Redovito je:

$$T_c < T_p \quad (4.150)$$

Prema L. D. Sokolovskom (1968.) je:

$$T_p = k \cdot T_c \quad (4.151)$$

koeficijent za kratke pljuskovne iznosi $k \approx 1,0$, a za duge kiše $k = 1,30 - 1,60$.

Ako je poznata brzina putovanja vode duž glavnoga vodotoka v (m/s), vrijeme koncentracije je:

$$T_c = \frac{L_v}{v} \quad (s) \quad (4.152)$$

gdje je L_v (m) duljina vodotoka.

Izravni se dotok hidrograma sastoji iz površinskoga dotoka vode sa sliva i znatno manjega dotoka iz oborine koja padne izravno na površinu vode u vodotoku te brzoga podpovršinskog dotoka. Ta se, često razmjerno mala komponenta hidrograma, redovito ne uzima u obzir zasebno, nego se podrazumijeva da je ona sadržana u površinskome dotoku. Bazni se dotok sastoji iz podzemnoga i sporoga potpovršinskog dotoka i njih se u većini slučajeva razmatra zajedno. Prema tome, postupkom razdvajanja ili separacije hidrograma se gotovo uvijek dijeli na dva glavna dijela - na bazni i na izravni dotok.

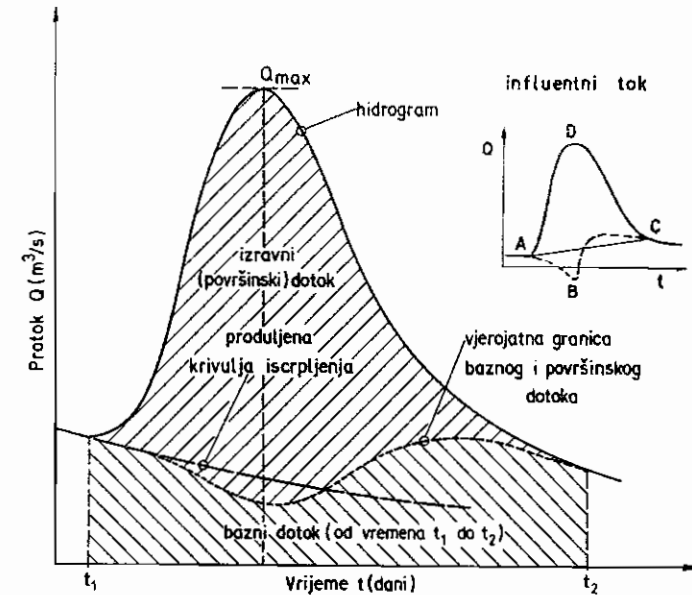
Kada nema površinskoga dotoka iz oborina, vodotok se napaja vodom iz podzemlja - tada postoji samo bazni dotok, a dok nema novih oborina hidrogram je redovito neprekidno u opadanju. Oborine koje padnu na sliv uzrokuju porast ordinata hidrograma, a ordinate hidrograma predstavljaju bazni i izravni dotok zajedno. Kada hidrogram predstavlja bazni i izravni dotok, osnovni problem postaje definiranje vremena trajanja izravnoga dotoka i razdvajanje baznoga od izravnoga dotoka.

Podjela, odnosno vjerojatna granična linija između baznoga i izravnoga dotoka, može se pretpostaviti kao što je prikazano na slici 4.73. Takav približni oblik navodi se i u ranijoj (E. M. Wilson, 1974.) i u novijoj hidrološkoj literaturi (K. N. Mutreja, 1986., D. R. Maidment i dr. 1993.). Kao poseban slučaj - gore desno na slici 4.73 - prikazan je hidrogram vodnoga vala influentnoga vodotoka. Vjerojatna granica između baznoga i izravnoga dotoka, kakva je prikazana na slici 4.73, nije pogodna za aproksimiranje odgovarajućim matematičkim izrazima, a u području od početka podizanja vodnoga vala do postizanja maksimalnoga protoka ne mora uvijek opadati, već u određenim povoljnim geološkim uvjetima podzemni dotok može lagano rasti zajedno s nadzemnim. Prema tome, za dijeljenje hidrograma na bazni i izravni dotok mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja, jednostavno prikazana na slici 4.74 (D. Srebrenović, 1986.):

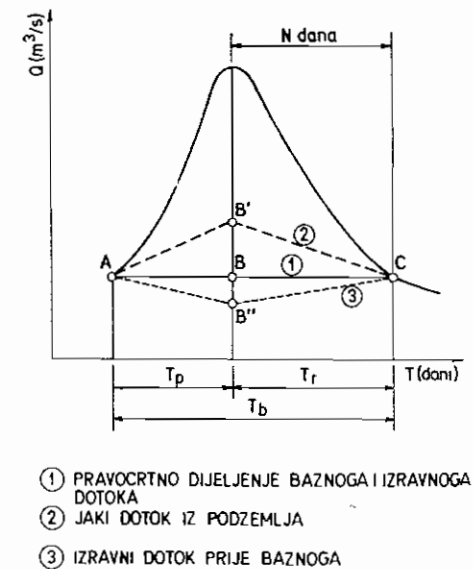
1. točka *A*, *B* i *C* su na istome pravcu,
2. prihranjivanje vode iz podzemlja u vodotok je jako, pa je točka *B'* iznad *A* i *C*,
3. površinsko tečenje odvija se prije podzemnoga, pa je točka *B''* ispod točaka *A* i *C*.

U geološki povoljnim uvjetima za otjecanje bazni i izravni dotok rastu do vršnoga protoka (2. slučaj), a za nepovoljnih uvjeta porast baznoga dotoka počinje znatno kasnije - često kada i vršni protok (3. slučaj). No kada na temelju raspoloživih podloga nije moguće s dovoljno pouzdanosti zaključiti kakve su promjene baznoga dotoka, pretpostavlja se da je odvajanje baznoga od izravnoga dotoka linearno (1. slučaj).

Podizanje hidrograma nakon kiše redovito počinje naglo i obično traje znatno kraće od opadanja hidrograma, pa zbog toga vrijeme podizanja T_p uglavnom nije teško odrediti. U takvim slučajevima nakon kraćih, naglijih promjena pri podizanju dolazi znatno dulja faza opadanja (recesije) hidrograma T_r , u kojoj se protoci tijekom vremena lagano mijenjaju, a krivulja recesije hidrograma postupno i sve blaže opada. Zbog toga se kao temeljni problem postavlja određivanje kraja vodnoga vala, odnosno točke na hidrogramu u kojoj prestaje izravni dotok, a ostaje samo bazni dotok.



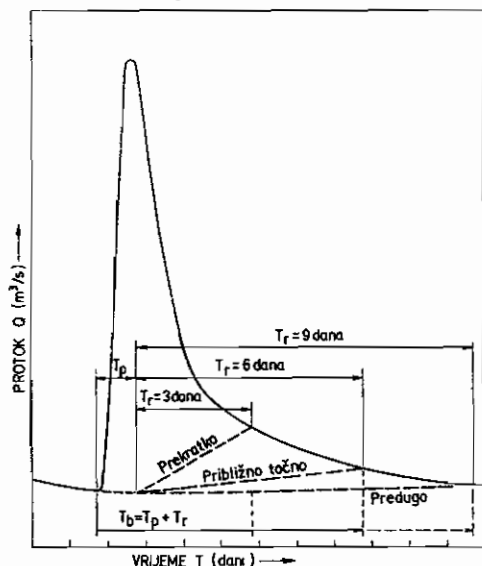
Slika 4.73 Razdvajanje hidrograma na bazni i izravni dotok (E. M. Wilson, 1974.)



- ① PRAVOCRTNO DIJELJENJE BAZNOGA I IZRAVNOGA DOTOKA
- ② JAKI DOTOK IZ PODZEMLJA
- ③ IZRAVNI DOTOK PRIJE BAZNOGA

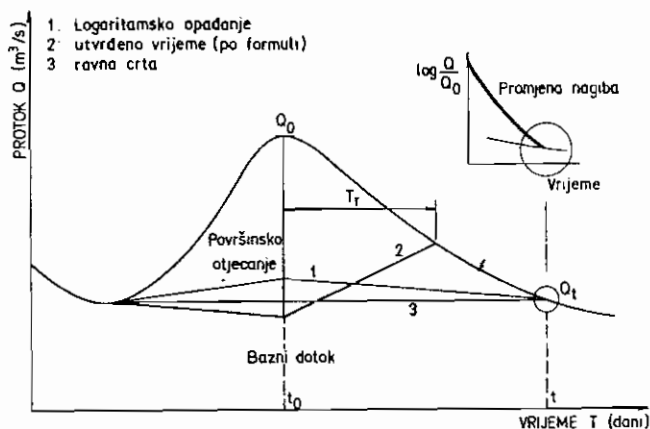
Slika 4.74 Tri slučaja dijeljenja (separacije) hidrograma (D. Srebrenović, 1986.)

Na slici 4.75 je na karakterističnome hidrogramu velikoga vodnog vala prikazan raspon unutar kojega se trajanje opadanja hidrograma izravnoga dotoka može kretati, ako se procjenjuje na osnovi krivulje recesije.



Slika 4.75 Određivanje vremena opadanja (recesije) T_r hidrograma izravnoga otjecanja (R. K. Linsley i dr., 1988.)

Odvajanje baznoga od izravnoga dotoka hidrograma najčešće se provodi na temelju jednog od triju osnovnih pristupa koji su prikazani na slici 4.76.



Slika 4.76 Načini odvajanja izravnoga od baznoga dotoka (M. P. Wanielista, 1990.)

Osnovna je pretpostavka prvoga pristupa da se komponente krivulje recesije (izravni, potpovršinski i podzemni dotok) mogu dovoljno dobro aproksimirati eksponencijalnim krivuljama, pa se protok u vremenu t može približno definirati Mailletovom formulom (4.148):

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

gdje je:

Q_0 - protok na početku vremena t

Q_t - protok nakon vremena t

α - konstanta recesije (različita za pojedine komponente hidrograma)

$e = 2,718$ - baza prirodnoga logaritma.

Kada se hidrogram prikaže u log-normalnome mjerilu, njegove komponente približno izgledaju kao pravci (B. S. Barnes, 1940.). Uzima se da djelovanje pojedine komponente prestaje kod promjenom nagiba krivulje recesije, odnosno pri lomovima ravnih linija kada se krivulja prikaže u log-normalnome mjerilu. Ovaj se pristup temelji na teoriji i zbog toga mu pojedini hidrolozi (M. P. Wanielista, 1990.; S. Prohaska i V. Ristić, 1996.) daju prednost u odnosu na ostale metode. Glavni mu je nedostatak to što duž krivulje recesije često postoji i nekoliko lomova, pa tada nije jednostavno definirati vrijeme recesije.

Drugi se pristup temelji na iskustvenome određivanju vremena recesije N , čije su prosječne vrijednosti u tablici određene na osnovi podataka dobivenih motrenjem i mjerenjem na velikome broju prirodnih slivova (R. K. Linsley, i W. C. Ackerman, 1942.; M. P. Wanielista, 1990.).

Tablica 4.11 Prosječne vrijednosti broja dana N za različite slivove (prema E. M. Wilsonu, 1974.)

Veličina sliva A (km ²)	Vrijeme recesije N (dani)
250	2
500	3
2000	4
5000	5
10.000	6

Napomena: U opisu ovoga pristupa za određivanje vremena recesije zadržana je izvorna oznaka N , dok se na drugim mjestima u knjizi rabi oznaka T_r .

Različiti nagibi slivova i drugi čimbenici bitni za otjecanje uzrokuju odstupanja od prosječnih vrijednosti iz tablice 4.11. Za planinska područja preporučuje se vrijednosti N smanjiti, a za duge uske slivove s blagim nagibima N se može povećati i za 50 posto.

R. K. Linsley i suradnici (1949.) daju za vrijeme recesije N u danima jednostavnu formulu (koja ne odstupa značajno od vrijednosti N iz tablice 4.11):

$$N = A^{0.2} \quad (4.153)$$

gdje je A veličina sliva u četvornim miljama (1 mi = 1,6093 km).

Za površinu sliva A (km²) R. K. Linsley i sur. (1988.) daju približnu formulu:

$$N = 0,8 A^{0.2} \quad (4.154)$$

Izraz (4.154), gdje je površina sliva A dana u četvornim miljama, općenito se prikazuje:

$$N = A^n \quad (4.155)$$

a za vrijednost eksponenta n smatra se da se kreće oko 0,2 (M. P. Wanielista, 1990.).

Glavni nedostatak ovakva pristupa jest u razlikama koje nastaju u veličinama eksponenta n za pojedine slivove. Poseban problem predstavljaju slivovi u kršu s velikim podzemnim retencijama u zaleđima svojih izvorišta, koje zbog ograničenih kapaciteta izlaza imaju velik utjecaj na spljoštavanje vrha vodnoga vala i produljivanje padajućega dijela hidrograma. Kod takvih vodotoka površinski dotok redovito dolazi s razmjerno male slivne površine i to za vrlo jakih oborina (preko 50, pa čak i preko 70 mm/dan), a dominantan doprinos dolazi iz podzemlja. No i na zaleđe krških izvora djeluju jake kiše, koje pojačavaju pražnjenje podzemlja i čine značajan dio vodnoga vala. Pretpostavi li se da se i njihov doprinos hidrogramu otjecanja sastoji u izravnom dotoku (izlaz iz prirodne retencije), vrijeme recesije hidrograma u takvim se slučajevima značajno produljuje, a eksponent n je znatno veći od 0,2. Pretpostavka da se izravni dotok u kršu sastoji od površinskoga dotoka i dotoka koji naglo izlazi iz podzemlja potkrijepljena je naglim promjenama nagiba u donjem dijelu krivulje recesije, pa je zbog toga u takvim slučajevima teorijski prihvatljiva.

Tako se, primjerice, u slučaju krške rijeke Ričine za 10 hidrograma velikih vodnih valova u profilu Ričice (u blizini Imcetskoga) u razdoblju opažanja od 1989. do 1995. za sliv veličine $A = 240$ km², veličine n kreću od 0,22 do 0,46, a prosječno je $n = 0,38$ (R. Žugaj, 1997.).

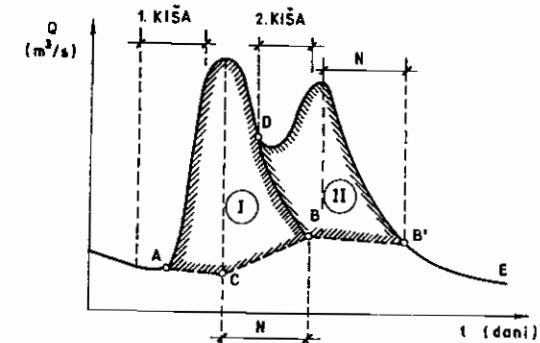
Na rijeci Cetini u profilu brane Peruća, do kojega veličina sliva iznosi $A = 1380$ km², analiziran je 21 veliki vodni val iz razdoblja od 1964. do 1986. godine. Veličine eksponenta n kreću se od 0,18 do 0,52, a prosječno je $n = 0,42$.

Prema tome, kada se koristi iskustvena formula (4.155), u određenim su slučajevima moguće vrlo velike pogreške u određivanju vremena recesije.

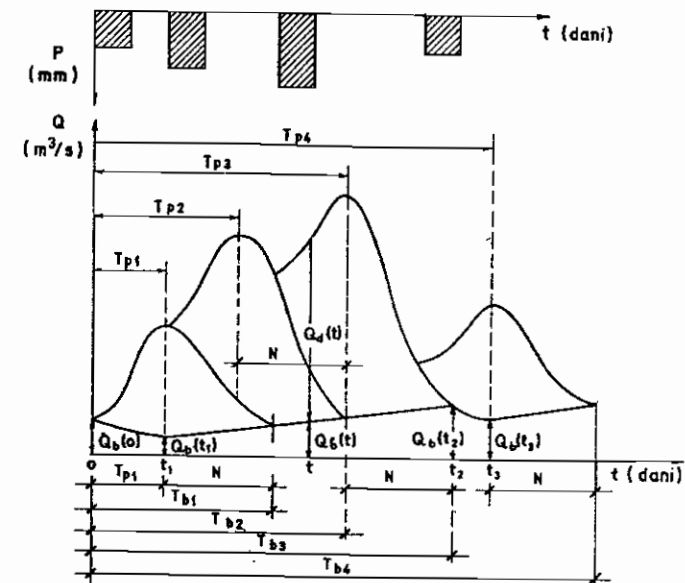
Trećim se pristupom granica između baznoga i izravnoga dotoka utvrđuje pravocrtno. Pritom, ovisno o geološkim prilikama koje određuju bazni dotok, mogu nastupiti slučajevi kakvi su prikazani na slici 4.75. Kada se radi prema ovome postupku, D. Srebrenović (1986.) preporučuje vrijeme recesije provjeriti Linsleyevom formulom (4.154). Ovu preporuku treba usvajati uz određeni oprez, jer se prema hidrogramu karakterističnoga vodnoga vala, prikazanom na slici 4.75, u određivanju baznoga dotoka

veće pogreške mogu napraviti ukoliko se usvoji prekratko vrijeme recesije, nego ako se precijeni.

Kada je otjecanje u efluentnome vodotoku posljedica dviju ili više kiša, u vodotoku se pojavljuje složen hidrogram otjecanja. Na slici 4.77 prikazan je hidrogram dvostrukoga vodnoga vala koji je posljedica dvaju pljuskova. Odvajanje baznoga od izravnoga dotoka provodi se na temelju vremena opadanja vodnoga vala N , koje treba biti poznato, za sliv do profila u kojemu se hidrogram razmatra. Na taj se način određuju točke B i B' na hidrogramu.



Slika 4.77 Hidrogram dvostrukoga vodnoga vala (S. Jovanović, 1975.)



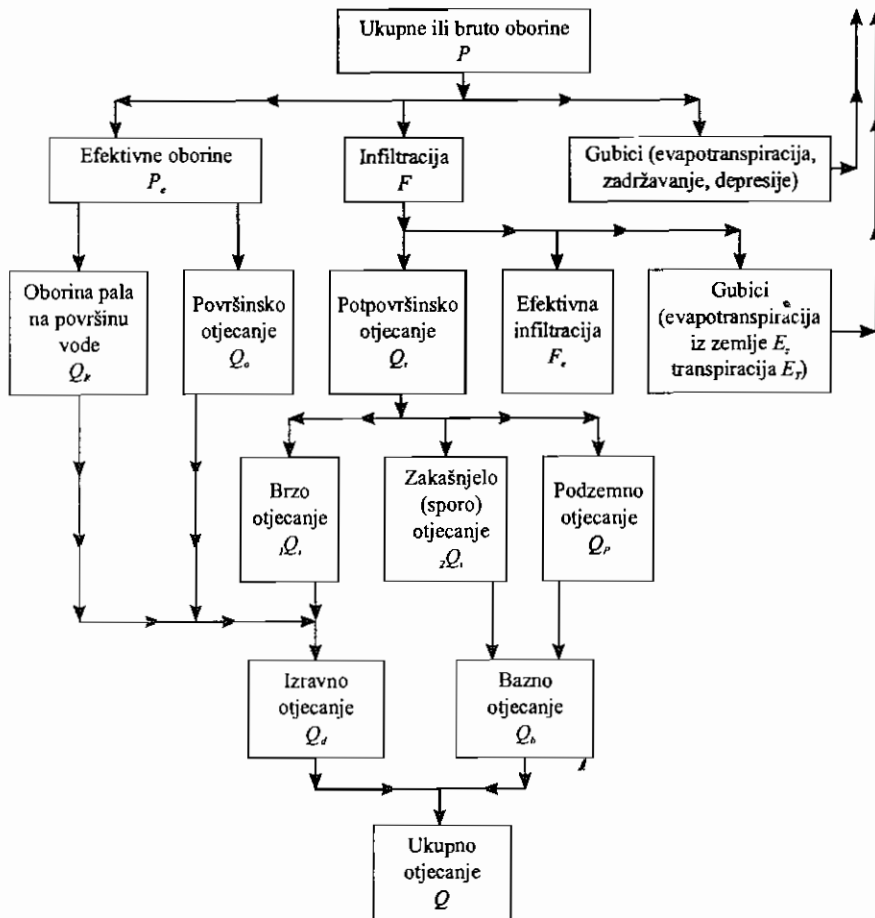
Slika 4.78 Hidrogram višestrukoga vodnoga vala (S. Jovanović, 1975.)

Na slici 4.78 prikazan je složeni hidrogram otjecanja izazvan kišama koje padaju s prekidima. Posljedica svake kiše je odgovarajući hidrogram, pa zbog toga ukupni hidrogram ima više vrhova (pikova). Na slici 4.78 shematski je prikazano povećavanje baznoga otjecanja u vremenu i mogući doprinos ove komponente obliku hidrograma otjecanja.

Prema prikazima na slikama 4.77 i 4.78, vrijeme opadanja vodnoga vala N je:

$$N = T_{b1} - T_{p1} = T_{b2} - T_{p2} = \dots = T_{bn} - T_{pn} \quad (4.156)$$

Nakon svega izloženog, na slici 4.79 je prikazano rastavljanje ukupnoga otjecanja vode na pojedine komponente.



Slika 4.79 Shema rastavljanja ukupnoga otjecanja na komponente (S. Jovanović, 1975.).

4.14 Hidrološke osnove reguliranja protoka

Količine vode u vodotoku vrlo su promjenljive tijekom godine, pa je njihovo korištenje u različite svrhe (korištenje vodnih snaga, melioracije, vodoopskrba i sl.) često vrlo otežano, a ujedno i nepogodno.

Tijekom jednoga dana količine vode se najčešće mijenjaju vrlo malo, osim u danima kada nastupe velike vode. No potrebe za vodom mogu biti vrlo promjenljive tijekom dana. Ovo se naročito osjeća kada prirodni protok u vodotoku padne ispod onoga koji je potrebno osigurati da bi se vodu iz vodotoka moglo koristiti.

Obzirom na svrhu korištenja vode, **reguliranje protoka** ili **izravnanje voda** može biti **dnevno, tjedno, mjesečno, godišnje, i višegodišnje**.

Dnevno reguliranje protoka ili **dnevno izravnavanje voda** naročito dolazi u obzir kada se radi o hidroelektranama, jer se voda za proizvodnju električne energije troši nejednoliko zbog velikih promjena u potrebama za električnom energijom tijekom dana. Slične varijacije u potrebama za vodnim količinama u danu moguće su i kada se radi o korištenju vode za navodnjavanje, a za potrebe plovnosti rijekom ovaj način reguliranja protoka ne dolazi u obzir.

Tjedno reguliranje protoka ili **tjedno izravnanje voda** primjenjuje se, kao i dnevno, kada su hidrološki uvjeti takvi da pri približno jednakim dotocima potrošnja vode znatno varira. Sedmi dan u tjednu (nedjelja) je najpogodniji za akumuliranje vode jer se tada voda najmanje koristi. Prije toga, tijekom šest radnih dana, razina vode u akumulacijskome bazenu spusti se na minimum.

Godišnje reguliranje ili **izravnanje protoka** ima svrhu omogućavanja potrebnih dotoka tijekom cijele godine. Pritom se u vlažnome dijelu godine u akumulacijskome jezeru stvaraju rezerve za sušno razdoblje u godini. Za godišnje reguliranje protoka potreban je znatno veći prostor u akumulacijskome jezeru nego za dnevno, tjedno ili mjesečno reguliranje.

Svrha je **višegodišnjega reguliranja** ili **izravnjanja protoka** da se u riječnome koritu postigne višegodišnji prosječni protok vode. To znači da u vodnim godinama treba prikupljati rezervne količine vode za sušne godine i to kao višak vode koju je nužno ispuštati za određene potrebe (hidroenergija, plovnost). Za višegodišnjega izravnanja voda cijeli ciklus promjena razina vode u akumulacijskome jezeru traje nekoliko godina. Maksimalna razina vode u jezeru postići će se nakon niza uzastopnih vlažnih godina, a minimalna razina poslije niza sušnih godina.

Svaki oblik regulacije protoka može kao funkcija vremena i dotoka biti djelomično ili potpuno izravnanje, ovisno o raspoloživome akumulacijskom prostoru. Primjerice, ako se u akumulacijskome jezeru može zadržati sav prirodni dotok i osigurati stalan protok kroz cijelu godinu, onda se postiže potpuno ili 100-postotno godišnje izravnanje dotoka. (Važno je napomenuti da stručni izrazi "reguliranje protoka" i "reguliranje dotoka" u praksi imaju isto značenje.)

Ukoliko to nije moguće postići, dio će vode oteći kroz evakuacijske organe (preljev i temeljni ispušt), pa će se u sušnome dijelu godine moći iskoristiti manja količina vode od one koja bi odgovarala srednjemu godišnjem protoku. Takav se slučaj naziva **djelomičnim ili sezonskim izravnanjem dotoka**.

Ako akumulacijsko jezero ima volumen 20 - 25 posto one količine koja se preko dana koristi, onda je obično moguće postići potpuno dnevno, a koji put i tjedno izravnaje voda.

Za provođenje godišnjega izravnaja, akumulacijsko jezero mora imati volumen 20 - 30 posto volumena ukupnoga godišnjeg dotoka, kako bi se omogućilo ostvarivanje potpune ili skoro potpune godišnje regulacije dotoka. Ako akumulacijsko jezero ima volumen od oko 50 posto volumena dotoka prosječne vodne godine, takvo jezero u nekim godinama može zadovoljiti potpuno godišnje izravnaje, no za višegodišnje izravnaje potreban je znatno veći akumulacijski prostor.

Ovako određene veličine akumulacijskih prostora treba smatrati isključivo orijentacijskima. Važno je napomenuti da akumulacijsko jezero za višegodišnje izravnaje služi i za godišnje izravnaje dotoka (A. Štepinac, 1976.).

S općega vodoprivrednog gledišta, akumulacijsko jezero treba zadovoljavati potrebe višenamjenskoga korištenja (vodoopskrba, energetika, navodnjavanje, plovidba, zaštita od poplava).

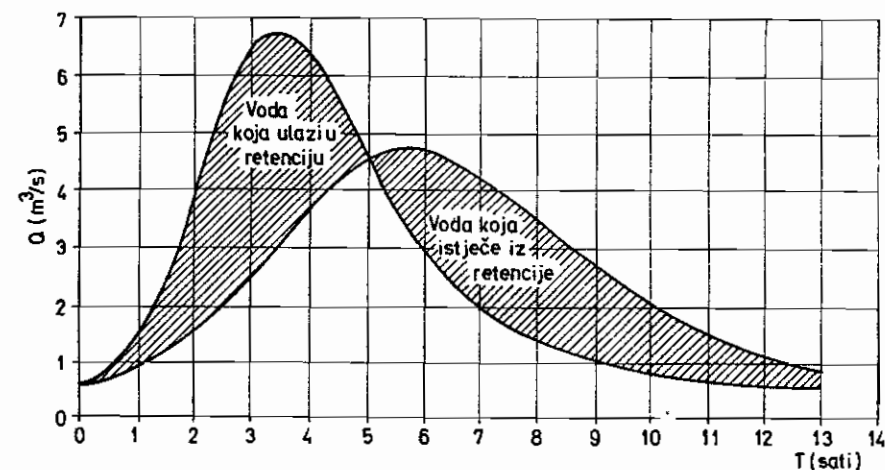
Neosporan je velik značaj akumulacijskih jezera u vodnome gospodarstvu, no neosporna je i činjenica da ostvarivanje akumulacijskih jezera donosi i otvara velik broj problema: tehničkih, ekonomskih, ekoloških i političkih.

Snalaženje u ovim problemima i njihovo pravilno tretiranje u težnji k optimalnom rješenju zahtijeva visoko stručni pristup i odgovarajuće obrade. Na to je potrebno posebno ukazati, jer se upravo zbog složenosti ovih problema i zbog nastojanja da se olakšaju obrade, često ta materija suviše pojednostavljuje, pa su rješenja ili jednostrana i daleko od optimalnih, ili su s nekih od spomenutih stanovišta nepovoljna ili se, pak od rješenja odustaje, ne uviđajući pravi značaj i vrijednost ostvarenja.

Optimalno korištenje vodnoga bogatstva, a u tom okviru i korištenje akumulacijskih jezera, u prvome redu zahtijeva zadovoljavanje i usklađivanje interesa različitih vodoprivrednih grana (navodnjavanje, vodoopskrba, plovidba, hidroenergetika, rekreacija, ribolov, turizam i sl.). Uz korištenje treba riješiti i obrane od šteta, obuhvatiti kontrolu poplava, odvodnju, regulacije rijeka, uređenje bujica, utjecaj na okoliš itd. (M. Žugaj, 1975.).

Uloga akumulacijskih jezera naročito je važna u transformaciji velikih poplavnih valova. Ako se postavi taj uvjet, onda jezero treba biti tako dimenzionirano da može prihvatiti cijeli mjerodavni veliki vodni val do početka njegova opadanja. Osim radi zaštite područja nizvodno od brane, to je važno i radi ekonomičnosti izgradnje evakuacijskih organa brane.

Ako namjena akumulacijskoga jezera i njegova veličina ne omogućuju dovoljnu transformaciju velikoga vodnog vala, u obzir dolazi izgradnja retencija u uzvodnome dijelu sliva s isključivom namjenom ublažavanja velikih vodnih valova. **Spljoštenje vodnoga vala ili transformacija hidrograma je smanjenje prirodnih protoka vodnoga vala uslijed djelovanja akumulacijskih ili retencijskih prostora** (slika 4.80). Približno određivanje spljoštenja vodnoga vala opisano je na kraju poglavlja 4.16.5.

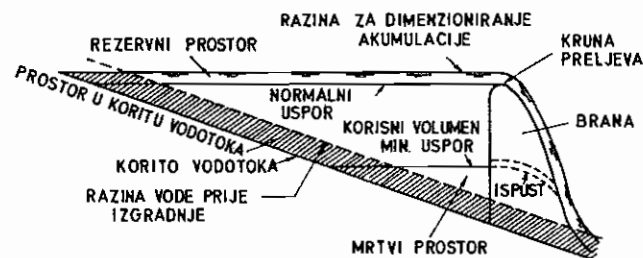


Slika 4.80 Spljoštenje velikoga vodnog vala uslijed djelovanja retencije

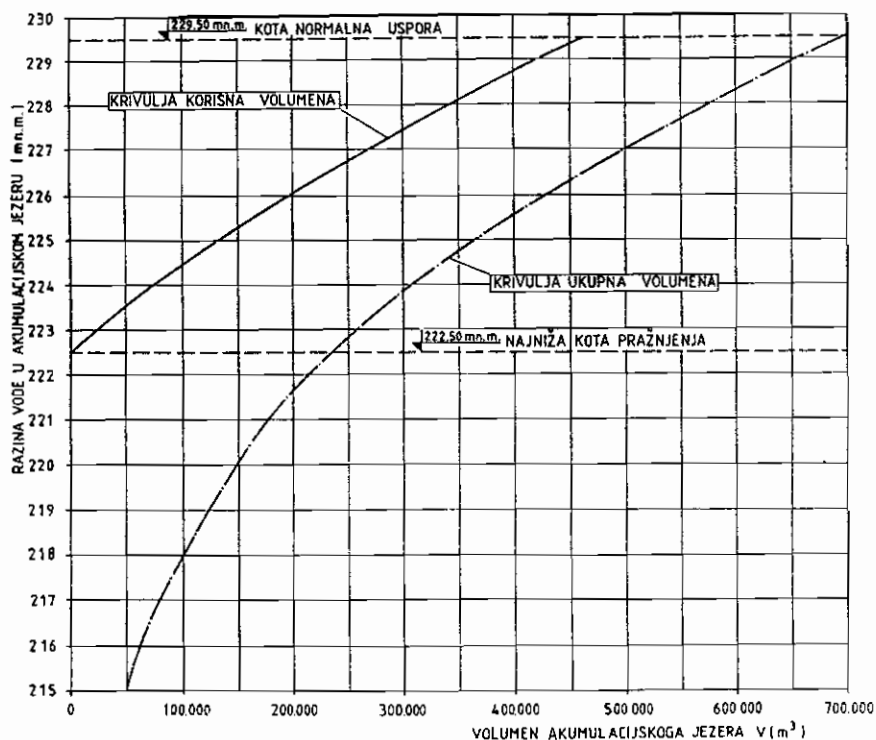
S obzirom na način na koji su ostvarena, akumulacijska se jezera dijele na dvije vrste:

- Prirodna jezera**, koja mogu služiti za reguliranje voda ako se na izlazu iz jezera podignu usporne građevine, kojima se omogućuje kontrolirano dizanje i spuštanje razina vode u jezeru.
- Umjetna akumulacijska jezera**, koja se ostvaruju izgradnjom dolinskih pregrada. Volumen, odnosno prostor u akumulacijskim bazenima dijeli se na **korisni i mrtvi prostor**. Korisni dio volumena je onaj iz kojega uzima se voda koja se koristi za različite namjene, a mrtvi prostor služi za taloženje nanosa koji s vodom dođe u akumulacijsko jezero. Na slici 4.81 prikazan je shematizirani uzdužni presjek akumulacijskoga jezera s mrtvim i korisnim prostorom te nadvišenim prostorom radi prelijevanja velikih vodnih valova.

Pri određivanju akumulacijskoga volumena potrebno je raspolagati kvalitetnim topografskim snimkama terena. Na temelju takvih snimaka određuje se krivulja površina i krivulja volumena akumulacijskoga bazena (slika 4.82).



Slika 4.81 Područja u akumulacijskome jezeru (R. K. Linsley i J. B. Franzini, 1979.)



Slika 4.82 Krivulja volumena akumulacijskoga jezera Valiči (HE Rijeka)

Da bi se mogao napraviti izračun izravnjanja voda, prvenstveno je potrebno poznavati hidrogram dotoka u profilu brane ili u njezinoj neposrednoj blizini. Iz hidrograma dnevnih dotoka vode može se izračunati ukupni dotok u akumulacijski prostor V od početnoga trenutka do bilo kojega odabranog trenutka definirana vremenom t :

$$V = \int_0^t Q dt \quad \text{odnosno: (4.157)}$$

$$V = \sum_0^t Q \Delta t \quad (4.157a)$$

Prirast vremena Δt (s) usvaja se u sekundama, a odnosi se na jedan dan, tjedan, dekadu ili mjesec. Djelomični (parcijalni) prirasti mogu se obračunati tabelarno, a konačni rezultat izračuna je sumarna količina dotoka na kraju razdoblja obrade. Osnovni elementi izračuna sumarnih dotoka za $\Delta t = 1$ mjesec dani su u tablici 4.12.

U tablici 4.12 dani su u stupcu 3 srednji mjesečni protoci SQ_{mj} (m^3/s), u stupcu 4 ukupni mjesečni dotoci ΣQ_{mj} (m^3) ili (hm^3), odnosno ($10^6 m^3$), gdje je T broj sekunda u dotičnome mjesecu i u stupcu 5 sumarni mjesečni dotoci $\Sigma \Sigma Q_{mj}$ (m^3) ili (hm^3). Sumarni dotoci u svakome mjesecu postupno rastu (za vrijednost dotoka u tom mjesecu) i u zadnjemu mjesecu su jednaki zbroju svih mjesečnih dotoka.

Prikažu li se vrijednosti iz stupca 5 tablice 4.12 grafički, dobit će se **sumarna krivulja dotoka** u razmatranome razdoblju (slika 4.83). Ordinata krajnje točke sumarne krivulje predstavlja ukupnu količinu vode V u razmatranome razdoblju (npr. u jednoj godini). Iz sumarne količine dobije se srednji protok SQ_o :

$$SQ_o = \frac{V}{T} \quad (4.158)$$

gdje je T (s) trajanje razdoblja.

Tablica 4.12 Elementi izračunavanja sumarnih dotoka

Mjesec	Broj dana	SQ_{mj} (m^3/s)	$\Sigma Q_{mj} =$ $= SQ_{mj} T$ (m^3) ili (hm^3)	$\Sigma \Sigma Q_{mj}$ (m^3) ili (hm^3)
1	2	3	4	5
I	31	12,4	33,2 (hm^3)	33,2 (hm^3)
II	28	10,5	24,5	58,6
III	31	14,2	38,0	96,6
IV	30	9,80	25,4	122,0

T je broj sekunda u mjesecu.

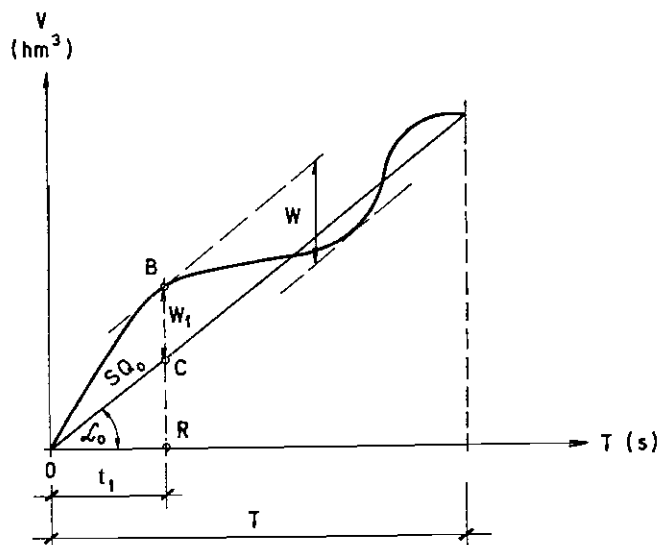
Ako se krajnja točka sumarne krivulje spoji s početnom točkom (ishodištem), taj pravac zatvara s apscisnom osi kut α_o , pa je srednji protok:

$$SQ_o = \frac{V}{T} = m \operatorname{tg} \alpha_o \quad (4.159)$$

gdje je m koeficijent ovisan o razmjeru V i T . Želi li se dobiti protok u bilo kojoj točki sumarne krivulje, onda je:

$$Q = \frac{dV}{dT} = m \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (4.160)$$

gdje je α kut što ga tangenta povučena u promatranoj točki sumarne krivulje zatvara s osi apscise.



Slika 4.83 Sumarni dotoci (A. A. Morozov, 1954.)

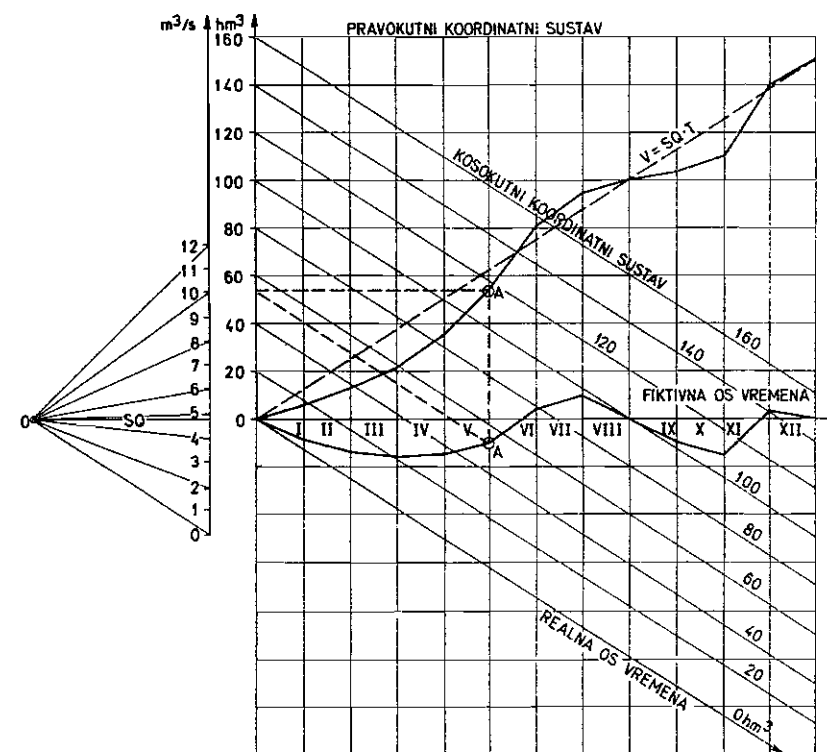
Polazno mjerilo protoka (lijevo na slici 4.83) određuje se tako da se iz središta pramena O povuče paralela s pravcem koji pod kutem α_0 defimira srednji protok, a okomica se od $0 \text{ m}^3/\text{s}$ podijeli na odgovarajuće vrijednosti protoka.

Ukoliko je dotoke potrebno regulirati tako, da se kroz cijelu godinu uzima iz akumulacijskoga jezera konstantan protok koji je jednak srednjemu godišnjem protoku SQ_0 , potrebno je raspolagati s akumulacijskim prostorom volumena W . Prostor W je defimiran razmakom između tangenti povučenih u točkama maksimalna punjenja i maksimalna pražnjenja (potrošnje) kako je prikazano na slici 4.83.

Ukupni dotok u točki B (do koje su najveći dotoci u akumulacijsko jezero) jednak je ordinati od R do B . U vremenu t_1 iz akumulacijskoga jezera oteče količina vode definirana ordinatom od R do C . Prostor u akumulacijskome jezeru potreban za prikupljanje dotoka vode u vremenu t_1 je:

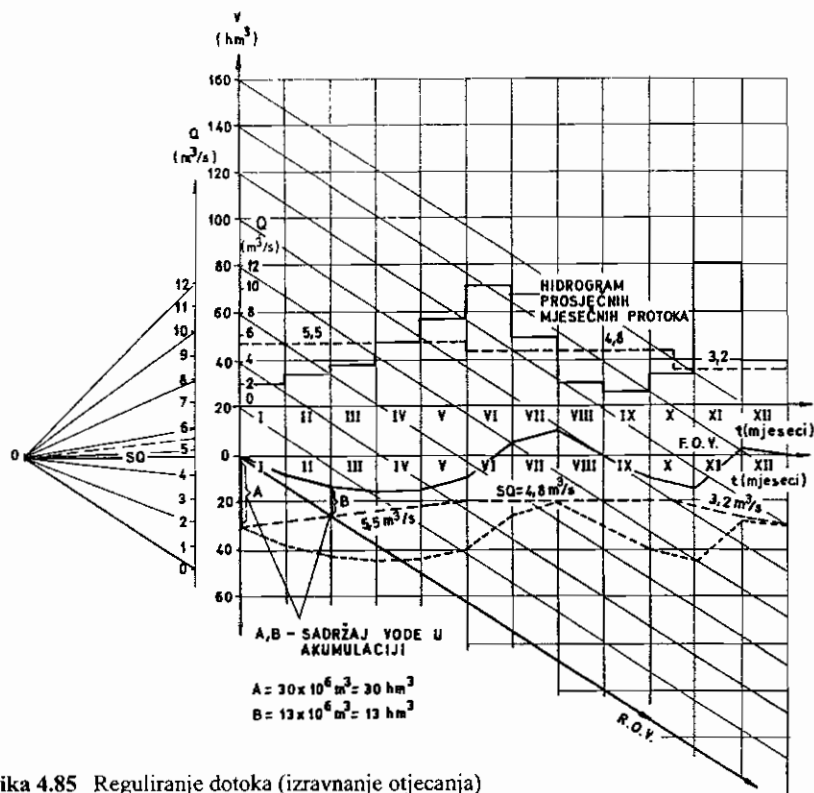
$$W_1 = \Sigma Q t_1 - SQ_0 = \overline{BR} - \overline{CR} \quad (4.161)$$

Sumarna krivulja u pravokutnome koordinatnom sustavu predstavlja jednostavan grafički prikaz, ali ima malu točnost nanošenja podataka, pogotovo ako se radi o dugogodišnjemu nizu sumarnih dotoka. Radi bolje preglednosti i točnosti, krivulja sumarnih dotoka redovito se prikazuje u **kosokutnome koordinatnom sustavu**. Kosokutni koordinatni sustav se dobije tako da se os apscise zarotira za kut α_0 , kojega pravac srednjega protoka s tom osi zatvara u pravokutnome koordinatnom sustavu, kao što je prikazano na slici 4.84.



Slika 4.84 Sumarna krivulja dotoka u pravokutnome i kosokutnome koordinatnom sustavu

Na slici 4.85 prikazano je uobičajeno reguliranje odnosno izravnavanje dotoka. Sumarni mjesečni dotoci (znatno točnije bi bilo raditi s dekadnim dotocima) iz pravokutnoga su prebačeni u kosokutni koordinatni sustav. Reguliranje dotoka provodi se uz pretpostavku da je na početku i na kraju razdoblja akumulacijsko jezero bilo puno: $A = 30 \text{ hm}^3$. Uz prikazane prirodne dotoke moglo se iz akumulacije uzimati $5,50; 4,80$ i $3,20 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 4.85).



Slika 4.85 Reguliranje dotoka (izravnjanje otjecanja)

Prema tome, reguliranje protoka na nekoj dionici vodotoka može se provesti ako postoji mogućnost prethodnoga zadržavanja određenih količina vode u koje su uključeni i dotoci velikih vodnih valova. Raspoloživi volumen akumulacijskoga bazena je poznat, a točnost provedenoga postupka izravnjanja voda ovisi o pouzdanosti vrijednosti razmatranih protoka i duljini hidrološkoga niza koji se obrađuje.

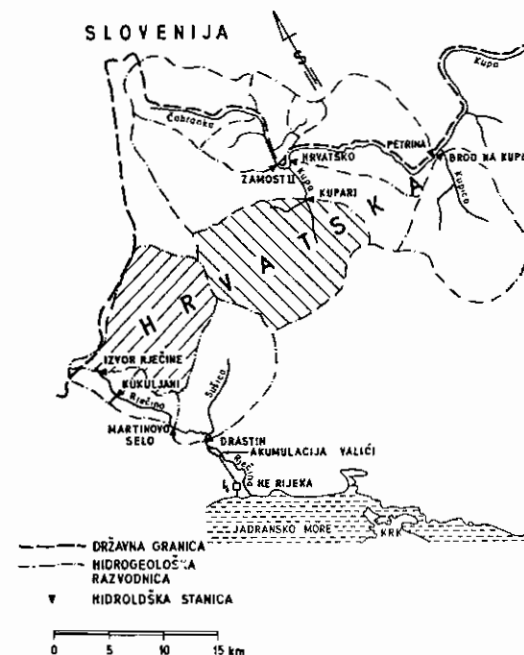
U primjerima na slikama 4.84 i 4.85 razmatrani su prosječni mjesečni protoci. Točnija se analiza može provesti korištenjem srednjih dekadnih protoka u određenome vremenskom razdoblju, npr. 30 godina. Na taj se način razmatra količine i raspored dotoka vode u godinama različitim po vodnosti (sušnim, približno srednjim i vlažnim), koje dolaze kronološkim redom.

4.15 Protoci u modulnim koeficijentima

Ukoliko se članovi nekoga niza protoka podijele sa svojim prosjekom, onda se te vrijednosti nazivaju modulnim koeficijentima protoka ili protocima u modulnim

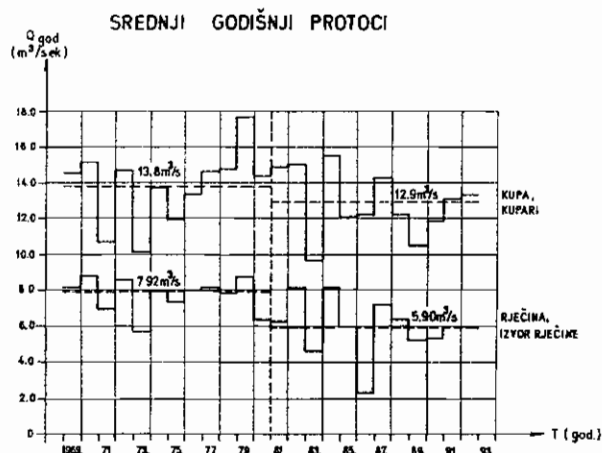
koeficijentima. Protoci u modulnim koeficijentima pogodni su za usporedbu pojedinih hidroloških karakteristika u dvjema hidrološkim stanicama, a na toj je osnovi moguće uspoređivati i vrijednosti oborina i protoka. Najčešće se za određeno razdoblje obrade modulnim koeficijentima prikazuju srednji mjesečni i godišnji protoci, prosječni mjesečni i godišnji protoci, te maksimalni i minimalni godišnji protoci.

Zaključivanje o promjeni vodnoga režima izazvanoj ljudskim radom na osnovi modulnih koeficijenata srednjih godišnjih protoka prikazano je na primjeru slivova Kupe i Rječine (slika 4.86). Njihovi su vodni režimi u prirodnome stanju slični, pa se promjene odražavaju u povećanim razlikama između veličina modulnih koeficijenata.



Slika 4.86 Situacija uzvodnih dijelova slivova Kupe i Rječine

Na slici 4.87 prikazani su srednji godišnji protoci Kupe u profilu Kupari i Rječine u profilu Izvor Rječine. Ispod njih su za iste profile nacrtani srednji godišnji protoci u modulnim koeficijentima. Veličina utjecajnoga sliva Kupe do profila Kupari je oko 205 km², a utjecajnoga sliva Rječine do profila Izvor Rječine oko 110 km². Iz hidrograma na slici 4.87 (gornji dijagram) vidi se da u razmatranim profilima postoji smanjenje dotoka koje počinje 1980. godine, a poznato je da tada počinje i dugo sušno razdoblje. Iz prikaza modulnih koeficijenata na slici 4.87 može se zaključiti da su srednja godišnja otjecanja vode Kupe u profilu Kupari i Rječine u profilu Izvor Rječine do 1979. godine vrlo slična. Poremećaj nastaje u 1980. godini, kada se uzvodno

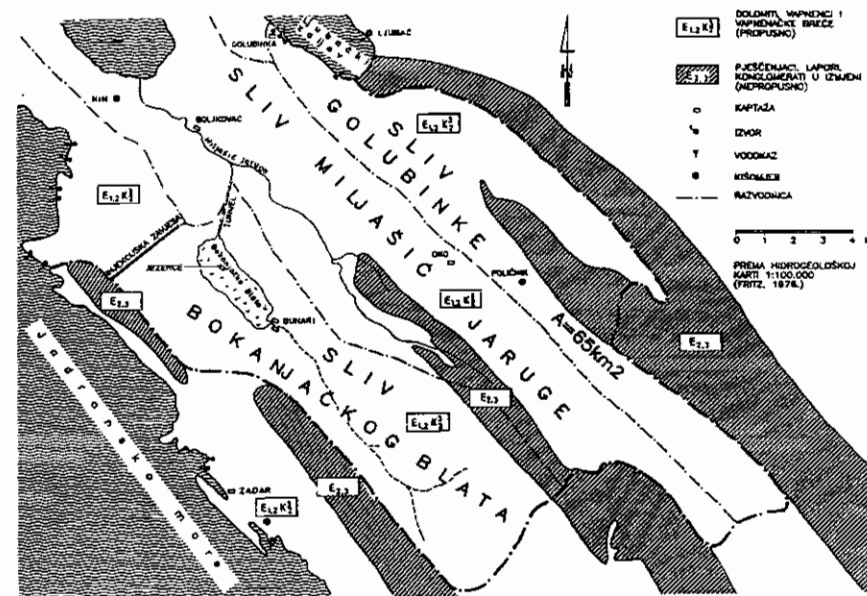


Slika 4.87 Srednji godišnji protoci i njihovi modulni koeficijenti za Kupu u profilu Kupari i Rječine u profilu Izvor Rječine u razdoblju od 1969. do 1992. godine (R. Žugaj, 1996.).

od mjernoga profila Izvor Rječine na Rječini voda počinje uzimati za potrebe vodoopskrbe. Razlike u modulnim koeficijentima nakon 1979. godine jasno ukazuju na promjenu u vodnome režimu Rječine.

Razlika u srednjemu protoku ranijega razdoblja, bogatijega vodom u odnosu na kasnije, sušnije razdoblje Kupe u profilu Kupari je 7 posto, a Rječine u profilu Izvor Rječine čak 34 posto. Ako se pretpostavi da bi u prirodnim uvjetima ta razlika trebala biti i 7 posto u slučaju Rječine, onda je u razdoblju od 1981. do 1992. prosječno 27 posto ili $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ vode iz Rječine uzimano za vodoopskrbu. Rezultat ovoga jednostavnog proračuna treba, doduše, shvatiti samo orijentacijski, ali njegov je red veličine sasvim sigurno realan.

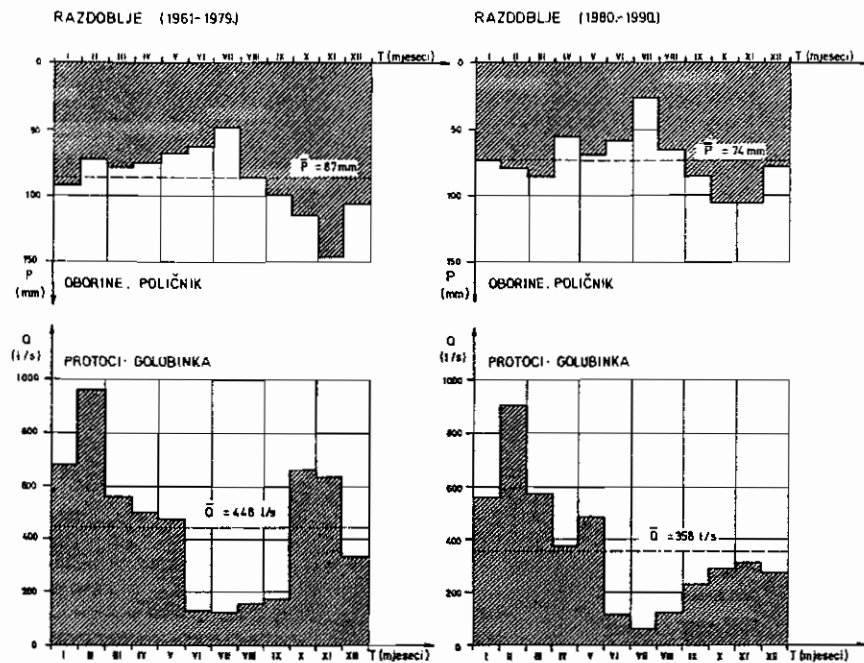
Modulni su koeficijenti vrlo pogodni za analiziranje promjene vodnoga režima na istome hidrometrijskom profilu u dvama različitim razdobljima. Takav je primjer krškoga sliva Golubinka, koji je u Domovinskom ratu bio jedan od najvažnijih izvora pitke vode za grad Zadar. Situacija sliva s kojega voda podzemnim tokovima dolazi na izvor Golubinka prikazana je na slici 4.88. Na slivu se nalazi kišomjerna stanica Poličnik.



Slika 4.88 Utjecajni sliv izvora Golubinka (F. Fritz, 1976.)

Za Golubinku su obrađeni srednji mjesečni i srednji godišnji protoci u razdoblju od 1961. do 1990. Ispitivanjem homogenosti niza srednjih godišnjih protoka Golubinke ustanovljeno je da nizovi protoka iz razdoblja 1961. - 1979. i iz sušnoga razdoblja 1980. - 1990. ne tvore zajednički homogeni niz, pa su stoga razmatrani odvojeno.

Prosječni mjesečni hijetogrami mjerodavne kišomjerne stanice Poličnik (koja se nalazi na slivu Golubinke) pokazuju razlike u oborinama od prosječno 15 posto, a prosječni mjesečni hidrografi Golubinke razlike od prosječno 20 posto između podataka iz sušnoga razdoblja 1980. - 1990. i razdoblja 1961. - 1979., kako je prikazano na slici 4.89. U prijašnjemu, vodom bogatijemu razdoblju 1961. - 1979., prosječni su mjesečni protoci četiri mjeseca uzastopce, od lipnja do rujna, te nakon vodom bogatijeg listopada i studenoga još i u prosincu, bili niži od prosjeka razdoblja. U novijemu sušnom razdoblju 1980. - 1990. prosječni su mjesečni protoci čak sedam mjeseci uzastopce (lipanj - prosinac) bili niži od prosječnoga protoka toga razdoblja.



Slika 4.89 Prosječne mjesečne visine oborina P_p na kišomjernoj stanici Poličnik i prosječni mjesečni protoci Q_G na izvoru Golubinka u razdobljima 1961. - 1979. i 1980. - 1990.

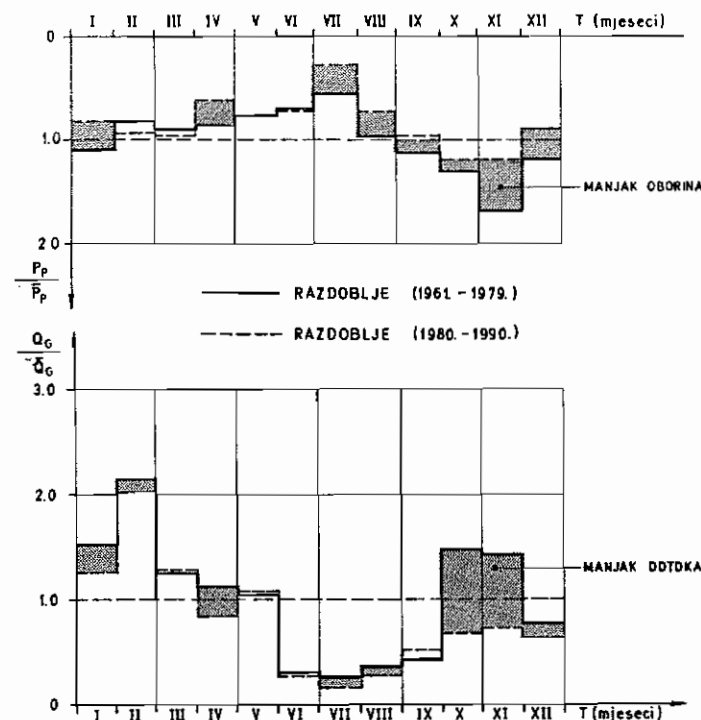
Nedostatak oborina i njegov utjecaj na otjecanje vode iz Golubinke prikazan je odnosom između modulnih koeficijenata prosječnih mjesečnih oborina kišomjerne stanice Poličnik i prosječnih mjesečnih protoka Golubinke u razdobljima 1961. - 1979. i 1980. - 1990., danima na slici 4.90.

Na slici 4.90 vidljiv je neprekidan nedostatak oborina u mjesecima od srpnja do prosinca. Smanjene količine ljetnih i jesenskih oborina uzrokovala su veliko smanjivanje dotoka u listopadu i studenome, koji su u prosjeku pali gotovo na polovicu svojih prijašnjih vrijednosti.

Ekstremni protoci u modulnim koeficijentima zanimljivi su za izvođenje zakonitosti veza s pojedinim karakterističnim parametrima. Često se razmatraju veze oblika:

$$\frac{Q_{Mp}}{Q_M} = f(c_{vM}) \quad (4.162)$$

$$\frac{Q_{mp}}{Q_m} = f(c_{vm}) \quad (4.163)$$



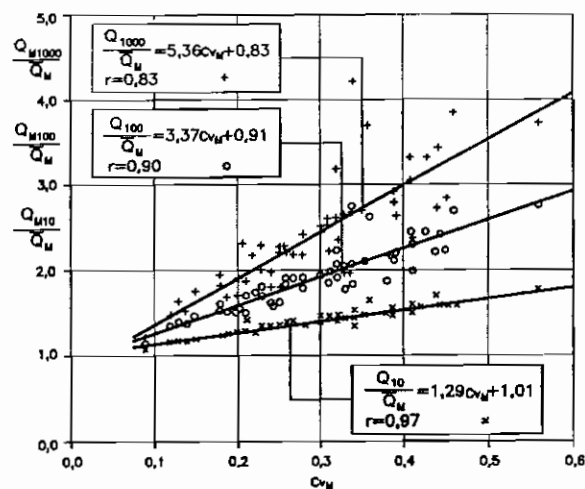
Slika 4.90 Prosječne mjesečne oborine na kišomjernoj stanici Poličnik i prosječni mjesečni protoci Golubinke u razdobljima 1961. - 1979. i 1980. - 1990., u modulnim koeficijentima (R. Žugaj, 1995.b)

gdje su Q_{Mp} i Q_{mp} maksimalni i minimalni godišnji protok p -toga povratnog razdoblja, Q_M i Q_m prosječni maksimalni i minimalni godišnji protok, a c_{vM} i c_{vm} koeficijenti varijacije maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka.

Na primjeru krških vodotoka u Hrvatskoj na slici 4.91 prikazane su zakonitosti veze između maksimalnih godišnjih protoka u modulnim koeficijentima različitih povratnih razdoblja Q_{Mp}/Q_M i koeficijenata varijacije maksimalnih godišnjih protoka c_{vM} . Zakonitosti sa slike 4.91 pokazuju da porastom koeficijenata varijacije rastu i vrijednosti modulnih koeficijenata maksimalnih godišnjih protoka. Osim toga, zanimljivo je da su linearne veze $Q_{Mp}/Q_M = f(c_{vM})$ nešto bolje od veza oblika $y = ax^b$ (koje su u sklopu regionalnih hidroloških analiza u kršu Hrvatske također ispitane).

Na kraju je važno navesti da je M. Žugaj (1981.) na osnovi sumarnih dotoka u modulnim koeficijentima rijeka Like i Gacke u razdoblju od 1948/49. do 1967/68. definirao veličine podzemne retencije vode u krškome zaleđu izvorskoga područja rijeke Gacke. Na temelju analize sumarnih krivulja modulnih koeficijenata protoka

rijeka Like i Gacke i promjena volumena retencije Gacke definiran je aktivni volumen vode u podzemnoj retenciji Gacke, koji iznosi $410 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Unutar toga volumena obavljaju se svakogodišnja sezonska punjenja i pražnjenja podzemne retencije, a prosječni volumen punjenja i pražnjenja iznosi $103,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



Slika 4.91 10-godišnji, 100-godišnji i 1000-godišnji maksimalni protoci u modulnim koeficijentima Q_{M1000}/Q_M i koeficijenti varijacije maksimalnih godišnjih protoka C_{vM} za vodotoke krša u Hrvatskoj (R. Žugaj, 1994.)

4.16 Velike vode

4.16.1 Općenito o velikim vodama

Prema UNESCO-vu i WMO-vu rječniku hidroloških pojmova (1986.) **velika voda** se može definirati na tri načina:

1. kao *povišenje - obično naglo - vode u vodotoku do najviše vrijednosti, od koje razina vode počinje polagano opadati.*
2. kao *velik tok vode mjeran visinom vodostaja ili veličinom protoka.*
3. kao *rastuća plima.*

Pod pojmom velika voda podrazumijevaju se pojave označene maksimalnim ordinatama nivograma ili hidrograma velikih vodnih valova, koje se očituju kao naglo izdizanje vodostaja ili protoka tijekom vremena. Oblici i volumeni velikih vodnih valova također su vrlo važni hidrološki pokazatelji, a izravno su povezani s maksimalnim vodostajima i protocima.

Velika voda je ekstremna pojava definirana vodostajem, sekundnim protjecanjem ili volumenom u određenome vremenskom razdoblju opažanja ili je utvrđena kao vjerojatnost pojava u određenima vremenskim razdobljima.

Prijelaz između obična visokog vodostaja i vodostaja velike vode nije jasno određen. Stoga to u izvjesnoj mjeri stvara neodređenost u definiciji velike vode. No, kada je potrebno, granica iznad koje se bilježe velike vode može se odrediti na temelju prosječne visine obala i ekonomskoga utjecaja na okolinu. Velike se vode prema veličini mogu podijeliti na obične, koje se najčešće pojavljuju, te srednje i izvanredne - katastrofalne. Također se mogu podijeliti i prema razdobljima u kojima djeluju, primjerice, na velike vode u vegetacijskome razdoblju i velike vode u razdoblju gradnja.

Vrlo je pogodan pokazatelj velikih voda, pogotovo ako se uspoređuju ekstremna otjecanja s raznih slivova, maksimalni specifični dotok s jednoga km^2 sliva q_M . On je određen omjerom između maksimalnoga protoka Q_M i površine sliva A .

$$q_M = \frac{Q_M}{A} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.164)$$

Maksimalni specifični dotok q_M opada s porastom površine sliva, i to ne linearno nego po nekom eksponencijalnom zakonu. Ta zakonitost se redovito prikazuje grafički, tako da se na dijagram $A - q_M$ nanesu vrijednosti q_M za odgovarajuću A i na toj osnovi definira krivulja maksimalnih specifičnih dotoka.

Uzroci nastajanja velikih voda u riječnome toku su: jake kiše, topljenje snijega ili obje te pojave zajedno. Uz ove, pojave velike vode mogu biti uzrokovane i iznimnim događajima na slivu koji mogu biti izazvani različitim činiocima: odronom zemlje u umjetna ili prirodna jezera, rušenjem brana ili nasipa, nepravilnim rukovanjem evakuacijskim uređajima, otvaranjem barijera nastalim prikupljanjem leda ili naplavljenoga drveta itd. Veliki odroni zemlje u punu ili djelomično punu akumulaciju mogu uvjetovati prelijevanje preko brane ili rušenje brane i time izazvati katastrofalne poplave u nizvodnome području.

Raspored i veličina velikih voda ovise i o sezonama, odnosno sušnome i vodnome razdoblju unutar godine. Uvjeti i uzroci otjecanja se, ovisno o sezoni, mogu međusobno vrlo razlikovati. Ljeti se, primjerice, velike vode javljaju pretežno uslijed pljuskova jaka intenziteta. Za zimu je, pak, karakteristično zadržavanje oborina na slivu u obliku snježnoga pokrivača. Porastom temperature dolazi do topljenja snijega pa, ovisno o njegovoj količini na slivu i intenzitetu topljenja, dolazi do povećana otjecanja. U odgovarajućim prilikama mogu se otjecanje uslijed topljenja snijega i otjecanje uslijed kiše pojaviti zajedno i izazvati vrlo jake velike vode (npr. rijeka Lika).

Pojavama velikih voda pogoduju odgovarajući geološki sastav sliva (nepropusnost), topografski uvjeti (velik koeficijent koncentriranosti sliva i veliki padovi sliva) i stupanj obraštenosti (slaba obraštenost sliva).

Stanje zemljišta također ima velik utjecaj na veličinu velikih voda. Zaleđenim zemljištem, kao i tlom zasićenim vodom, velik dio pale kiše otječe u vodotok. Suho zemljište, naprotiv, upija palu oborinu i na taj način u velikoj mjeri smanjuje površinsko otjecanje. Ovdje treba izuzeti slučaj kada jak ljetni pljusak padne na suh teren i prve velike kapi stvore na zemlji "koru", preko koje nesmetano otječe ostala voda.

Na velike vode znatno utječe i promjena (transformiranje) vodnoga vala u uzvodnim retencijama - ako one postoje na slivu - i spljoštenje vodnoga vala duž riječnoga toka.

I akumulacijska jezera imaju značajan utjecaj na velike vode. Pravilnim radom akumulacijska jezera mogu smanjiti veličine velikih voda, pa čak i broj njihova pojavljivanja. Ako se njima nepažljivo rukuje ili ako njihovo djelovanje na određenoj slivu nije međusobno uskladeni, može doći do pojavljivanja nepovoljnih velikih voda sa štetnim posljedicama (D. Srebrenović, 1966.).

Bilo radi obrane od poplave, dimenzioniranja hidrotehničkih, odnosno drugih objekata, ili raspoređivanja vodnih količina, potrebno je znati koje se velike vode može očekivati u budućnosti. Zbog toga je nužno sa što većom sigurnošću odrediti veličine budućih velikih voda i to prvenstveno u prirodnu, neporemećenu stanju, a nakon toga ih različitim postupcima definirati za buduće - izgrađeno stanje.

Velike vode čiji su uzrok neki iznimni događaji, primjerice rušenje brane, obrađuju se prije svega hidraulički, na fizikalnim modelima, ili, uz određene aproksimacije, na matematičkim modelima.

Ovdje se razmatraju samo one velike vode koje se mogu svrstati u isključivo hidrološke pojave, a to su velike vode koje su uzrokovane oborinama palim na sliv, te uvjetima tečenja ili slijevanja sa sliva.

Buduće velike vode određuju se prema podacima iz prošlosti na temelju ovih četiriju osnovnih pristupa:

1. Usvajanjem jedne najveće zabilježene velike vode ili nekoliko njih.
2. Određivanjem velikih voda različita reda pojave metodama matematičke statistike na osnovi niza opaženih velikih voda.
3. Određivanjem velikih voda iz oborina na osnovi zajedničkih meteoroloških i hidroloških opažanja. Ovdje je uključeno određivanje velikih voda metodom jediničnoga hidrograma i metodom izokrona.
4. Upotrebom različitih iskustvenih (empirijskih) formula.

Prvi način određivanja velikih voda ne isključuje mogućnost da buduća velika voda bude veća od najveće zabilježene. Bez obzira na to koliko se dugo na nekome slivu vrše motrenja velikih voda, to nikako ne isključuje mogućnost pojavljivanja neke znatno veće velike vode u budućnosti. Zato ne treba najveću zabilježenu vodu usvajati kao mjerodavnu, već ona treba biti uključena u izračune prema drugačijim osnovnim pristupima, a ujedno može poslužiti i za usporedbu i provjeru rezultata dobivenih prema ostalima metodama.

Rezultat statističkih obrada su velike vode različitih povratnih razdoblja, a to su parametri koji se zahtijevaju od današnjih hidroloških obrada. Ovim se pristupom redovito određuju mjerodavne velike vode, ukoliko su na raspolaganju dovoljno pouzdani nizovi podataka dobivenim motrenjem i mjerenjem hidroloških veličina.

Treći i četvrti se načina redovito koriste mogućnošću uključivanja matematičke statistike. Pri uporabi metode izokrona i metode jediničnoga hidrograma oborine se obrađuju statistički, a razvojem iskustvenih izraza došlo se do formula za velike vode različitih povratnih razdoblja.

Pri određivanju mjerodavnih velikih voda može se naići na dva pojma: **najveća moguća voda** i (znatno češće korišten pojam) **velike vode različitih povratnih razdoblja**.

U ranijemu razdoblju hidrologije, dok se u toj znanstvenoj disciplini još nisu primjenjivale metode matematičke statistike, od hidroloških se obrada tražilo davanje najvećih mogućih velikih voda. Njih je bilo moguće odrediti kao najveću zabilježenu veliku vodu, što svakako ne isključuje pojavu još veće vode u budućnosti pa je osnovi neispravno, ili su najveće moguće velike vode bilo određivane na osnovi tadašnjih jednostavnih iskustvenih formula. Vrijednosti velikih voda istoga sliva, kada ih se određuje na temelju nekoliko različitih iskustvenih formula, redovito se međusobno vrlo razlikuju. Iskustvene formule vrijede najčešće samo za područje za koje su izvedene, a izbor najpogodnije formule je otežan i time što ih ima vrlo mnogo.

Upravo glavni nedostatak iskustvenih formula, a to je činjenica da one općenito ne mogu obuhvatiti sve mnogobrojne čimbenike važne za otjecanje, pokazuje da je ispravno pretpostaviti da su velike vode slučajne pojave. Uz uvjet da su pojavljivanja velikih voda međusobno neovisna, primjena metoda matematičke statistike za određivanje velikih voda različitih povratnih razdoblja u punoj je mjeri opravdana.

Prema tome, najispravnije je velike vode odrediti kao rijetke pojave različitih povratnih razdoblja. Stupanj sigurnosti kojim se definira velika voda mjerodavna za dimenzioniranje danih tehničkih zahvata obično se određuje ili propisuje na temelju ocjenjivanja. Pravilnije bi, međutim, bilo da se mjerodavna velika voda određuje ekonomskim računom, usporedbom šteta uzrokovanih velikim vodama s troškovima koje zahtijeva zaštita od tih voda. Kako su ti računi ponekad nepouzdana, primjenjuje se ojejena stupnja sigurnosti, koji je različit za različite objekte ili zahvate u slivu pa se prognoze odnose na prirodno (neporemećeno) stanje.

Činjenica koja nije zanemariva, a smeta usvojenoj definiciji, je da se vodni režimi polagano tijekom vremena ili naglo uslijed nekoga zahvata mijenjaju, što otežava ili remeti prognoze velikih voda.

Puno opravdanje ima pristup da se, kada je to moguće, velike vode odrede različitim metodama, a potom njihove vrijednosti međusobno usporede.

U iznimnim slučajevima, kada je potrebna apsolutno sigurna zaštita od velikih

voda, određuje se **najveća vjerojatna moguća poplava - PMF** (kratica od engl. probable (possible) maximum flood). *To je najveća poplava koju se može očekivati uzimajući u obzir sve glavne čimbenike mjesta, meteorologije, hidrologije i terena.* Najveća se moguća poplava redovito uzima kao mjerodavna podloga za dimenzioniranje objekata nuklearnih elektrana, ako su one smještene uz vodotok.

Uz PMF pojavljuje se i **najveća vjerojatna moguća oborina - PMP** (engl. probable (possible) maximum precipitation), *a predstavlja količinu oborina koja je statistička (fizikalna) gornja granica za dano trajanje (vremensko razdoblje) na nekome određenom slivu.* PMP često služi kao podloga za izračunavanje najveće vjerojatne moguće poplave (PMF).

PMF je moguće odrediti determinističkim ili stohastičkim pristupom.

Deterministički se pristup sastoji od definiranja jediničnoga hidrograma (opis metode jediničnoga hidrograma dan je u poglavlju 4.16.3) na koji se djeluje s PMP-om, a kao rezultat se dobije veliki vodni val s mjerodavnim maksimalnim protokom. Za takav izračun PMP obuhvaća cijelo slivno područje i određuje se po potrebi, nakon provođenja složenih meteoroloških analiza. U SAD-u postoje karte izohijeta PMP različitih trajanja za slivove različitih veličina (V. T. Chow i dr., 1964., R. K. Linsley i dr., 1988.). Za mali se sliv može uzeti jedan reprezentativni jedinični hidrogram, a na velikim se slivovima otjecanje PMP-a treba računati na osnovi jediničnih hidrograma s više podslivova, nakon čega se rezultirajuće hidrograme do mjerodavnoga protječajnog profila na odgovarajući način superponira. Veličine PMP-a određene determinističkim pristupom redovito su nekoliko puta veće od najvećega opaženog protoka.

Stohastičkim pristupom je PMF moguće odrediti pomoću **metode maksimalne vjerojatnosti**, koju je opisao D. Srebrenović (1986.). Izračun po metodi maksimalne vjerojatnosti moguće je pratiti i provjeravati u svim njegovim dijelovima i to je prednost stohastičkoga u odnosu na deterministički pristup. No veličine PMF-a izračunane na temelju stohastičkih metoda obično su znatno manje od onih izračunanih na temelju determinističkoga pristupa. Zbog toga je pri odlučivanju koji će se pristup primjeniti za izračunavanje PMF-a, potrebno prvenstveno proučiti realnost pojave PMP na cijelom slivu i ostale uvjete bitne za otjecanje velikih voda.

Uz pojam velike vode vezani su i pojmovi poplave, poplavnoga vala i povodnja. **Poplava** je pojava velike vode na površini Zemlje nakon što ona izađe iz određenoga korita. **Poplavni val** je veliki vodni val (jednostruk ili višestruk) u vrijeme trajanja poplave. **Povodanj** je pojava velike vode koja prelazi granice korita površinskih voda ili uobičajene gornje razine podzemnih voda.

Osim velikih materijalnih šteta, velike poplave uzrokuju i stradanje velika broja ljudi, kako je na primjeru nekoliko katastrofalno velikih poplava pokazano u tablici 4.13.

Tablica 4.13 Ljudske žrtve u najvećima poplavama (Lj. Tropan, 1994.)

Država	Godina	Broj poginulih
Nizozemska (jugozapadna)	1421.	100.000
Kina (Huang - ho)	1887.	900.000
Bangladeš (ušća Gangesa i Brahmaputre)	1970.	150.000

Devedesetih godina dvadesetoga stoljeća poplave s brojnim ljudskim žrtvama i velikim štetama pojavljuju se češće nego u ranijim razdobljima. O. Bonacci (1998.) navodi da su se u razmjerno kratkome razdoblju od 1990. do 1996. u svijetu dogodile 22 katastrofalne poplave; u svakoj od njih poginulo je najmanje 1000 ljudi, ili su štete bile veće od milijardu američkih dolara. U tablicama 4.14 i 4.15 izneseni su podaci o pet najvećih poplava po broju poginulih ljudi i štetama u razdoblju od 1990. do 1996. godine.

Z. W. Kundzewicz (1998.) analizira hidrološke prilike devedesetih godina, nastale promjenom klime uslijed povećanja koncentracije stakleničkih plinova. Smatra se da je to glavni uzrok povećanja kišnih intenziteta s posljedicama povećanja velikih voda. Osim učinka staklenika (pogl. 3.3), na promjene veličina i varijacija protoka vode utječu i drugi čimbenici - prvenstveno izgradnja velikih hidrotehničkih sustava koji uvjetuju određene promjene u vodnim režimima. Na nekim su područjima ustanovljena skraćenja povratnih razdoblja pojavljivanja poplava. Primjerice, na osnovi ranijih podataka određena poplava 100-godišnjega povratnog razdoblja postaje sada, zbog češćih pojavljivanja, 10-godišnja ili čak niža pojava. Zbog ove se činjenice postavlja pitanje jesu li hidrološki nizovi iz prošlosti, na osnovi kojih su velike vode bile definirane, u odnosu na podatke iz devedesetih godina homogeni i stacionarni (pogl. 4.3.2). Ovo će biti moguće ustanoviti tek nakon prikupljanja dovoljna broja podataka, a do tada je najprihvatljivije velike vode definirati sa stajališta ostvarivanja veće sigurnosti.

Tablica 4.14 Pet najvećih poplava po broju poginulih ljudi u razdoblju od 1990. do 1996. godine (O. Bonacci, 1998.)

Redni broj	Država	Vrijeme pojave	Broj poginulih
1	Bangladeš	travanj, 1991.	140.000
2	Kina	srpanj, 1991.	3.074
3	Kina	lipanj - kolovoz, 1996.	2.700
4	Pakistan	listopad, 1992.	1.500
5	Kina	svibanj-lipanj, 1994.	1.410

Tablica 4.15 Pet najvećih poplava prema štetama (u milijardama američkih dolara) u razdoblju od 1990. do 1996. godine (O. Bonacci, 1998.)

Redni broj	Država	Vrijeme pojave	Iznos štete (10 ⁹ USD)
1	Kina	lipanj - kolovoz, 1996.	26,5
2	SAD	lipanj - kolovoz, 1993.	16,0
3	Sjeverna Koreja	srpanj - kolovoz, 1995.	15,0
4	Italija	listopad, 1994.	12,5
5	Kina	srpanj, 1991.	7,5

Velike se vode mogu pojaviti i unutar znatno kraćega razdoblja nego što je njihovo povratno razdoblje. O Bonacci (1998.) navodi primjer poplava većih od 100-godišnjih povratnih razdoblja, koje su se pojavile u slivu Rajne krajem 1993. i početkom 1995., u razmaku od 13 mjeseci, iz čega se može izvesti tri važna opća zaključka:

1. Nakon pojavljivanja prve poplave ne treba dugo čekati pojavanje druge poplave slična povratnog razdoblja.
2. Nakon prve poplave potrebno je poduzeti odgovarajuće zaštitne mjere. U Njemačkoj su, kada je to bilo učinjeno, štete uslijed druge poplave bile znatno smanjene.
3. U područjima u kojima dugo nije bilo poplava nužno se pripremiti za takve incidentne prilike. Iako nije moguće unaprijed odrediti kada će se poplava pojaviti, moguće je utvrditi kritična područja na kojima treba poduzeti preventivne mjere za zaštitu od poplave i smanjivanje njome izazvanih štetnih posljedica.

4.16.2 Određivanje velikih voda primjenom statističkih metoda

Svaka pojava u prirodi zbiva se kao posljedica uzroka koji ju je izazvao. To znači da u prirodi postoje određene zakonitosti po kojima se događaji zbivaju. U okviru toga postoje događaji koji se zbivaju kao posljedica mnogih uzroka, koji se ne mogu ni obuhvatiti, niti ispitati. Takve se pojave zovu slučajnim pojavama ili slučajnim događajima. Ukoliko takvih pojava ima dovoljno, onda se preko njih, na osnovi statističkih zakonitosti, može statističkim metodama istraživati buduće stanje.

Statističke se metode primjenjuju kada se pojedine dijelove neke pojave ne može proučavati odvojeno, nego se može promatrati samo cjelokupna pojava. Iz nje se onda može izvesti moguća zakonitost.

Značajke sliva i klime uvjetuju otjecanje vodotokom. Uzroci postanka svake velike vode su mnogobrojni i toliko složeni, da se ona s toga stajališta slobodno može smatrati slučajnom pojavom. Polazeći od toga, iz nizova najvećih međusobno neovisnih pokazatelja velikih voda (pod čime se misli na maksimalne vodostaje, protoke ili volumene velikih vodnih valova) može se, uz primjenu metoda matematičke statistike, odrediti buduće velike vode različita reda pojavljivanja.

Radi izbjegavanja paradoksa da veličina velike vode - uz uvjet da vjerojatnost njezina pojavljivanja bude dovoljno mala - postane prevelika (teorijski čak beskonačna), ranije je bilo usvojeno da se događaj vjerojatnosti preko 0.0001 posto ili povratnoga razdoblja preko 1.000.000 godina smatra nemogućim. U tome smislu bi pojava 1.000.000-godišnje velike vode bila definirana kao najveća moguća velika voda. Ovako definirana velika voda manja je od PMF-a određenoga determinističkim pristupom ili na osnovi metode najveće vjerojatnosti pojavljivanja. Osim toga, teorijski gledano, ni 1.000.000-godišnja velika voda nije najveća moguća velika voda. Zbog toga se 1.000.000-godišnja velika voda ne rabi za definiranje PMF-a.

Za praktične potrebe zanimljive su prvenstveno iz ekonomskih razloga, velike vode 10.000-, 1.000-, 500-, 100-, 50-, 25-, 10- i 2-godišnjih povratnih razdoblja i upravo zbog toga se u hidrološkim obradama teži što pouzdanijem određivanju njihovih veličina.

Čak i kada se metode matematičke statistike primjenjuju u hidrologiji, mogu nastupiti izvjesne poteškoće. Često ulazni podaci nemaju istu težinu i nisu određeni s jednakom točnošću, iako se u izračunu tretiraju statistički ravnopravno. Određeni upliv može imati i mijenjanje stanja na slivu ili u koritu rijeke. U pojedinima se slučajevima hidrološki podaci dobiveni nakon nekoga značajnog zahvata na slivu ne smiju statistički obrađivati zajedno s podacima dobivenima prije toga zahvata.

Dobiveni će rezultati biti realni ako su u razdoblju motrenja i mjerenja bile zabilježene dovoljno visoke vrijednosti velikih voda, a same statističke obrade provedene određenim redoslijedom i ispravno primijenjene. Uvjeti koje hidrološki nizovi trebaju zadovoljavati da bi se na njima mogle primijeniti metode matematičke statistike opisani su u poglavlju 4.3.2.

U prvome redu treba ispitati međusobnu neovisnost članova niza, jer ulazne podatke treba tretirati kao međusobno neovisne slučajne događaje. Također je potrebno da takvih međusobno neovisnih ulaznih podataka bude dovoljan broj, odnosno niz treba biti dovoljno dug. To je potrebno zbog toga što se zakonitosti statističkih metoda u svojoj suštini zasnivaju na zakonu velikih brojeva.

Poslije toga je potrebno ispitati homogenost niza. Niz se može statistički obrađivati samo ako unutar njega nije tijekom vremena nastupila neka statistički značajna promjena. To znači da je potrebno ustanoviti jesu li se događaji u jednome dijelu niza zbivali s nekim dodatnim, statistički značajnim utjecajem, koji nije postojao u drugome dijelu vremenskoga niza. Nakon što je ustanovljeno da su ulazni podaci međusobno neovisni, a niz dovoljno dug i homogen, treba odrediti mjerodavnu krivulju raspodjele, koja mora dobro odgovarati opaženome materijalu. Preko izraza mjerodavne krivulje raspodjele moguće je tada odrediti velike vode malih vjerojatnosti pojavljivanja.

Riječna su korita, pogotovo korita bujičnih vodotoka, podložna promjenama tijekom godina. Takve moguće značajne promjene u koritu ili, pak, promjene kote

nule vodokaza mogu u velikoj mjeri otežati ili čak onemogućiti analizu velikih voda preko maksimalnih vodostaja. Na to prvenstveno mogu ukazati različite protočne krivulje unutar dužega vremenskog razdoblja. U takvim slučajevima je bolje umjesto niza maksimalnih vodostaja razmatrati niz maksimalnih protoka, koji su preko odgovarajućih protočnih krivulja izvedeni iz maksimalnih vodostaja. Na taj se način izravno dobiju maksimalni protoci različita reda pojavljivanja, a to su ujedno i najčešći parametri velikih voda, koje hidrologija treba osigurati kao podloge. Postoji li pouzdana ekstrapolacija protočne krivulje, mogu se, ukoliko je to potrebno, iz maksimalnih protoka odrediti i maksimalni vodostaji različita reda pojavljivanja.

Vrlo važni i često neophodni podaci su oblici i volumeni vodnih valova različitih povratnih razdoblja. Na malim slivovima, bujičnih osobina, gdje vodni valovi često nastaju uslijed djelovanja jakih kiša, može se kroz određeni niz godina prikupiti zadovoljavajući broj vodnih valova nastalih površinskim otjecanjem. Ako su hidrogrami vodnih valova po oblicima slični, pogotovo je korisno statistički obraditi njihove volumene. Naime, volumeni vodnih valova su izravno povezani s oborinama palima na sliv i oni su kao pokazatelji mnogo ilustrativniji nego sami maksimalni protoci, koji su izvedeni iz vodostaja i prikazuju zapravo trenutno djelovanje, odnosno samo veličine vrhova vodnih valova. Volumeni i prikazi velikih vodnih valova mnogo više govore o ekstremno velikom otjecanju i njihovom se daljnjom analizom mogu dobiti glavni pokazatelji za obranu od poplave, dimenzioniranje akumulacijskih jezera, evakuacijskih organa itd.

Osnovni skup maksimalnih voda, odnosno niz ulaznih podataka koji će se statistički obrađivati, može se sastaviti na dva načina:

- 1) Na temelju niza maksimalnih godišnjih voda, a to su najveći protoci ili, u nekim slučajevima, vodostaji, od kojih je svaki zabilježen u jednoj hidrološkoj ili kalendarskoj godini.
- 2) Na temelju niza najvećih zabilježenih protoka u razdoblju opažanja, gdje se uzimaju sve velike vode iznad neke unaprijed određene vrijednosti - repnoga protoka (primjer za maksimalne mjesečne protoke prikazan je na slici 4.2).

Polazeći od činjenice da i jedan i drugi niz imaju dovoljan broj članova, potrebno je ustanoviti koji od razmatranih dvaju nizova daje veće velike vode. To se može na jednostavan način ispitati tako da se na logaritamski papir vjerojatnosti (logaritmi - vjerojatnost) nanese vrijednosti obaju nizova. Pravac koji prolazi kao težišnica strmijega niza u ekstrapoliranome dijelu - daje veće velike vode. Prema tome, rezultati dobiveni na osnovi strmijega niza omogućavat će veću sigurnost.

Osnovna mana niza 2) jest da pojedini susjedni članovi mogu biti vrlo blizu, što pokazuje da je drugi član u većoj ili manjoj mjeri ovisan o prvome, a to nije u skladu s osnovnom pretpostavkom da su ove pojave slučajne i međusobno neovisne.

Međutim, niz maksimalnih godišnjih protoka može sa stajališta statističke obrade

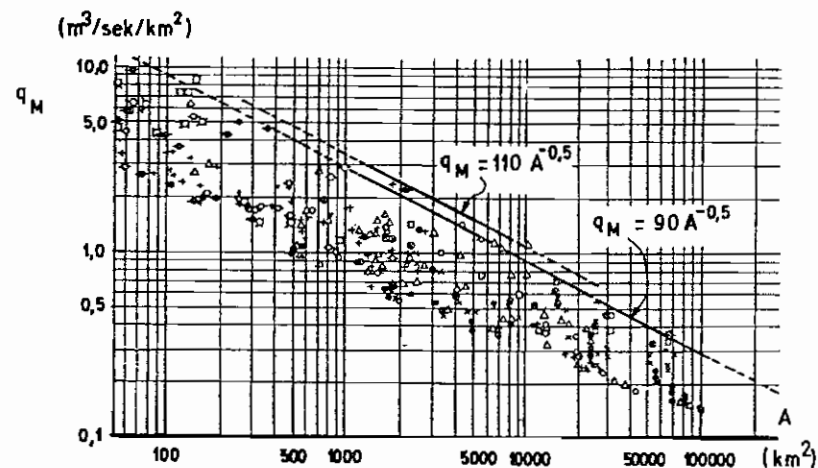
biti prekratak, što se vrlo često događa u slučaju malih slivova. U tom slučaju nije na odmet, ukoliko statistička obrada podataka uopće dolazi u obzir, usporediti oba niza.

U nizu maksimalnih godišnjih protoka razmak između pojedinih članova redovito je tako dug, da je uzajamni utjecaj gotovo isključen, pogotovo ako se radi o hidrološkim godinama.

Prije svega je potrebno ispitati je li se unutar promatranoga vremenskog razdoblja pojavila barem jedna reprezentativna velika voda. Naime, moguće je da su unutar razdoblja motrenja bile zabilježene samo razmjerno male velike vode, a da su se izvan toga razdoblja pojavljivale znatno veće vrijednosti. Njih bi svakako trebalo uzeti u obzir, jer bi u suprotnom izračunane vrijednosti velikih voda sasvim sigurno bile preniske. Zbog toga je potrebno ustanoviti jesu li u razdoblju opažanja bile zabilježene dovoljno velike vrijednosti velikih voda.

To se može provjeriti preko odgovarajućih dijagrama na koje su nanoseni najveći opaženi specifični dotoci različitih slivova u funkciji površina slivova. Jedan takav dijagram, u log-log koordinatnome sustavu, prikazan je na slici 4.92. Dijagram na slici 4.92 izrađen je na osnovi podataka o najvećim opaženim protocima na različitim slivovima u istočnome dijelu SAD-a. Na slici 4.92 konstruirane su i dvije anvelopne krivulje, kod kojih donja anvelopa obuhvaća najveći dio velikih voda, a gornja anvelopa krajnje opažene maksimume (V. Jevđević, 1956.).

Za slivna područja u bivšoj Jugoslaviji anvelopne krivulje najvećih opaženih specifičnih dotoka definirao je D. Srebrenović (1970.b). Te su anvelope, zajedno s podacima o najvećim opaženim specifičnim dotocima i anvelopama krških slivova u Hrvatskoj, prikazane na slici 4.133, u poglavlju 4.25.



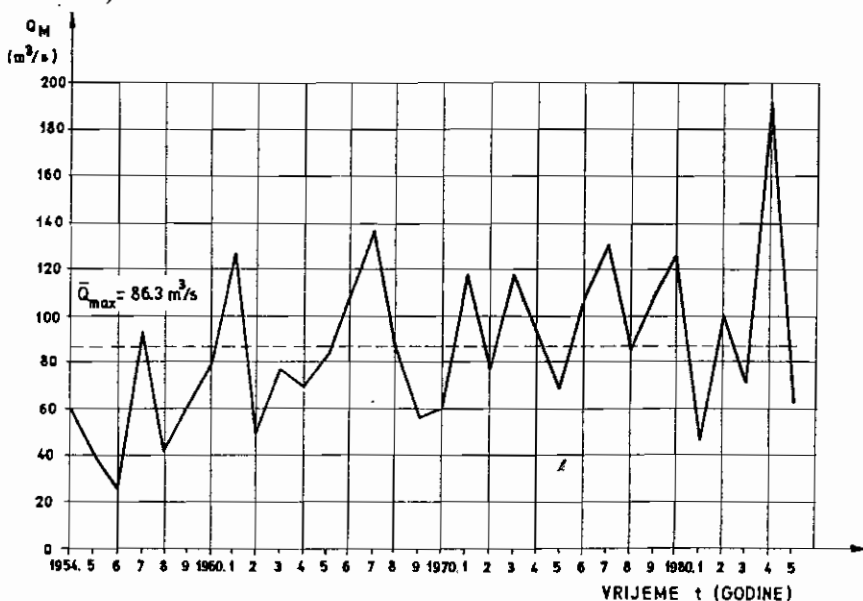
Slika 4.92 Najveći opaženi maksimalni specifični dotoci u funkciji površina slivova (V. Jevđević, 1956.)

Izračun velikih voda primjenom statističkih metoda predstavlja određivanje mjerodavne funkcije raspodjele na temelju ulaznih izračunskih podataka dobivenim hidrološkim motrenjima i mjerenjima.

Funkcija raspodjele ili funkcija raspodjele vjerojatnosti pojavljivanja slučajne promjenljive veličine je način na koji su učestalosti članova neke populacije raspodijeljene prema vrijednostima varijabli koje prikazuju. U hidrologiji se funkcije raspodjele najviše primjenjuju pri definiranju veličina velikih i malih voda različitih povratnih razdoblja, koje se određuju na osnovi mjerodavne funkcije raspodjele - ekstrapolacijom za različita povratna razdoblja (npr. 2-, 5-, 10-, 25-, 100-, 1000-, 10.000-godišnji maksimalni protok).

Grafički prikaz funkcije raspodjele naziva se krivuljom raspodjele. Na osnovi članova niza izračunskih podataka poredanih po veličini, određenom se teorijskom krivuljom raspodjele definira krivulja trajanja. Za velike vode najčešće se obrađuju maksimalni godišnji protoci i volumeni maksimalnih vodnih valova (s obzirom na vršni protok ili najveći volumen), a mogu se obrađivati i maksimalni protoci iznad nekoga repernog protoka, te maksimalni vodostaji.

Velike se vode rijetka reda pojave određuju na temelju ekstrapolacije krivulje raspodjele i zbog toga je potrebno definirati mjerodavnu krivulju raspodjele. Nakon izračunavanja, krivulje se raspodjele grafički prikazuju na papiru vjerojatnosti (slika 4.3 i 4.94).



Slika 4.93 Maksimalni godišnji protoci Čabranke u profilu Zamost II u razdoblju od 1954. do 1985.

Za analizu raspodjele u hidrologiji se rabi velik broj jedno-, dvo- ili višeparametarskih krivulja raspodjele. Ovdje su prikazane Gaussova (normalna), logaritamsko-normalna (Galtonova) i Gumbelova raspodjela te raspodjela Pearson 3. Izračun krivulja raspodjele opisan je na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka rijeke Čabranke u profilu Zamost II iz razdoblja od 1954. do 1985. godine, koji je prikazan na slici 4.93.

Nakon provedenih ispitivanja neovisnosti, homogenosti i stacionarnosti, ustanovljeno je da se na članove niza mogu primijeniti statističke metode. Osnovni statistički parametri razmatranoga niza su, prema izrazima (4.1), (4.3), (4.5) i (4.6):

- prosjek niza: $\bar{Q}_M = 86,3 \text{ m}^3/\text{s}$
- standardno odstupanje: $\sigma = 35,2 \text{ m}^3/\text{s}$
- koeficijent varijacije: $c_{vM} = 0,41$
- koeficijent asimetrije: $c_{sM} = 0,80$

Nakon što se maksimalni godišnji protoci Čabranke u profilu Zamost II poredaju po veličini, definira se vjerojatnost pojavljivanja svakoga pojedinog člana. U ovome je slučaju usvojena vjerojatnost pojavljivanja po N. N. Čegodajevu (4.23). Prema tome je vjerojatnost pojavljivanja prvoga člana (najvećega maksimalnog godišnjeg protoka u razmatranome nizu):

$$p = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} = \frac{1 - 0,3}{32 + 0,4} = 0,0216 = 2,16\%$$

vjerojatnost pojavljivanja drugoga člana niza po veličini je:

$$p = \frac{2 - 0,3}{32 + 0,4} = 0,0525 = 5,25\%, \text{ itd.}$$

Članovi niza s odgovarajućim vjerojatnostima pojavljivanja prikazani su na papiru vjerojatnosti na slici 4.94.

Nakon što su izračunani osnovni statistički parametri, pristupa se izračunavanju maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja prema odabranim krivuljama raspodjele.

Gaussova (normalna) krivulja raspodjele je simetrična i dvoparametarska, a opisana je u poglavlju 4.3.3. Velike vode, kao i većina hidroloških pojava, redovito imaju nesimetričnu raspodjelu, ali Gaussova se raspodjela često obrađuje uz druge raspodjele radi njihove međusobne usporedbe.

Ukoliko se u Gaussovu funkciju uvede reducirano odstupanje z kao nova nepoznatica (izraz 4.31), a ona se u razmatranome slučaju maksimalnih godišnjih protoka označava kao:

$$z = \frac{Q_M - \bar{Q}_M}{\sigma} \quad (4.165)$$

dobije se Gaussova krivulja bez parametara, određena izrazom:

$$p = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (4.166)$$

Na taj se način postupak svodi na to, da se iz podataka osnovnoga skupa, a u ovome slučaju su to 32 maksimalna godišnja protoka, izračunaju dva parametra: aritmetička sredina \bar{Q}_M i standardno odstupanje σ . Nakon toga se za razne vjerojatnosti pojavljivanja p iz tablice Gaussove funkcije (u priručniku) odrede vrijednosti reduciranoga odstupanja z . Veličine protoka velikih voda različitih vjerojatnosti pojavljivanja dobiju se iz izraza:

$$Q_{Mp} = \bar{Q}_M + z\sigma \quad (4.167)$$

Izračun maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II prema Gaussovoj krivulji dan je u tablici 4.16.

Tablica 4.16 Izračun maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II prema Gaussovoj krivulji raspodjele

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	z	$z\sigma$	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	3,715	131	217
1000	0,1	3,090	109	195
100	1	2,326	81,9	168
50	2	2,054	72,3	159
25	4	1,752	61,7	148
10	10	1,281	45,1	131
5	20	0,842	29,6	116
2	50	0,000	0,0	86,3
1,25	80	-0,842	-29,6	56,7
1,1111	90	-1,281	-45,1	41,2
1,0417	96	-1,752	-61,7	24,6
1,0204	98	-2,054	-72,3	14,0
1,0101	99	-2,326	-81,8	4,4
1,0010	99,9	-3,090	-109	-
1,0001	99,99	-3,715	-132	-

Ako se vrijednosti članova niza izraze logaritima, njihov niz može slijediti dvoparametarsku **logaritamsko-normalnu** ili **Galtonovu raspodjelu**. Funkcija vjerojatnosti tada je dana izrazom:

$$P(\bar{q}) = \frac{1}{\bar{\sigma} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{q} - \bar{q}_o}{\bar{\sigma}}\right)^2} d\bar{q} \quad (4.168)$$

Oznake u izrazu za raspodjelu su:

- logaritam maksimalnoga protoka:

$$\bar{q} = \log Q_M \quad (4.169)$$

- aritmetička sredina logaritama niza $\log Q_M$:

$$\bar{q}_o = \frac{\sum \bar{q}}{n} = 1,8999 \quad (4.170)$$

- standardno odstupanje logaritama:

$$\bar{\sigma} = \pm \frac{\sqrt{\sum (\bar{q} - \bar{q}_o)^2}}{n} = \pm 0,18577 \quad (4.171)$$

$e = 2,7183$ - baza prirodnih logaritama

U ovoj raspodjeli reducirano odstupanje je:

$$z = \frac{(\bar{q} - \bar{q}_o)}{\bar{\sigma}} \quad (4.172)$$

Prema tome, vrijednost logaritma maksimalnih protoka različita reda pojave dobije se prema izrazu:

$$\bar{q}_p = \bar{q}_o + z\bar{\sigma} \quad (4.173)$$

Kada se vrijednosti \bar{q}_p antilogaritmiraju, dobiju se vrijednosti maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja. Za određene vrijednosti z iz tablice za Gaussovu krivulju mogu se izračunati učestalosti maksimalnih godišnjih protoka. Rezultati izračuna na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II dani su u tablici 4.17.

Od 14 Pearsonovih funkcija raspodjele u hidrologiji se najčešće koristi 3. tip Pearsonove funkcije. **Raspodjela Pearson 3** je nesimetrična troparametarska raspodjela. Budući da je izvorni oblik ove raspodjele dosta složen, a rad sa njime dugotrajan, u hidrološkoj praksi se upotrebljava modificirani oblik, prema Foster-Ribkinu. Taj je oblik vrlo pogodan da se s osnovnim parametrima - aritmetičkom sredinom \bar{Q}_M , koeficijentom varijacije c_{vM} i koeficijentom asimetrije c_{sM} - može raditi brzo i jednostavno. Foster-Ribkinova modifikacija dana je izrazom:

$$Q_{Mp} = (c_v \phi + 1) \bar{Q}_M \quad (4.174)$$

Funkcija ϕ definirana je kao:

$$\phi = f(c_v, p) \quad (4.175)$$

Tablica 4.17 Izračun maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II prema logaritamsko-normalnoj (Galtonovoj) raspodjeli

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	z	$z\sigma$	\bar{q}_p	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	3,715	0,6901	2,5900	389
1000	0,1	3,090	0,5740	2,4739	298
100	1	2,326	0,4321	2,3320	215
50	2	1,054	0,3816	2,2815	191
25	4	1,752	0,3255	2,2254	168
10	10	1,281	0,2380	2,1379	137
5	20	0,842	0,1564	2,0563	114
2	50	0,000	0,000	1,8999	79,4
1,25	80	-0,842	-0,1564	1,7435	55,4
1,1111	90	-1,281	-0,2380	1,6619	45,9
1,0417	96	-1,752	-0,3255	1,5744	37,5
1,0204	98	-2,054	-0,3816	1,5183	33,0
1,0101	99	-2,326	-0,4321	1,4678	29,4
1,0010	99,9	-3,090	-0,5740	1,3259	21,2
1,0001	99,99	-3,715	-0,6901	1,2098	16,2

Tablica 4.18 Veličine funkcije ϕ prema Foster-Ribkinu

c_{SM}	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)														
	0,01	0,1	1	2	4	10	20	50	80	90	96	98	99	99,9	99,99
-2,0		1,00	0,99	0,98	0,96	0,90	0,78	0,31	-0,6	-1,3	-2,3	-3,0	-3,6	-5,9	
-1,5		1,31	1,26	1,23	1,15	1,02	0,82	0,24	-0,7	-1,3	-2,0	-2,9	-3,3	-5,2	
-1,0		1,79	1,59	1,37	1,22	1,13	0,85	0,16	-0,8	-1,3	-2,0	-2,7	-3,0	-4,5	
-0,8		2,02	1,74	1,65	1,42	1,17	0,85	0,13	-0,8	-1,3	-1,9	-2,6	-2,9	-4,2	
-0,6		2,27	1,88	1,76	1,51	1,20	0,85	0,10	-0,8	-1,3	-1,9	-2,5	-2,8	-4,0	
-0,4		2,54	2,03	1,90	1,60	1,23	0,85	0,07	-0,8	-1,3	-1,8	-2,3	-2,6	-3,7	
-0,2		2,81	2,18	1,98	1,67	1,26	0,85	0,03	-0,8	-1,3	-1,8	-2,2	-2,5	-3,4	
0,0	3,72	3,09	2,33	2,04	1,75	1,28	0,84	0,00	-0,9	-1,3	-1,7	-2,1	-2,3	-3,1	-3,7
0,2	4,16	3,38	2,47	2,16	1,81	1,30	0,83	0,00	-0,9	-1,3	-1,6	-1,8	-2,2	-2,8	-3,3
0,4	4,61	3,66	2,61	2,26	1,87	1,32	0,82	-0,1	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-2,0	-2,5	-2,9
0,6	5,05	3,96	2,76	2,35	1,94	1,33	0,80	-0,1	-0,9	-1,2	-1,5	-1,7	-1,9	-2,3	-2,5
0,8	5,50	4,24	2,89	2,45	2,00	1,34	0,78	-0,1	-0,9	-1,2	-1,4	-1,6	-1,7	-2,0	-2,2
1,0	5,96	4,53	3,02	2,54	2,05	1,34	0,76	-0,2	-0,9	-1,1	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-1,9
1,2	6,41	4,81	3,15	2,62	2,09	1,34	0,73	-0,2	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6
1,5	7,09	5,26	3,33	2,74	2,15	1,33	0,69	-0,2	-0,8	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3
2,0	8,21	5,91	3,60	2,91	2,23	1,30	0,61	-0,3	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
2,5	9,30	6,60	3,83	3,04	2,28	1,24	0,53	-0,4	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
3,0	10,4	7,25	4,02	3,16	2,30	1,18	0,42	-0,4	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7

U tablici 4.18 danc su vrijednosti funkcije ϕ za različite vjerojatnosti pojavljivanja p i različite koeficijente asimetrije c_{SM} prema Foster-Ribkinovim tablicama. (Veličine ϕ u Foster-Ribkinovim tablicama izvedene su za koeficijent varijacije $c_{SM} = 1$, prosjek niza $\bar{X} = 1$, a u ovome je slučaju prosječni godišnji maksimalni protok $\bar{Q}_M = 1$.)

Rezultati izračuna maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II dani su u tablici 4.19. Izračun je proveden s ulaznim parametrima $\bar{Q}_M = 86,3$ m³/s, $c_{vM} = 0,41$ i $c_{sM} = 0,80$.

Tablica 4.19 Izračun maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II prema raspodjeli Pearson 3

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	ϕ	Q_{Mp} (m ³ /s)
10.000	0,01	5,50	281
1000	0,1	4,24	236
100	1	2,89	189
50	2	2,45	173
25	4	2,00	157
10	10	1,34	134
5	20	0,78	114
2	50	-0,13	81,7
1,25	80	-0,86	55,9
1,1111	90	-1,17	44,9
1,0417	96	-1,47	34,3
1,0204	98	-1,60	29,7
1,0101	99	-1,74	24,7
1,0010	99,9	-2,02	14,8
1,0001	99,99	-2,18	9,17

Gumbelova raspodjela je nesimetrična i dvoparameterska. Prema Gumbelu je na primjeru maksimalnih godišnjih protoka vjerojatnost pojavljivanja definirana eksponencijalnom funkcijom:

$$P(Q_M) = a e^{-a(Q_M - Q_*)} e^{-e^{-a(Q_M - Q_*)}} \quad (4.176)$$

gdje su Q_* i a parametri Gumbelove raspodjele. Q_* je modus Gumbelove krivulje i definiran je izrazom:

$$Q_* = \bar{Q}_M - \frac{0,577}{a} \quad (4.177)$$

U izrazu (4.177), $\bar{Q}_M = 86,3$ m³/s je prosječan maksimalni godišnji protok, veličina 0,577 je Eulerova konstanta, a parametar a je definiran izrazom:

$$\frac{1}{a} = 0,780 \sigma \quad (4.178)$$

gdje je u razmatranome primjeru standardno odstupanje $\sigma = 35,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Prema tome, u obradi maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost 2 veličine parametara Gumbelove raspodjele su: $\frac{1}{a} = 27,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_0 = 70,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Ako se uzme:

$$z = a(Q_M - Q_0) \quad (4.179)$$

i uvrsti u izraz za učestalost, dobije se:

$$P(Q_M) = ae^{-z} e^{-e^{-z}} \quad (4.180)$$

Prema tome je vjerojatnost:

$$P_{1(Q_M)} = e^{-e^{-z}} \quad (4.181)$$

zato što je:

$$P_{1(Q_M)} = 1 - P(Q_M) \quad (4.182)$$

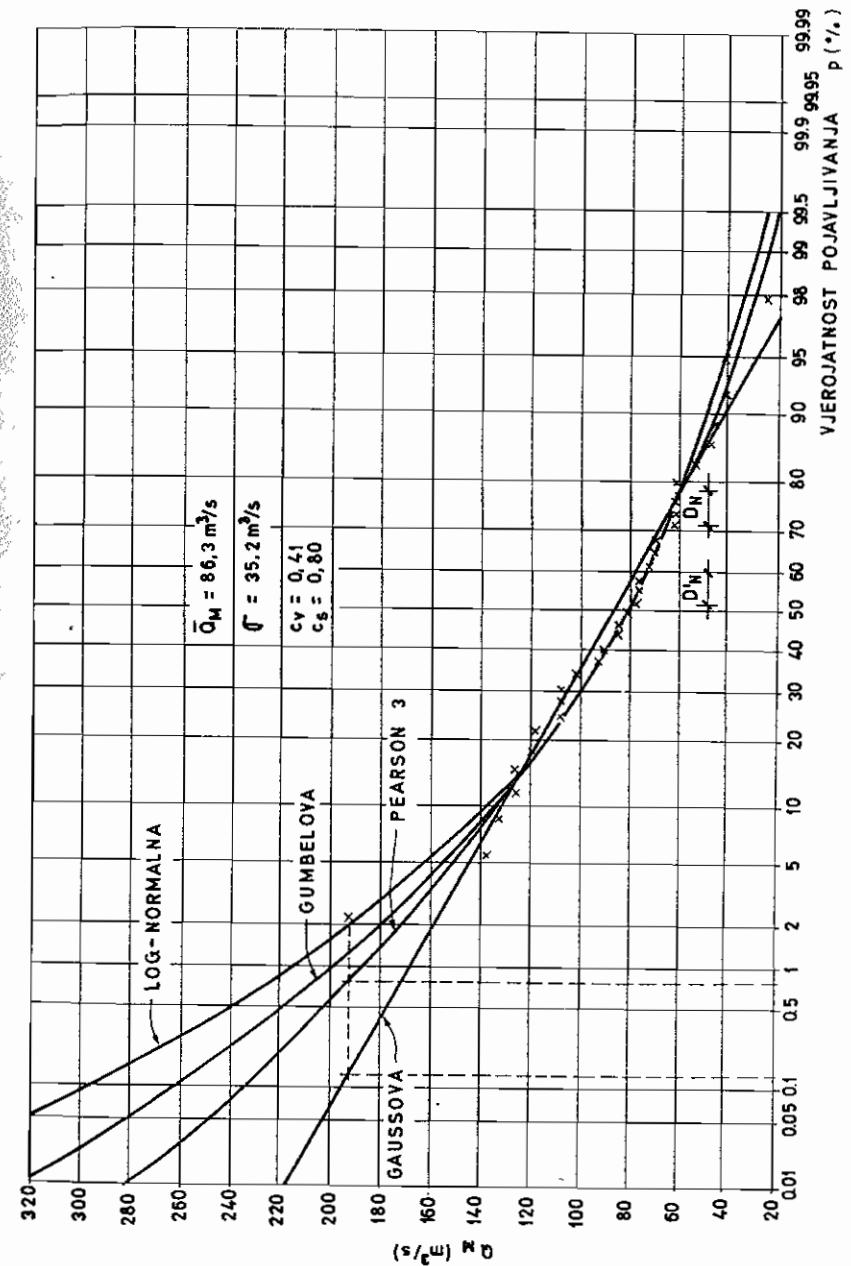
Gumbel je u tablici dao odnos $P_{1(Q_M)}$ i z , pa se protoci različita reda pojavljivanja mogu odrediti na temelju izraza:

$$Q_{Mp} = Q_0 + \frac{1}{a} z \quad (4.183)$$

Izračun se provodi tabelarno, kao što je prikazano u tablici 4.20.

Tablica 4.20 Izračun maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II prema Gumbelovoj raspodjeli

Povratno razdoblje (god.)	Vjerojatnost pojavljivanja p (%)	p_1	z	$\frac{1}{a} z$	Q_{Mp} (m^3/s)
10.000	0,01	0,9999	9,21	253,3	324
1000	0,1	0,999	6,91	190	261
100	1	0,99	4,60	126,5	197
50	2	0,98	3,91	107,5	178
25	4	0,96	3,20	88,0	159
10	10	0,90	2,25	61,9	132
5	20	0,80	1,50	41,3	112
2	50	0,50	0,37	10,2	80,7
1,25	80	0,20	-0,48	-13,2	57,3
1,1111	90	0,10	-0,83	-22,8	47,7
1,0417	96	0,04	-1,15	-31,6	38,9
1,0204	98	0,02	-1,35	-37,1	33,4
1,0101	99	0,01	-1,53	-42,1	28,4
1,0010	99,9	0,001	-1,94	-53,4	17,2
1,0001	99,99	0,0001	-2,20	-60,5	10,0



Slika 4.94 Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja Čabranke u profilu Zamost II

Gaussova, log-normalna, Pearson 3 i Gumbelova krivulja raspodjela, zajedno su s ulaznim izračunskim podacima (maksimalni godišnji protoci Čabranke u profilu Zamost II) grafički prikazane na papiru vjerojatnosti na slici 4.94.

Krivulje raspodjele sa slike 4.94 daju različite vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja. Već na prvi pogled se vidi da Gaussova simetrična raspodjela nije prihvatljiva jer daje preniske ekstrapolirane vrijednosti. Najveći izračunski protok iz 32-godišnjega niza $Q_M = 192 \text{ m}^3/\text{s}$ ima praktički 900-godišnje povratno razdoblje prema Gaussovoj raspodjeli.

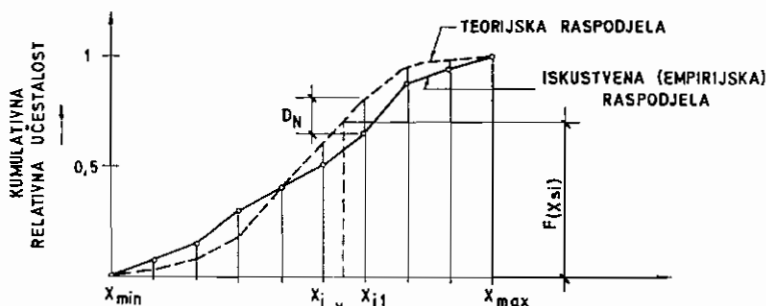
Odluka o mjerodavnoj raspodjeli može se temeljiti na primjeni različitih testova kojima se ispituje prilagodljivost teorijskih raspodjela ulaznim izračunskim podacima, npr. χ^2 -test, test A. N. Kolmogorova (S. Jovanović, 1981.). Ovdje se opisuje Kolmogorovljev test.

Primjena Kolmogorovljeva testa ne ovisi o broju parametara raspodjele. Pretpostavlja se da su raspodjela članova niza i veličine parametara raspodjele poznate.

Mjera odstupanja D_N iskustvene raspodjele, odnosno raspodjele ulaznih izračunskih podataka, od teorijske raspodjele je najveća razlika između iskustvene (empirijske) $\phi_{N(x)}$ i teorijske raspodjele $F(x)$.

$$D_N = \max[\phi_N(x) - F(x)] \quad -\infty < x < +\infty \quad (4.184)$$

Niz je poredan prema rastućim vrijednostima, a određivanje mjere odstupanja D_N je prikazano na slici 4.95.



Slika 4.95 Iskustvena i teorijska raspodjela

Tablica 4.21 Kritične vrijednosti D_α testa A. N. Kolmogorova za različite brojeve članova niza n kod razine povjerenja $\alpha = 0,05$ uobičajene u hidrologiji (prema S. Jovanović, 1981.)

n	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	$n > 50$
D_α	0,56	0,41	0,34	0,29	0,27	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$

Za razinu povjerenja $\alpha = 0,05$ (5%) za različiti broj članova niza n dane su u tablici 4.21 kritične vrijednosti D_α .

Testiranje se provodi sljedećim postupkom:

1. za rastući se niz izračunaju iskustvene (empirijske) vrijednosti $\phi_N(x_m)$
2. za svaki x u rastućem nizu se izračuna vjerojatnost $F(x)$ - može se i očitati s raspodjele
3. za svaki se x odrede razlike $|\phi_N(x) - F(x)|$
4. najveća se razlika $D_N = \max |\phi_N(x) - F(x)|$ uspoređi s kritičnom vrijednošću D_α , koja se uzme iz tablica u skladu s usvojenom razinom povjerenja α .

Na primjeru niza maksimalnih godišnjih protoka Čabranke u profilu Zamost II prikazane su na slici 4.91 najveće razlike D_N između ulaznih izračunskih podataka i pojedinih raspodjela. Za Gaussovu raspodjelu $D_N = 8,54\%$, odnosno $D_N' = 0,085$, za log-normalnu $D_N = 0,070$, za Pearson 3 $D_N = 0,066$, a za Gumbelovu $D_N = 0,082$.

Prema tablici 4.21 kritična vrijednost za niz od $n = 32$ člana je $D_\alpha = 0,23$, pa po tom kriteriju sve četiri raspodjele zadovoljavaju. Najbolju prilagodbu ulaznim izračunskim podacima ima raspodjela Pearson 3, ali i za nju se može reći da daje niske ekstrapolirane vrijednosti - najveći zabilježeni protok u 32-godišnjem nizu $Q_M = 192 \text{ m}^3/\text{s}$ po raspodjeli Pearson 3 ima povratno razdoblje od približno 140 godina. U razmatranome stvarnom slučaju bilo bi najispravnije kao mjerodavne usvojiti vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja po log-normalnoj raspodjeli, i to iz sljedećih razloga:

1. log-normalna raspodjela zadovoljava prema provedenome Kolmogorovljevu testu (razlika između vrijednosti D_N za raspodjelu Pearson 3 i log-normalnu raspodjelu je vrlo mala)
2. log-normalna krivulja raspodjele prolazi vrlo blizu podatka najveće vrijednosti, pa i ta činjenica pruža određenu sigurnost ekstrapoliranim vrijednostima.
3. niz od 32 maksimalna godišnja protoka na osnovi kojega se izračunavaju protoci vrlo rijetka reda pojave vrlo je kratak u odnosu na povratna razdoblja od 100, 1000 i 10.000 godina. Zbog toga je sa stajališta veće sigurnosti opravdano usvojiti raspodjelu koja daje veće vrijednosti.

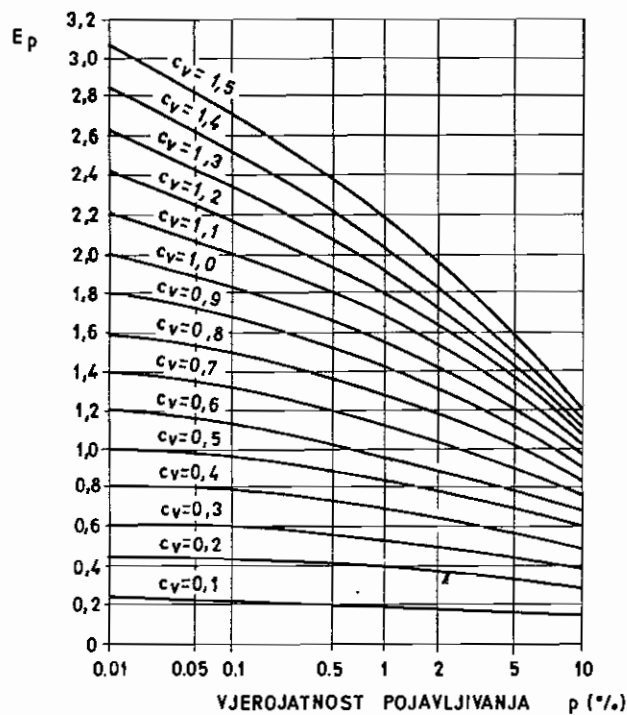
Prema tome, izbor mjerodavne raspodjele treba temeljiti na prilagodbi raspodjela ulaznim izračunskim podacima, a isto treba razmotriti i druge čimbenike koji se razlikuju od slučaja do slučaja (duljina niza, odnos raspodjele prema najvećim vrijednostima u nizu i sl.). U nekim slučajevima važan utjecaj na usvajanje veličina velikih voda može imati i sama građevina radi koje se velike vode izračunavaju. Radi li se o dimenzioniranju evakuacijskih organa (preljev i temeljni ispuš) nasute brane, redovito je opravdano usvajati veće vrijednosti velikih voda, odnosno veću sigurnost. Preljevanje vode preko krune nasute brane se ne smije dozvoliti jer uslijed erozije može doći do njezina rušenja.

Ukoliko se tijekom razmatranja ulaznih izračunskih podataka ustanovi da su njihove vrijednosti niže od stvarnih, što je čest slučaj kada se radi s vodokaznim podacima ili kada se najveće vrijednosti ulaznih podataka nalaze s desne strane krivulje raspodjele, velike se vode različitih povratnih razdoblja može na određeni način povećati. Postupak pod nazivom **popravak sigurnosti** opisala je A. A. Lušćeva (1953.).

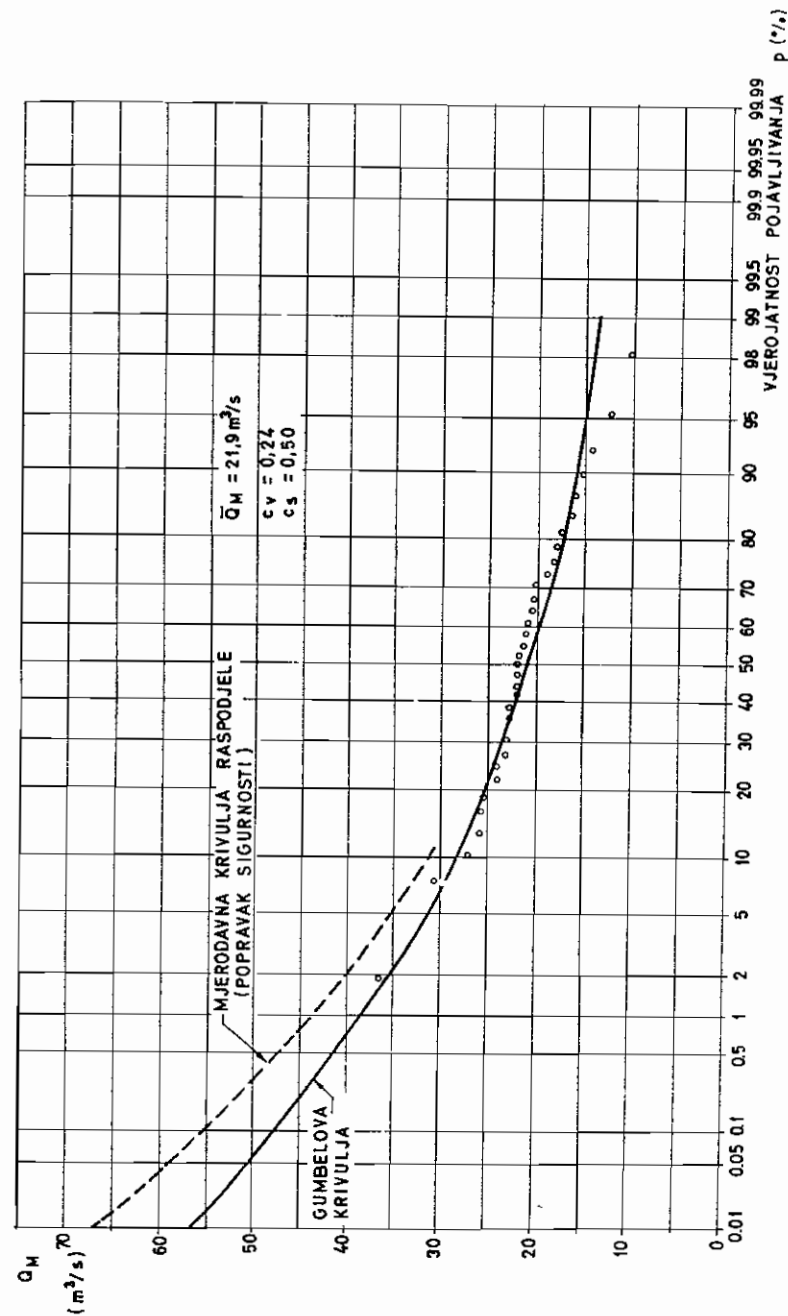
U izračun velikih voda uvodi se kao popravak sigurnosti veličina protoka ΔQ , koja je, budući da se redovito radi o maksimalnim protocima, definirana izrazom:

$$\Delta Q = \frac{a E_p}{\sqrt{n}} Q_{Mp} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.185)$$

gdje je a koeficijent i uzima se da je $a = 1$ za rijeke proučenih područja; $a = 2$ za rijeke neproučenih područja; E_p je srednja kvadratna pogreška protoka u računu vjerojatnosti, koja se uzima iz dijagrama sa slike 4.96; n je broj članova niza, a Q_{Mp} je maksimalni protok s krivulje raspodjele p -toga reda pojave.



Slika 4.96 Veličine E_p za određivanje popravka sigurnosti maksimalnih protoka (A. A. Lušćeva, 1953.).



Slika 4.97 Maksimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja Bijele u profilu Badljevine, određeni na osnovi popravka sigurnosti

Konačni maksimalni protok Q'_{Mp} je:

$$Q'_{Mp} = Q_{Mp} + \Delta Q \quad (4.186)$$

Izračun maksimalnih godišnjih protoka Q'_{Mp} rijeke Bijele u vodokaznome profilu Badljevina dan je u tablici 4.22, a mjerodavna krivulja raspodjele prikazana je na slici 4.97. Zbog vodokaznih podataka kojima nisu obuhvaćene najveće vrijednosti protoka (očitanja u određeno vrijeme), proveden je popravak vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka. Broj članova niza $n = 35$ (razdoblje od 1951. do 1985. godine), za koeficijent a je usvojeno $a = 2$, a E_p je za poznatu vrijednost koeficijenta varijacije $c_{vM} = 0,24$ očitavan za različita povratna razdoblja iz dijagrama na slici 4.96. (Krivulju $c_{vM} = 0,24$ jednostavno je interpolirati između krivulja $c_{vM} = 0,2$ i $c_{vM} = 0,3$, kako je prikazano na slici 4.96.)

Na osnovi vrijednosti Q_{Mp} naertana je mjerodavna krivulja raspodjele maksimalnih godišnjih protoka Bijele u profilu Badljevina na slici 4.97.

Napominje se da se popravak sigurnosti ΔQ uvodi samo u slučaju kada nije veći od 20 posto protoka Q_{Mp} s krivulje raspodjele. Ukoliko je ΔQ veći od 20 posto Q_{Mp} , onda Q_{Mp} treba ponovo definirati.

Tablica 4.22 Izračun mjerodavnih vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Bijele u profilu Badljevina na osnovi popravka sigurnosti

Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m ³ /s)	E_p	ΔQ (m ³ /s)	Q'_{Mp} (m ³ /s)
10	28,2	0,25	2,43	31,1
25	32,5	0,32	3,52	36,0
50	35,4	0,38	4,55	40,0
100	38,2	0,42	5,42	43,6
1000	47,6	0,45	7,24	54,8
10.000	56,9	0,50	9,62	66,5

4.16.3 Metoda jediničnoga hidrograma

Jedinični hidrogram je hidrogram izravnoga otjecanja koji je rezultat jedinične količine efektivnih oborina (1 mm; 1 cm); raspoređenih ravnomjerno po slivnome području tijekom određenoga vremenskog razdoblja.

Metoda jediničnoga hidrograma predstavlja jednu od metoda za određivanje hidrograma otjecanja, a u hidrologiju ju je uveo L. K. Sherman, 1932. godine.

Trenutni jedinični hidrogram je hidrogram jedinične oborine pale na sliv u beskonačno kratkome vremenu.

Ukoliko nema dovoljno podataka dobivenih hidrološkim mjerenjima, jedinični se hidrogram može definirati umjetnim, odnosno sintetičkim načinom. **Umjetni ili sintetički jedinični hidrogram** je jedinični hidrogram razvijen na osnovi procijenjenih koeficijenata, kojima se različite fizičke značajke sliva dovode u međusobnu vezu. Postupak je opisan u stručnoj literaturi (R. K. Linsley i dr., 1988.).

Definicija jediničnoga hidrograma koji traje T sati je:

T-satni jedinični hidrogram je hidrogram izravnoga otjecanja uslijed jedinične oborine (1 cm ili 1 mm) efektivne (neto) kiše, koja je ravnomjerno raspoređena na površini sliva i jednolika je intenziteta tijekom vremena T .

Osnovne pretpostavke za primjenu metode jediničnoga hidrograma su:

1. kiša (pljusak) određenoga trajanja uvijek ima istu vremensku bazu, neovisno o intenzitetu kiše
2. ordinate hidrograma su proporcionalne volumenu efektivne kiše, ako su pljuskovi istoga trajanja
3. raspodjela otjecanja vode je neovisna o prethodnim ili budućim kišama.

Da bi se iz jediničnoga hidrograma moglo dobiti stvarni hidrogram otjecanja, pretpostavi se da se sliv ponaša kao stacionaran (stalan) i linearan sustav, pa prema tome za njega vrijede principi superpozicije i proporcionalnosti.

Jediničnim hidrogramom se ne može tretirati oborina koja je pala na sliv u obliku snijega. Intenzitet efektivne kiše i_e , koji određuje jedinični hidrogram za visinu efektivne oborine $P_e = 1$ je:

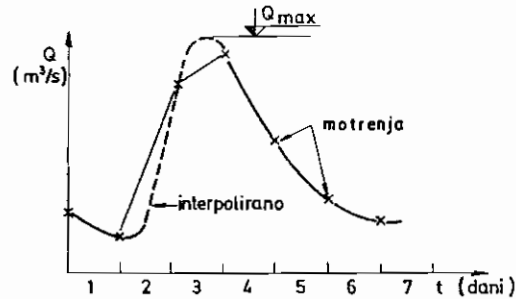
$$i_e = \frac{P_e}{T} = \frac{1}{T} \quad (\text{mm/sat}) \quad (4.187)$$

Ako je u protjecajnome profilu zabilježen nivogram kao posljedica kiše, na osnovi njega može se odrediti jedinični hidrogram, i to na sljedeći način:

1. konstruirati se opaženi hidrogram (iznad njega se može konstruirati i opaženi hijetogram)
2. odvojiti se površinsko i bazno otjecanje
3. odrediti se vremenska baza hidrograma T_b
4. izračunati se volumen izravnoga otjecanja vode V_d
5. izračunati se efektivna kiša $P_e = \frac{V_d}{A}$ (mm)
6. izračunati se ordinate jediničnoga hidrograma:

$$u(T, t) = \frac{Q(t)}{P_e} \quad \text{odnosno} \quad u_i = \frac{Q_i}{P_e} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (4.188)$$

Često se događa da nivogrami nisu na raspolaganju ili da u promatranome profilu nema neprekidnih opažanja vodostaja, nego se vodostaji bilježe jedanput dnevno i, izvanredno, za vrijeme velikih voda. Tada se hidrogram otjecanja može konstruirati logičnom interpolacijom, kao što je prikazano na slici 4.98.



Slika 4.98 Konstruiranje hidrograma iz prekidanih opažanja

Ovakva interpolacija se preporuča za slivove veličine preko 500 km². Takva se konstrukcija može primijeniti i na znatno manje slivove, ako djelovanje podzemlja produljuje vrijeme prikupljanja T_p i vrijeme trajanja vodnoga vala T_b .

Nakon konstruiranja stvarnoga hidrograma potrebno je odvojiti izravni (površinski) od baznoga dotoka. Slučajevi koji mogu nastupiti i pristupi kojima se taj problem rješava opisani su u poglavlju 4.13. Na slici 4.99 prikazan je slučaj kad se točka C na hidrogramu, u kojoj prestaje izravni dotok, definira na temelju diskontinuiteta krivulje recesije. Diskontinuitet se dobro uočava, kada se taj dio hidrograma nacrtava u log-normalnome mjerilu (gore desno na slici 4.99). Pretpostavi se granica površinskoga i baznoga dotoka od točke A do točke B kao produljeni dotok do točke A - prije nego što je počeo površinski dotok. Točka B se nalazi na ordinati vršnoga protoka i od nje se pa do točke C - u kojoj prestaje površinski dotok - granica između površinskoga i baznoga dotoka određuje kao i od A do B - pravocrtno (S. Prohaska i dr., 1996.).

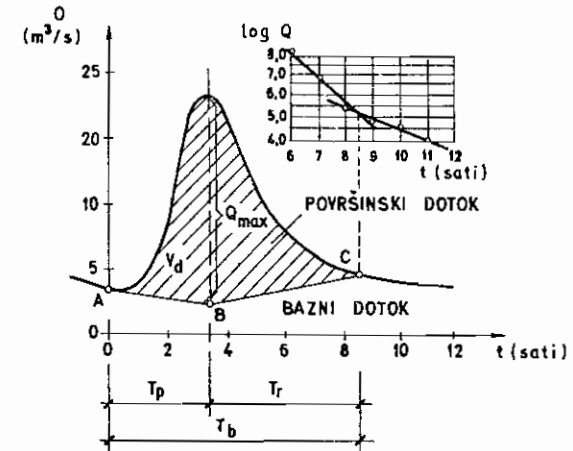
Nakon što su odvojeni izravni (površinski) i bazni dotok te kada je definirana vremenska baza hidrograma T_b , određuje se volumen izravnoga (direktnog) otjecanja V_d - crtkana površina ispod hidrograma i spojnica A, B, C na slici 4.99.

Ukupni volumen vode koja je preko oborine dospjela na sliv je:

$$V_k = P A \quad (\text{m}^3) \quad (4.189)$$

gdje je P (m) visina bruto oborine na slivu, a A (m²) površina sliva. Prema tome, visina bruto oborine j_c , na temelju izraza (4.189):

$$P = \frac{V_k}{A} \quad (4.190)$$



Slika 4.99 Odvajanje površinskoga od baznoga dotoka

Volumen izravnoga dotoka uvijek je manji od volumena vode nastale iz bruto oborine na slivu: $V_d < V_k$ odnosno:

$$V_d = c V_k \quad c < 1.0 \quad (4.191)$$

gdje je c koeficijent otjecanja. Lijevu i desnu stranu jednadžbe (4.191) treba podijeliti s površinom sliva A , kako bi se dobilo:

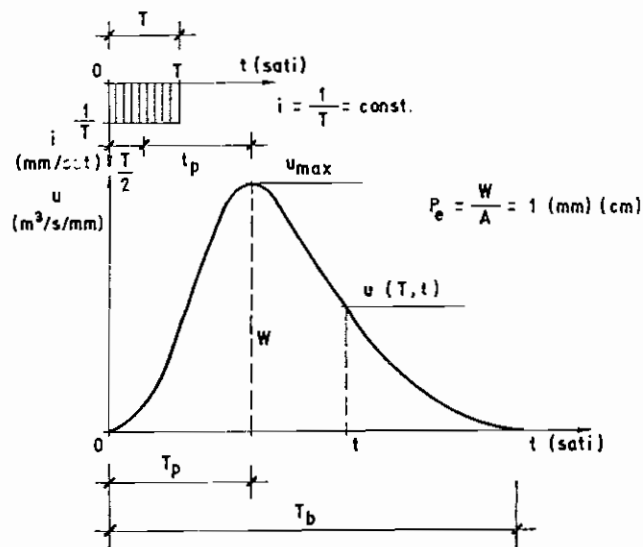
$$\frac{V_d}{A} = c \frac{V_k}{A} \quad (4.192)$$

Efektivna oborina je $P_e = c P$; pa se prema tome na osnovi izraza (4.190) i (4.192) dobije:

$$P_e = \frac{V_d}{A} \quad (4.193)$$

Važno je napomenuti da je otjecajni koeficijent c hidrološki parametar koji daje odnos oborine koja otječe i oborine koja padne na sliv: $c = P_e / P$. Kada se primjenjuje metoda jediničnoga hidrograma, P_e se definira kao oborina koje otječe samo površinski, za razliku od definicije otjecajnoga koeficijenta u poglavlju 4.5.6, gdje se efektivna oborina P_e sastoji od izravnoga i od baznoga dotoka, odnosno od ukupne oborine koje vodotokom otječe.

Uz uvjet da je kiša tijekom vremena T jednolika, moguće je definirati jedinični hidrogram, kako je prikazano na slici 4.100.



Slika 4.100 T-satni jedinični hidrogram i njegov uzrok - hijetogram jedinične oborine trajanja T (S. Jovanović, 1975.).

Efektivna oborina na slici 4.98 P_e jednaka je jedinici (1 mm; 1cm), pa je prema tome njezin intenzitet u vremenu T :

$$i_e = \frac{1}{T} \quad (4.194)$$

Ordinate jediničnoga hidrograma u , su, u skladu s izrazom (4.188):

$$u_i = \frac{Q_i}{P_e}$$

Ukoliko se primijeni ulaz $P_e = 1$ u trajanju T , onda se izlazna veličina, odnosno ordinata jediničnoga hidrograma, opisuje kao:

$$u = u(T, t) \quad (4.195)$$

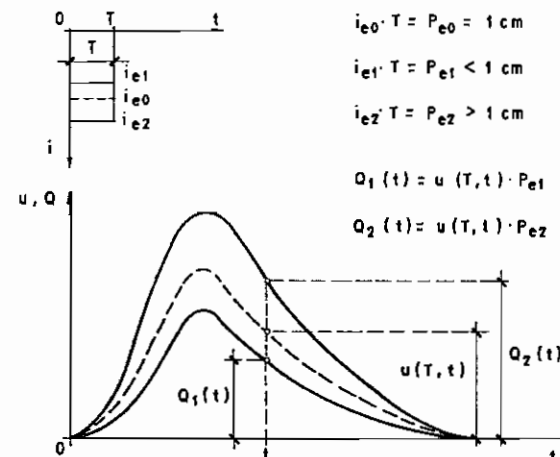
Jedinice u kojima se izražavaju ordinate jediničnoga hidrograma u su ($m^3/s/mm$), ($l/s/mm$), ($m^3/s/cm$) i ($l/s/cm$). Ukoliko se ordinate u izraze kao specifični dotok sa sliva ($m^3/s/mm/km^2$), onda je površina ispod jediničnoga hidrograma $W = 1$.

Kod jediničnoga se hidrograma jednako kao i kod stvarnoga (prikazanog na slici 4.64), vrijeme t_p od težišta hijetograma do maksimalne ordinate jediničnoga hidrograma u_{mp} naziva vremenom zakašnjenja.

Ako se u razdoblju $(0, T)$ pojavi efektivna kiša $P_e \leq 1$, onda je, na temelju principa proporcionalnosti, ordinata odgovarajućega hidrograma otjecanja u trenutku t :

$$Q(t) = P_e u(T, t); \quad (4.196)$$

kao što je prikazano na slici 4.101.



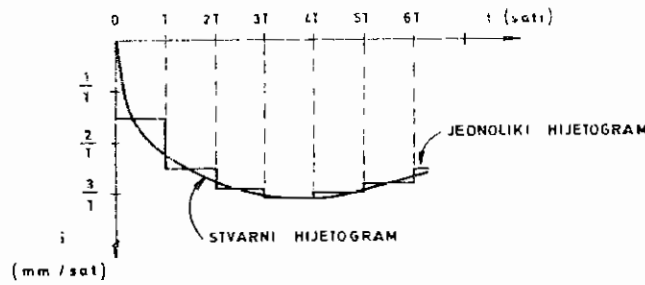
Slika 4.101 Jedinični hidrogram i hidrogrami otjecanja za različite veličine efektivne kiše P_e u vremenu T (S. Jovanović, 1975.).

Bruto se kiša dobije na temelju mjerenja pale kiše na čitavu slivnome području. Kao posljedica bruto kiše, na osnovi motrenja i mjerenja otjecanja vode na izlaznome se profilu određuje efektivna ili neto kiša.

Na malim slivovima jaki pljuskovi kratka trajanja daju maksimalne velike vode. Raspored i veličina pale oborine nisu jednoliki po cijelome području. Ako se kišomjerna stanica nalazi u središtu oborine, onda, prema A. Frühlingu, intenzitet oborine pada s povećanjem udaljenosti od centra, tako da je 1 km od stanice $i = 50\%$ onoga intenziteta koji je zabilježen na stanici. Nalazi li se na slivu nekoliko kišomjernih stanica, može se uzeti prosječna visina izmjerenih oborina.

Najprije je potrebno odrediti veličinu jednolikoga intenziteta oborine. Hijetogram redovito ima oblik kakav je prikazan na slici 4.102.

Uvjet da je kiša konstantna intenziteta i tijekom vremena T ravnomjerno raspoređena po slivu ne može biti u cijelosti zadovoljen kada se radi o prirodnim slivovima. Time se isključuje otjecanje izazvano topljenjem snijega i slučajeve kada je trajanje efektivne kiše dulje od vremena podizanja T_p . Pretpostavka da intenzitet efektivne kiše mora biti ujednačen uvjetuje da se odabiru pljuskovi kratka trajanja, jer oni pružaju veću vjerojatnost da će intenzitet biti približno jednolik.



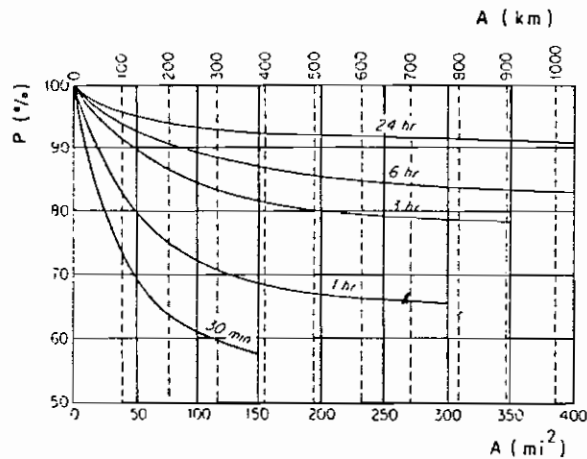
Slika 4.102 Stvarni i jednoliki hijetogram

Vrlo je važno raspolagati neprekidnim podacima o mjerenim kišama - ombrogramima - naročito u slučaju malih slivova. Dnevne količine oborine mogu se rabiti na velikim slivovima, odnosno na slivovima s dugim vremenom prikupljanja T_p .

Kriteriji za određivanje vremena jednolika intenziteta T u funkciji vremena podizanja T_p su različiti, a svode se na to da T mora biti znatno manji od T_p . Za slivove površinc manje od 300 km² može se uzeti:

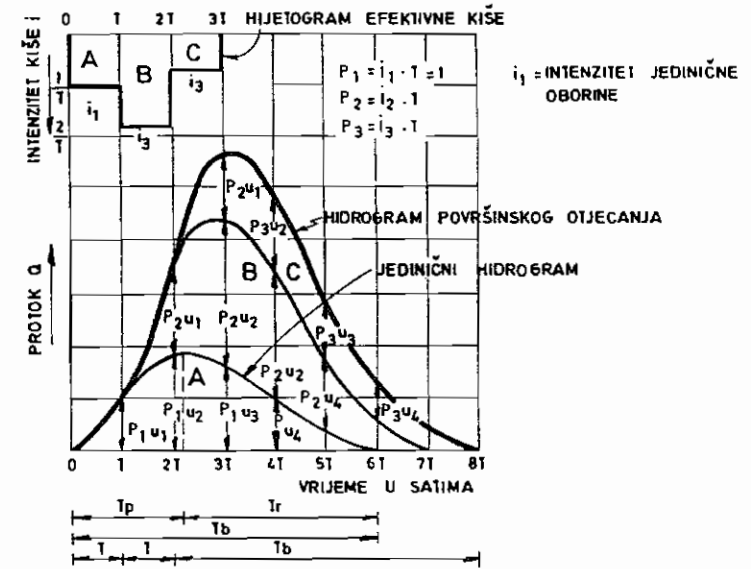
$$T = \frac{1}{2} T_p \quad (4.197)$$

Vrlo često se na malim slivovima oborine promatraju samo u jednoj točki sliva, odnosno na slivu postoji samo jedna kišomjerna stanica. U. S. Weather Bureau preporuča da se njihove vrijednosti umanje za cijeli sliv prema dijagramu kakav je dan na slici 4.103 (V. T. Chow i dr. 1964., R. K. Linsley i dr., 1975.).



Slika 4.103 Krivulje smanjivanja oborina (R. K. Linsley i dr., 1975.)

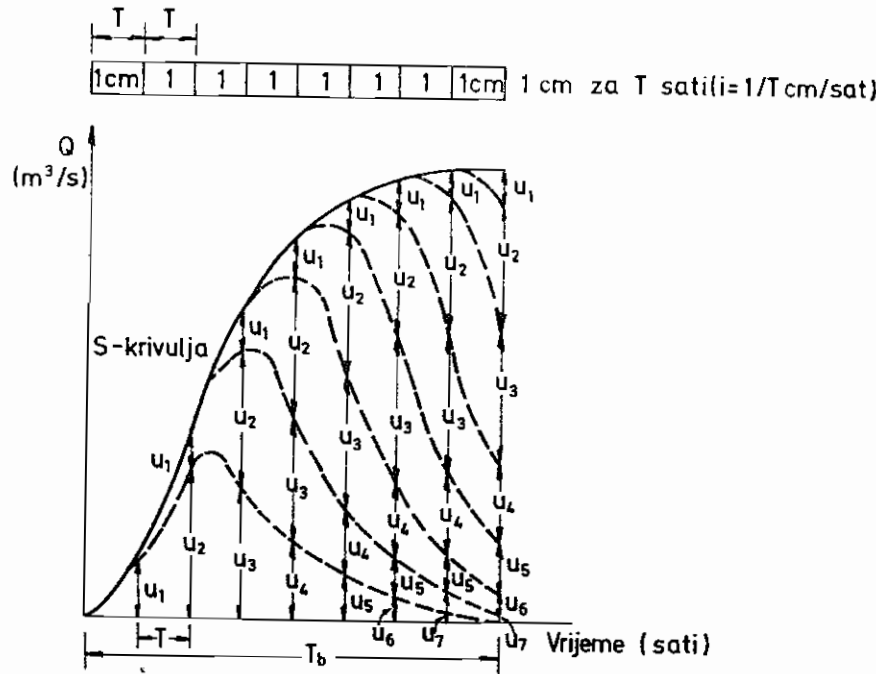
Na slici 4.104 prikazano je dobivanje složenoga hidrograma površinskoga otjecanja iz jediničnoga hidrograma na temelju kiša različita intenziteta. Slučaj sa slike 4.104 počinje s T -satnom oborinom intenziteta $1/T$ i rezultat te oborine je jedinični hidrogram volumena A . Hidrogrami B i C pribrajaju se hidrogramu A . Ordinate jediničnoga hidrograma proporcionalne su kiši - onoliko puta koliko je kišni intenzitet veći od jediničnoga kišnog intenziteta, toliko su puta ordinate stvarnoga hidrograma veće od ordinata jediničnoga hidrograma. Hidrogram otjecanja uslijed ukupne oborine nastaje superpozicijom ordinata hidrograma A , B i C , koji su posljedica pojedinih T -satnih kišnih intenziteta (u ovome je primjeru hidrogram A ujedno i jedinični hidrogram).



Slika 4.104 Dobivanje hidrograma otjecanja iz jediničnoga hidrograma

Ukoliko je kiša dugotrajna, neprekidana i ravnomjerna može se, uz primjenu principa superpozicije i proporcionalnosti, konstruirati hidrogram otjecanja na osnovi S -krivulje ili S -hidrograma. S -hidrogram je hidrogram koji je posljedica neprekidne i ravnomjerne kiše intenziteta $\frac{1}{T}$ (mm/sat) beskonačna trajanja, a prikazan je na slici 4.105.

S -krivulja omogućava da se odredi jedinični hidrogram ravnomjerne neprekinute oborine bilo kojega trajanja. Na sličnome principu može se definirati hidrogram otjecanja bilo kojega trajanja i bilo kojega intenziteta jednolika u vremenu T . Ordinate S -hidrograma nakon nekoga vremena dostignu vrijednost koju efektivna oborina ima u trenutku kada je postignuta ravnoteža.



Slika 4.105 S-hidrogram

Visine efektivnih oborina su:

$$P_{e1} = i_{e1} T \quad (4.198a)$$

$$P_{e2} = i_{e2} T \quad (4.198b)$$

$$P_{en} = i_{en} T \quad (4.198c)$$

i te veličine su poznate. Također su poznate i ordinate jediničnoga hidrograma:

u_1, u_2, \dots, u_{m+1} .

Za ordinate ukupnoga hidrograma može se napisati sustav linearnih jednadžbi:

$$Q_1 = P_{e1} u_1 \quad (4.199a)$$

$$Q_2 = P_{e2} u_1 + P_{e1} u_2 \quad (4.199b)$$

$$Q_n = P_{en} u_1 + P_{e(n-1)} u_2 + \dots + P_{e1} u_n \quad (4.199c)$$

$$Q_{m+n} = P_{en} u_{m+1} \quad (4.199d)$$

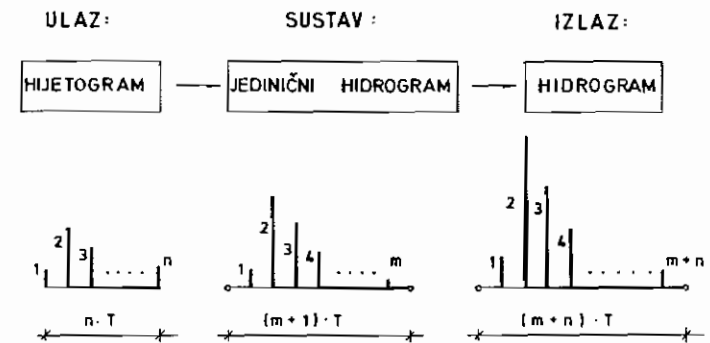
Proces diskretne konvolucije (povezanosti uz prekide) efektivne kiše s T -satnim jediničnim hidrogramom može se prikazati kao umnožak matrice i vektora:

$$P_e u = Q \quad (4.200)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} P_{e1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{e2} & P_{e1} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{en} & P_{e(n-1)} & \dots & P_{e1} & \dots & 0 \\ 0 & P_{en} & P_{e(n-1)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & P_{en} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ \vdots \\ u_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \\ \vdots \\ Q_{m+1} \\ \vdots \\ Q_{m+n} \end{bmatrix} \quad (4.201)$$

Diskretan (a to znači kada se mogu dogoditi samo neki određeni slučajni događaji) prikaz efektivne kiše, jediničnoga hidrograma i hidrograma dan je na slici 4.106.



Slika 4.106 Diskretan prikaz hijetograma, jediničnoga hidrograma i hidrograma otjecanja

Ako se, kao na ovoj shemi, jedinični hidrogram nalazi u memoriji u elektroničkom računalu, a na taj sustav se djeluje hijetogramom, na izlazu će se dobiti hidrogram otjecanja. Na taj se način može vrlo brzo - čim se zabilježi pala oborina - dobiti hidrogram kojim se prognozira otjecanje, a iz njega potom volumen vodnoga vala V_d i maksimalni protok Q_M .

Prema tome, ako su poznati samo visina i raspored kiše, na osnovi jediničnoga hidrograma može se odrediti hidrogram otjecanja, odnosno Q_M i V_d .

U praksi se jedinični hidrogram primjenjuje za:

1. prognoze poplavnih valova
2. izračunavanje velikih vodnih valova (probabilističke prognoze)
3. ocjenjivanje utjecaja zahvata u riječnome koritu
4. određivanje raspodjele otjecanja u vremenu.

Pouzdanost jediničnoga hidrograma pada povećavanjem veličine sliva, budući da se porastom površine sliva gubi ravnomjernost kiša. Oblik sliva također igra važnu ulogu u raspoređivanju oborine. Sliv s faktorom koncentracije bližim jedinici moći će, s obzirom na ujednačenost rasporeda oborina, imati veću površinu. Najveća granična vrijednost površine sliva dovoljne za upotrebu jediničnoga hidrograma je oko 10.000 km². U praksi je površina sliva dovoljna za upotrebu jediničnoga hidrograma redovito ograničena do 5000 km². Dakako, što je sliv manji, primjena metode jediničnoga hidrograma je pouzdanija.

Kao što je ranije bilo spomenuto, metodom jediničnoga hidrograma sliv se tretira kao stacionaran, linearan sustav, dok je u stvarnosti sliv nelinearan sustav, što znači da su zakonitosti promjena karakterističnih parametara sliva nelinearnih osobina.

Veličina i oblik vodnoga vala ovise o intenzitetu oborine. Veliki vodni valovi mogu nastati uslijed jakih kiša, topljenja snijega i kombinacijom djelovanja kiša i topljenja snijega. Najveće velike vode malih slivova (veličine otprilike do 500 km²) najčešće nastaju uslijed lokalnih kiša vrlo jaka intenziteta. Vrlo velik broj malih slivova također se u slučaju djelovanja jakih kiša ponaša kao stacionaran i linearan sustav, tako da za njih vrijede zakoni superpozicije i proporcionalnosti. Zbog toga je moguće metodom jediničnoga hidrograma doći do pouzdanih vrijednosti velikih voda malih slivova.

Često puta su oblici i volumeni velikih vodnih valova najvažniji pokazatelji velikih voda koje hidrološka obrada treba dati. Kako su jedinični hidrogrami dobiveni na temelju stvarnih vodnih valova, vrlo je jednostavno preko njih odrediti hidrograme najnepovoljnijih vodnih valova. To je naročito pouzdano u slučaju malih slivova, gdje se najveći vodni valovi pojavljuju kao jednostruki (zasebni) vodni valovi.

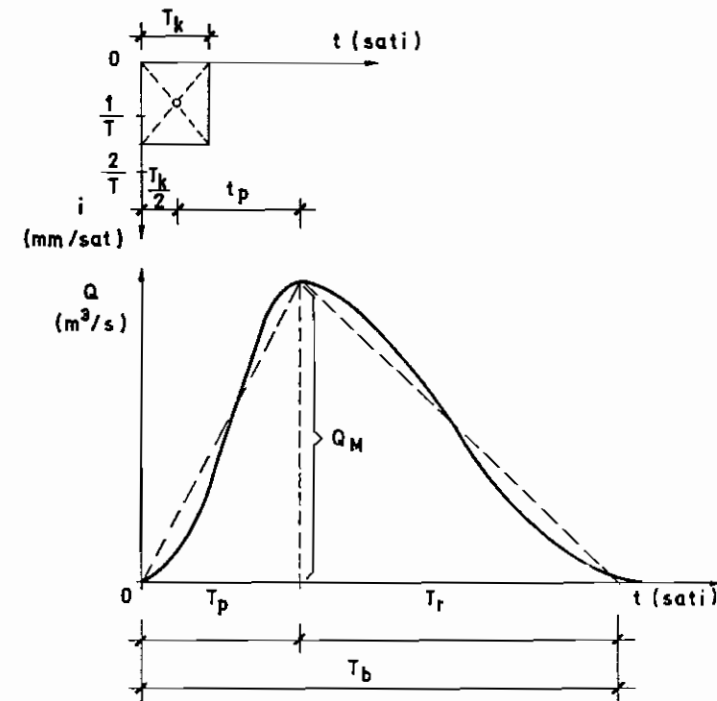
Upotreba računala pogoduje daljnjem razvijanju i usavršavanju metode jediničnoga hidrograma. Ako se vrijednost tek zabilježene jake oborine na slivu odmah unese u računalo u čijoj je memoriji pohranjen odgovarajući jedinični hidrogram, moguće je, prije nego što se vrh vodnoga vala pojavi u protjecajnom profilu, proračunati i poslati natrag na sliv podatke o vodnome valu koji će izazvati ta oborina. Takav postupak ima smisla primjenjivati na slivovima s dugim vremenima podizanja vodnih valova.

Prema tome, metoda jediničnoga hidrograma se opravdano primjenjuje u hidrološkoj praksi. Njezine glavne prednosti u odnosu na druge postupke su brzina, jednostavnost i točnost.

Gotovo je uvijek moguće na slivovima o kojima nema dovoljno podataka za statističku obradu organizirati kratkotrajna mjerenja i mjerenja hidroloških veličina. Parametri koji se primjenom metode jediničnoga hidrograma mogu odrediti iz takvih podataka, redovito su znatno pouzdaniji od pokazatelja dobivenih na osnovi iskustvenih formula. Uvjet za to jest da unutar toga kratkotrajnog razdoblja opažanja treba biti zabilježen i reprezentativni vodni val, na osnovi kojega se onda može odrediti mjero-davnan jedinični hidrogram, a potrebno je i raspolagati s podacima o mjerodavnim kišama.

Iz metode jediničnoga hidrograma izvodi se umjetni (sintetički) jedinični hidrogram za slivove o kojima nema podataka dobivenih mjerenjem i mjerjenjem. Oblik i veličina umjetnoga hidrograma određuju se na osnovi analize fizikalnih i drugih karakteristika sliva na taj način da se koriste ovisnosti koje daju vezu između različitih karakteristika sliva i oblika hidrograma otjecanja. Najčešće se hidrogram može aproksimirati trokutom. Na temelju hidrograma u obliku trokuta moguće je po potrebi konstruirati i odgovarajući krivocrtni hidrogram.

Na slici 4.107 prikazan je jednostavan slučaj aproksimacije stvarnoga hidrograma trokutom.



Slika 4.107 Aproksimacija stvarnoga hidrograma trokutom

Da bi aproksimacija stvarnoga hidrograma trokutom bila realna, moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

1. površina ispod krivulje hidrograma i površina trokuta kojim se zamjenjuje hidrogram moraju biti jednake, odnosno volumen stvarnoga vodnog vala V_d i volumen vodnoga vala u obliku trokuta V_t moraju biti jednaki: $V_d = V_t$
2. vršni protok stvarnoga hidrograma Q_M mora biti jednak maksimalnome protoku hidrograma u obliku trokuta $Q_M = Q_{M_t}$

3. vremena podizanja obaju hidrograma moraju biti jednaka:

$$T_p = T_{p'} = \frac{T_k}{2} + t_p$$

4. vremena zakašnjenja obaju hidrograma moraju biti jednaka: $t_p = t_{p'}$
Za hidrogram u obliku trokuta vrijedi:

$$P_e A = \frac{Q_M T_b}{2} \quad (4.202)$$

Iz izraza (4.202) vršni protok hidrograma u obliku trokuta je:

$$Q_M = \frac{2 P_e A}{T_b} \quad (4.203)$$

Najčešće se rabe sljedeće jedinice: za protok Q (m^3/s), za efektivnu oborinu P_e (mm), za površinu sliva A (km^2) i za vremensku bazu hidrograma T_b (sati). Stoga se izraz (4.203) može srediti:

$$Q_M = \frac{10^6}{10^3 \cdot 3600} \frac{2 P_e A}{T_b} = \frac{0,56 P_e A}{T_b} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.204)$$

Za $P_e = 1$ mm vršna ordinata jediničnoga hidrograma je:

$$u_M = \frac{0,56 A}{T_b} = \frac{0,56 A}{T_p (1+k)} = \frac{0,56 A}{\left(\frac{T_k}{2} + t_p\right) (1+k)} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (4.205)$$

gdje je $k = \frac{T_r}{T_p}$ odnos vremena opadanja i vremena podizanja hidrograma vodnoga vala.

Maksimalni specifični dotok jediničnoga hidrograma (specifično otjecanje vršne ordinata jediničnoga hidrograma) je:

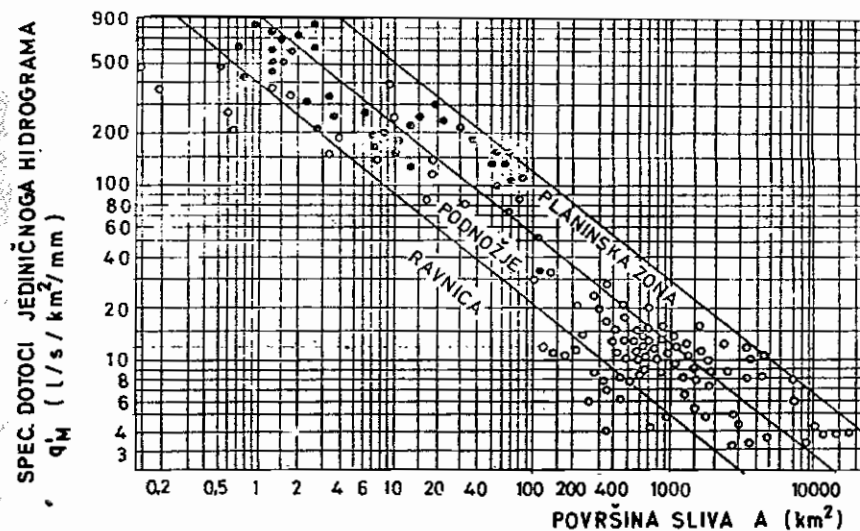
$$q_M = \frac{u_M}{A} = \frac{0,56 A}{T_p A} = \frac{0,56}{T_b} = \frac{560}{T_b} \quad (\text{l/s}/\text{mm}/\text{km}^2) \quad (4.206)$$

Vrijednost vršne ordinata jediničnoga hidrograma u_M ovisi samo o trajanju kiše T_k , jer se uzima da su vrijeme zakašnjenja t_p i odnos $\frac{T_r}{T_p} = k$ konstantni za razmatrani sliv veličine A .

Vrijednosti najvećih ordinata jediničnih hidrograma mogu se međusobno uspoređivati na temelju odgovarajućih maksimalnih specifičnih dotoka jediničnih hidrograma q_M . Na taj se način može ispitati pouzdanost jediničnoga hidrograma u slučajevima kada su podaci za njegovu izradu bili nepouzdana ili nedostatni, ili u slučajevima kad

se rabi umjetni (sintetični) jedinični hidrogram.

Na slici 4.108 prikazane su na dijagramu u logaritamskome mjerilu vrijednosti maksimalnih specifičnih dotoka jediničnih hidrograma q_M u ovisnosti o površinama slivova A različitih slivova.



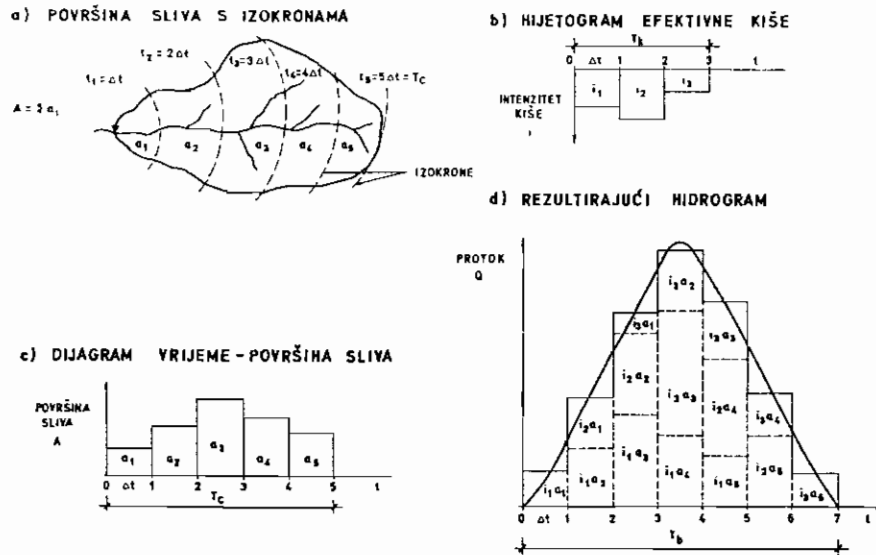
Slika 4.108 Maksimalni specifični dotoci jediničnih hidrograma u ovisnosti o površinama slivova (S. Jovanović, 1975.)

4.16.4 Metoda izokrona

Izokrone otjecanja ili **izokrone** su linije jednakih vremena otjecanja vode sa sliva. Osnovna je pretpostavka metode izokrona da voda s pojedinih dijelova sliva stiže do izlaznoga profila vodotoka u različitim vremenskim intervalima Δt . Na temelju površine sliva s izokronama, hijetograma efektivne oborine i dijagrama vrijeme-površina određuje se rezultirajući hidrogram otjecanja. Na slici 4.109 prikazano je određivanje hidrograma otjecanja metodom izokrona.

Postupak određivanja hidrograma površinskoga otjecanja metodom izokrona provodi se na sljedeći način:

- Najprije se na slivu s kojega se otjecanje računa konstruiraju linije jednakih vremena otjecanja - izokrone. Vrijeme otjecanja vode od jedne do druge izokrone je Δt , a ukupno vrijeme otjecanja od najudaljenije izokrone do izlaznoga profila jednako je vremenu koncentracije sliva T_c (slika 4.109a). Izokronama je sliv podijeljen na manje površine.



Slika 4.109 Određivanje hidrograma površinskoga otjecanja metodom izokrona

- Nakon toga se konstruira hijetogram efektivne kiše konstantnih intenziteta u vremenima Δt (slika 4.109b). Temeljna je pretpostavka da je na cijeli sliv pala kiša i da su intenziteti efektivne kiše i_1, i_2, \dots, i_k u vremenskim razmacima Δt . Trajanje efektivne kiše T_k je:

$$T_k = k \Delta t = T_c \quad (4.207)$$

gdje je T_c vrijeme koncentracije sliva, definirano izrazom (4.152).

- Ispod hijetograma se u dijagram vrijeme-površina nanese površine sliva između pojedinih izokrona a_1, a_2, \dots, a_k . Površine između izokrona se nanose u razmacima Δt , a vrijeme za sve površine od a_1 do a_k jednako je vremenu koncentracije sliva T_c (slika 4.109c).
- Sada se može pristupiti izradi hidrograma otjecanja, i to sljedećim redoslijedom: u prvoj jedinici vremena Δt do izlaznoga profila dolazi voda s površine a_1 , uslijed efektivne kiše intenziteta i_1 , pa je protok na kraju vremena Δt :

$$Q_1 = i_1 a_1 \quad (4.208)$$

Na kraju druge vremenske jedinice, nakon $2\Delta t$, do izlaznoga profila dolazi voda s površine a_2 , na koju je pala kiša intenziteta i_2 (u drugoj vremenskoj jedinici Δt) te voda s površine a_1 , na koju je u prvoj vremenskoj jedinici pala kiša intenziteta i_1 , pa je protok nakon druge vremenske jedinice:

$$Q_2 = i_2 a_1 + i_1 a_2 \quad (4.209)$$

Na isti se način dolazi do protoka na kraju treće vremenske jedinice:

$$Q_3 = i_3 a_1 + i_2 a_2 + i_1 a_3 \quad (4.210)$$

Postupak konstruiranja hidrograma prikazan je na slici 4.109d, a protok u i -tome trenutku je:

$$Q_i = \sum_{k=1}^{i-1} i_k a_{i-k+1} = \sum_{k=1}^{i-1} i_{i-k+1} a_k \quad (4.211)$$

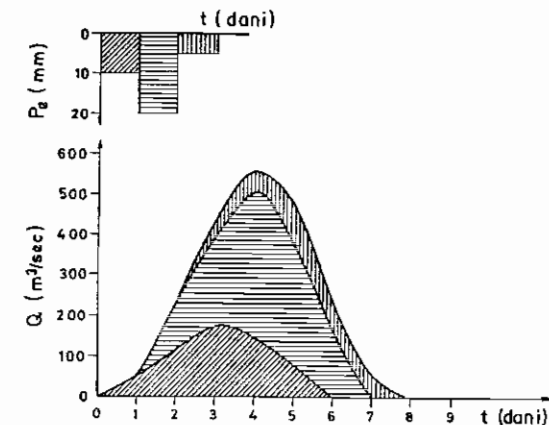
Vremenska baza hidrograma površinskoga otjecanja, odnosno ukupno trajanje površinskoga otjecanja je:

$$T_b = T_c + T_k - \Delta t \quad (4.212)$$

U primjeru na slici 4.109 trajanje kiše je $T_k = 3\Delta t$, a vrijeme koncentracije sliva je $T_c = 5\Delta t$, pa je stoga vremenska baza hidrograma površinskoga otjecanja:

$$T_b = 5\Delta t + 3\Delta t - \Delta t = 7\Delta t$$

Na slici 4.110 prikazani su hijetogram i hidrogram konstruirani metodom izokrona za jedan sliv veličine $A = 5000 \text{ km}^2$. Usvojena vremenska jedinica je $\Delta t = 1$ dan, a na hidrogramu je prikazan i utjecaj svake jednodnevne kiše.

Slika 4.110 Hidrogram otjecanja metodom izokrona za sliv $A = 5000 \text{ km}^2$; $\Delta t = 1$ dan (S. Jovanović, 1975.)

Za razmatrani sliv veličine $A = 5000 \text{ km}^2$ vrijeme koncentracije je $T_c = 5$ dana (120 sati). Prema tome bi kiša po čitavu slivu trebala padati duže od pet dana kako bi se dostiglo stanje ravnoteže (S -krivulja). U našim klimatskim uvjetima vjerojatnost ovakve pojave je vrlo mala.

O. Bonacci i S. Roglić (1981.) izveli su primjenom dinamičkoga programiranja matematički model za otjecanje vode po površini terena i vodotoku te definiranje izokrona:

Sliv se prekrije kvadratnom mrežom. U svakome čvoru mreže definira se visina terena. Vodotok se aproksimira razlomljenom linijom kroz čvorove s određenima visinama. U prvome se koraku određuju vremena otjecanja za čvorove koji pripadaju vodotoku. Nakon toga se određuju vremena otjecanja za čvorove čiji bar jedan susjedni čvor pripada vodotoku, a naposljetku se određuju vremena i smjerovi tečenja za ostale čvorove na slivu. Postupak se provodi iterativno: za i -ti čvor odrede se svi mogući smjerovi otjecanja - što znači da se tečenje vode može pojaviti samo prema susjednim čvorovima manje visine od i -tog čvora. Postupak se ponavlja dok se ne odrede vremena otjecanja vode u svim čvorovima sliva.

Brzina tečenja vode u koritu vodotoka v_k određuje se prema Manningovoj formuli (hidraulički radijus R zamijenjen je srednjom dubinom \bar{h}).

$$v_k = \frac{1}{n_k} \bar{h}^{2/3} I^{1/2} \quad (4.213)$$

gdje je n_k Manningov koeficijent hrapavosti korita vodotoka, \bar{h} (m) srednja dubina vode u koritu, a I pad energetske linije koji se u primjeni zamjenjuje padom dna vodotoka (uz pretpostavku jednolikoga tečenja u koritu).

Brzina tečenja vode po terenu v_t određena je izrazom:

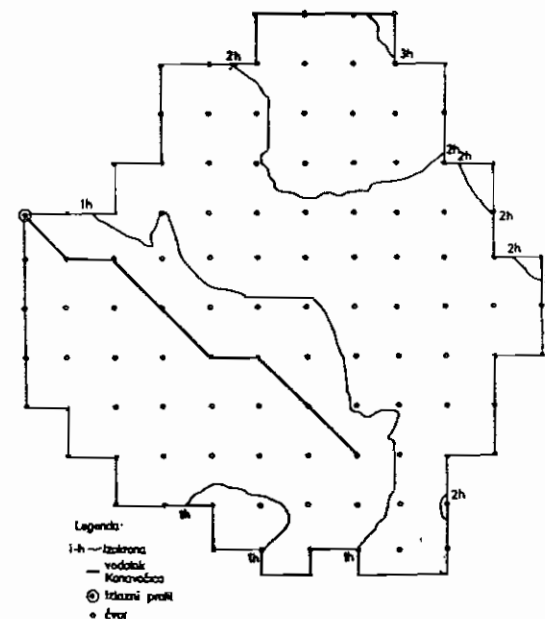
$$v_t = \frac{1}{n_t} D^{2/3} S^{1/2} \quad (4.214)$$

gdje je n_t Manningov koeficijent hrapavosti terena po kojemu otječe voda, D (m) srednja dubina sloja vode koja se po terenu slijeva, a S pad terena.

Na slici 4.111 prikazani su rezultati modela primijenjena na sliv Konavočice veličine $A = 32,8 \text{ km}^2$. Aproksimacija je provedena kvadratnom mrežom s 21×23 čvora na udaljenosti od 315 m. Za korito je usvojen Manningov koeficijent $n_k = 0,022$, a za teren $n_t = 0,050$. Usvojeno je da je srednja dubina sloja vode koja se slijeva po terenu $D = 0,02 \text{ m}$.

Oblici hidrograma prikazanih na slikama 4.109 i 4.110 nisu realni, jer metoda izokrona uzima u obzir samo inercijalne osobine sliva (zakašnjenje). Naime, potrebno je obraditi i utjecaj retencijske sposobnosti sliva, jer sliv akumulira određenu količinu vode. Hidrogram dobiven metodom izokrona moguće je određenim metodama transformirati (kroz linearni ili nelinearni rezervoar).

Prema tome, osnovni su problemi u vezi s primjenom metode izokrona određivanje položaja izokrona na slivu, veličine površina sliva između pojedinih izokrona i vremena



Slika 4.111 Izokrone na slivu Konavočice definirane dinamičkim programiranjem (O. Bonacci i S. Roglić, 1981.)

koncentracije sliva. U vremenu koncentracije sadržano je vrijeme otjecanja vode po terenu i vrijeme otjecanja u koritu vodotoka. Vrijeme koncentracije ovisi o obliku, veličini i padu sliva, intenzitetu, trajanju i raspodjeli kiše, te o obraštenosti sliva.

Oblik se hidrograma može popraviti različitim transformacijama. Polazi se od Saint-Venantove parcijalne diferencijalne jednadžbe kojom se opisuje nestacionarno tečenje. Na toj su osnovi razvijene metode retardacije kojima se transformira bidrogram vodnoga vala: metoda Puls, koeficijent-metoda, metoda Muskingum, Kalininova metoda, sukcesivna "lag"-metoda i sl. (D. Srebrenović, 1986.; R. K. Linsley i dr., 1988.).

4.16.5 Iskustvene (empirijske) formule

Iskustvena ili empirijska formula (za izračunavanje velikih voda) je formula koja izražava maksimum (najveću vrijednost) protoka kao funkcije veličine sliva i drugih čimbenika bitnih za otjecanje. Osim maksimalnih protoka - za koje je izvedeno najviše iskustvenih izraza - na taj se način može izračunavati i neke druge hidrološke parametre, npr. prosječni protok (na osnovi odnosa efektivne i bruto oborine) i pronos lebdećega (suspendiranog) nanosa.

U ovome su poglavlju prikazane neke od iskustvenih formula za izračun velikih voda, pri čemu je prednost dana jednostavnim formulama.

Formula koja se u svijetu najčešće rabi za definiranje maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja, a bila je spomenuta u poglavlju 1.3, je racionalna formula, pa ju se prvu opisuje.

a) **Racionalna formula ili racionalna metoda** je formula za izračunavanje maksimalnih protoka s malih slivova kao umnoška slivne površine, maksimalna kišnog intenziteta i racionalnoga koeficijenta.

Osnovna postavka racionalne metode jest da za vrijeme olujnih oborina jednolika intenziteta i jednolike raspodjele na slivu dolazi do maksimalna protoka vodnoga vala u trenutku kada cijela površina sliva sudjeluje u postanku hidrograma. Pod tim se vremenom podrazumijeva vrijeme koncentracije T_c , odnosno vrijeme potrebno da voda s najudaljenije točke sliva stigne do mjesta gdje se izračunava protok ili do izlaznoga profila.

Racionalna je formula definirana izrazom:

$$Q_M = C i A \quad (4.215)$$

gdje je Q_M maksimalni (vršni) protok, C racionalni koeficijent, i intenzitet kiše, a A površina sliva.

Ako se uzmu jedinice Q_M (m^3/s), i (mm/sat) i A (km^2), onda racionalna formula ima oblik:

$$Q_M = 0,278 C i A \quad (4.216)$$

za Q_M (m^3/s), A (km^2) i i (mm/min) je:

$$Q_M = 16,67 C i A \quad (4.216a)$$

Mjerodavan intenzitet oborine i je funkcija vremena koncentracije T_c i povratnoga razdoblja p :

$$i = i(T_c, p) \quad (4.217)$$

Vrijeme koncentracije T_c može se računati prema iskustvenome izrazu koji je dao Z. P. Kirpieh (1940.):

$$T_c = 0,00032 L^{0,77} I_{max}^{-0,385} \text{ (sati)} \quad (4.218)$$

gdje je L (m) najveća duljina putovanja vode, pad $I_{max} = \Delta H/L$, a ΔH (m) je visinska razlika između najviše točke na slivu i protjecajnoga profila.

Ukoliko se vrijeme koncentracije povezuje s brzinom tečenja u vodotoku, ono će se skraćivati s povećanjem brzine, a ta brzina će se povećavati s povećanjem maksimalnih protoka, odnosno produljenjem povratnih razdoblja. Za vrijeme koncentracije se u skladu s (4.152) približno može uzeti:

$$T_c = \frac{L}{v}$$

gdje je L (m) duljina glavnoga vodotoka od razvodnice sliva do izlaznoga profila, a v (m/s) je brzina vode u vodotoku.

Brzina se vode u vodotoku može odrediti na osnovi Chezyjeve, Manningove ili Stricklerove formule (2.114):

$$v = K \bar{h}^{2/3} I^{1/2}$$

i to ukoliko je hidraulički radijus $R = \bar{h}$, a \bar{h} je srednja dubina u vodotoku.

Ako o vodotoku za čiji izračun se rabi racionalna formula nema dovoljno podataka za izračunavanje brzine prema Chezyjevoj, Manningovoj ili Stricklerovoj formuli, onda se brzina otjecanja može izračunati prema izrazu koji je dao I. I. Herheulidze (1947):

$$v_p = (1,6 + 1,10 \log p)^4 \sqrt{I_{max}} \text{ (m/s)} \quad (4.219)$$

p (god.) je povratno razdoblje, a prema izrazu (4.76) $I_{max} = \Delta H/L$, gdje je ΔH (m) visinska razlika između najviše točke na slivu i protjecajnoga profila, a L (m) je duljina vodotoka, kako je prikazano na slici 4.23.

U razmatranjima mogu korisno poslužiti orijentacijske vrijednosti brzina tečenja vode ruskih rijeka, koje su dane u tablici 4.23.

Za racionalni koeficijent C mogu se uzeti prosječne vrijednosti na osnovi topografskih uvjeta i vegetacije različitih vrsta tla na slivu, iznesene u tablici 4.24. Vrijednosti racionalnih koeficijenata u tablici 4.24 preuzete su iz stručne literature (V. T. Chow i dr., 1964., S. Gavrilović, 1976., K. N. Mutreja, 1986.).

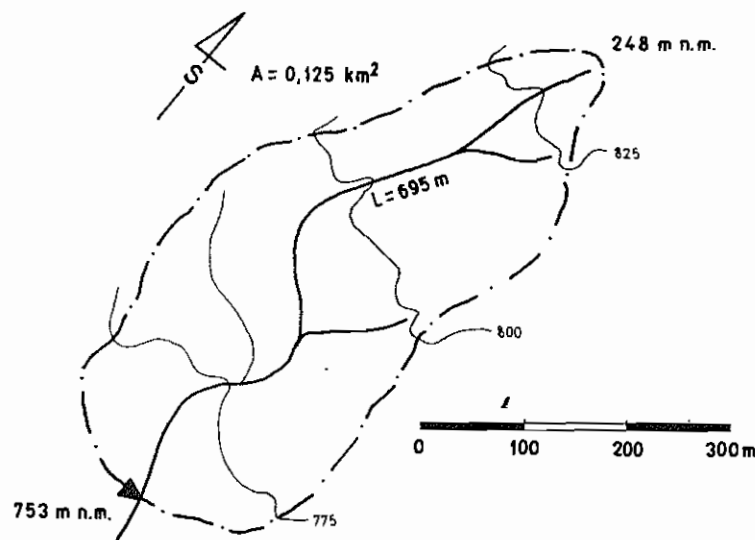
Tablica 4.23 Orijetacijske brzine tečenja u ruskima vodotocima (A. A. Luščeva, 1953.)

Osobine vodotoka i reljefa	Brzina vode v (m/s)	
	Mali vodotoci dubine manje od 1 m	Ostali vodotoci
tokovi u močvarama	0,3 - 0,5	0,4 - 0,8
ravničarski	0,8 - 1,2	1,0 - 1,5
brdski	1,5 - 2,5	2,0 - 2,5
planinski	2,5 - 3,5	2,0 - 2,4

Izračunavanje maksimalnih protoka 5-, 10- i 100-godišnjih povratnih razdoblja prema racionalnoj formuli opisano je na primjeru malena šumskog sliva jednoga potoka u Gorskome kotaru blizu Delnica. Situacija sliva prikazana je na slici 4.112.

Tablica 4.24 Prosječne vrijednosti racionalnoga koeficijenta C (prema V. T. Chow i dr., 1964., S. Gavrilović, 1976.; K. N. Mutreja, 1986.)

Vegetacija i topografski uvjeti			pijesak	mulj, glina	zbijena glina
1. šumska zemljišta	a) ravnice	0 - 5%	0,10	0,30	0,40
	b) brežuljci	5 - 15%	0,25	0,35	0,50
	c) brda	15 - 30%	0,30	0,50	0,60
2. pašnjaci i trava	a) ravnice	0 - 5%	0,10	0,30	0,40
	b) brežuljci	5 - 15%	0,16	0,36	0,55
	c) brda	15 - 30%	0,22	0,42	0,60
3. obradiva zemljišta	a) ravnice	0 - 5%	0,30	0,50	0,60
	b) brežuljci	5 - 15%	0,40	0,60	0,70
	c) brda	15 - 30%	0,52	0,72	0,82
4. naselja	a) ravnice 0 - 5%		nepropusnost zemljišta:		
	b) brežuljci 5 - 15%		30%	50%	70%
5. parkovi, groblja igrališta rezidencijalne stambene površine industrijske zone terase, krovovi za vožnju i prolaženje gradovi u ravnici, asfalt, beton, kosi krovovi			0,10 - 0,25		
			0,20 - 0,35		
			0,30 - 0,70		
			0,50 - 0,90		
			0,75 - 0,85		
		0,75 - 0,95			



Slika 4.112 Situacija sliva potoka kod Delnica

Na temelju topografske podloge u mjerilu 1:5000 - koja je dostatna za tako malen sliv - određena je veličina sliva $A = 0,125 \text{ km}^2$; duljina vodotoka $L = 695 \text{ m}$ i pad vodotoka I_{max} , koji je, prema (4.76):

$$I_{max} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} = \frac{848 - 753}{695} = 0,137 = 13,7\%$$

Za izračun mjerodavnih kišnih intenziteta korištene su klimatske funkcije 5-, 10- i 100- god. povratnoga razdoblja koje je definirao J. Rubinić (1989.) za potrebe Hrvatskih cesta. Na razmatranome području maksimalna kiša 5-godišnjega povratnog razdoblja je:

$$P_5 = 58,2 T_c^{0,633} \quad (\text{mm}) \quad (4.220)$$

10-godišnjega povratnog razdoblja:

$$P_{10} = 67,3 T_c^{0,663} \quad (4.221)$$

i 100-godišnjega povratnog razdoblja:

$$P_{100} = 107,4 T_c^{0,728} \quad (4.222)$$

Brzina otjecanja 5-godišnje velike vode je, prema (4.219):

$$v_5 = (1,60 + 1,10 \log p)^4 \sqrt[3]{I_{max}} = (1,60 + 1,10 \log 5)^4 \sqrt[3]{0,137} = 1,44 \text{ m/s}$$

Vrijeme koncentracije 5-godišnje velike vode je, prema (4.152):

$$T_{c5} = \frac{L}{v_5} = \frac{695}{1,44} = 483 \text{ s} = 0,134 \text{ sata}$$

Mjerodavni 5-godišnji intenzitet kiše je:

$$i_5 = \frac{P_5}{T_{c5}} = 58,2 \cdot \frac{0,134^{0,633}}{0,134} = 122 \text{ mm/sat}$$

Za pad vodotoka $I_{max} = 13,7\%$ i karakteristike terena odabran je iz tablice 4.24 racionalni koeficijent $C = 0,45$.

Prema tome, 5-godišnji maksimalni protok je:

$$Q_{M5} = 0,278 C i_5 A = 0,278 \cdot 0,45 \cdot 122 \cdot 0,125 = 1,91 \text{ m}^3/\text{s}$$

Na jednak način dobije se za 10-godišnji maksimalni protok $v_{100} = 1,64$ m/s; $T_{c10} = 0,118$ sata; $i_{10} = 138$ mm/sat pa je:

$$Q_{M10} = 0,278 \cdot 0,45 \cdot 138 \cdot 0,125 = 2,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

Za 100-godišnji maksimalni protok je $v_{100} = 2,31$ m/s; $T_{c100} = 0,084$ sata; $i_{100} = 210$ mm/sat pa je:

$$Q_{M100} = 0,278 \cdot 0,45 \cdot 210 \cdot 0,125 = 3,28 \text{ m}^3/\text{s}$$

Na osnovi racionalne metode može se odrediti samo maksimalni (vršni) protok hidrograma. Zbog toga se pri izboru metode izračunavanja daje prednost pristupima kojima se određuje i mjerodavne hidrograme velikih voda.

Od vrlo velika broja iskustvenih formula za izračunavanje maksimalnih protoka ovdje će biti navedeno nekoliko jednostavnih oblika (s malo parametara). Kada se rabe formule kojima se određuje samo maksimalni protok (bez povratnoga razdoblja), usvaja se da taj protok odgovara maksimalnome protoku 100-godišnjega povratnog razdoblja.

b) **Kresnikove formule** (iz 1886. god.)

$$\text{za } A < 1,0 \text{ km}^2 \quad Q_M = 20\alpha A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.223)$$

$$\text{za } A = 1,0 - 300 \text{ km}^2 \quad Q_M = \alpha A \frac{32}{0,5 + \sqrt{A}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.224)$$

A (km²) je površina sliva, α je koeficijent hrapavosti i njegove su vrijednosti za različite vrste slivova dane u tablici 4.25 (P. Kresnik, 1886.).

Tablica 4.25 Koeficijent hrapavosti α u Kresnikovim formulama

Pad sliva	α
mali padovi sliva, krški slivovi	0,4
mali padovi sliva	0,5
srednji padovi sliva	0,6
brežuljkasti slivovi	0,7
strmi slivovi	0,8
vrlo strmi slivovi	0,9
oštra konfiguracija	1,0
alpski slivovi s ledom i snijegom	1,1-1,5

c) **Formula "četiri koeficijenta" ili "Bavarsko-Ržihov"** (iz 1894. god.)

$$Q_M = A q \varphi_1 \varphi_2 \psi_1 \psi_2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.225)$$

A (km²) je površina sliva; q (m³/s/km²) je maksimalni specifični dotok u tablici 4.26; φ_1 je koeficijent pošumljenosti sliva (tablica 4.27); φ_2 je koeficijent vodopropusnosti terena (tablica 4.27); ψ_1 je koeficijent utjecaja duljine sliva po glavnome koritu (tablica 4.28) i ψ_2 je koeficijent oblika terena (tablica 4.28).

Tablica 4.26 Maksimalni specifični dotoci q u ovisnosti o duljini sliva L

L (km)	< 3	3 - 5	5 - 8	8 - 12	12 - 15	15 - 18
q (m ³ /s/km ²)	25	16	14	10	7	5

Tablica 4.27 Koeficijent pošumljenosti φ_1 i koeficijent vodopropusnosti φ_2

Pošumljenost sliva	φ_1	Vodopropusnost sliva	φ_2
nema šume	1,0	nepropusno	1,0
1/4 sliva pošumljeno	0,9	slabo propusno	0,9
1/2 sliva pošumljeno	0,8	srednje propusno	0,8
3/4 sliva pošumljeno	0,7	vrlo propusno	0,7
cijeli sliv pošumljen	0,6		

Tablica 4.28 Koeficijent utjecaja duljine sliva po koritu ψ_1 i koeficijent oblika terena ψ_2

Duljina sliva L (km)	ψ_1	Oblik terena	ψ_2
0,10 - 2,0	1,0	vrlo brdovit	1,0
2,0 - 3,0	0,9	brdovit	0,95
3,0 - 4,0	0,83	mala brda i brežuljci	0,90
4,0 - 5,0	0,75	brežuljkast i ravan	0,85
5,0 - 6,0	0,68	ravan teren	0,80
6,0 - 7,0	0,63		
7,0 - 8,0	0,58		
8,0 - 9,0	0,53		
9,0 - 10,0	0,50		
10,0 - 12,0	0,43		
12,0 - 15,0	0,35		

d) **Possentijeva formula** (iz 1900. god.)

$$Q_M = 700 \frac{h_{max}}{L} (A_a + 0,33 A_b) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.226)$$

gdje je h_{max} (m) maksimalna dnevna oborina u višegodišnjemu razdoblju; L (km) duljina sliva; A_a (km²) površina brdskoga dijela sliva; A_b (km²) površina ravna dijela sliva.

Formula (4.226) je izvedena za alpske slivove veličine $A = 10 - 150$ km².

e) **Giandotti-Vissentinijeva formula** (iz 1952. god.)

$$Q_M = \frac{n A h \sqrt{\Delta H}}{4,0 \sqrt{A} + 1,5 L} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.227)$$

gdje je A (km²) površina sliva; h (m) prosječna visina bujične kiše, čije je trajanje jednako ili dulje od vremena koncentracije; L (km) je duljina sliva i n je koeficijent razvijenosti sliva. Za male slivove $n = 166$, a za velike $n = 160$.

Vrijeme koncentracije računa se prema izrazu:

$$T_c = \frac{4,0 \sqrt{A} + 1,5 L}{0,8 \sqrt{\Delta H}} \quad (\text{sati}) \quad (4.228)$$

srednja visinska razlika sliva ΔH je:

$$\Delta H = H_o - H \quad (\text{m}) \quad (4.229)$$

gdje je H_o (m) srednja nadmorska visina sliva; a H (m) nadmorska visina protjecajnog profila.

f) **Müllerova formula** (iz 1943. god.)

$$Q_M = 40,0 \varphi_o A^{2/3} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.230)$$

A (km²) je površina sliva; φ_o je otjecajni koeficijent i njegove su vrijednosti dane u tablici 4.29.

Tablica 4.29 Vrijednosti otjecajnog koeficijenta φ_o

Osobine sliva	Veličine koeficijenta φ_o u odnosu na pad sliva		
	mali pad	osrednji pad	veliki pad
I. Područje iznad šumske vegetacije	0,40	0,60	0,80
II. Područje šuma	0,20	0,40	0,60
III. Ravnice, livade, oranice i šume	0,10	0,30	0,50
IV. Ravnice pod šumom	0,05	0,20	0,40

Izraz (4.230) izveden je za Švicarsku, a vrijednosti otjecajnog koeficijenta φ_o iz tablice 4.29 odnose se na 100-godišnju veliku vodu.

g) **Srebrenovićeva formula za male slivove**

Ova je formula po svojem obliku znatno složenija od svih ostalih ovdje navedenih. Izvedena je na temelju racionalne formule, a pri određivanju koeficijenata u formuli korišteni su podaci sa slivnoga područja Save. Zbog dobro određenih odnosa između karakterističnih parametara o kojima ovisi otjecanje velikih voda, preporučljiva je za praktičnu primjenu. Maksimalni protoci različitih povratnih razdoblja definirani su izrazom (D. Srebrenović, 1970.b):

$$Q_{Mp} = 0,48 \frac{\alpha}{(\beta \omega)^{3/4}} A^{0,96} \psi_p S^{1/3} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.231)$$

A (km²) je veličina sliva

α je otjecajni koeficijent koji se za prosječne godišnje oborine $1000 < P < 2000$ mm može odrediti prema formuli:

$$\alpha = 0,70 + 0,05 \log p \quad (4.232)$$

p (god.) je povratno razdoblje

β je faktor ovisan o propusnosti, pošumljenosti i sl., a njegove se vrijednosti kreću u granicama $\beta = 1 - 3$. Za slabo propusna i slabo obrađena tla, β je bliže jedinici, a za propusna i obrađena tla β teži prema vrijednosti 3.

Veličina ψ_p definirana je izrazom:

$$\psi_p = [P(1 + 1,5 \log p)]^{1,43} \quad (4.233)$$

P (m) je visina prosječnih godišnjih oborina

S (m/km) je pad sliva određen izrazom:

$$S = \frac{2\Delta H}{L} \quad (\text{m/km}) \quad (4.234)$$

ΔH je razlika između srednje nadmorske visine sliva H_o koja se određuje iz hipsometrijske krivulje (pogl. 4.5.2) i kote protjecajnog profila H :

$$\Delta H = H_o - H \quad (\text{m}) \quad (4.235)$$

L (km) je dulja stranica zamjenjujućega pravokutnika, čija je površina jednaka površini sliva:

$$L = \sqrt{\frac{A(2-K)}{K}} \quad (\text{km}) \quad (4.236)$$

Kraća stranica zamjenjujućega pravokutnika l je:

$$l = \sqrt{\frac{AK}{2-K}} \quad (\text{km}) \quad (4.237)$$

K je koeficijent koncentriranosti sliva definiran izrazom (4.68):

$$K = \frac{2A}{OU}$$

O (km) je opseg sliva, a U (km) je udaljenost težišta sliva od protjecajnog profila (slika 4.20).

ω je veličina određena izrazom:

$$\omega = 1 + \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (4.238)$$

τ_1 je vrijeme površinskoga sabiranja:

$$\tau_1 = \frac{20 \beta}{[P(1 + 1,5 \log p)]^{0,57} S^{0,43}} \quad (\text{sati}) \quad (4.239)$$

τ_2 je vrijeme tečenja duž vodotoka:

$$\tau_2 = 2,6 \left(\frac{A}{S} \right)^{1/3} \quad (\text{sati}) \quad (4.240)$$

Prema tome je vrijeme podizanja vodnoga vala τ :

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{20 \beta}{[P(1 + 1,5 \log p)]^{0,57} S^{0,43}} + 2,6 \left(\frac{A}{S} \right)^{1/3} \quad (\text{sati}) \quad (4.241)$$

Od opisanih formula se prema racionalnoj i Srebrenovićevoj formuli definiraju maksimalni protoci različitih povratnih razdoblja, dok se ostalim formulama (Kresnikovom, Četiri koeficijenta, Possentijevom, Giandotti-Vissentinijevom i Müllerovom) određuju maksimalni protoci za koje se može usvojiti da su reda veličine 100-godišnjega povratnog razdoblja.

h) Krepsova formula

Ova formula za 100-godišnji maksimalni protok Q_{M100} vrlo je jednostavna oblika, a Q_{M100} ovisi jedino o srednjemu protoku SQ :

$$Q_{M100} = 90 SQ^{2/3} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.242)$$

Krepsova formula vrijedi samo za slivove na kojima je srednji protok $SQ > 5,0$ m³/s.

Vrijednost srednjega protoka SQ za slivove na kojima nema hidroloških motrenja i mjerenja određuje se na osnovi prosječne godišnje efektivne oborine P_e , koja se prema Krepšu dobija na temelju otjecajnoga koeficijenta (W. Reitz i H. Krepš, 1943.):

$$c = \frac{P_e}{P} = 0,88 - \frac{2,6t + 24}{P} \quad (4.243)$$

gdje je P (mm) prosječna godišnja oborina koja padne na sliv; t (°C) je prosječna godišnja temperatura zraka na slivu. Vrijednosti otjecajnoga koeficijenta po formuli (4.243) vrlo su visoke, jer je formula izvedena za alpske slivove u Austriji. (Napomena za izračunavanje SQ : $P_e = c P$; $SQ = \frac{P_e A}{T}$; P_e (m) je efektivna oborina; A (m²) površina sliva i $T = 31,54 \cdot 10^6$ - broj sekundi u godini).

Za opisane iskustvene formule (osim Krepsove jer ona ne vrijedi za male slivove čiji je srednji protok $SQ < 5,0$ m³/s) izračunani su maksimalni protoci jednoga odabranog sliva u Sisačkoj županiji, čije su glavne značajke - veličina sliva $A = 35,0$ km²; najviša točka sliva $H_{\max} = 896$ m n.m.; srednja visina sliva $H_o = 535$ m n.m.; kota protjecajnoga profila $H = 287$ m n.m.; duljina sliva po glavnome vodotoku $L = 8,2$ km; opseg sliva $O = 24,6$ km; udaljenost težišta sliva od protjecajnoga profila $U = 3,2$ km; prosječna godišnja oborina $P = 980$ mm; za slabo propusno tlo oko 50% pošumljeno: $\beta = 1,4$; za izračunavanje mjerodavnoga kišnog intenziteta usvaja se krivulja za 100-godišnje povratno razdoblje, sa slike 3.32.

Vrijednosti maksimalnih protoka i karakterističnih parametara iz pojedinih formula dane su u tablici 4.30.

Napomene uz izračunavanje mjerodavnih oborina iz tablice 4.30:

Za izračunavanje mjerodavnoga kišnog intenziteta pomoću racionalne formule vrijeme koncentracije je, prema Z. P. Kirpichu (4.218), $T_c = t_k = 0,9$ sati = 54 min, pa je za meteorološku stanicu Sisak, prema slici 3.32:

$$i_{100} = 6,349 \cdot 100^{0,164} \cdot 54^{-0,657} = 0,983 \text{ mm/min} = 59 \text{ mm/sat}$$

Za Possentijevu je formulu (4.226) usvojena mjerodavna 100-godišnja 24-satna oborina $h_{\max} = 0,090$ m prema analizama koje su za meteorološku stanicu Sisak proveli M. Gajić-Čapka i B. Čapka (1997.).

Kada se primjenjuje Giandotti-Vissentinijeva formula, vrijeme koncentracije je definirano prema (4.228). Tako određeno, $T_c = 2,85$ sata = 171 min usvojeno je kao vrijeme trajanja kiše t_k , pa je prema klimatskoj funkciji 100-godišnjega povratnog razdoblja sa slike 3.32 količina mjerodavne oborine:

$$h = P_{100} = 6,349 \cdot 100^{0,164} \cdot 171^{0,343} = 78,8 \text{ mm} = 0,079 \text{ m}$$

Prosječna vrijednost maksimalnih protoka prema različitim iskustvenim formulama iz tablice 4.30 je $\bar{Q}_M = 167$ m³/s. Veličine Q_M u tablici 4.30 variraju u vrlo veliku rasponu - od 120 m³/s (formula "Četiri koeficijenta") do 202 m³/s (Possentijeva formula). Iz usporedbe vrijednosti maksimalnih protoka, danih u tablici 4.30, može se na temelju njihovih velikih razlika zaključiti da se maksimalni protoci ovim načinom ne mogu jedinstveno obuhvatiti.

Iskustvene su formule izvedene za različita slivna područja, čije se značajke otjecanja velikih voda međusobno značajno razlikuju. To je osnovni razlog postojanja velikih razlika u veličinama maksimalnih protoka definiranih na osnovi različitih iskustvenih formula. Zbog toga se javljaju i stavovi da ih uopće ne treba rabiti (F. Bidovec, 1971.), a prevladava mišljenje da iskustvene formule treba oprezno koristiti. Prvenstveno je preporučljivo rabiti formule izvedene za regiju u kojoj se nalazi sliv ili formule izvedene za regije s vrlo sličnim glavnim značajkama otjecanja velikih voda. Maksimalni se protok može izračunati prema nekoliko različitih iskustvenih

Tablica 4.30 Izračunavanje maksimalnoga protoka Q_M prema različitim iskustvenim formulama

Naziv (autor) i broj formule	Karakteristični parametri	Q_M (m ³ /s)
Racionalna formula (4.214)	prema (4.218) $T_c = 0,9$ sati; $T_c = t_k \rightarrow$ (sl. 4.31) $i_{100} = 59$ mm/sat; $C = 0,35$	200
Kresnik (4.224)	$\alpha = 0,8$	140
Četiri koeficijenta (4.225)	$q = 10$ m ³ /s/km ² ; $\varphi_1 = 0,8$; $\varphi_2 = 0,9$; $\psi_1 = 0,53$; $\psi_2 = 0,90$	120
Possenti (4.226)	usvojeno: $h_{max} = 0,090$ m; $L = 8,2$ km; $A_a = 22,0$ km ² ; $A_b = 13,0$ km ²	202
Giandotti-Vissentini (4.227)	prema (4.228) $T_c = 2,85$ sata; $n = 166$; $h = 0,079$ m; $L = 8,2$ km; $\Delta H = 248$ m	200
Müller (4.230)	$\varphi_p = 0,35$	150
Srebrenović (4.231)	$\Delta H = 248$ m; $L = 6,60$ km; $\beta = 1,4$; $K = 0,89$ $S = 75,2$ m/km; $\tau_{1,100} = 2,0$ sata; $\tau_{2,100} = 2,0$ sata; $\tau_{100} = 4,0$ sata; $\omega_{100} = 2,0$; $\alpha_{100} = 0,80$; $\psi_{100} = 7,05$	160

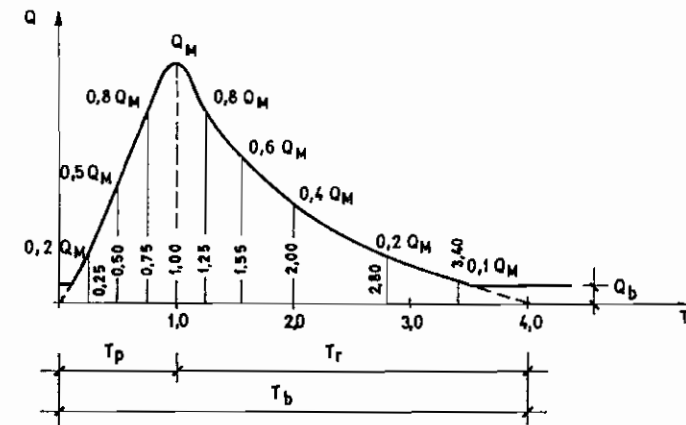
prosječna vrijednost: $\bar{Q}_M = 167$ m³/s

formula, pa se onda kao mjerodavna usvaja prosječna vrijednost \bar{Q}_M . U primjeru iz tablice 4.30 maksimalni protok prema Srebrenovićevoj formuli $Q_{M100} = 160$ m³/s najbliži je prosječnoj vrijednosti $\bar{Q}_M = 167$ m³/s. Srebrenovićeva je formula izvedena za regiju sa sličnim hidrološkim značajkama (slivovi pritoka Save), pa je na toj osnovi najprikladnija za primjenu na razmatranome slivu (u okolici Siska).

Hidrogram velikoga vodnog vala može se iskustvenim načinom odrediti različitim pristupima. Ovdje se opisuju dva pristupa: Krepsov i Srebrenovićev.

a) Krepsova metoda određivanja hidrograma velikoga vodnog vala

H. Krep je na osnovi obrade podataka o velikim vodama alpskih slivova dao oblik hidrograma velikoga vodnog vala u općemu obliku, prikazanom na slici 4.112. Hidrogram vodnoga vala sa slike 4.112 ovisan je o dvama parametrima: maksimalnome protoku Q_M i vremenu podizanja vodnoga vala T_p (W. Reitz i H. Krep, 1943.).



Slika 4.113 Hidrogram vodnoga vala prema H. Krepšu (1943.)

Vrijeme podizanja vodnoga vala T_p za hidrogram na slici 4.112 je:

$$T_p = 0,872 A^{0,4} \quad (\text{sati}) \quad (4.244)$$

gdje je A (km²) površina sliva.

Volumen vodnoga vala je:

$$V = 5400 Q_M T_p \quad (\text{m}^3) \quad (4.245)$$

gdje je Q_M (m³/s) vršni protok hidrograma; T_p (sati) vrijeme podizanja vodnoga vala.

Trajanje vodnoga vala T_b je:

$$T_b = 4 T_p \quad (\text{sati}) \quad (4.246)$$

Vrijeme podizanja vodnoga vala prema izrazu (4.244) odredio je Krep za slivove u Austriji na kojima nema prirodnih retencija u kojima se voda zadržava i na taj način produžuje vrijeme podizanja T_p .

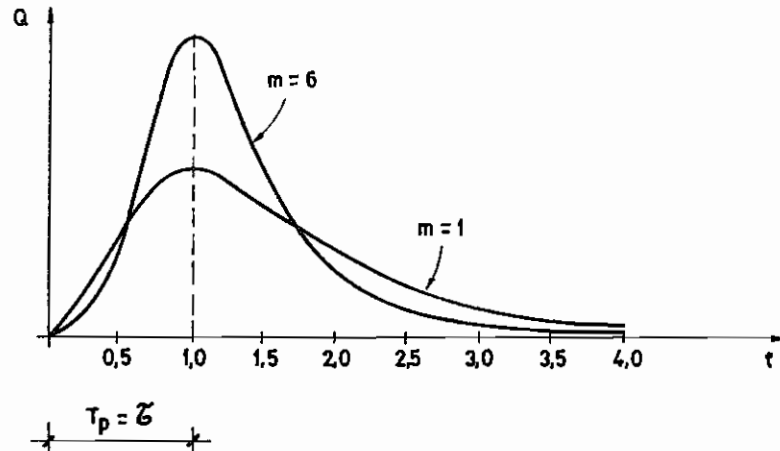
b) Hidrogram velikoga vodnog vala prema D. Srebrenoviću

Oblik hidrograma velikoga vodnog vala D. Srebrenović je definirao pomoću triju parametara: maksimalnoga protoka Q_M , vremena podizanja vodnoga vala τ i koeficijenta oblika vodnoga vala m . Protok vodnoga vala u zadanome vremenu t je:

$$Q = Q_M \left(\frac{t}{\tau} \right)^m e^{m \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)} \quad (\text{m}^3/\text{s}). \quad (4.247)$$

U jednadžbi (4.247) poznata su dva parametra: maksimalni protok Q_M (m³/s) i vrijeme podizanja vodnoga vala τ (sati); $e = 2,718$ je baza prirodnog logaritma.

Nepoznati parametar je koeficijent oblika vodnoga vala m i potrebno ga je odrediti, a njegove se vrijednosti kreću u granicama $m = 1-6$. Na slici 4.113 prikazani su karakteristični oblici hidrograma za $m = 1$ i $m = 6$.



Slika 4.114 Karakteristični oblici hidrograma velikih vodnih valova prema D. Srebrenoviću (1970.b)

Ako se odnos baznoga protoka Q_b i maksimalnoga protoka Q_M označi sa φ , kako je prikazano na slici 4.114, onda je:

$$\varphi = \frac{Q_b}{Q_M} \tag{4.248}$$

Volumen vodnoga vala je:

$$V = Q_{max} \tau \gamma(\varphi, m) \tag{4.249}$$

a za veličinu γ se na osnovi osnovnoga izraza za protok vodnoga vala Q u nekom vremenu t (4.247) dobiva:

$$\gamma = 9450 m^{-0,515} (1 - \varphi)^{1,5} e^{-0,5\varphi} \tag{4.250}$$

Izraz (4.250) se potom uvrsti u (4.249) i dobije se volumen vodnoga vala uslijed djelovanja izravnoga dotoka (ukupni volumen vodnoga vala umanjeno za volumen baznoga dotoka):

$$V = 9450 Q_M \tau m^{-0,515} (1 - \varphi)^{1,5} e^{-0,5\varphi} \quad (m^3) \tag{4.251}$$

jedinice dane u (4.251) su: Q_M (m^3/s); τ (sati).

Na temelju izraza (4.251) parametar m je:

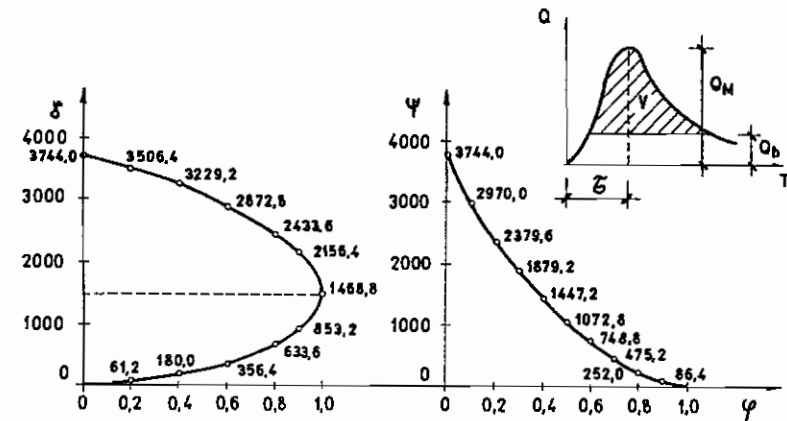
$$m = \left(\frac{9450 Q_M \tau (1 - \varphi)^{1,5}}{V e^{0,5\varphi}} \right)^{1,94} \tag{4.252}$$

Prema tome, da bi izračun parametra m bio moguć treba poznavati volumen vodnoga vala uslijed izravnoga dotoka, koji je:

$$V = Q_M \tau \psi \quad (m^3) \tag{4.253}$$

Q_M (m^3/s), τ (sati).

Na slici 4.114 prikazana je veličina ψ kao funkcija odnosa baznoga i maksimalnoga protoka φ . Veličina ψ , na osnovi koje se može proračunati koliki je volumen izravnoga dotoka vodnoga vala u zadanome vremenu t , prikazana je na slici 4.114 također kao funkcija $\varphi = Q_b / Q_M$



Slika 4.115 Odnosi $\gamma = f(\varphi)$ i $\psi = f(\varphi)$ prema D. Srebrenoviću (1970.b)

Prema tome, nakon izračunavanja τ i Q_M na osnovi formule (4.231) najprije treba odrediti odnos φ (4.248). Nakon toga se s veličinom ψ određenom iz dijagrama (φ, ψ) sa slike 4.114, izračuna volumen vodnoga vala V iz (4.253). Kada su Q_M, τ, φ i V jednom poznati, odredi se parametar m iz (4.252). Tada se može pristupiti izračunavanju protoka hidrograma Q u zadanim vremenima t prema (4.247), te nacrtati hidrogram.

U slučaju stvarnoga primjera iz tablice 4.30 je:

$$Q_M = 160 \text{ m}^3/\text{s}, \text{ a } T_p = \tau = 4,0 \text{ sata. Baznoga dotoka nema, pa je } \varphi = \frac{Q_b}{Q_M} = 0.$$

Prema dijagramu na slici 4.114 za $\varphi = 0, \psi = 3744,0$. Volumen vodnoga vala je:

$$V_i = Q_M \tau \psi = 160 \cdot 4,0 \cdot 3744,0 = 2,40 \cdot 10^6 m^3$$

Parametar m je (uz $\varphi = 0$):

$$m = \left(\frac{9450 Q_M \tau}{V} \right)^{1/94} = \left(\frac{9450 \cdot 160 \cdot 4,0}{2,41 \cdot 10^6} \right)^{1/94} = 6,0$$

U prvome satu ($t = 1,0$ sat) ordinata hidrograma je:

$$Q_t = Q_M \left(\frac{t}{\tau} \right)^m e^{m \left(\frac{t}{\tau} \right)} = 160 \cdot \left(\frac{1}{4} \right)^6 \cdot 2,718^6 \left(\frac{1}{4} \right) = 3,52 \text{ m}^3/\text{s} \text{ itd.}$$

Na slici 4.115 prikazan je hidrogram velikoga vodnog vala prema Srebreновиću, izračunan opisanim postupkom.

Za isti maksimalni protok $Q_M = 160 \text{ m}^3/\text{s}$ sa sliva površine $A = 35 \text{ km}^2$, određen je hidrogram velikoga vodnog vala prema Krepšu i prikazan uz hidrogram prema Srebreновиću na slici 4.115.

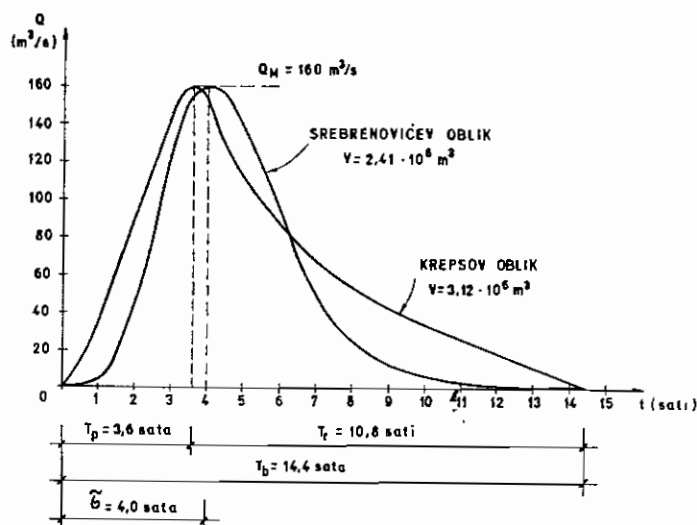
Prema Krepšu (4.244) vrijeme podizanja vodnoga vala je:

$$T_p = 0,872 A^{0,4} = 0,872 \cdot 35,0^{0,4} = 3,6 \text{ sata}$$

Volumen vodnoga vala prema Krepšu (2.245) je:

$$V_2 = 5400 Q_M T_p = 5400 \cdot 160 \cdot 3,6 = 3,11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Ordinate hidrograma na slici 4.115 određene su na osnovi općega oblika Krepsova hidrograma sa slike 4.112.



Slika 4.116 Usporedba hidrograma velikoga vodnog vala prema D. Srebreновиću i prema H. Krepšu

Volumeni vodnih valova prema Srebreновиću i Krepšu, prikazani na slici 4.115, razlikuju se gotovo 30 posto. U ovome se primjeru može odrediti 100-godišnja efektivna oborina na slivu, koja za vodni val prema Srebreновиćevu obliku iznosi:

$$P_{e1} = \frac{V_1}{A} = \frac{2,40 \cdot 10^6}{35,0 \cdot 10^6} = 0,069 \text{ m} = 69 \text{ mm};$$

a za vodni val prema Krepsovom obliku:

$$P_{e2} = \frac{V_2}{A} = \frac{3,11 \cdot 10^6}{35,0 \cdot 10^6} = 0,089 \text{ m} = 89 \text{ mm};$$

Ako se usvoji Srebreновиćev koeficijent otjecanja 100-godišnje velike vode $\alpha = 0,80$, onda 100-godišnja oborina koja padne na sliv za vodni val prema Srebreновиćevu obliku iznosi:

$$P_1 = \frac{P_{e1}}{\alpha} = \frac{69}{0,8} = 86 \text{ mm},$$

a za vodni val prema Krepsovom obliku:

$$P_2 = \frac{P_{e2}}{\alpha} = \frac{89}{0,8} = 111 \text{ mm}.$$

Veličina 100-godišnje dnevne oborine s kojom se ušlo u proračun izračunavanje prema Possentijevoj formuli (tablica 4.30) je $h_{max} = 90 \text{ mm}$, a veličina 100-godišnje oborine prema Giandotti-Vissentinijevoj formuli, uz vrijeme koncentracije $T_c = 2,85$ sata, je $h = 79 \text{ mm}$. Ove su vrijednosti oborina znatno bliže oborini $P_1 = 86 \text{ mm}$ nego oborini $P_2 = 111 \text{ mm}$. U ovome se slučaju može zaključiti da je hidrogram vodnoga vala definiran na osnovi Srebreновиćeva pristupa bliži realnosti od hidrograma određena prema Krepsovom obliku. Prema tome, i pri izabiranju iskustvenih oblika hidrograma treba nastojati na odgovarajući način ocijeniti njihovu pouzdanost, pri čemu određeni utjecaj ima i iskustvo obrađivača.

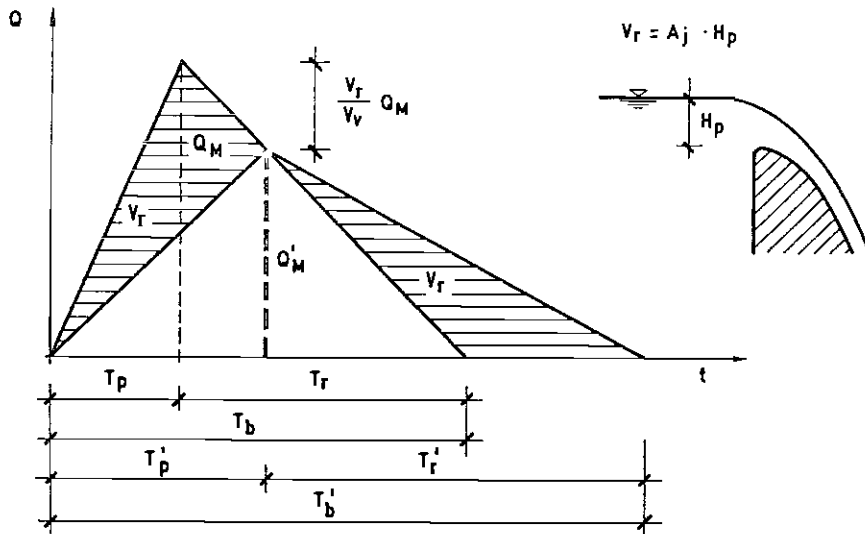
Na kraju se ovog poglavlja opisuje jednostavno približno izračunavanje spljoštenja vodnoga vala, koje se provodi uz pretpostavku da su ulazni i izlazni hidrogrami u obliku trokuta, kao što je prikazano na slici 4.117.

Volumen prirodnoga (netransformiranog) vodnog vala je, prema slici 4.117:

$$V_i = Q_M \frac{T_b}{2} \quad (4.254)$$

Volumen vodnoga vala koji ulazi u retenciju je:

$$V_r = Q_M \frac{T_b}{2} - Q'_M \frac{T_b}{2} = \frac{T_b}{2} (Q_M - Q'_M) \quad (4.255)$$



Slika 4.117 Hidrogram u obliku trokuta i njegova transformacija kroz retenciju

Odnos volumena vodnoga vala koji ulazi u retenciju V_r i ukupnoga volumena vodnoga vala V_v je:

$$\frac{V_r}{V_v} = \frac{T_b}{2} (Q_M - Q'_M) \frac{2}{Q_M T_b} = 1 - \frac{Q'_M}{Q_M} \quad (4.255a)$$

Na osnovi izraza (4.255a) odnos vršnoga protoka spljoštenoga (transformiranog) vodnog vala Q'_M i vršnoga protoka ulaznoga hidrograma Q_M je:

$$\frac{Q'_M}{Q_M} = 1 - \frac{V_r}{V_v} \quad (4.256)$$

Prema tome, vršni protok spljoštenoga vodnog vala je:

$$Q'_M = \left(1 - \frac{V_r}{V_v}\right) Q_M \quad (4.257)$$

Ako se u (4.257) uvrsti izraz (4.254) za volumen vodnoga vala V_v , onda je vršni protok spljoštenoga vodnog vala:

$$Q'_M = Q_M - \frac{2V_r}{T_b} \quad (4.258)$$

Volumen vodnoga vala koji ulazi u retencijski prostor u jezeru (od krune preljeva do maksimalne razine vode u jezeru) je:

$$V_r = A_j H_p \quad (4.259)$$

gdje je A_j površina jezera u sredini sloja visine H_p , a H_p je maksimalna visina preljevnoga mlaza.

Vremenska baza hidrograma spljoštenoga vodnog vala T'_p je:

$$T'_p = \frac{2V_v}{Q'_M} = \frac{Q_M}{Q'_M} T_b \quad (4.260)$$

Vrijeme podizanja spljoštenoga vodnog vala T'_p je:

$$T'_p = T_p + \frac{T'_b - T_b}{2} = T_p + T_b \frac{Q_M - Q'_M}{2Q'_M} \quad (4.261)$$

Izračunavanje spljoštenja vodnoga vala koji ulazi u akumulacijsko jezero obrađena je na karakterističnome primjeru:

U akumulacijsko jezero ulazi vodni val čiji se oblik može aproksimirati trokutom s poznatim veličinama: $Q_M = 43,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $T_b = 10,2$ sata i $T_p = 3,8$ sati. Val se prelijeva preko Crea: rova preljeva širine $b = 19,3 \text{ m}$, a visina preljevnoga mlaza je $H_p = 0,80 \text{ m}$. Površina jezera u sredini preljevnoga sloja (debljine $H_p = 0,80 \text{ m}$) je $A_j = 3,1 \cdot 10^5 \text{ m}^2$. Koliki je vršni protok spljoštenoga vodnog vala, te koliko je njegovo trajanje i vrijeme podizanja?

Volumen vodnoga vala je, prema (4.254):

$$V_v = \frac{Q_M T_b}{2} = \frac{43,5 \cdot 10,2 \cdot 3600}{2} = 8,0 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

Volumen vodnoga vala u retencijskome prostoru jezera je, u skladu s izrazom (4.259):

$$V_r = A_j H_p = 3,1 \cdot 10^5 \cdot 0,80 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

Vršni protok spljoštenoga vodnog vala prema (4.257) iznosi:

$$Q'_M = \left(1 - \frac{V_r}{V_v}\right) Q_M = \left(1 - \frac{2,5 \cdot 10^5}{8,0 \cdot 10^5}\right) 43,5 = 30,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Protok $Q'_M = 30,0 \text{ m}^3/\text{s}$ mora biti jednak protoku preko preljeva, koji prema izrazu (4.102) iznosi:

$$Q'_M = Q_p = m b \sqrt{2g} H_p^{1,5} = 0,49 \cdot 19,3 \cdot \sqrt{19,62} \cdot 0,8^{1,5} = 30,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vremenska baza hidrograma spljoštenoga vodnog vala prema (4.260) iznosi:

$$T'_b = \frac{Q_M}{Q'_M} T_b = \frac{43,5}{30,0} 10,2 = 14,8 \text{ sati};$$

a vrijeme podizanja spljoštenoga vodnog vala je, prema (4.261):

$$T'_{p'} = T_p + T_b \frac{Q_M - Q'_M}{2 Q'_M} = 3,8 + 10,2 \frac{43,5 - 30,0}{2 \cdot 30,0} = 6,1 \text{ sati}$$

4.17 Male vode

Prema UNESCO-vu i WMO-vu rječniku hidroloških pojmova (1986.), **malá voda** može se definirati na dva načina:

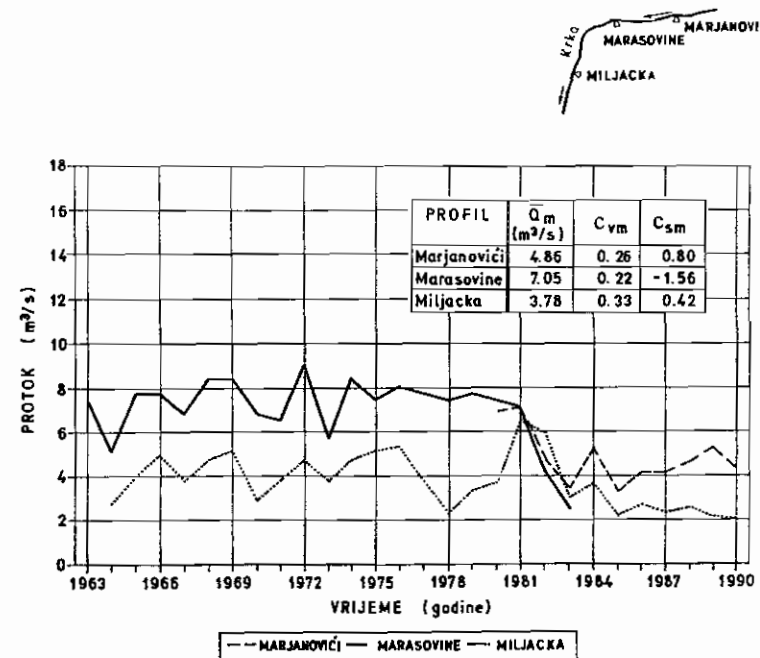
1. kao stanje oseke, kada je razina vode najniža za bilo koji plimni ciklus
2. kao najniža razina (protok) dostignuta u vodotoku ili jezeru.

Izračunavanje vjerojatnosti pojavljivanja malih voda na osnovi metoda matematičke statistike provodi se na isti način kao i izračunavanje velikih voda različitih povratnih razdoblja - samo se veličine malih voda smanjuju s produljenjem povratnoga razdoblja (slika 4.119).

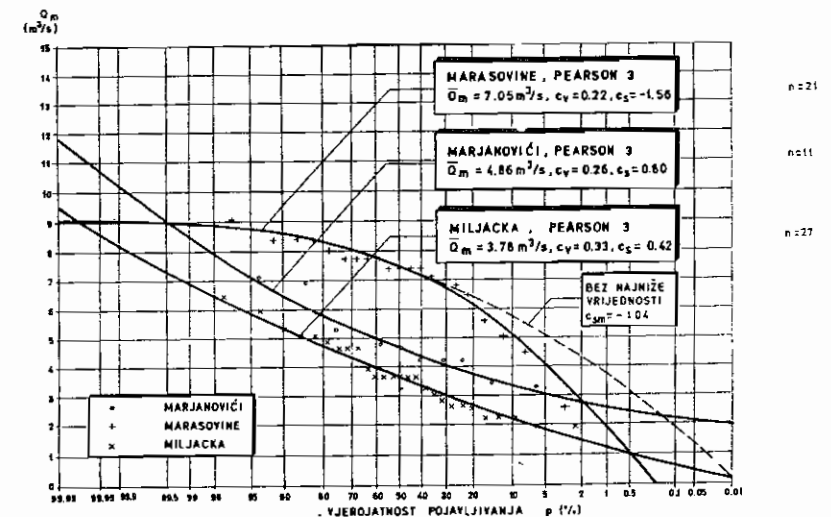
Najčešće se minimalni godišnji protoci različitih povratnih razdoblja računaju na temelju nizova minimalnih godišnjih protoka. Ukoliko nizovi zadovoljavaju kriterije za statističku obradu, koji su opisani u poglavlju 4.3.2, moguće je definirati minimalne godišnje protoke različitih povratnih razdoblja prema krivuljama raspodjela. Za određivanje logaritamsko-normalne raspodjele mogu se koristiti vrijednosti iz donjega dijela tablice 4.17, za određivanje raspodjele Pearson 3 vrijednosti iz tablice 4.18, a za određivanje Gumbelove raspodjele vrijednosti iz tablice 4.20. Mjerodavnu se raspodjelu određuje na isti način kao i za velike vode, pri čemu se može primijeniti test A. N. Kolmogorova (tablica 4.21).

U analizi nizova minimalnih godišnjih protoka naročito je važna njihova duljina i kakvoća članova niza. Općenito se smatra da je kod nizova minimalnih godišnjih protoka za izračun koeficijenta varijacije c_{vm} dovoljno već 12 - 15 godina neprekinutih motrenja i mjerenja. Da bi definiranje koeficijenta asimetrije c_{sm} bilo dovoljno pouzdano, potrebno je barem 70 godina neprekidnih hidroloških motrenja i mjerenja, a nizovi takvih duljina su vrlo rijetki.

Na slici 4.118 prikazani su minimalni godišnji protoci triju hidroloških profila na Krki: Marjanovići, Marasovine i Miljacka. Marjanovići se nalaze najzvodnije, Marasovine (koji je 1983. ukinut) u sredini, a Miljacka nizvodno na Krki. Između profila Marasovine i Miljacka smještena je hidroelektrana Miljacka (ranije HE Manojlovac), čiji rad ima utjecaj na smanjivanje protoka u profilu Miljacka.



Slika 4.118 Hidrogrami minimalnih godišnjih protoka Krke u profilima Marjanovići, Marasovine i Manojlovac



Slika 4.119 Minimalni godišnji protoci Krke različitih povratnih razdoblja u profilima Marjanovići, Marasovine i Miljacka

Na slici 4.118 jasno se vidi da minimalni godišnji protoci iz 1982. i 1983. godine nisu međusobno u skladu. Naročito je problematična veličina minimalnoga godišnjeg protoka Krke u profilu Marasovine u 1983. godini. Ta - vrlo niska - vrijednost protoka uzrok je negativnoj vrijednosti koeficijenta asimetrije u profilu Marasovine $c_{sm} = -1,56$. Zbog toga je krivulja raspodjele minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine, prikazana na slici 4.119, okrenuta prema dolje, a krivulje za ostala dva profila, u kojima je koeficijent asimetrije pozitivan, okrenute su prema gore.

Vrijednosti koeficijenta asimetrije c_{sm} za nizove minimalnih godišnjih protoka na slici 4.119 međusobno se značajno razlikuju. Zbog toga se krivulja raspodjele minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine po svojem obliku bitno razlikuje od krivulja raspodjela za druga dva profila. Za niz minimalnih godišnjih protoka Krke u profilu Marasovine može se reći da je prekratak, ali više podataka nije na raspolaganju jer je profil ukinut, a ako se izostavi najniža vrijednost, oblik krivulje raspodjele se neće bitno promijeniti (crkana krivulja na slici 4.119).

Ovakav slučaj nije osamljen u hidrološkoj praksi, pa zbog toga ekstrapolirane vrijednosti minimalnih godišnjih protoka dugih povratnih razdoblja (500-, 1000- i 10.000-godišnjih) treba usvajati s određenim oprezom. U nekim naročito problematičnim slučajevima, naročito u krškim područjima - otkuda je uzet primjer sa slike 4.119 - potrebno je realno ocijeniti do kojega povratnog razdoblja ekstrapolacija malih voda ima smisla (npr. do 50- ili 100-godišnjega povratnog razdoblja).

Male se vode mogu razmatrati i prema pojedinim malovodnim razdobljima; primjerice od lipnja do rujna ili prema sušnim mjesecima. Analize malih voda mogu se provoditi i pentadno ili dekadno (s prosječnim najnižim petodnevnom ili deseto-dnevnom protocima).

Često puta se razmatraju trajanja malovodnih razdoblja koja su ispod nekoga repnog minimalnog protoka, a u nekim slučajevima i trajanja presušivanja korita vodotoka (naročito u kršu). **Repni protok je temeljni protok iznad ili ispod kojega se promatra otjecanje**, a najčešće se rabi pri analizama velikih i malih voda.

Za definiranje osobina malih voda D. Trinić (1998.a) je opisao različite normative i standarde koji postoje kod nas i u svijetu.

Kod nas se za mjerodavne male vode najčešće uzimaju mjesečne male vode 95-postotne sigurnosti za neregulirane vodotoke, a garantirane male vode za regulirane vodotoke.

U svijetu se najčešće mjerodavni mali protok definira kao protok kroz 30 uzastopnih dana (bilo kojih unutar godine), čije je povratno razdoblje 20 godina. Ovakvo određen protok nije podložan utjecaju pojave povećavanja protoka u kalendarski izabranome razdoblju od mjesec dana, nego je određen za realno razdoblje od 30 uzastopnih kritičnih dana.

Najčešće se rabi sljedećih šest pragova malih voda:

- $Q_{30,80\%}$ - minimalni srednji 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto
- Q_{min} - srednji minimalni godišnji protok (u ovoj knjizi označen kao Q_m)
- $Q_{95\%}$ - minimalni srednji mjesečni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 95 posto
- $Q_{30,95}$ - minimalni srednji 30-dnevni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 95 posto
- Q_{min} - apsolutno najmanji godišnji protok u razmatranome razdoblju (u ovoj knjizi označen s Q_m)
- $Q_{99\%}$ - stogodišnji minimalni protok.

D. Trinić (1998.b) naglašava da je problematika malih voda u otvorenim vodotocima vrlo složena, pa zahtijeva stručan i studiozan rad, pri kojemu treba raspolagati kvalitetnim i pouzdanim podacima dobivenim hidrološkim motrenjima i mjerenjima.

Često je potrebno definirati režim malih voda na malim slivovima na kojima nedostaju podaci. U tom se slučaju mogu koristiti rezultati regionalnih analiza malih voda iz regija sa sličnim osobinama otjecanja. Za proračun malih voda s neproučenih slivova vrlo je pogodna metoda A. M. Vladimirova (1976.), koja se ovdje ukratko opisuje.

Prema Vladimirovu, minimalni protok (mala voda) trajanja T i vjerojatnosti pojavljivanja p je:

$$Q_{Tp} = \lambda_{Tp} Q_{\phi} \quad (4.262)$$

gdje je λ_{Tp} koeficijent prijelaza; a Q_{ϕ} je minimalni 30-dnevni protok, vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto ($Q_{30,80\%}$).

Izračunavanje se provodi u tri koraka:

1. određuje se osnovna regionalna ovisnost Q_{ϕ} u funkciji parametara sliva, pri čemu se za Q_{ϕ} uzima minimalni 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto ($Q_{\phi} = Q_{30,80\%}$)
2. određuju se, prema (4.262), koeficijenti prijelaza za $Q_{20,80\%}$; $Q_{10,80\%}$; $Q_{1,80\%}$, a zatim za svako trajanje posebno i koeficijenti prijelaza od $Q_{T,80\%}$ za $Q_{T,90\%}$; $Q_{T,95\%}$ i $Q_{T,98\%}$
3. izračunavaju se sve potrebne vrijednosti Q_{Tp} preko određene vrijednosti $Q_{30,80\%}$ za razmatrani sliv i na osnovi regionalnih vrijednosti koeficijenta prijelaza.

Veličina $Q_{30,80\%}$ ovisi o nekoliko parametara, među kojima su najvažniji: površina sliva A , gustoća riječne mreže D , srednja nadmorska visina sliva H_s i prosječna godišnja oborina P koja padne na sliv.

Najčešći je pristup u kojemu se područje koje se razmatra podijeli na dvije, tri ili više regija homogenih prema navedenim parametrima, osim površine sliva A koja predstavlja neovisnu varijablu. Za pojedine se regije definiraju ovisnosti oblika:

$$Q_{30,80\%} = a A^b \quad (4.263)$$

gdje su a i b regresijski koeficijenti.

U drugome se postupku primjenjuje višestruka korelacija za određivanje regionalnih koeficijenata a, b, c, d, \dots , pa je opći izraz za minimalni 30-dnevni protok vjerojatnosti pojavljivanja 80 posto:

$$Q_{30,80\%} = a A^b H_s^c P^d \quad (4.264)$$

Rezultati analiza malih voda služe kao temeljna hidrološka podloga za različite korisnike voda, a posebno su značajni za prostorno planiranje, snabdijevanje naselja i industrije vodom, za energetiku, poljoprivredu, riječni i kanalski promet, za zaštitu voda, turizam, specijalne potrebe i sl. (D. Trninić, 1998.b).

4.18 Hidrološka suša

Prema Međunarodnome hidrološkom rječniku (UNESCO/WMO, 1992.) **suša** je razdoblje izrazito suha vremena dovoljno duga trajanja da nedostatak oborina ozbiljno promijeni hidrološku ravnotežu.

Prema Priručniku za hidrološku praksu (WMO, 1993.) **suša** je produženi nedostatak, izraženi manjak ili loša raspodjela oborina.

Hidrološka suša je razdoblje nenormalno suha vremena koje traje dovoljno dugo da može uzrokovati manjak vode, što se očituje u razinama vodotoka i jezera ispod normale, manjku (deficitu) vlažnosti tla i smanjenju razina podzemne vode.

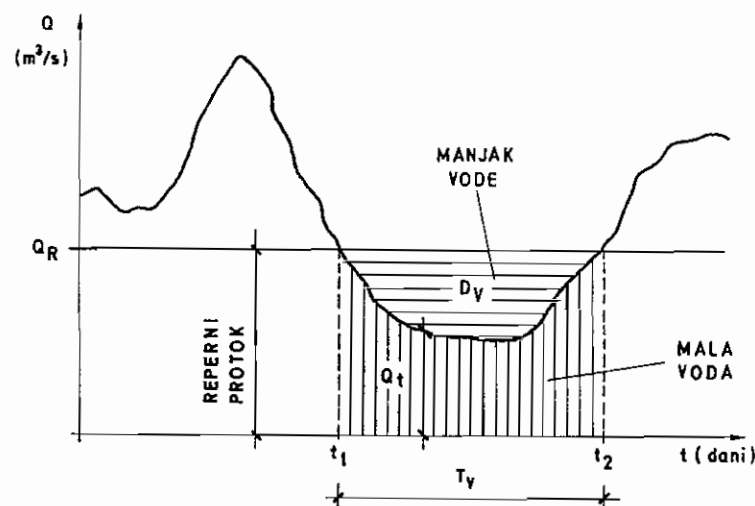
Jedinice koje se u literaturi rabe za označavanje suše su godina i mjesec (Z. Sen, 1976., 1980.). Najčešće se rabi godina, ali na osnovi mjeseci se o suši može preciznije zaključivati.

Pojam je suše različit za pojedina geografska područja koja imaju različite vrste klime. Primjerice, na otoku Baliju u Indoneziji suša je svako razdoblje bez oborine koje traje duže od šest dana, a u Libiji se o suši govori tek kada prođu dvije godine bez pojavljivanja oborine.

Pod **malovodnim razdobljem**, a ujedno i sušom, *pri otvorenim vodotocima podrazumijeva se razdoblje u kojemu su prirodni protoci vode manji od onih koji su potrebni određenim korisnicima* (D. Trninić, 1998.a).

Jedan od glavnih problema koji se stvaraju djelovanjem suše je snižavanje razina podzemnih voda. Mali slivovi s malim podzemnim rezervoarima (retencijama) isprazne se uslijed suše za nekoliko mjeseci ili tijekom jedne godine. Na velikim slivovima (npr. sliv Save u području Zagreba) pražnjenja podzemnih retencijskih prostora uslijed suše mnogo su sporija nego na malim slivovima i traju godinama.

Često se hidrološka suša definira kao volumenski manjak vode u vodotoku ispod nekoga repornog protoka Q_R , uzimajući u obzir trajanje suše Δt i volumenski manjak male vode D_v , kako je prikazano na slici 4.120.



Slika 4.120 Hidrogram male vode s osnovnim veličinama (D. Trninić, 1998.a)

Na slici 4.120 korištene su oznake:

- t_1 - vrijeme početka male vode
- t_2 - vrijeme završetka male vode
- T_v - trajanje male vode (ukupan broj uzastopnih dana u kojima je protok vode manji od repornoga protoka Q_R)
- D_v - manjak male vode danoga trajanja T_v , definiran izrazom:

$$D_v = Q_R T_v \int_{t_1}^{t_2} \frac{Q_t}{Q_R} dt \quad (4.265)$$

Izraz (4.265) vrijedi za protok $Q_t < Q_R$.

Najveći godišnji manjak vode označava se s D_{vmax} .

U tablici 4.31 prikazane su štete uslijed elementarnih nepogoda u Hrvatskoj u razdoblju od 1980. do 1993. godine. Osnovni su podaci preuzeti od Državnoga statističkog zavoda RH.

Prema podacima iz tablice 4.31 od šteta uslijed elementarnih nepogoda u Hrvatskoj u razdoblju od 1980. do 1993. godine najveći dio spada u štete uslijed suša - preko 40 posto. U odnosu na štete uslijed poplava, štete uslijed suša su 7,3 puta veće.

U razmatranome razdoblju od 1980. do 1993. godine najveće su štete uslijed suša bile 1990. godine, a iznosile su $849,5 \cdot 10^6$ USD ili 70,5 posto svih šteta te godine, koje su, iznoseći $1120,5 \cdot 10^6$ USD, bile najveće u Hrvatskoj u tom razdoblju. Štete uslijed poplava u 1990. godini iznosile su $9,04 \cdot 10^6$ USD ili 0,80 posto ukupnih šteta, a omjer šteta uslijed suša i šteta uslijed poplava te godinu u Hrvatskoj bio je 94 : 1.

Tablica 4.31 Štete uslijed elementarnih nepogoda u Hrvatskoj u razdoblju od 1980. do 1993. godine (10⁶ USD) (prema B. Čapka, 1994.)

Elementarne nepogode	Ukupno (1980.-1993.)	Prosječno godišnje	Postotak
poplave	229,3	16,4	5,58
potresi	623,4	44,5	15,16
požari	233,7	16,7	5,68
suše	1671,9	119,4	40,67
tuče, oluje, vjetrovi	652,3	46,6	15,87
klizanje tla	4,3	0,3	0,11
mraz	331,7	23,7	8,07
biljne bolesti, štetnici	1,2	0,1	0,03
radijacija	5,4	0,4	0,13
ostalo	35,8	2,5	0,87
kombinacija više uzroka	322,0	23,0	7,83
ukupno	4111,0	293,6	100,00

Prema N. S. Griggu (1989.), borba protiv suše ili, kako se često naziva, odgovor suši, je multidisciplinarni problem. Pod time se podrazumijeva da u tu borbu osim vodoprivrede treba biti uključena i šira društvena zajednica.

O. Bonacci (1993.b) navodi četiri faze koje je potrebno proći kako bi se stvarno moglo upravljati borbom protiv suše:

1. Predviđanje suše. Ova se faza odnosi na analize i prognoze prosječnih uvjeta vlažnosti u budućnosti (M. A. Beran, 1979., S. Chander i dr., 1979.) po dekadama, mjesecima ili sezonski. Statistički se obrađuju i analiziraju temperature zraka, evapotranspiracija, vlaga u zraku, oborine, razine vode (na površini i u podzemlju), protok, vlaga u tlu, stanje vegetacije itd.
2. Određivanje (identifikacija) i motrenje (monitoring) suše. U ovu su fazu uključeni čimbenici prve faze, a njih se proširuje novim čimbenicima, kojima se opisuju učinci suše na terenu (A. V. Havens, 1954.). Izravni učinci suše nepovoljno se odražavaju na poljoprivredu i šumarstvo, vodoprivredu - naročito na vodoopskrbu, industriju (hidroenergetika), te zaštitu okoliša (požari i zagađenja koja su naročito opasna za podzemne vode).
3. Procjena učinaka suše i njihovo ispravljanje. U procjenjivanju učinaka suše i njihovu ublažavanju i ispravljanju trebaju sudjelovati timovi stručnjaka različitih područja, a odluke se donose na različitim razinama, ovisno o veličini zahvaćenoga područja i težini posljedica (W. M. Wenland, 1990.).

4. Stvaranje strategije i politike borbe protiv suše. U ovoj fazi može se mjere koje se provode podijeliti u četiri skupine: institucionalne, zakonske, strukturne i upravljačke mjere.

Hidrologiji su najzanimljivije strukturne mjere u borbi protiv suše, jer se one odnose na korištenje voda tijekom suše. Pritom se zajednički tretiraju površinske i podzemne vode, te umjetni spremnici vode.

D. Trninić (1993.) navodi kao moguće mjere smanjivanja šteta uslijed hidroloških suša oplemenjivanje ili povećavanje površinskih voda, kao i podzemnih malih voda. Prva mjera je osiguravanje određenoga volumena vode u postojećima akumulacijskim jezerima i izgradnja novih akumulacijskih jezera. Druga je mogućnost prebacivanje vode iz jednoga u drugi sliv. Primjerice, u razdobljima suše moglo bi se u sliv Save prebacivati vodu iz Kupe i Une. No najpovoljnije rješenje predstavlja prebacivanje vode iz Drave koja ima kišno-ledenački vodni režim, pa je vodom najbogatija u kasno proljeće i ljeti, kada ostali vodotoci u Hrvatskoj imaju najmanju vodnost.

4.19 Problem biološkoga minimuma

Biološki minimum je protok vode koji se mora ispuštati nizvodno od zahvata u vodotok, a da se ne poremeti ekološki sustav.

Određivanje biološkoga minimuma, odnosno minimalnih količina vode koje će teći nizvodno od zahvata vode u vodotoku, općenito je vrlo složen problem. Pristup njegovu rješavanju ne smije biti administrativan ili bez poznavanja veličina minimalnih protoka. Naime, u takvu se slučaju ne uvažavaju osnovna biološka svojstva vodotoka, pa on s gledišta zaštite prirodnih vrijednosti nije prihvatljiv. S. Mišetić (1993.) navodi da su najvažniji kriteriji za definiranje biološkoga minimuma veličina i raspodjela protoka vode, osobine staništa, godišnja dinamika fizikalno-kemijskih i bioloških svojstava vode, prijašnji način korištenja vode, količina i kakvoća vode u pritocima, katastar onečišćivača, te procjena utjecaja predviđena zahvata na fizikalno-kemijske i biološke parametre u vodotoku. Osnovne postavke su da kakvoća vode u razdoblju minimalnih protoka ne smije biti pogoršana u odnosu na ranije stanje, a njezina količina, nakon što se zadovolje svi vodoprivredni zahtjevi, mora osigurati sve uvjete za razvoj sveukupnoga ranijeg živog svijeta (prije zahvata).

Prema tome, određivanje biološkoga minimuma je vrlo složen postupak, jer je osim hidroloških obrada i analiza, kojima treba dovoljno pouzdano definirati vodni režim malih voda, potrebno uvažavati i bio-ekološke i ostale zahtjeve, a oni se znatno razlikuju od slučaja do slučaja. Zbog toga je vrlo teško odrediti općenite kriterije koji bi uvažavali osnovne fizikalno-kemijske i biološke parametre u vodotocima. Biološki minimum ne mora biti jednak u pojedinim mjesecima ili sezonama. U donošenju odluke o njegovoj veličini trebali bi sudjelovati stručnjaci različitih specijalnosti: hidrolozi, hidrauličari, biolozi, ekolozi, ihtiolozi, kemičari, urbanisti i specijalisti ostalih zainteresiranih struka.

O. Bonacci i T. Roje-Bonacci, (1997.a) u analizi biološkoga minimuma rijeke Žrnovnice (važne za vodoopskrbu Splita) ukazuju na potrebu izrade i provedbe detaljnog projekta hidroloških istraživačkih radova (motrenje vodostaja i mjerenja protoka i temperature vode), koji moraju biti povezani s mjerenjima kemijskih obilježja vode. Osim toga, potrebno je barem dvaput godišnje pratiti i mjeriti dječlovanje eko-sustava duž cijelog toka Žrnovnice.

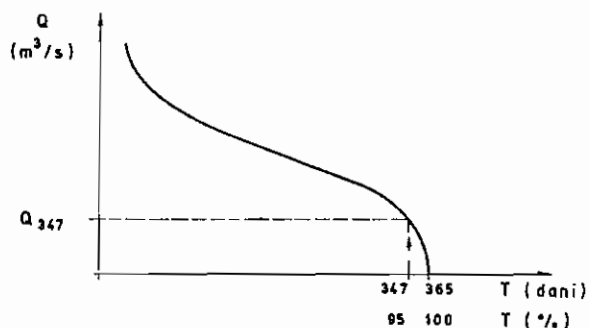
U Hrvatskoj za sada (do 1999. godine) ne postoje odgovarajući propisi, pa se veličina biološkoga minimuma često predlaže na temelju hidrološke obrade raspoloživih podataka dobivenih motrenjem i mjerenjem. Pritom se usvaja ranije preporučena definicija biološkoga minimuma na temelju koje treba "u prirodnome koritu vodotoka zadržati sve količine vode do prosječne minimalne količine u vodotoku: $Q_o = MNQ$ ". (MNQ je prosječni minimalni godišnji protok, definiran kao aritmetička sredina minimalnih godišnjih protoka u razmatranome razdoblju.).

U nekim se europskim zemljama biološki minimum Q_o definira kao **zadržani dotok u vodotoku** Q_o (engl. reserved flow).

U nekim se slučajevima u izračunavanju zadržanoga dotoka Q_o rabi Mattheyjeva formula:

$$Q_o = \frac{15,0 Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2} \quad (l/s) \quad (4.266)$$

gdje je Q_{347} protok 347-oga dana na prosječnoj krivulji trajanja protoka u profilu vodotoka za koji se računa biološki minimum, kao što je prikazano na slici 4.121.



Slika 4.121 Prosječna krivulja trajanja srednjih dnevnih protoka s označenim protokom 347-oga dana

G. A. Babalis (1997.) opisuje različite pristupe određivanju veličine biološkoga minimuma za potrebe projektiranja malih hidroelektrana na malim vodotocima. Određivanje biološkoga minimuma, odnosno zadržanoga dotoka u vodotoku, razmatrano je na primjeru europskih zemalja.

Pregled kriterija za određivanje biološkoga minimuma, odnosno dotoka koji se mora zadržati u vodotoku, dan je za 15 europskih država u tablici 4.32.

Za pregled kriterija određivanja Q_o u tablici 4.32 karakteristično je da se u veliku broju zemalja, u kojima postoji odgovarajuća zakonska regulativa, primjenjuju različiti pristupi koji se temelje isključivo na hidrološkoj osnovi (npr. u Austriji, Francuskoj, Italiji, Njemačkoj, Španjolskoj, Engleskoj i Walesu). S toga se gledišta može naći opravdanje i za korištenje hidrološkoga pristupa za rješavanje biološkoga minimuma u Hrvatskoj, barem kao orijentacije u donošenju odluke o njegovoj veličini.

U primjeru nekoliko odabranih profila na malim vodotocima u Hrvatskoj, predviđenima za izgradnju malih hidroelektrana, kao prvi su korak u određivanju biološkoga minimuma hidrološkim pristupom izračunane njegove vrijednosti te uspoređene s vrijednostima definiranim prema europskim kriterijima. U skladu s kriterijem da biološki minimum ili zadržani dotok Q_o treba odgovarati prosječnoj minimalnoj količini vode u vodotoku, usvojena je veličina biološkoga minimuma kao prosječnoga minimalnog godišnjeg protoka MNQ . Taj je protok definiran za homogena razdoblja u kojima su provedena motrenja i mjerenja hidroloških veličina na razmatranim vodotocima, prema obradi podataka iz Banke hidroloških podataka (BHP) Državnoga hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) RH.

Veličine predloženih bioloških minimuma za nekoliko karakterističnih profila zahvata malih hidroelektrana uspoređene su s vrijednostima bioloških minimuma izračunanih prema kriterijima koji vrijede u različitim europskim zemljama. Rezultati izračuna dani su u tablici 4.33.

U tablici 4.33 su za svaki razmatrani zahvat male hidroelektrane (stupac 1) dani opći podaci - veličina sliva do zahvata A (stupac 2) i srednji protok u profilu zahvata SQ (stupac 3).

Predložena veličina biološkoga minimuma Q_o , koja je jednaka prosječnome godišnjem minimalnom protoku MNQ , dana je u stupcu 4 tablice 4.33. Veličina MNQ definirana je kao aritmetička sredina minimalnih godišnjih srednjih dnevnih protoka. Jedino je kod rijeke Jadro biološki minimum određen kompleksnijim pristupom, provedenim prije ove obrade. Ta je vrijednost usvojena i označena zvjezdicom*, a u zagradi je dana vrijednost MNQ .

U stupcima 5 - 9 tablice 4.33 dane su vrijednosti Q_o određene na osnovi hidroloških kriterija koji vrijede u nekim europskim zemljama. U stupcu 5 su veličine $Q_o = 0,10 SQ$ ($0,10 SQ$ je 10 posto srednjega protoka), prema važećemu kriteriju u Austriji i Francuskoj. U talijanskoj pokrajini Bolzano uzima se kao mjerodavna veličina specifičnoga dotoka sa sliva $q_o = 2,0 l/s/km^2$. Biološki minimum je prema tome $Q_o = q_o A$ (l/s) i te su vrijednosti dane u stupcu 6 tablice 4.33. U Njemačkoj se najčešće uzima da je $Q_o = 0,50 MNQ$, pa je ta formula usvojena u izračunu (stupac 7 tablice 4.33).

Tablica 4.32 Pregled kriterija definiranja zadržanoga dotoka u vodotoku Q_o (reserved flow) u projektiranju malih hidroelektrana (G. A. Babalis, 1997.)

Zemlja	Određivanje zadržanoga dotoka u vodotoku Q_o
Austrija	Nema posebne zakonske regulative. Na dionicama rijeke mora biti osigurana ekološka ravnoteža. Uobičajeno: $Q_o = 5 - 10\% SQ$ i prema Mattheyjevoj formuli.
Belgija	Nema uredbi
Danska	Nema posebne zakonske regulative.
Francuska	Zakonski se zahtijeva za vodotoke s dugogodišnjim prosječnim protokom $SQ < 80 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_o = 10\%$, a za $SQ > 80 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_o = 5\% SQ$. To je minimalna vrijednost, a stručnjaci u tom području mogu odrediti i veće vrijednosti.
Grčka	Različito od slučaja do slučaja.
Irska	Utvrđuje se od ovlaštenih područnih stručnjaka.
Italija	Nema državne zakonske regulative. U Lombardiji: $q_o = 1,60 - 3,75 \text{ l/s/km}^2$ U Pijemontu: $Q_o = 10\% Q$ (Q je trenutni protok). U autonomnoj pokrajini Bolzano $q_o = 2,0 \text{ l/s/km}^2$.
Luxembourg	Određivanje Q_o obuhvaćeno je Zakonom o očuvanju okoliša.
Nizozemska	Regionalna uprava za vode određuje Q_o na temelju pregovora s vlasnikom elektrane.
Njemačka	U nekim se pokrajinama Q_o određuje na osnovi zakonske regulative, a u nekim za svaki slučaj posebno (donosi se zajednička odluka mjesnog Parlamenta i Vodoprivrede). U praksi u Bavarskoj $Q_o = 0,33 - 1,00 MNQ$; u Sjevernoj Vestfaliji $Q_o = 0,20 - 0,50 MNQ$; u Rajnskoj oblasti $Q_o = 0,33 - 0,50 MNQ$; u Baden-Württembergu Q_o se mijenja po godišnjim dobima, a u Hessenu od slučaja do slučaja (MNQ je prosječna mala voda).
Portugal	Ne postoji zakonska regulativa. Q_o se određuje na osnovi neobjavljenih kriterija.
Španjolska	U skladu sa Zakonom o vodama iz 1988., Q_o jednak je maloj vodi ili specifičnome dotoku sa sliva od $2,0 \text{ l/s/km}^2$. U pokrajini Asturiji rijeke su podijeljene na tri razreda i Q_o se određuje na temelju Mattheyjeve formule. U prvome razredu za Q_o (l/s) usvaja se najveća od sljedećih triju vrijednosti: a) $Q_o = 0,35 Q_{347}$ b) $Q_o = \frac{15,0 Q_{347}}{(\ln Q_{347})^2}$ c) $Q_o = 0,25 Q_{347} + 75$ U drugome razredu Q_o se proračuna kao i u prvom i onda mu se pribroji protok koji odgovara specifičnome dotoku sa sliva od $2,0 \text{ l/s/km}^2$. Za treći se razred protoku izračunano kao u prvom pribroji protok koji odgovara specifičnome dotoku od $4,0 \text{ l/s/km}^2$. (Q_{347} je protok jednak protoku u 347 dana na prosječnoj krivulji trajanja.)
Švedska	Nema propisa. Zahtjeva se da Uprava voda odredi Q_o za svaki slučaj posebno.
Švicarska	Od 1.11.1992. je na snazi Savezni zaštitni zakon o vodi, koji sadrži odredbe za proračune rezervi vode. Za sve vodne tokove se Q_o određuje kao funkcija Q_{347} i različitih područnih ekoloških zahtjeva - koji se u izuzetnim okolnostima mogu smanjiti.
Velika Britanija	U Engleskoj i Walesu Q_o se određuje prema pojedinom slučaju, a najniža vrijednost je protok 95-postotnoga trajanja. U Škotskoj Q_o određuje područno vijeće i njegove vrijednosti variraju od 5 do 25 posto srednje vode.

Na osnovi provedene usporedbe predloženih veličina biološkoga minimuma iz stupca 4 i veličina određenim prema kriterijima u razmatranim europskim zemljama iz stupaca 5 - 9 tablice 4.33 može se zaključiti da je odabrani hidrološki kriterij određivanja biološkoga minimuma u Hrvatskoj u većini slučajeva stroži nego u mnogim drugim: europskim zemljama.

Veličine MNQ za Hrvatsku uglavnom su veće od Q_o određena prema različitim pristupima u europskim zemljama. Ova činjenica ukazuje na određenu sigurnost da predložene vrijednosti bioloških minimuma na temelju hidrološkoga pristupa nisu preskromno određene u usporedbi s europskim iskustvima. Prema tome se može zaključiti da ovakav hidrološki pristup predstavlja pouzdanu podlogu za definiranje biološkoga minimuma na temelju složenoga multidisciplinarnog pristupa, kao što je bilo naglašeno na početku ovoga poglavlja.

Tablica 4.33 Biološki minimum Q_o karakterističnih zahvata malih hidroelektrana u Hrvatskoj prema različitim hidrološkim kriterijima

Vodotok i energetski profil	A (km ²)	SQ (m ³ /s)	Q _o =MNQ (l/s)	Q _o (l/s) u europskim zemljama					Razdoblje obrade (god.)
				Austrija Francuska 0,10 SQ	Italija: Bolzano q _o =2,0 l/s/km ²	Njemačka 0,50 MNQ	Španjolska 15,0 Q ₃₄₇ / (ln Q ₃₄₇) ²	Engleska i Wales 95% Q	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ljuta 1	119	3,40	440	340	238	220	123	250	1981.-1990.
Vitunjića 3	89	3,25	290	325	178	145	140	307	1976.-1990.
Orljava 6	743	5,21	600	521	1490	300	232	650	1951.-1995
Kupica 1	144	7,61	1185	760	290	593	410	1450	1981.-1995.
Jadro 1	240	7,22	1800* (1380)	720	480	690	370	1250	1973-1983
Krupa 2	131	5,15	280	515	260	140	80	125	1981-1990.
Kupčina 4	146	1,80	360	180	290	180	135	285	1981-1995

* protok određen kompleksnijim pristupom (O. Bonacci i T. Roje-Bonacci, 1997.b)

4.20 Nanos u vodotocima

4.20.1 Postanak i vrste nanosa

Nanos je materijal vodom donesen s mjesta odakle potječe na mjesto taloženja. U vodotocima se nanos prema načinu gibanja dijeli na **lebdeći** ili **suspendirani** i **vučeni** - po dnu korita.

U hidrološkim je obradama i analizama uz poznavanje vodnih režima pojedinih vodotoka od velike važnosti i definiranje pronosa i količina nanosa. To je posebno

važno za projektiranje akumulacijskih jezera, jer njihov vijek trajanja vrlo često ovisi o količinama nanosa koji vodotokom dolazi u akumulaciju. Načini čišćenja nanosa iz akumulacijskih jezera još uvijek nisu dovoljno proučeni i poznati. Trajanje plovnih, natapnih, drenažnih i ostalih kanala, uz ostale čimbenike, ovisi i o količinama nanosa koji se u njima zadržava.

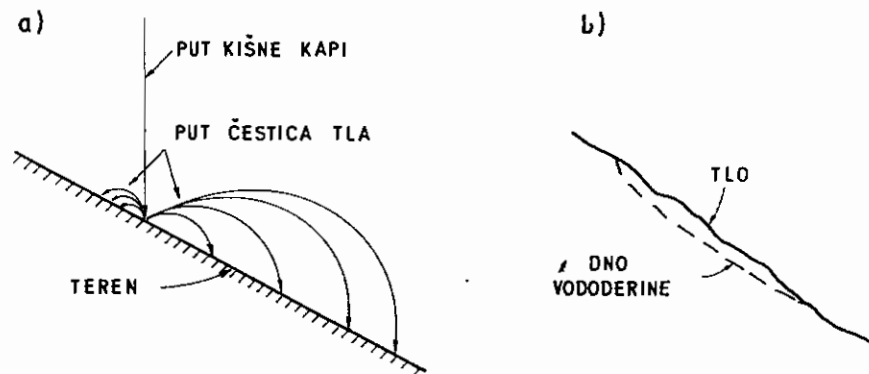
Nanos po svome sastavu može biti: **anorganski** (uglavnom petrografski sastav), **organski** (pretežno od drvene i lisnate materije) i **kemijski** (ostatak različitih kemijskih procesa u industriji).

Anorganski riječni nanos, koji se opisuje u ovome poglavlju, nastaje tijekom erozije u slivu. Razlikuju se **površinska i dubinska erozija**. Do površinske erozije dolazi uslijed površinskoga otjecanja pale oborine i na taj način nastaje lebdeći nanos. Dubinska erozija pojavljuje se za pojačana površinskoga otjecanja, kada se stvaraju vododerine i bujice, a u tome procesu uglavnom nastaje vučeni nanos. Vučeni je nanos znatno krupniji od lebdećega, a njegove se čestice duž riječnoga toka kreću kotrljanjem (vučenjem) po riječnome dnu ili skokovima (saltacijom).

Podjela nanosa na lebdeći i vučeni je uvjetna, jer određivanje koji dio nanosa lebdi u vodi, a koji se kreće po dnu ovisi o hidrauličkim uvjetima u toku. Približno se može usvojiti da od ukupne količine nanosa u vodotoku prosječno oko 85 do 95 posto otpada na lebdeći, a 5 do 15 posto na vučeni nanos (D. Muškatirović, 1979.).

Stupanj i jačina erozije ovise o jačini oborina, nagibima sliva, značajkama vegetacije i poduzetim mjerama za zaštitu od erozije.

Neuređene bujice u nekoherentnome materijalu naročito doprinose donošenju nanosa u vodotoke, a izravni utjecaj na količine nanosa imaju položaj (topografski) sliva, te njegov geološki sastav i obraštenost. Na slici 4.122 shematski je prikazano kako nanos dolazi u vodotok.



Slika 4.122 Transport čestica tla nizvodno uslijed prskanja kišnih kapi (a) (W. D. Ellison, 1944.) i uzdužni profil tipične vododerine (b) (R. K. Linsley i dr., 1988.)

Promjer kišnih kapi varira od 0,5 do 5,8 mm, a krajnja brzina v , ovisno o promjeru kapi d , varira od 2 do 9 m/s (tablica 4.34). Budući da je kinetička energija proporcionalna s $d^3 v^2$, R. K. Linsley i dr. (1988.) smatraju da snaga erozije velikih kapi može biti 10.000 puta veća od snage erozije malih kapi⁶. Ova je činjenica potkrijepljena podacima dobivenim terenskim motrenjima, koji redovito pokazuju da snažne oluje daju najveći doprinos eroziji na nekom slivu.

Tablica 4.34 Krajnja brzina (uz površinu zemlje) kišnih kapi u miru zraku: tlak zraka 101,33 kPa, temperatura zraka 20°C, relativna vlažnost 50% (R. Gunn i G. D. Kinzer, 1949.)

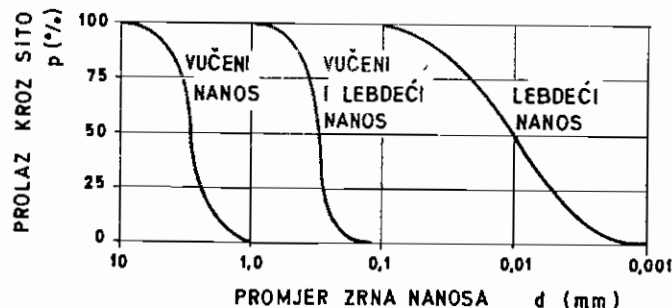
Promjer kišne kapi d (mm)	Krajnja brzina v (m/s)
0,5	2,06
1,0	4,03
1,5	5,41
2,0	6,49
3,0	8,06
4,0	8,83
5,0	9,09
5,5	9,15
5,8	9,17

Najvažniji pokazatelj riječnoga nanosa je njegov granulometrijski sastav, prvenstveno jer oblik zrnaca nanosa i njegova gustoća variraju, ovisno o krupnoći, u granicama koje se mogu približno odrediti. D. Muškatirović (1979.) opisuje dva osnovna načina određivanja granulometrijskoga sastava riječnoga nanosa ovisno o krupnoći nanosa:

- određivanje granulometrijskoga sastava nanosa prosijavanjem kroz sustav sita različitih širina rupa - za nanos krupna granulometrijskoga sastava zrna promjera $d > 0,062$ mm
- određivanje granulometrijskoga sastava na osnovi brzine taloženja u mirnoj vodi (hidraulička krupnoća) - za sitan nanos.

Najčešći oblik statističke obrade podataka o granulometrijskome sastavu riječnoga nanosa je određivanje sumarnih krivulja raspodjele, kao što je za jedan karakteristični slučaj u log-normalnom mjerilu prikazano na slici 4.123.

⁶ Odnos $d^3 v^2$ za najveću i najmanju kap kiše iz tablice 4.34 ($d_1 = 5,8$ mm; $v_1 = 9,17$ m/s i $d_2 = 0,5$ mm; $v_2 = 2,06$ m/s) je 35.000:1, ali se malim povećanjem kapi i njezine brzine vrlo brzo postigne odnos 10.000:1 ($d_1 = 5,8$ mm; $v_1 = 9,17$ i $d_2 = 0,65$ mm; $v_2 = 2,44$ m/s).



Slika 4.123 Shematski prikaz granulometrijskoga dijagrama riječnog nanosa (D. Muškatirović, 1979.)

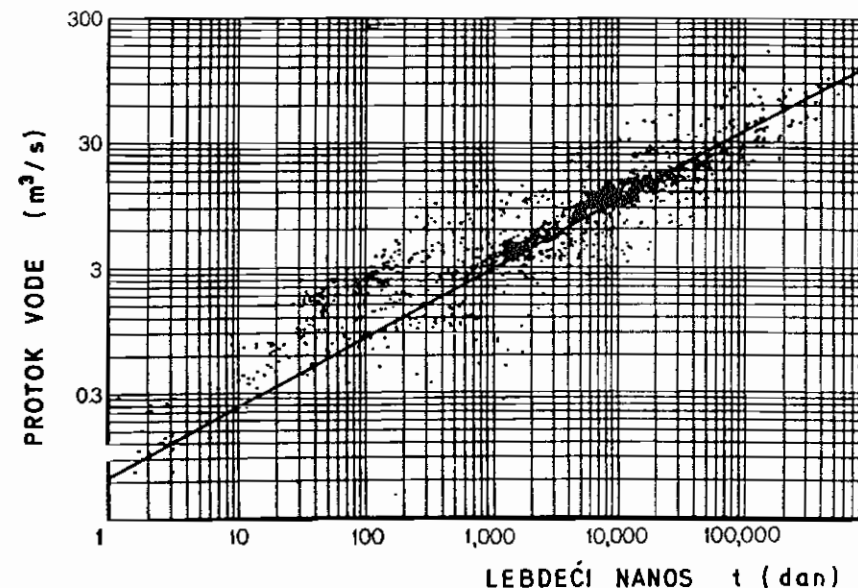
Podjela nanosa prema krupnoći dana je u tablici 4.35

Tablica 4.35 Vrste riječnog nanosa (W. H. Shen, 1971.)

Vrsta	Skupina	Promjer d	
		(mm)	(μ)
kamen	vrlo krupne gromade	2000 - 4000	
	krupne gromade	1000 - 2000	
	srednje gromade	500 - 1000	
	male gromade	250 - 500	
	krupan kamen	130 - 250	
	sitan kamen	64 - 130	
šljunak	vrlo krupan šljunak	32 - 64	
	krupan šljunak	16 - 32	
	srednje krupan šljunak	8 - 16	
	fini šljunak	4 - 8	
	vrlo fini šljunak	2 - 4	
pijesak	vrlo krupan pijesak	1,0 - 2,0	1000 - 2000
	krupan pijesak	0,5 - 1,0	500 - 1000
	srednji pijesak	0,25 - 0,5	250 - 500
	fini pijesak	0,125 - 0,25	125 - 250
	vrlo fini pijesak	0,062 - 0,125	62 - 62
prašina	krupna prašina	0,031 - 0,062	31 - 62
	srednja prašina	0,016 - 0,031	16 - 31
	fina prašina	0,008 - 0,016	8 - 16
	vrlo fina prašina	0,004 - 0,008	4 - 8
glina	krupna glina	0,0020 - 0,0040	2 - 4
	srednja glina	0,0010 - 0,0020	1 - 2
	fina glina	0,0005 - 0,0010	0,5 - 1
	vrlo fina glina	0,00024 - 0,0005	0,24 - 0,5

4.20.2 Pronos nanosa

Rezultati mjerenja pronosa lebdećega nanosa (opis u pogl. 4.6.4) redovito znatno odstupaju od prosječnih zakonitosti, kao što je prikazano na primjeru rijeke Powder u Wyomingu na slici 4.124. Zakonitost veze između dnevnoga pronosa nanosa i srednjih dnevnih protoka vode sa slike 4.124 treba shvatiti orijentacijski.



Slika 4.124 Dnevni pronos lebdećega nanosa u ovisnosti o srednjim dnevnim protocima vode rijeke Powder u Wyomingu (G. Fleming, 1969.a)

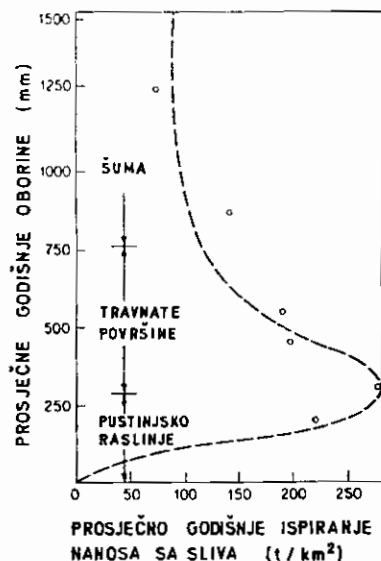
Prosječno godišnje ispiranje lebdećega nanosa sa sliva ovisi o mnogim čimbenicima, kao što su: klima, topografija, vrste tla, obraštenost i obrađenost zemljišta te prisutnost prirodnih i umjetnih retencijskih prostora. Na slici 4.125 prikazana je približna krivulja specifičnih dotoka nanosa za različita područja u ovisnosti o prosječnim godišnjim oborinama.

G. Fleming (1969.) je, na osnovi podataka dobivenih mjerenjem lebdećega nanosa na 250 slivova iz cijeloga svijeta, izveo jednostavnu zakonitost za srednju godišnju količinu nanosa Q_s u ovisnosti o srednjemu godišnjem protoku vode Q (m^3/s), za različite vrste vegetacije na slivu:

$$Q_s = a Q^n \quad (t/god.) \quad (4.267)$$

a i n su parametri čije su vrijednosti dane u tablici 4.36.

Pri korištenju formule (4.267) moguća su odstupanja od ± 50 posto.



Slika 4.125 Prosječno godišnje ispiranje nanosa sa sliva u ovisnosti o prosječnim godišnjim oborinama (W. B. Langbein i S. A. Schum, 1958.)

Tablica 4.36 Vrijednosti parametara n i a u Flemingovoj formuli (4.267)

Biljni pokrov	n	a
miješane bjelogorične i crnogorične šume	1,02	4.000
crnogorične šume i visoka trava	0,82	59.000
kratka trava i grmlje	0,65	177.000
pustinja i grmlje	0,72	446.000

Na slivovima na kojima mjerenja pronosa i količine nanosa nisu provedena formula (4.267) može poslužiti u procjeni reda veličine godišnjih količina nanosa. Ako je moguće, takvu procjenu treba usporediti s podacima dobivenim na temelju provedenih motrenja i mjerenja lebdećega nanosa na sličnim slivovima u toj regiji.

Primjerice, za sliv rijeke Čabranke, koji je najvećim dijelom obrašten bjelogoričnom i crnogoričnom šumom, u profilu Zamost II, uz srednju vodu $Q = 3,75 \text{ m}^3/\text{s}$ je, prema (4.267), srednja godišnja količina lebdećega nanosa koji prođe kroz profil:

$$Q_s = a Q^n = 4000 \cdot 3,75^{1,02} = 15.400 \text{ t}$$

Ukoliko na sličnim slivovima u regiji mjerenja nanosa nisu provedena, pa zbog toga nije moguće usporediti rezultate izračunane po formuli s podacima dobivenim

mjerenjima, preporučljivo je usvojiti veličine koje omogućuju veću sigurnost. Pronos nanosa prema formuli (4.267) treba, u skladu s mogućim odstupanjima od ± 50 posto, povećati 50 posto, pa je prema tome količina lebdećega nanosa:

$$Q'_s = 1,50 \cdot 15.400 = 23.100 \text{ t/god.}$$

(Ukoliko se u tekstu ne naglasi da je riječ o godišnjoj količini nanosa, jedinica za Q_s je t/god.).

U ovome se slučaju može usvojiti da je u ukupnome nanosu 10 posto vučenoga nanosa. Prema tome, ukupnoga je nanosa:

$$Q_u = 1,10 Q'_s = 1,10 \cdot 23.100 = 25.410 \text{ t/god}$$

Površina sliva Čabranke do profila Zamost 2 je $A = 106 \text{ km}^2$, pa je prema tome prosječno specifično ispiranje nanosa sa sliva (specifični dotok nanosa):

$$q_u = \frac{Q_u}{A} = \frac{25 \cdot 410}{106} = 240 \text{ t/km}^2/\text{god.}$$

Pronos i količinu vučenoga nanosa u prirodnome vodotoku (pogl. 4.6.4) teže je mjeriti nego lebdeći nanos, pa je zbog toga podataka o vučenome nanosu znatno manje nego podataka o lebdećem. Ranije iskustvene formule za pronos vučenoga nanosa (A. Schoklitsch, E. Meyer-Peter) osnivaju se samo na pokusima, a novije formule, primjerice Einsteinova, dijelom imaju i teorijsku osnovu.

a) Schoklitscheva formula

Pronos vučenoga nanosa G je, prema A. Schoklitschu (1930.):

$$G = 143,98 b \sum_{i=1}^n \frac{437,9}{\sqrt{d_i}} I_e^{3/2} (10,76 q - q_{oi}) \quad (\text{t/dan}) \quad (4.268)$$

gdje je b (m) širina vodotoka; d_i (mm) srednji promjer svake pojedine frakcije nanosa; I_e pad linije energije (hidraulički gradijent); q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) protok vode po jedinici širine korita; a n je broj pojedinih frakcija na koje je nanos podijeljen;

$$q_{oi} = \frac{0,00021 d_i}{I_e^{1,3}} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{m}) \quad (4.269)$$

b) Meyer-Peterova formula

Meyer-Peterova formula (E. Meyer-Peter i dr., 1934.) prilagođena je SI sustavu mjera, pa je u tom obliku pronos vučenoga nanosa q^2 :

¹ Izvorni oblik Meyer-Peterove formule je $q = 40 (\tau - \tau_c)^{3/2}$, a jedinica za q je (Mp/sm). Radi odnosa (2.10) $\gamma = \rho g$, konstanta 40 u SI sustavu mjera je $40/9,81^{3/2} = 1,30$

$$q = 1,30 (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (\text{t/sm}) \quad (4.270)$$

$$\tau = \rho g R I_c \left(\frac{Q_s}{Q} \left(\frac{n_p}{n} \right)^{3/2} \right) \quad (\text{t/m}^2) \quad (4.270a)$$

$$\tau_c = 0,461 (\rho_s - \rho) d \quad (\text{t/m}^2) \quad (4.270b)$$

gdje je τ (t/m^2) vučna sila na dnu korita, τ_c (t/m^2) kritična vučna sila (pri kojoj počinje pokretanje vučenoga nanosa)⁸, ρ (t/m^3) gustoća vode, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitacija. R (m) je hidraulički radijus - za široka se korita može uzeti $R = h$, - h (m) srednja dubina u protjecajnome profilu, I_c pad linije energije, Q_s (m^3/s) protok vode iznad površine po kojoj se kreće vučeni nanos, Q (m^3/s) ukupni protok vode kroz protjecajni profil, n_p ($\text{s/m}^{1/3}$) Manningov koeficijent hrapavosti zrna nanosa uslijed strujanja, n ($\text{s/m}^{1/3}$) Manningov koeficijent hrapavosti cijele dionice vodotoka, ρ_s (t/m^3) gustoća suhoga nanosa i d (m) srednji promjer zrna vučenoga nanosa.

Manningov koeficijent hrapavosti zrna nanosa uslijed strujanja u vodotoku n_p je:

$$n_p = \frac{d_{90}^{1/6}}{26}; \quad (4.271)$$

gdje je b (m) širina dna u protjecajnome profilu.

Protok u dijelu protjecajnome profila u kojemu se kreće nanos Q_s je:

$$Q_s = \frac{Q}{1 + \frac{b \left(\frac{n_s}{n_p} \right)^{3/2}}{2h}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.272)$$

n_s je Manningov koeficijent hrapavosti stranica korita, a b (m) je širina dna po kojemu se kreće vučeni nanos.

c) Einsteinova formula

H. A. Einstein (1950.) je definirao intenzitet pronosa vučenoga nanosa kao:

$$\phi = \frac{G_i}{\rho g} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \frac{1}{g d^3} \quad (4.273)$$

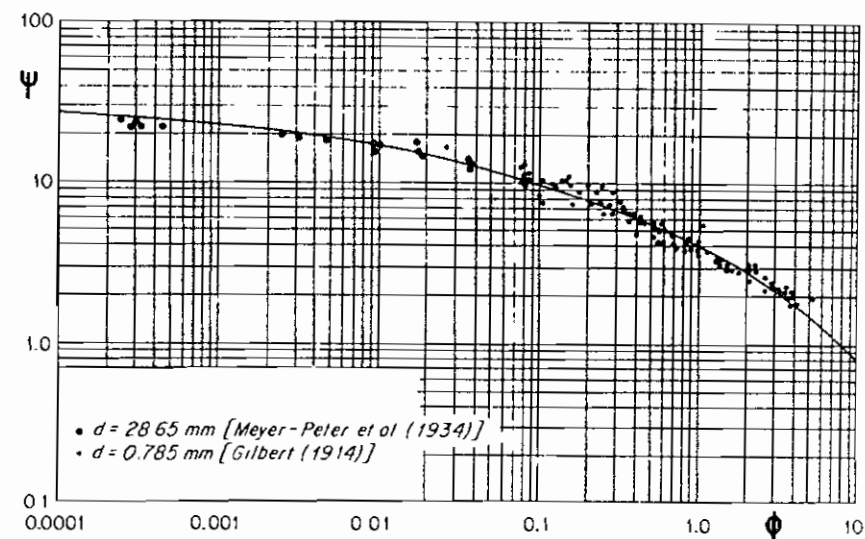
⁸ Izvorni oblik formule (4.270b) je $\tau_c = 0,047 (\gamma_s - \gamma) d$, a radi odnosa (2.10) je $\tau_c = 0,047 (\rho_s g - \rho g) d = 0,461 (\rho_s - \rho) d$

i intenzitet toka kao:

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{I_c R} \quad (4.274)$$

gdje je G_i (t/s) pronos vučenoga nanosa; ρ (t/m^3) gustoća vode; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ gravitacija; ρ_s (t/m^3) gustoća vučenoga nanosa; $\rho = 1,0 \text{ t/m}^3$ gustoća vode; d (m) je promjer zrna vučenoga nanosa, za koji H. A. Einstein preporuča da se uzme d_{35} (promjer zrna 35 postotne frakcije iz granulometrijske krivulje vučenoga nanosa) ukoliko je vučeni nanos sitan; I_c je pad linije energije; a R (m) je hidraulički radijus koji je kod širokih korita približno jednak srednjoj dubini $R \approx h$.

Na slici 4.126 je prikazana Einsteinova funkcija $\phi = f(\psi)$. Uz krivulju su naertane i veličine provedenih mjerenja za jednoličan nanos.



Slika 4.126 Einsteinova funkcija $\phi = f(\psi)$ (R. K. Linsley i dr., 1988.)

Izračun pronosa vučenoga nanosa prema navedenim trima formulama prikazan je na sljedećem primjeru:

U protjecajnome profilu prirodnoga vodotoka širine dna $b = 23,0 \text{ m}$ i srednje dubine $h = 1,80 \text{ m}$, srednja profilska brzina je $v = 1,45 \text{ m/s}$, a Manningov koeficijent hrapavosti $n = 0,035 \text{ s/m}^{1/3}$. Koliko je vučenoga nanosa prošlo kroz razmatrani profil toga dana (uz uvjet da su srednja dubina i srednja brzina vode cijeli dan nepromijenjene), ako su karakteristike nanosa: srednji promjer zrna je $d = 5,0 \text{ mm}$; $d_{35} = 4,0 \text{ mm}$; $d_{90} = 21,0 \text{ mm}$, a gustoća nanosa $\rho_s = 2,3 \text{ t/m}^3$.

Za ovaj se protjecajni profil, zbog velike širine dna u odnosu na dubinu vode, može usvojiti da je hidraulički radijus jednak prosječnoj dubini vode:

$$R = h = 1,80 \text{ m}$$

Ukupan protok vode kroz profil je:

$$Q = A v = b h v = 23,0 \cdot 1,80 \cdot 1,45 = 60,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pad linije energije je (iz Manningove formule za brzinu):

$$I_e = \frac{v^2 n^2}{h^{4/3}} = \frac{1,45^2 \cdot 0,035^2}{1,80^{4/3}} = 0,0012 \text{ (0,12 \%)}$$

Izračun se prema Schoklitschevoj formuli u ovom slučaju provodi za jedinstveni sastav nanosa, bez podjele na pojedine frakcije, pa je prema tome $i = 1$. Protok q_{01} je, u skladu s formulom (4.269):

$$q_{01} = \frac{0,00021 d}{I_e^{4/3}} = \frac{0,00021 \cdot 5,0}{0,0012^{4/3}} = 8,23 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Specifični protok q je:

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{60,0}{23,0} = 2,61 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Pronos vučenoga nanosa za $i = 1$ je prema Schoklitschevoj formuli (4.268):

$$G = 143,98 b \frac{437,9}{\sqrt{d}} I_e^{3/2} 10,76 (q - q_{01}) = \\ = 143,98 \cdot 23,0 \frac{437,9}{\sqrt{5,0}} 0,0012^{3/2} (10,76 \cdot 2,61 - 8,23) = 535 \text{ t/dan}$$

Kada se pronos vučenoga nanosa izračunava prema Meyer-Peterovoj formuli, najprije treba odrediti Manningov koeficijent hrapavosti zrna nanosa uslijed strujanja n_p prema (4.271):

$$n_p = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = \frac{0,021^{1/6}}{26} = 0,020 \text{ s/m}^{1/3}$$

Uz pretpostavljeni koeficijent hrapavosti stranica korita $n_s = 0,030 \text{ s/m}^{1/3}$, protok vode u dijelu protjecajnoga profila u kojemu se kreće nanos je, prema (4.272):

$$Q_s = \frac{Q}{1 + \frac{2h}{b \left(\frac{n_s}{n_p} \right)^{3/2}}} = \frac{60,0}{1 + \frac{2 \cdot 1,80}{23,0 \left(\frac{0,030}{0,020} \right)^{3/2}}} = 55,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Za hidraulički se radijus može usvojiti $R = h = 1,80 \text{ m}$, pa je vučna sila na dnu korita prema formuli (4.270a):

$$\tau = \rho g h I_e \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{n_p}{n} \right)^{3/2} = 1,0 \cdot 9,81 \cdot 1,80 \cdot 0,0012 \cdot \frac{55,3}{60,0} \cdot \left(\frac{0,020}{0,035} \right)^{3/2} = \\ = 0,00844 \text{ t/m}^2$$

Kritična vučna sila je prema formuli (4.270b):

$$\tau_c = 0,461 (\rho_s - \rho) d = 0,461 \cdot (2,3 - 1,0) \cdot 0,005 = 0,00300 = 0,00300 \text{ t/m}^2$$

Pronos vučenoga nanosa je prema formuli (4.270):

$$q = 1,30 (\tau - \tau_c)^2 = 1,30 \cdot (0,00844 - 0,00300)^2 = 0,000522 \text{ t/sm}$$

Kroz protjecajni profil širine $b = 23,0 \text{ m}$ prođe:

$$G_1 = b q = 23,0 \cdot 0,000522 = 0,012 \text{ t/s}$$

Ukupan dnevni pronos nanosa kroz protjecajni profil, izračunan na temelju Meyer-Peterove formule je:

$$G = 24 \cdot 3600 \cdot G_1 = 86.400 \cdot 0,012 = 1037 \text{ t/dan}$$

Prema Einsteinovoj formuli prvo treba izračunati intenzitet toka prema izrazu (4.274):

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d_{35}}{I_e h} = \frac{2,3 - 1,0}{1,0} \frac{0,004}{0,0012 \cdot 1,80} = 2,41$$

Za vrijednost $\psi = 2,41$ iz dijagrama sa slike 4.125 očita se veličina $\phi = 2,30$. Pronos vučenoga nanosa je stoga, na temelju izraza (4.274):

$$G_1 = \frac{\phi \rho g}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{1}{g d_{35}^3}}} = \frac{2,30 \cdot 1,0 \cdot 9,81}{\sqrt{\frac{1,0}{2,3 \cdot 1,0} \frac{1}{9,81 \cdot 0,004^3}}} = 0,02 \text{ t/s}$$

Budući da jedan dan ima 86.400 sekundi, ukupan pronos nanosa na temelju Einsteinove formule je:

$$G = 86.400 G_1 = 86.400 \cdot 0,02 = 1728 \text{ t/dan}$$

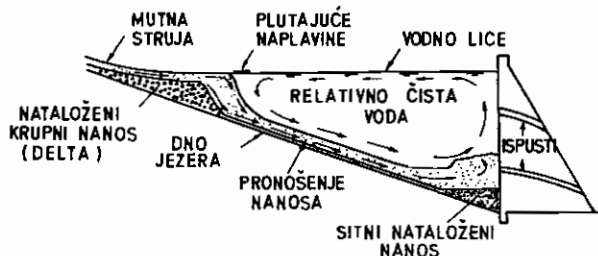
Rezultati izračuna pronosa vučenoga nanosa prema trima razmatranim formulama međusobno se previše razlikuju. Naročito je velika razlika između pronosa vučenoga nanosa prema Schoklitschevoj (4.268) i prema Einsteinovoj formuli (4.273). Određeni utjecaj na rezultate ima početna aproksimacija, jer izračun nije rađen po lamelama, nego za cijeli protjecajni profil. Osim toga, Einsteinovu funkciju $\phi = f(\psi)$ na slici

4.126 Meyer-Peterova mjerenja jednolična vučenog nanosa potvrđuju samo u području do $\psi = 1,0$; $\phi = 0,1$, a u obrađenoj primjeru je $\psi = 2,41$, dok je $\phi = 2,30$.

Na temelju vrlo velikih razlika u veličinama pronosa vučenoga nanosa prema različitim iskustvenim formulama može se zaključiti da na toj osnovi nije moguće dobiti dovoljno pouzdane rezultate. Prema tome, gdje god je to moguće, treba provoditi odgovarajuća mjerenja i tek nakon njihove obrade izvoditi odgovarajuće zaključke o pronosu i količini nanosa.

4.20.3 Nanos u akumulacijskim jezerima

Taloženje nanosa predstavlja osnovni problem akumulacijskih jezera jer se na taj način smanjuje njihov korisni prostor. Koristi li se akumulacijsko jezero za reguliranje dotoka, njegov će smanjeni korisni volumen bitno utjecati na njegovu namjenu, bilo da se radi o proizvodnji električne energije, vodoopskrbi, natapanju ili obrani od poplave i sl. Na slici 4.127 prikazan je shematizirani uzdužni presjek akumulacijskoga jezera s naznačenim kretanjem vode i nanosa, te taloženjem nanosa u jezeru.



Slika 4.127 Kretanje vode i nanosa u akumulacijskome jezeru (R. K. Linsley i J. B. Franzini, 1979.)

Krupni se nanos taloži na ulazu u akumulacijsko jezero i stvara deltu čije se čelo pomiče prema nizvodnome dijelu. Najsitniji se nanos taloži na najdubljem dijelu jezera, koji se redovito nalazi uz branu.

Dotoci nanosa u akumulacijska jezera međusobno se veoma razlikuju, a brzina kojom se raspoloživi prostor akumulacijskoga jezera smanjuje uslijed punjenja nanosom ovisi o trima glavnim čimbenicima:

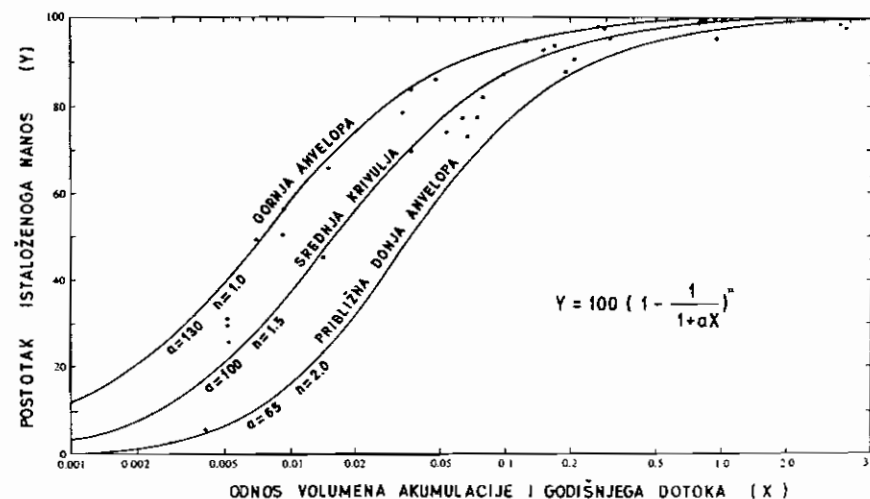
1. količini nanosa koja dolazi u akumulacijsko jezero
2. količini nanosa koja se zadržava u jezera
3. gustoći nataloženoga nanosa.

Glede nataloženoga nanosa u akumulacijskim jezerima treba imati na umu da se radi o uronjenome materijalu. U tablici 4.37 dani su rasponi unutar kojih se kreće gustoća pojedinih vrsta nanosa nataloženih u akumulacijskome jezeru.

Tablica 4.37 Rasponi gustoće nanosa nakon 50 godina taloženja u akumulacijskome jezeru (L. C. Gottschalk, 1964.)

Vrsta nataloženoga nanosa	Stalno uronjen ρ'_s (kg/m^3)	Sa zrakom ρ''_s (kg/m^3)
Glina	640 - 960	960 - 1280
Mulj	880 - 1200	1200 - 1360
Pijesak	1360 - 1600	1360 - 1600
Slabo granulirani pijesak i šljunak	1520 - 2080	1520 - 2080

Na temelju uspoređivanja nanosa u akumulacijskim jezerima s dotocima nanosa definiranim na osnovi mjerenja, G. M. Brune (1953.) je izveo odnos između postotka dolazećega nanosa koji se zadržava u akumulacijskome jezeru i srednjega godišnjeg dotoka vode u jezero. Na slici 4.128 prikazan je preinačeni (prepravljeni) dijagram odnosa nataloženoga nanosa u akumulacijskome jezeru i godišnjega dotoka vode u jezero izrađen na temelju Bruneovih osnovnih postavki.



Slika 4.128 Nanos u akumulacijskome jezeru kao funkcija prostora u jezeru i dotoka vode (R. K. Linsley i dr., 1988., nakon G. M. Brunea)

Postotak punjenja akumulacijskoga jezera nanosom Y definiran je izrazom:

$$Y = 100 \left(1 - \frac{1}{1+aX} \right)^n \quad (\%) \quad (4.275)$$

parametri a i n dani su uz krivulje na slici 4.128, (od kojih za izračun treba odabrati odgovarajuću krivulju prema osobinama razmatranoga sliva), a X je odnos akumulacijskoga prostora i godišnjega dotoka vode u jezero.

Izračun vijeka trajanja akumulacije uz korištenje dijagrama sa slike 4.128 prikazan je na sljedećemu primjeru:

Akumulacijsko jezero ima volumen $V_o = 12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; površina sliva do pregradnoga profila je $A = 360 \text{ km}^2$; prosječna godišnja efektivna oborina je $P_e = 450 \text{ mm}$; prosječno ispiranje nanosa sa sliva je $q_s = 2300 \text{ t/km/god.}$, a gustoća (mokroga) nanosa u akumulacijskome jezeru je $\rho'_s = 1540 \text{ kg/m}^3$. Koliko će se dugo akumulacijsko jezero puniti nanosom dok u njemu ne ostane prostor $V'_o = 2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$?

Prosječni godišnji dotok vode u akumulacijsko jezero je:

$$Q = P_e A = 0,450 \cdot 360 \cdot 10^6 = 1,62 \cdot 10^8 \text{ m}^3$$

Prosječni godišnji dotok nanosa u jezero je:

$$G = q_s A = 2300 \cdot 360 = 828.000 \text{ t}$$

Prosječni godišnji volumen nanosa koji dođe u jezero je:

$$V_n = \frac{G}{\rho'_s} = \frac{828.000}{1540} = 538.000 \text{ m}^3$$

Izračun trajanja punjenja akumulacijskoga jezera nanosom može se provesti po dijelovima raspoloživoga volumena. U razmatranome se slučaju izračun provodi za svakih $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ akumulacijskoga jezera.

Za prvih $V'_o = 2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (od $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ do $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) je prosječni volumen akumulacijskoga jezera $V_o = 11 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, pa je odnos volumena u jezeru i prosječnoga godišnjeg dotoka vode:

$$X = \frac{V_o}{Q} = \frac{11 \cdot 10^6}{1,62 \cdot 10^8} = 0,068$$

Ako se kao mjerodavna usvoji srednja krivulja sa slike 4.128, postotak nanosa koji se zadrži u akumulacijskome jezeru je:

$$Y = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + aX} \right) = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + 100 \cdot 0,068} \right)^{1,5} = 81,4 \% \quad (0,81)$$

Punjenje prvoga dijela akumulacijskoga jezera volumena $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ traje:

$$t = \frac{V'_o}{Y V_n} = \frac{2.000.000}{0,81 \cdot 538.000} = 4,6 \text{ god.}$$

Rezultati izračuna za sve dijelove raspoloživoga volumena akumulacijskoga jezera od $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ do $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dani su u tablici 4.38.

Tablica 4.38 Izračun trajanja punjenja akumulacijskoga jezera nanosom

Dijelovi volumena akumulacijskoga jezera (10^6 m^3)	Prosječni volumen akumulacijskoga jezera V_o (10^6 m^3)	X	Y	Vrijeme punjenja t (god.)
12 - 10	11	0,068	0,81	4,6
10 - 8	9	0,056	0,78	4,8
8 - 6	7	0,043	0,73	5,1
6 - 4	5	0,031	0,66	5,6
4 - 2	3	0,019	0,53	7,0

Σt 27,1

Prema izračunu provedenom u tablici 4.38, volumen akumulacijskoga jezera od $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bi se za 27,1 godinu ispunio nanosom.

Izračun za cijeli raspoloživi prostor u akumulacijskome jezeru, koji iznosi

$V'_o = 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, može se provesti i drugačijim pristupom. U tome se slučaju prosječni volumen nalazi unutar raspona od $12 \cdot 10^6$ i $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. $V_o = 7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, pa je odnos toga volumena i prosječnoga dotoka vode $X = 0,043$, a postotak nanosa koji se zadrži u akumulacijskome jezeru je $Y = 73\%$. Vrijeme punjenja akumulacijskoga jezera nanosom je:

$$t = \frac{V'_o}{Y V_n} = \frac{10.000.000}{0,73 \cdot 538.000} = 25,5 \text{ god.}$$

Nema nikakve sumnje da je razlika u rezultatima prikazanih izračuna znatno manja od pouzdanosti ulaznih izračunskih podataka.

4.21 Jednadžba hidrološke bilance vode u općem obliku

Vodna bilanca je pregled raspoložive vode temeljen na načelu da tijekom određenoga vremenskog intervala ukupan višak vode u danome slivnom području ili vodnome objektu mora biti jednak zbroju ukupnoga gubitka vode i neto promjene zaliha vode u slivu ili vodnome objektu.

Hidrološki ciklus opisuje ukupni tijek kruženja i raspodjele vode u atmosferi na tlu i ispod tla. Otjecanje je onaj dio hidrološkoga ciklusa koji opisuje raspodjelu vode i njezine promjene od trenutka kada oborina padne na tlo i dospije u vodotok ili se evapotranspiracijom vrati u atmosferu.

Jednadžba bilance hidrološkoga ciklusa može se pisati u obliku:

$$P = Q_o + I + E \pm \Delta V |_{A(t_0, t)} \quad (4.276)$$

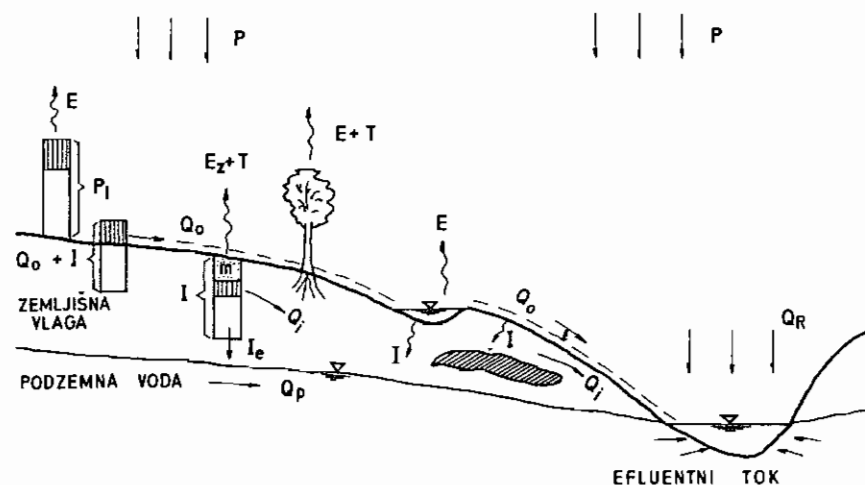
gdje su:

P	- bruto oborina
Q_o	- površinsko otjecanje
$I = Q_i + I_e + m$	- infiltracija
Q_i	- potpovršinsko otjecanje
I_e	- efektivna infiltracija ($I_e \rightarrow Q_p$)
Q_p	- podzemno otjecanje
$m = E_z + T$	- zemljišna vlaga
E_z	- isparavanje iz zemljišta
T	- transpiracija iz biljaka
E	- isparavanje s površine terena, s lišća i vegetacije, i s vodne površine
ΔV	- promjena zapremnine vode u slivu (podzemne vode i u površinskim tokovima)

Jedinice u jednadžbi vodne bilance mogu biti (m^3/s), (mm/s), (m^3), (mm) itd. - napisana jednadžba najčešće je dana u (mm) ili (m^3).

Jednadžba vodne bilance se uvijek odnosi na određenu slivnu površinu A i neko vremensko razdoblje (t_0, t).

Opisane veličine iz jednadžbe vodne bilance prikazane su na slici 4.129.



Slika 4.129 Komponente jednadžbe hidrološke bilance vode (S. Jovanović, 1975.)

4.22 Regionalna hidrološka analiza

4.22.1 Općenito o regionalnoj analizi

U ovome se poglavlju ukratko opisuju osnovne postavke regionalne hidrološke analize ili kraće, regionalne analize, i prikazuje njezina primjena na odabrane primjere iz obrade slivova hrvatskoga krša.

Prema definiciji UNESCO-a, **regionalna analiza** je *produbljivanje rezultata provedenih obrada i analiza podataka o nekoj regiji (području) dobivenih motrenjem i mjerenjem*.

U regionalnoj analizi zastupljena su sva tri osnovna usmjerenja hidrologije, prema kojima se hidrologija dijeli: na opisnu, primijenjenu i znanstvenu hidrologiju (pogl. 1.5).

Korištenje opisne (deskriptivne) hidrologije veoma je važno kada se primjenjuju rezultati obrada regionalnih hidroloških analiza sa slivova na kojima postoje mjerenja hidroloških veličina na slivove gdje nema izmjerenih podataka ili ih je premalo.

Korisnička ili primijenjena hidrologija usmjerava hidrološka istraživanja ka rješavanju praktičnih problema. To se u regionalnim analizama izravno očituje u mogućnosti primjenjivanja zakonitosti izvedenih na osnovi postojećih podataka dobivenih motrenjem i mjerenjem na vodotoke na kojima mjerenja hidroloških veličina nije bilo.

Svrha provođenja regionalnih analiza, tj. donošenje općenitih zaključaka o hidrološkim fenomenima i izvođenje zakonitosti koje se može primjenjivati na druge - u hidrološkome smislu slične - regije, sadrži u sebi i znanstvene komponente suvremene hidrologije.

Prema tom, u regionalnim hidrološkim analizama do izražaja dolaze sva tri osnovna hidrološka usmjerenja: opisna hidrologija u proučavanju bitnih hidroloških značajki, znanstvena hidrologija u analizama i izvođenju odgovarajućih pravila i zakonitosti, te korisnička hidrologija u primjeni tih zakonitosti u inženjerskoj praksi.

Primjenom regionalnih analiza u inženjerskoj hidrologiji obuhvaćena su ispitivanja hidroloških pojava s dvama osnovnim ciljevima:

1. Definiranje matematičkih izraza koji se mogu koristiti unutar razmatrane regije. Ovdje su općenito matematičkim izrazima obuhvaćene informacije dovoljno dugih nizova iznucjenih hidroloških veličina, tako da su one dovoljno pouzdane za korištenje na susjednim slivnim područjima s kraćim razdobljima opažanja ili na kojima motrenja i mjerenja hidroloških veličina uopće nema.
2. Izvođenje iskustvenih (parametarskih) izraza primjenjivih za šira geografska područja sa sličnim glavnim karakteristikama otjecanja vode. U tu se svrhu primjenjuju korelacije uz korištenje vjerojatnosti i statistike, uključivo sa složenom vjerojatnošću i analizom učestalosti.

Općenito je u regionalnim analizama, kao i u ostalim složenim hidrološkim analizama, proces obrade i analizu potrebno provoditi u tri osnovne faze. Te se faze sastoje iz procjene kakvoće osnovnih (izračunskih) podataka, strukturalne analize te modeliranja procesa i karakteristika prirodne sredine, kako je opisano u poglavlju 1.5.

U provođenju regionalnih hidroloških analiza bitne su prva i druga faza, odnosno procjena kakvoće podataka i strukturalna analiza.

Za hidrološke je stanice općenito karakteristično da su razdoblja njihova rada različiti duljina - često su kratkotrajna - a mjerni profili mogu biti nepristupačni i nestabilni. Osnovni hidrološki podaci - srednji i ekstremni dnevni protoci u području malih, a još češće velikih voda - definirani su na temelju ekstrapolacija protočnih krivulja. Ovo su glavni razlozi zašto je u regionalnim analizama naročito važno provesti odgovarajuće analize kakvoće osnovnih podataka.

Regionalne se analize provode na osnovi sljedećih postupaka:

1. Analize osnovnih podloga.
2. Određivanje obrada karakterističnih parametara čije međusobne veze će se ispitivati.
3. Ispitivanje veza između pojedinih karakterističnih parametara na temelju linearne i nelinearne korelacije.
4. Definiranje općenitih zakonitosti zadovoljavajućih veza uz grafičke prikaze.
5. Usporedbe rezultata regionalnih hidroloških analiza razmatrane regije s rezultatima analiza drugih regija.

4.22.2 Analize osnovnih podloga

Osnovne podloge za hidrološke proračune i analize mogu se podijeliti na tri glavne skupine:

1. slivovi
2. oborine
3. protoci (R. Žugaj, 1993.b).

Konačni rezultati hidroloških obrada izravno ovise o kakvoći osnovnih podloga, odnosno ulaznih podataka. Mogućnosti pogrešnih zaključivanja s obzirom na ulazne podatke mogu biti dvojak: ili je ulaznih podataka premalo ili su oni netočni. Zato je naročito važno provjeriti i po potrebi (ako je to moguće) ispraviti osnovne podloge. Ovdje se najčešće može razlikovati netočna mjerenja meteoroloških i hidroloških veličina (što se u novije vrijeme pojavljuje dosta rijetko) te netočne podatke izvedenih osnovnih veličina (npr. definiranje slivnih površina, ekstrapolacije protočnih krivulja i sl.).

Provjeri (verifikaciji) ulaznih podataka potrebno je posvetiti odgovarajuću pozornost, jer rezultati kasnijih obrada - matematičkoga modeliranja, simulacija i optimizacija - ne mogu biti bolji nego što dozvoljava kakvoća ulaznih podataka.

Pri utvrđivanju osnovnih podloga za provođenje regionalnih hidroloških analiza neophodno je posvetiti osobitu pozornost:

- a) veličinama slivnih površina (ovo se naročito odnosi na krške slivove gdje često postoje velike razlike između topografske i hidrogeološke razvodnice, a u nekim slučajevima se razvodnicu može odrediti samo približno, jer njezin položaj ovisi o stanju u podzemlju)
- b) ocjeni kakvoće izmjerenih hidroloških podataka (osnovu za to predstavlja kategorizacija hidroloških stanica prema Državnome hidrometeorološkom zavodu RH, prema kojoj su stanice svrstane u četiri kategorije: prva pruža najpouzdanije, a posljednja - četvrta kategorija - nesigurne hidrološke podatke) (I. Pavletić i B. Kljajić, 1987.)
- c) produljivanju (ekstrapolaciji) protočnih krivulja (provjera realnosti ekstrapoliranih protoka odnosi se na područja velikih i malih voda)
- d) duljinama nizova izmjerenih podataka (potrebno je ustanoviti jesu li razmatrani nizovi podataka dovoljno dugi da bi se na njih mogle primijeniti metode matematičke statistike)
- e) homogenosti razmatranih nizova (regionalne se analize provode s homogenim nizovima)
- f) podacima o visinama oborina (ove se osnovne podloge analiziraju na kraju, jer nakon ispitivanja duljine i homogenosti hidroloških nizova neki slivovi mogu otpasti, pa za njih onda ne treba razmatrati oborine). Za obradu slivova hrvatskoga krša korištene su karte izohijeta prosječnih godišnjih oborina u mjerilu 1:500.000 izrađene u DHMZ-u RH (N. Pleško i dr., 1984.).

4.22.3 Karakteristični parametri

Parametar je u širem smislu matematički termin s više značenja. Obično se definira kao varijabilna veličina čijim je posebnim značenjem određen neki konkretni element nekoga skupa. Općenito, hidrološki je parametar veličina koja opisuje neko svojstvo obradenih podataka, primjerice prosjek hidrološkoga niza \bar{X} standardno odstupanje σ , koeficijent varijacije c_v , koeficijent asimetrije c_s , modulni koeficijent itd.

Od karakterističnih hidroloških parametara u regionalizaciji se redovito upotrebljavaju prosjek \bar{X} te koeficijenti varijacije c_v i asimetrije c_s . Dimenzija prosjeka \bar{X} (za prosjeke nizova srednjih, maksimalnih i minimalnih protoka Q , Q_M i Q_m jedinica je m^3/s) određuje apsolutne vrijednosti u regionalizaciji pomoću bezdimenzionalnih parametara c_v i c_s . U cilju obrade što većega broja hidroloških informacija uz tri se osnovna, \bar{X} , c_v i c_s , u analizu uvode i drugi parametri. Obzirom na obrade podataka iz različitih regija, postoje određene razlike u izboru karakterističnih parametara. To ovisi o broju raspoloživih podataka, njihovoj pouzdanosti i vrstama provedenih terenskih istraživačkih radova u razmatranoj regiji.

Regionalnom hidrološkom analizom najčešće su obuhvaćeni sljedeći karakteristični parametri:

- veličine slivova A (km²)
- prosječne godišnje oborine koje padnu na sliv (bruto oborine) P (mm)
- prosječne godišnje efektivne oborine (oborine koje otječu, neto oborine) P_e (mm) i prosječni specifični dotoci sa sliva q (m³/s/km²) ili (l/s/km²)
- prosječni protoci Q (m³/s) i njihovi glavni deskriptori: standardno odstupanje σ (m³/s) te koeficijenti varijacije c_v i koeficijent asimetrije c_s ,
- prosječni godišnji koeficijenti otjecanja c
- maksimalni godišnji protoci: najveći zabilježeni Q_M (m³/s) i prosječni \bar{Q}_M (m³/s) s deskriptorima σ_M (m³/s), c_{vM} i c_{sM} te modulni koeficijenti maksimalnih godišnjih protoka Q_M/\bar{Q}_M
- maksimalni specifični dotoci sa sliva q_M (m³/s/km²)
- minimalni godišnji protoci: najmanji zabilježeni Q_m (m³/s) ili (l/s) i prosječni \bar{Q}_m (m³/s) ili (l/s), s deskriptorima σ_m (m³/s) ili (l/s) c_{vm} i c_{sm} te modulni koeficijenti minimalnih godišnjih protoka Q_m/\bar{Q}_m .

Od karakterističnih parametara čije se međusobne veze najčešće ispituju, također se mogu razmatrati:

- maksimalni godišnji protoci 10-, 100- i 1000-godišnjega povratnog razdoblja Q_{M10} ; Q_{M100} i Q_{M1000} (m³/s) te njihovi modulni koeficijenti Q_{M10}/\bar{Q}_M , Q_{M100}/\bar{Q}_M i Q_{M1000}/\bar{Q}_M
- minimalni godišnji protoci 10- i 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{m10} i Q_{m100} (m³/s) te njihovi modulni koeficijenti Q_{m10}/\bar{Q}_m i Q_{m100}/\bar{Q}_m (za minimalne godišnje protoke obično su dovoljno pouzdane vrijednosti do 100-godišnjega povratnog razdoblja).

Osim navedenih karakterističnih parametara u regionalne se hidrološke analize treba uključivati i pad sliva I , prosječne godišnje temperature zraka na slivu T , maksimalne oborine P_M i prosječni godišnji pronosi nanosa Q_N - ukoliko je proveden dovoljan broj mjerenja pronosa i količina nanosa.

4.22.4 Ispitivanje međusobnih veza i definiranje zakonitosti veza

U regionalnim hidrološkim analizama ispituju se linearne i nelinearne veze dviju i više varijabli. Kakvoća veza ocjenjuje se na osnovi vrijednosti koeficijenta korelacije r uz uobičajeni kriterij da je korelacija dobra - i u tome slučaju vezu ima smisla dalje razmatrati - ako je $r \geq |0,75|$.

Kako bi se moglo izvesti pouzdane zakonitosti veza s više od dviju varijabli, valja ispuniti dva osnovna uvjeta:

- a) veze između neovisnih varijabli i ovisne varijable trebaju biti što jače (koeficijent korelacije što bliži vrijednosti $r = 1,00$)

- b) međusobne veze nezavisnih varijabli trebaju biti što slabije (Z. M. Radić i dr., 1986.).

Ukoliko se na osnovi vrijednosti koeficijenta korelacije ustanovi da neku vezu ima smisla dalje razmatrati, metodom se najmanjih kvadrata definira zakonitost te veze. Nakon toga je važno ispitati odstupanja izračunskih podataka od izvedene zakonitosti, na čemu treba temeljiti i ocjenu je li ta zakonitost prihvatljiva za primjenu u praksi. Odstupanje, odnosno rasipavanje ulaznih izračunskih podataka oko izvedene zakonitosti, redovito se može dobro aproksimirati normalnom raspodjelom. Zbog toga je vjerojatno odstupanje, u kojemu se pojavljuje 95 posto slučajeva, u skladu s izrazom (4.38) (razina povjerenja od pet posto):

$$\sigma_p = 1,96 \sigma_o = 1,96 \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{x} \right)^2}{n}}$$

gdje je σ_o relativno odstupanje; x ulazni podatak za izračunavanje zakonitosti; x_i odgovarajući podatak dobiven na temelju izvedene zakonitosti i n broj ulaznih podataka za proračun zakonitosti.

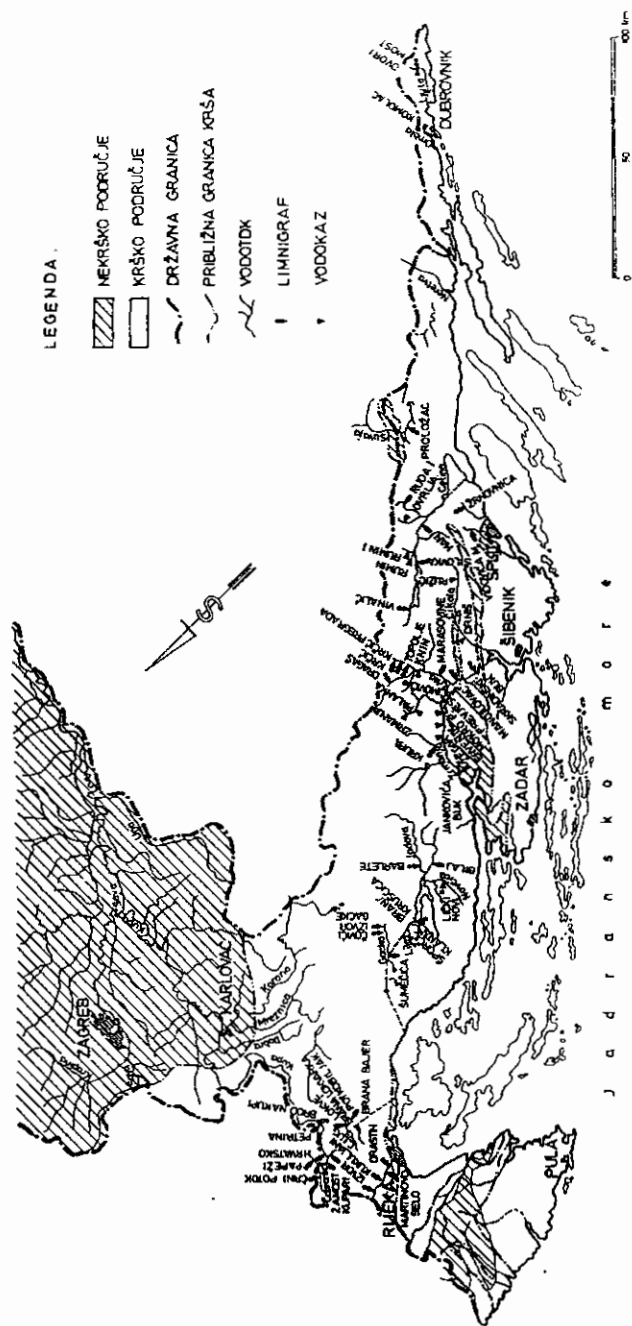
Na osnovi izraza (4.38) moguće je odrediti vjerojatne granice unutar kojih se nalazi 95 posto podataka na temelju kojih je definirana zakonitost veze čija se pouzdanost u primjeni ocjenjuje.

4.22.5 Primjeri regionalnih istraživanja u svijetu i Hrvatskoj

UNESCO je 1985. godine u sklopu Međunarodnoga hidrološkog programa osnovao istraživački program za međunarodnu suradnju u području regionalne hidrologije pod nazivom FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data). FRIEND programom su obuhvaćena i koordinirana regionalna hidrološka istraživanja u 74 zemlje sa svih kontinenata (FRIEND, 1997.).

Prije ovakvih sustavnih istraživanja, S. Jovanović i Z. M. Radić (1985.) provode regionalnu hidrološku analizu sliva Dunava i slivova velikih europskih rijeka. Kao razdoblje obrade usvojeno je razdoblje od 1931. do 1970. godine, a između pojedinih karakterističnih parametara (npr.: anvelopne linije $q_M = f(A)$ i veze modulnih koeficijenata ekstremnih godišnjih protoka s odgovarajućim koeficijentima varijacije) ustanovljene su zanimljive veze. Na toj su osnovi izvedene regionalne zakonitosti pogodne za praktičnu primjenu.

U Hrvatskoj jednu od prvih regionalnih zakonitosti postavlja, za sliv Save i drugih rijeka, D. Srebrenović (1970.b). To je zakonitost veze između prosječnih godišnjih efektivnih oborina P_e i prosječnih godišnjih oborina P koje padnu na sliv:



Slika 4.130 Krški vodotoci u Hrvatskoj s obrađenim hidrološkim stanicama

$$P_e = 0,895 P - 405 \text{ (mm)} \quad (4.277)$$

Devedesetih je godina izrađena regionalna analiza za područje krša u Hrvatskoj (R. Žugaj, 1995.b). Analizom su obuhvaćeni slivovi ukupne površine 12.000 km², a njome su obrađeni podaci prikupljeni na 60 hidroloških stanica (slika 4.130), unutar razdoblja od 1951. do 1990. godine. U području krša u Hrvatskoj regionalizaciji se moglo pristupiti jer su postojala osnovna iskustva o otjecanju vode u kršu, sažeta u literaturi (A. Stepinac, 1969., A. Magdalenić, 1971. i O. Bonacei, 1987.), te dovoljno dugi i dovoljno pouzdani hidrološki nizovi pohranjeni u Banci hidroloških podataka Državnoga hidrometeorološkog zavoda RH.

U regionalnoj analizi hercegovačkoga krša, koji je po glavnim obilježjima vrlo sličan golome hrvatskom kršu u području dalmatinskih slivova (Zrmanje, Krke, Cetine, Omble i Ljute), analiziran je hidrološki režim u cijelosti (D. Isailović, 1989.).

U najnovije vrijeme (D. Trninić, 1997. i 1998. a i b) izrađena je regionalna analiza malih voda u Hrvatskoj, potaknuta velikim štetama od suša u razdoblju od 1980. do 1992. godine. U njoj su navedeni osnovni čimbenici (prirodni i oni nastali djelovanjem čovjeka) koji utječu na male vode i definirane su sve temeljne veličine malih voda. Za Hrvatsku su na preglednim kartama prikazane izolacije minimalnih srednjih mjesečnih protoka 95-postotne vjerojatnosti pojavljivanja, te izolacije specifičnih minimalnih srednjih 30-dnevnih protoka 80- i 95-postotne vjerojatnosti pojavljivanja.

Kako bi bili razjašnjeni glavni postupci u regionalizaciji, ovdje se daje nekoliko prikaza rezultata regionalne hidrološke analize karakterističnih parametara u kršu Hrvatske.

Nakon provedene analize osnovnih podloga i definiranja karakterističnih parametara, od kojih su veličine slivova A , srednji protoci Q i najveći zabilježeni protoci Q_M prikazani u tablici 4.39, ispitane su njihove (svih parametara) međusobne linearne i nelinearne veze.

U tablici 4.40 su u simetričnoj matrici dane veličine koeficijenta korelacije za linearnu vezu. Oznake u tablici opisane su u poglavlju 4.22.3, pod naslovom "Karakteristični parametri".

Na slici 4.131 prikazana je zanimljiva zakonitost veze srednjih protoka krških vodotoka u Hrvatskoj u ovisnosti o veličinama slivnih površina, zajedno s vjerojatnim granicama unutar kojih se nalazi 95 posto slučajeva:

$$Q = 0,0523 A^{0,907} \quad r = 0,96 \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (4.278)$$

Bez obzira na vrlo visok koeficijent korelacije ($r = 0,96$), zakonitost veze (4.278), uslijed velika raspona unutar kojega se kreću izračunski podaci, ima razmjerno velika vjerojatna odstupanja: $\sigma_p = 89,6\%$. (U linearnoj vezi, u kojoj je koeficijent korelacije prema tablici 4.40 $r = 0,97$, vjerojatno odstupanje je $\sigma_p = 90,2\%$.) Zbog toga je provedena uža regionalizacija po pojedinim područjima unutar razmatrane krške regije. Određene su četiri grupe slivova, od kojih su zakonitosti za 1. i 2. grupu prikazane na slici 4.131.

Tablica 4.39 Karakteristični parametri A , Q i Q_M vodotoka u kršu Hrvatske (R. Žugaj, 1998.b)

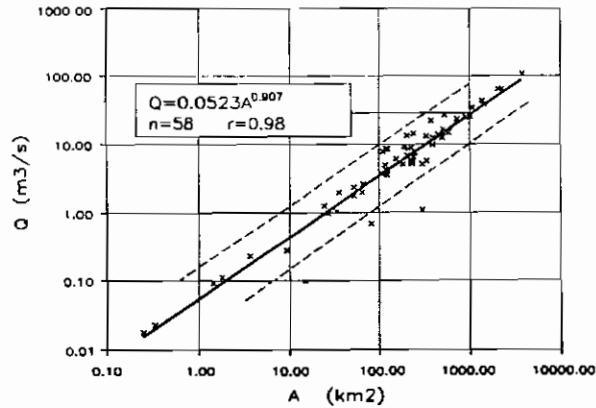
Redni broj	Sliv	Vodotok	Profil	A (km ²)	Q (m ³ /s)	Q _M (m ³ /s)
1	1 Rječine	Rječina	Izvor Rječine	110	7.84	56,0
2		Rječina	Kukuljani	119	8.54	99,0
3		Rječina	Martinovo Seio	124	8,69	119
4		Rječina	Drastin	191	9,11	166
5	2 Gornje Kupe	Kupa	Kupari	205	13,4	319
6		Kupa	Hrvatsko	305	22,1	438
7		Kupa	Petrina	528	26,8	513
8		Čabranka	Črni Potok	53	2,34	83,9
9		Čabranka	Zamost 2	106	3,75	192
10		Belica	Papeži	27	0,99	40,3
11	Kupica	Brod na Kupi	240	14,3	323	
12	3 Ličanke	Ličanka	Brana Bajer	36	2,00	148
13		Ličanka	Podkobiljak	14,9	0,20	-
14	4 Lokvarke	Lokvarka	Brana Lokvarka	24,4	1,26	-
15		Lokvarka	Lokve	9,25	0,28	23,9
16	5 Crnog Luga	Bela Voda	Crni Lug	1,80	0,112	9,78
17		Vela Voda	Crni Lug	3,70	0,23	12,7
18		Tomac Potok	Crni Lug	1,45	0,093	-
19		Leska	Leska	0,25	0,018	-
20		Klada	Klada	0,33	0,023	-
21	6 Like	Lika	Bilaj	210	8,74	247
22		Lika	Krušćica	1014	25,3	748
23		Jadova	Barlete	228	5,19	140
24		Novčica	Lički Novi	67	2,59	137
25	7 Gacke	Gacka	Izvor Gacke	123	3,44	8,97
26		Gacka	Čoviće	492	12,6	59,2
27		Gacka	Šumečića	584	14,6	88,7
28	8 Krke	Krka	Topolje	334	13,1	161
29		Krka	Knin	510	16,5	122
30		Krka	Marasovine	725	23,2	350
31		Krka	Manojlovac	1073	34,2	365
32		Krka	Skradinski Buk	2285	64,8	483
33		Krčić	Krčić Pregrada	131	-	-
34		Krčić	Krčić	117	4,97	67,8
35		Radljevac	Ačimovići	82	0,69	54,4
36		Butišnica	Dragaš	205	6,81	134
37		Čikola	Ružić	228	5,60	70,0
38	Čikola	Drniš	337	5,72	151	
39	9 Zrmanje	Zrmanja	Zrmanja	126	-	99,3
40		Zrmanja	Palanka	156	6,07	115
41		Zrmanja	Prevjės	185	5,08	110
42		Zrmanja	Mokro Polje	235	5,25	100
43		Zrmanja	Ervenik	300	5,06	140
44		Zrmanja	Žegar	390	9,85	143
45		Zrmanja	Jankovića Buk	1460	38,3	403
46	Krupa	Krupa	227	8,92	118	
47	10 Suvaje	Suvaja	Proložac	300	0,300	182
48	11 Cetine	Cetina	Vinačić	390	12,5	135
49		Cetina	Šilovka	1380	43,6	246
50		Cetina	Han	2090	64,4	340
51		Cetina	Gardunska Mlinica	3850	107	621
52		Ruda Velika	Ruda I	450	13,8	54,6
53		Rumin Veliki	Rumin I	250	7,55	92,6
54		Rumin Mali	Rumin	65	1,98	19,2
55		Ovrlja	Ovrlja	34	1,04	6,22
56		12 Jadra	Jadro	Vidovića Most	240	6,52
57	13 Žrnovica	Žrnovica	Žrnovica	53	1,75	34,0
58	14 Ombić	Ombić	Komolac	900	23,9	112
59	15 Ljute	Ljuta	Dvor	120	4,12	84,3
60		Ljuta	Most	122	3,66	84,3

Tablica 4.40 Koeficijenti korelacije linearnih veza karakterističnih parametara u kršu Hrvatske (R. Žugaj, 1995.b)

	SREDNJI GODIŠNJI PROTOCI			MAKSIMALNI GODIŠNJI PROTOCI			MINIMALNI GODIŠNJI PROTOCI										
	A	P	Q	r	c	σ	Q _M	Q _M /Q	Q _M	Q _M /Q	Q _M	Q _M /Q					
A	1																
P	-0,39	1															
Q	0,97*	-0,31	1														
r	0,95*	-0,36	0,97*	1													
c	-0,22	-0,30	0,12	0,12	1												
σ	0,33	-0,39	-0,28	-0,25	0,08	1											
Q _M	0,05	-0,12	-0,13	-0,25	0,07	0,07	1										
Q _M /Q	0,98*	0,10	-0,11	-0,11	0,10	0,09*	0,96*	1									
Q _M	0,92*	-0,02	-0,19	-0,17	-0,19	-0,12	-0,10	0,09	1								
Q _M /Q	0,32	0,34	0,75*	0,34	0,34	0,34	0,34	0,75*	0,32	1							
Q _M	-0,07	0,71	-0,15	-0,07	0,71	-0,07	0,71	-0,15	-0,07	-0,15	1						
Q _M /Q	-0,34	-0,44	-0,44	-0,34	-0,34	-0,34	-0,34	-0,44	-0,34	-0,44	-0,34	1					
Q _M	-0,10	-0,19	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	1				
Q _M /Q	0,72	0,40	0,42	0,40	0,40	0,40	0,40	0,42	0,40	0,42	0,40	0,42	0,72	1			
Q _M	0,90*	-0,18	-0,29	0,90*	-0,18	-0,29	0,90*	-0,18	-0,29	0,90*	-0,18	-0,29	0,90*	-0,18	1		
Q _M /Q	0,08	-0,08	-0,34	0,08	-0,08	-0,34	0,08	-0,08	-0,34	0,08	-0,08	-0,34	0,08	-0,08	-0,34	1	
Q _M	0,76*	-0,84*	-0,76*	0,76*	-0,84*	-0,76*	0,76*	-0,84*	-0,76*	0,76*	-0,84*	-0,76*	0,76*	-0,84*	-0,76*	1	
Q _M /Q	0,44	-	-	0,44	-	-	0,44	-	-	0,44	-	-	0,44	-	-	-	1

Koeficijenti korelacije linearnih zavisnosti ($y = ax + b$)

* veze koje ima smisla razmatrati

Slika 4.131 Srednji protoci Q u ovisnosti o slivnim površinama A u hrvatskome kršu

Prvu grupu predstavljaju mali slivovi obrasloga krša bez podzemnih retencija i značajnih gubitaka vode u koritu te s vrlo velikim godišnjim oborinama (obično oko 2800 mm). Na temelju podataka dobivenih na slivovima Crnoga Luga u Gorskoj kotaru, izveden je izraz:

$$Q = 0,0614 A + 0,0028 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.279)$$

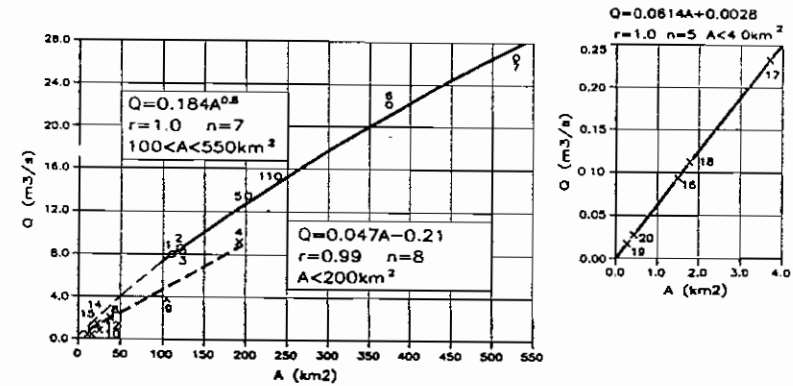
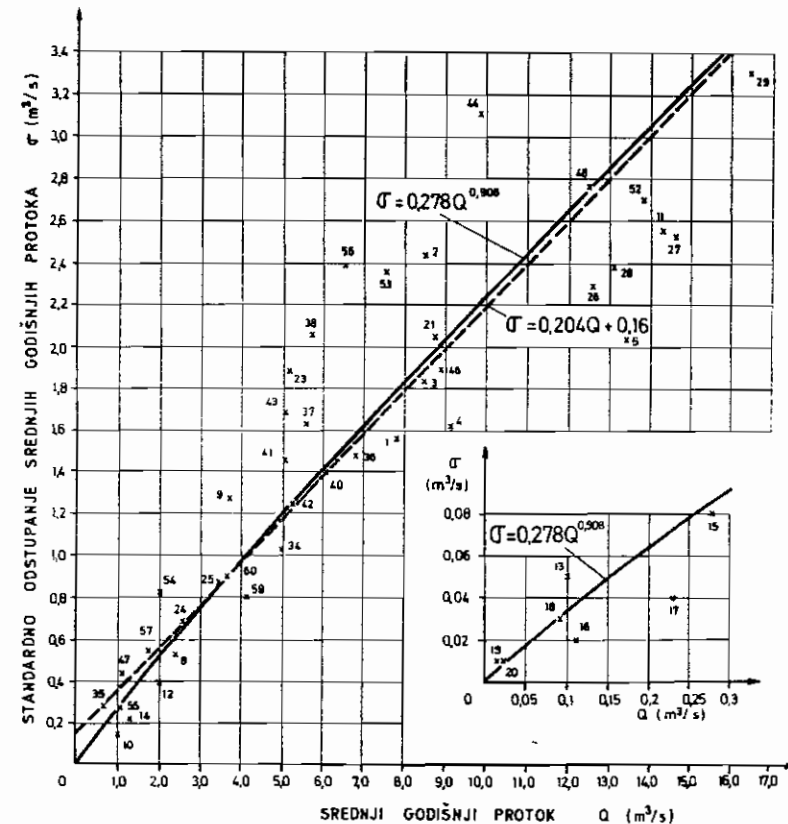
U drugu grupu spadaju slivovi obrasloga krša veličine 100 - 500 km², s podzemnim retencijama (reda veličine sliva koji izravno gravitira podzemlju do 100 km²), bez velikih gubitaka vode u koritima i s velikim godišnjim oborinama (prosječno 2000 - 2900 mm). Za slivove Rječine do ušća Sušice, Kupe do Petrine i Kupice izveden je izraz:

$$Q = 0,184 A^{0,8} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.280)$$

U drugoj se grupi izdvaja podgrupa za slivove veličine do 200 km² s jačim utjecajima retencija i gubicima vode na slivovima i u koritima. Za Rječinu je od ušća Sušice (koja ima veće gubitke vode) do profila Drastin, Ličanku i Lokvarku izveden izraz:

$$Q = 0,047 A - 0,21 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.281)$$

Prema tome, pri užoj je regionalizaciji u kršu, za definiranje zakonitosti oblika $Q = f(A)$, potrebno, uz poznavanje glavnih faktora otežanja - oborina i geomorfoloških uvjeta - osobito voditi računa o specifičnostima krških slivova, a to su djelovanje podzemnih retencija i gubici vode na slivu i u koritima. Ispravan izbor mjerodavne zakonitosti za sliv bez dovoljno hidroloških podataka u prvome redu ovisi o poznavanju njegovih geoloških obilježja. Za slivove kod kojih se ustanovi da postoje ponorska područja, srednji protok definiran na temelju zakonitosti $Q = f(A)$ treba shvatiti orijentacijski i težiti njegovoj provjeri na osnovi budućih mjerenja.

Slika 4.132 Srednji protoci Q i površine slivova A za slivove 1. i 2. grupeSlika 4.133 Standardna odstupanja srednjih godišnjih protoka σ i prosječni godišnji protoci Q

Prosječni godišnji protoci Q povezani su i sa svojim standardnim odstupanjima σ . Izvedene su eksponencijalna (4.282) i linearna zakonitost (4.283), koje su grafički prikazane na slici 4.133. Odstupanja ulaznih proračunskih podataka od zakonitosti (4.282), i (4.283) vrlo su velika. Pri odnosu $\sigma = f(Q)$ nije moguće provesti užu regionalizaciju i na taj način ostvariti bolje veze, kao što je to zbog heterogenosti podataka vidljivo na slici 4.133.

$$\sigma = 0,278 Q^{0,908} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.282)$$

$$\sigma = 0,204 Q + 0,16 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.283)$$

Glavni su razlozi rasipavanja ulaznih podataka oko općih zakonitosti $Q = f(A)$ i $\sigma = f(Q)$:

- različite veličine prosječnih godišnjih bruto oborina - od 1320 do 2940 mm
- velike razlike u uvjetima otjecanja s krških slivova - od površinskoga otjecanja s cijeloga sliva pa do slivova s velikim podzemnim retencijama
- različiti gubici vode - od slivova bez gubitaka do slivova s vrlo velikim gubicima
- vrlo veliki rasponi unutar kojih se kreću razmatrane veličine - omjer je između površina najmanjega i najvećega razmatranog sliva 1:5400, a između najmanjega i najvećega standardnog odstupanja omjer je 1:2040.

Za prosječne godišnje oborine rasponi između najnižih i najviših vrijednosti znatno su manji - za prosječne godišnje bruto oborine 1:2,2, a za prosječne godišnje efektivne oborine 1:20. Koeficijent linearne korelacije između efektivnih i bruto oborina $r = 0,79$ iz tablice 4.40 upozorava da postoji određena veza $P_e = f(P)$. Glavni poremećaji među vrijednostima (P , P_e), odnosno najveća rasipavanja podataka su svojstvo slivova sa značajnim gubicima vode. Zbog toga su podaci s takvih slivova izuzeti iz razmatranja. Za 47 slivova kojih su koeficijenti otjecanja veći od $c = 0,50$, a takvih je 81 posto, izvedena je zakonitost (4.284), prikazana na slici 4.134. Zakonitost (4.284) koja vrijedi za krške slivove s prosječnim otjecajnim koeficijentima $c > 0,50$ ima vjerojatna odstupanja $\sigma_p = \pm 18\%$ i na osnovi njih definirane su granice unutar kojih (s vjerojatnošću 95 posto) vrijedi zakonitost (4.284):

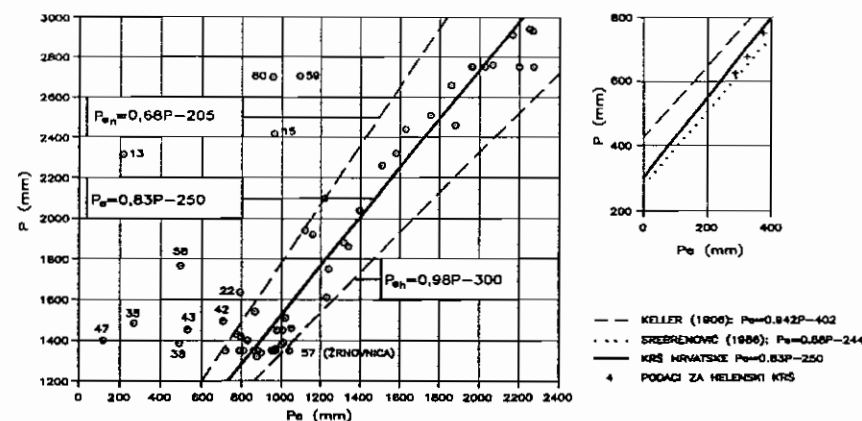
$$P_e = 0,83 P - 250 \quad (\text{mm}) \quad (4.284)$$

$$\text{gornja granica: } P_{eh} = 0,98 P - 300 \quad (\text{mm}) \quad (4.285)$$

$$\text{donja granica: } P_{en} = 0,68 P - 205 \quad (\text{mm}) \quad (4.286)$$

Zakonitost (4.284) s graničnim relacijama (4.285) i (4.286) pogodna je za praktičnu primjenu - što je potkrijepljeno odgovarajućim usporedbama na slici 4.134.

Odnosi bruto i efektivnih oborina $P_e = f(P)$ na slici 4.134, osim za hrvatski krš, dane su i za tri različita velika područja: slivovi Srednje Europe, slivovi Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine te sliv rijeke Save. Sve su izvedene zakonitosti $P_e = f(P)$ linearne, pa se prema tome zaključuje da taj oblik i u drugim područjima bolje od eksponencijalnoga odgovara odnosu bruto i efektivnih oborina.



Slika 4.134 Prosječne godišnje efektivne oborine P_e i prosječne godišnje bruto oborine P u hrvatskome kršu

Zakonitost koja je izvedena za krš Hrvatske ($P_e = 0,83 P - 250$) slična je Kellerovoj formuli za srednju Europu ($P_e = 0,94 P - 405$) i Srebrebovićevoj gornjoj granici za rijeke Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine ($P_e = 0,935 P - 420$), a vrlo je slična i Srebrebovićevoj formuli za gornji sliv Save pod kršem ($P_e = 0,88 P - 244$).

Na kraju razmatranja efektivnih i bruto oborina prikladno je navesti vrlo zanimljivu usporedbu hrvatskoga i helenskoga krša u Grčkoj.

Geomorfološka su obilježja helenskoga krša snažna tektonika, jaka okršenost te slab biljni pokrov i u tim osobinama postoji velika sličnost sa slivovima gologa krša u Hrvatskoj i Hercegovini. No u helenskom su kršu prosječne godišnje oborine oko 2,5 puta niže od prosječnih godišnjih oborina gologa hrvatskog krša. Zbog toga su prosječni otjecajni koeficijenti c u hrvatskom kršu oko 40 posto veći od otjecajnih koeficijenata helenskoga krša. U tablici 4.41 dani su karakteristični parametri srednjih voda za tri profila iz helenskoga krša, preuzeti iz rada G. Souliosa (1984.), te za profile hrvatskoga krša Zrmanja na Zrmanji i Vinalić na Cetini - koji su najprikladniji za usporedbu (kod ovih je usporedbi riječ o podacima u blizini izvorišta).

Tablica 4.41 Karakteristični parametri srednjih voda slivova helenskoga i hrvatskoga krša

Slivno područje, profil	\bar{A} (km^2)	P (mm)	P_e (mm)	c	q (l/s/km^2)
Korissos - Miltsa	22	764,0	398,0	0,52	12,6
Sources de Voula	31	671,4	339,0	0,51	10,7
Xerovouni (G. Souhos, 1984.)	9,2	623,8	284,5	0,46	9,0
Zrmanja, Zrmanja	126	1630	1165	0,71	36,9
Cetina, Vinalić (R. Žugaj, V. Marković, 1989.)	390	1390	1010	0,73	32,0

Vrijednosti P , P_e , c i q u protjecajnim profilima vodotoka helenskoga i hrvatskoga krša dane u tablici 18 pokazuju velike međusobne razlike. No veličine prosječnih godišnjih bruto i efektivnih oborina helenskoga krša potrebno je unijeti na grafički prikaz i usporediti s prosječnim otjecanjima s krša u Hrvatskoj ($P_e = 0,83 P - 250$) na slici 4.134. Tada postaje vidljivo kako su odstupanja parova vrijednosti (P, P_e) helenskoga krša od zakonitosti za hrvatski krš vrlo mala (4 - 10 posto). Prema tome, iako je riječ o velikim razlikama u veličinama prosječnih oborina koje padnu na slivove helenskoga krša, što se tiče prosječnih godišnjih otjecanja slivovi helenskoga krša ponašaju se slično kao i krški slivovi u Hrvatskoj. Ovo je potvrđeno i Srebrebrenovićevom zakonitošću ($P_e = 0,88 P - 244$), koja također potvrđuje podatke o helenskome kršu (slika 4.134).

Najveći zabilježeni specifični dotoci sa slivova q_M u ovisnosti o veličinama slivnih površina A prikazani su na slici 4.135. Parovi vrijednosti (A, q_M) pokazuju vrlo velika rasipavanja oko zakonitosti izvedene na osnovi svih podataka:

$$q_M = 6,033 A^{-0,446} \quad r = -0,68 \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.287)$$

Prema tome, izraz (4.287) ne treba rabiti za definiranje maksimalnih protoka na temelju poznatih veličina utjecajnih slivnih površina u kršu. Izraz (4.287) pruža jedino orijentaciju je li na veličinu pojedinoga najvećeg zabilježenog specifičnog dotoka, ovisno o njegovu položaju u odnosu na krivulju (4.287) na slici 4.135, jače ili slabije djeluje podzemlje u krškome zaleđu.

Na osnovi podataka sa slike 4.135 u praktičnoj primjeni ima smisla odrediti gornju granicu najvećih zabilježenih specifičnih dotoka s krških slivova. Definirana je gornja anvelopna linija koju se za slivove veličine do 36 km² izražava jednadžbom:

$$q_M = 5,735 A^{-0,093} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.288)$$

a za slivove od 36 do 4000 km² jednadžbom:

$$q_M = 25,89 A^{-0,514} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.289)$$

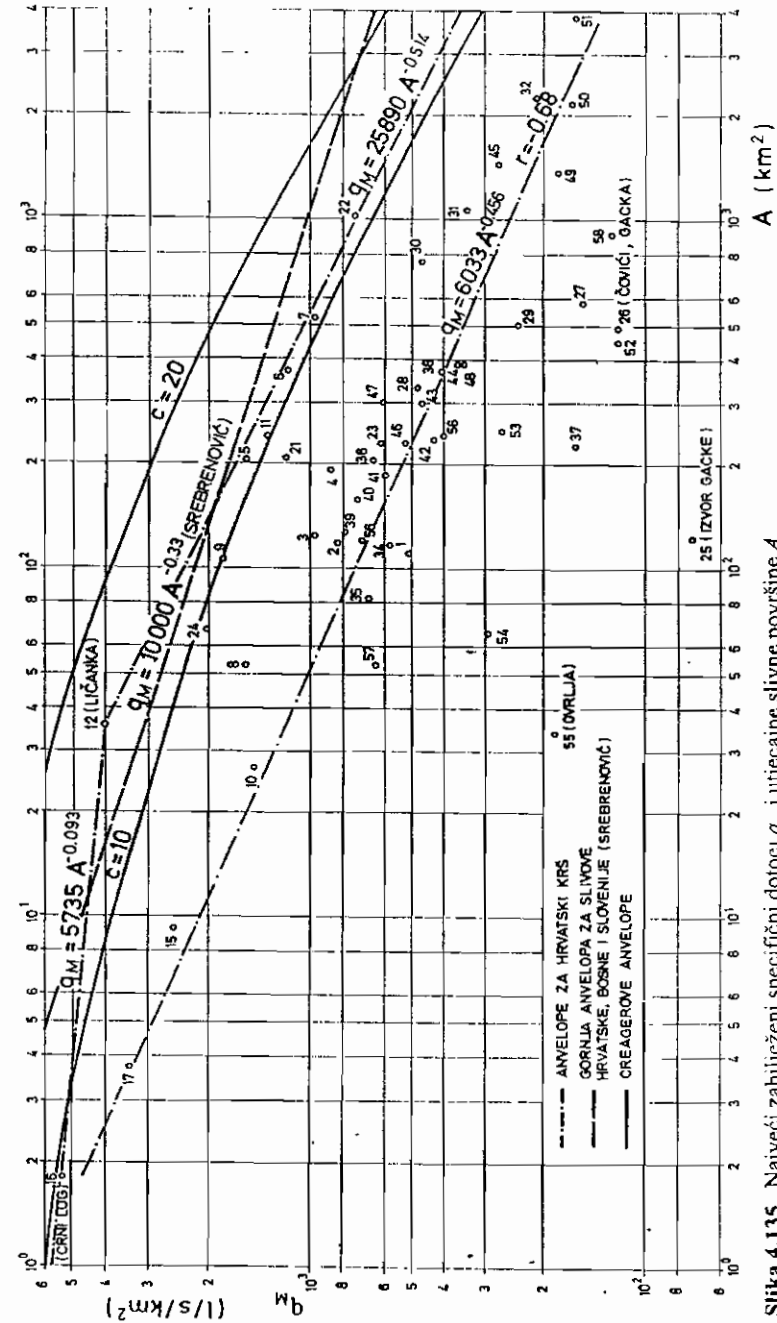
Na temelju prikaza na slici 4.135 može se zaključiti da su maksimalni zabilježeni specifični dotoci u kršu razmjerno visoki, jer se nalaze u području blizu 10-godišnje Creagerove anvelope ($C = 10$), a izrazito bujični sliv Ličanke do brane Bajer doseže, prema Creageru, čak 15-godišnje maksimalne vrijednosti (W.P. Creager i dr., 1945.).

Anvelopne linije za hrvatski krš (4.288) i (4.289) usporedene su na slici 4.135 s anvelopnom linijom za slivove Hrvatske, Bosne i Slovenije, koju je za slivove manje od 20.000 km² izveo D. Srebrebrenović (1970.b):

$$q_M = 10,0 A^{-0,33} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.290)$$

i s anvelopnom linijom za slivove Dunava i većih europskih rijeka (slivovi s umjerenom klimom) koja, definirana prema S. Jovanoviću i Z. M. Radiću (1985.), za slivove između 100 i 8000 km² iznosi:

$$q_M = 9,13 A^{-0,29} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2) \quad (4.291)$$



Slika 4.135 Najveći zabilježeni specifični dotoci q_M i utjecajne slivne površine A

Ova usporedba pokazuje da maksimalno otjecanje sa slivova bez podzemnih retencija u kršu može biti vrlo visoko - primjerice, maksimalni opaženi specifični dotok Ličanke prelazi Srebrenovićevu anvelopu (4.290) koja je 1970. bila definirana na osnovi 104 zabilježena maksimuma. Usporedba gornje anvelope za krš (4.289) i gornje anvelopne linije za slivove Dunava i velikih europskih rijeka (4.291) pokazuje da se vrijednosti q_M prema (4.291) povećavaju u odnosu na anvelopu za krške slivove (4.289) - čije se niže vrijednosti objašnjavaju redukcijskim djelovanjem krških podzemnih retencija na velike vode.

Na kraju ovoga poglavlja, a ujedno i ove knjige, potrebno je reći da hidrološke obrade i studije te regionalne analize - koje se temelje na rezultatima obrada i studija - najčešće radi samo nekoliko hidrologa. No potrebno je naglasiti da se njihov rad osniva na podlogama u čiju je izradu uključen znatno veći broj stručnjaka. Da bi određivanje osnovnih hidroloških podloga bilo realno, oni trebaju biti usko specijalizirani - primjerice, kada se definira protok vode, najprije hidrometri provode hidrološka mjerenja, nakon toga drugi specijalisti definiraju protočne krivulje i na osnovi njih mjerodavne protoke, a onda te podatke preuzimaju stručnjaci za sastavljanje i održavanje odgovarajućih baza podataka, iz kojih se te podatke preuzima za daljnje obrade.

Prema tome, uz vrednovanje rezultata hidroloških studija i regionalnih analiza, nikako se ne smije zanemariti velik trud, pa i samoprijegor niza specijalista, hidrologa, čiji rad stoji iznad podloga koje se rabi bilo u svakodnevnoj hidrološkoj praksi, bilo u regionalnim analizama. Samo je korištenjem kvalitetnih ulaznih podataka, uz primjenjivanje ranijih iskustava i suvremenoga pristupa, moguće dobiti pouzdane hidrološke parametre i realne odnose između njih. A samo na takvoj osnovi hidrologija može i dalje napredovati kao znanost i struka.

5 LITERATURA

- Agroskin, I. I., Dmitrijević, G. T., Pikalov, F. I.** (1973.) - *Hidraulika*, Tehnička knjiga, Zagreb, 331 str.
- Babalis, G. A.** (1997.) - *Legislation & Authorization Procedures in the European Union - Proposal for a Directive*, Hydroenergia, 5th International Conference and Exhibition, Proceedings, 92-101.
- Badon Ghyben, W.** (1888.-1889.) - *Nota in Verband met de Voorgenomen Putboring Nabij Amsterdam*, Tijdschr. Koninkl. Inst. Ingrs., The Hague, 8-12.
- Barnes, B. S.** (1940.) - *Discussion of Analysis of Runoff Characteristics*, Trans. ASCE, Vol. 105, 106 str.
- Bata, G., Jovanović, S., Vukmirović, V.** (1963.) - *Nomogrami za hidrauličke proračune*, Institut J. Černi, Beograd, 143 str.
- Beardmore, N.** (1862.) - *Manual of Hydrology*, Waterlow and Sons, London.
- Benson, M. S.** (1959.) - *Channel Slope Factor in Flood Frequency Analyses*, Proc. ASCE, J. Hydraulics Div., Vol. 85, No HY4, 1-9.
- Beran, M. A.** (1979.) - *Drought Predictability: Problems and Possibilities*, Symp. "Hydrological Aspects of Drought", New Delhi, Vol. 1, 229-241.
- Bidovec, F.** (1971.) - *Metoda računa vjerojatnosti nije odgovarajuća metoda za određivanje velikih voda rijetkih učestalosti*, Vodoprivreda, Vol. 3, br. 13-14, str. 715-723.
- Biondić, B., Ivičić, D., Kapelj, S., Mesić, S.** (1995.) - *Hidrologija Vranskog jezera na otoku Cresu*, Prvi hrvatski geološki kongres, Opatija, 89-94.
- Biswas, A. K.** (1963.) - *Hydrologic Engineering Prior to 600 B.C.*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 93, HY5, 115-135.
- Biswas, A. K.** (1969.) - *A History of Hydrology in the Nineteenth Century*, Water Power & Dam Construction, Vol. 21, No 1, 16-21.
- Biswas, A. K.** (1972.) - *History of Hydrology*, 2nd ed., North Holland, Amsterdam, 214 str.
- Blaney, H. F., Cridle, W. D.** (1950.) - *Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigated Data*, SCS, TP-96, August.
- Bonacci, O.** (1969.) - *Primjena digitalnih elektroničkih računala za rješavanje bazičnih hidroloških zadataka*, Građevinar, Vol. 21, br. 12, str. 457-466.
- Bonacci, O.** (1979.) - *Hidrometrija*, Tehnička enciklopedija, Svezak 6, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, str. 416-426.
- Bonacci, O.** (1981.) - *Utvrđivanje količina vode koje poniru na dionicama vodotoka u kršu*, Naš krš, 10-11, Sarajevo, 139-151.
- Bonacci, O.** (1984.) - *Meteorološke i hidrološke podloge*, Priručnik za hidrotehničke melioracije (ur. Z. Kos), I. kolo Odvodnjavanje, Knjiga 2, Podloge, Društvo za odvodnjavanje i navodnjavanje Hrvatske, Zagreb, str. 39-130.
- Bonacci, O.** (1987.a) - *Karst Hydrology*, Springer-Verlag, Heidelberg, 174 str.
- Bonacci, O.** (1987.b) - *Korekcije sistemskih grešaka mjerenje oborina*, Vodoprivreda, Vol. 19, 108 (4), str. 193-204.

- Bonacci, O.** (1993.a) - *The Vrana Lake Hydrology (Island of Cres - Croatia)*, Water Resources Bulletin, Vol. 29, No. 3, 407-414.
- Bonacci, O.** (1993.b) - *Identifikacija suše i borba protiv nje*, Okrugli stol o suši, Zagreb, Zbornik radova, str. 1-20.
- Bonacci, O.** (1994.a) - *Oborine: glavna ulazna veličina u hidrološki ciklus*, Geoling, Split, Sveučilišta u Splitu i Osijeku, 341 str.
- Bonacci, O.** (1994.b) - *Skupljanje vode iz magle i iz prizemne naoblake kao mogućnost dodatne opskrbe vodom*, Hrvatska vodoprivreda, Vol. 3, br. 23, str. 10-11.
- Bonacci, O.** (1995.) - *Znanstveni stav o globalnoj promjeni klime na zemlji*, Građevinar, Vol. 47, br. 10, str. 635-641.
- Bonacci, O.** (1998.) - *Poplave devedesetih godina*, Hrvatska vodoprivreda, Vol. 7, br. 68, str. 11-13.
- Bonacci, O., Roglić, S.** (1981.) - *Određivanje velikih voda na neužucenim slivovima genetskom metodom*, Vodoprivreda, Vol. 13, br. 6, str. 495-502.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T.** (1997.a) - *Hidrološki vid određivanja biološkog minimuma rijeke Žrnovnice*, Hrvatske vode, Vol. 5, br. 19, str. 161-174.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T.** (1997.b) - *Hidrološki vid određivanja biološkog minimuma rijeke Jadro*, Hrvatske vode, Vol. 5, br. 21, str. 339-349.
- Borelli, M., Bata, G.** (1979.) - *Hidraulika*, Tehničar 5, Građevinska knjiga, Beograd, str. 61-178.
- Bravar, L., Kavvas, M. L.** (1991.) - *On the Physics of Droughts. I: A Conceptual Framework*, Journal of Hydrology, 129, str. 281-297.
- Brownie, K. A.** (1960.) - *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
- Brune, G. M.** (1953.) - *Trap Efficiency of Reservoirs*, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 34, str. 407-418.
- Carić, D.** (1952.) - *Tehnička hidraulika*, Građevinska knjiga, Beograd, 338 str.
- Chander, S., Spolia, S. K., Kumar, A.** (1979.) - *Prediction of Hydrologic Characteristic of Drought*, Symp. "Hydrological Aspect of Drought", New Delhi, Vol. 1., 305-318.
- Chow, V. T. i dr.** (1964.) - *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1481 str.
- Chow, V. T.** (1986.) - *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, Singapore, 680 str.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W.** (1988.) - *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Singapore, 572 str.
- Creager, W. P., Justin, J. D., Hinds, J.** (1945.) - *Engineering for Dams*, Vol. 1, John Wiley, New York.
- Čapka, B.** (1994.) - *1990. - 2000.: Međunarodna dekada ublažavanja posljedica prirodnih katastrofa*, Izvanredne meteorološke i hidrološke prilike 1993. u Hrvatskoj, Vol. 17, str. 1-3.
- Čavlek, E.** (1992.) - *Osnove hidrologije*, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 145 str.
- Dalton, J.** (1802.) - *Experimental Essays on the Constitution of Mixed Gases*, Manchester Lit. Phil. Soc. Mem. Proc., Vol. 5, str. 536-602.
- Darcy, H.** (1856.) - *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, V. Dalmont, Paris.
- Darlymple, T.** (1960.) - *Flood - Frequency Analysis*, Water Supply Paper 1543-A, U.S. Geological Survey, Washington.
- Dickens, C. H.** (1865.) - *Flood Discharge of Rivers*, Professional Papers on Indian Engineering (Roorkee, India), 2, 133-136.
- Donn, W. L.** (1975.) - *Meteorology*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Dupuit, A. J.** (1863.) - *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*, 2d ed., Dunod, Paris.
- Einstein, H. A.** (1950.) - *The Bed-Load Function of Sediment Transportation in Open Channel Flows*, U. S. Dept. Agr. Soil Conserv. Serv. Tech. Bull. 1026.
- Ellison, W. D.** (1944.) - *Studies of Raindrop Erosion*, Agric. Eng., Vol. 25, str. 131-136, 181, 182.
- Francev, M.** (1982.) - *Mehanika fluida*, Tehnička enciklopedija, Svezak 8, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, str. 67-173.
- Fleming, G.** (1969.a) - *Suspended Solids Monitoring: A Comparison between Three Instruments*, Water Eng., Vol. 73, 377-382.
- Fleming, G.** (1969.b) - *Design Curves for Suspended Load Estimation*, Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 43, 1-9.
- Frazier, A. H.** (1969.) - *Robert Hooke's Water Current Meter circa 1663*, Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 95, HY1, 439-443.
- Frisi, P.** (1860.) - *A Treatise on Rivers and Torrents*, John Weale, London.
- Fritz, F.** (1976.) - *Hidrološka karta Ravni kotari Bukovica*, mj. 1: 100.000, Geološki zavod, Zagreb.
- Fritz, F.** (1991.) - *Utjecaj recentnog okršavanja na zahvaćanje voda*, Geološki vjesnik 44, Zagreb, str. 281-288.
- Gajić-Čapka M., Čapka B.** (1997.) - *Procjene maksimalnih dnevnih količina oborine*, Hrvatske vode, Vol. 5, br. 20, str. 231-243.
- Garašić, M.** (1999.) - *Međunarodna speleoronilačka ekspedicija u Crveno jezero kraj Imotskog*, Hrvatska vodoprivreda, Vol. 8, br. 78, str. 40-42.
- Gavrilović, S.** (1976.) - *Bujični tokovi i erozija*, Građevinski kalendar SGITJ, Beograd, str. 161-311.
- Giandotti, M.** (1937.) - *Idrologia generale*, Firenze.
- Gjurašin, K.** (1942.) - *Prilog hidrografiji primorskog krša*, Tehnički vjesnik, Vol. 5, br. 4-6, str. 107-112.
- Gjurašin, K.** (1943.) - *Prilog hidrografiji krša*, Tehnički vjesnik, Vol. 6, br. 1-2, str. 1-17.
- Gottschalk, L. S.** (1964.) - *Sedimentation*, pogl. 17 u V.T. Chow: "Handbook of Applied Hydrology". McGraw-Hill, New York, 17.1-17.35.
- Grgić, B.** (1995.) - *Hidrologija i hidroenergija*, Okrugli stol, Uloga hidrologije u strukturi gospodarstva Hrvatske, Zagreb, Zbornik radova, str. 79-83.
- Grigg, N. S.** (1989.) - *Hydrology and Management of Drought in U.S.*, IAHS Publication No. 181, 303-312.
- Grishin, M. M.** (1982.) - *Hydraulic Structures*, Mir Publishers, Moscow, Vol. 1, 468 str.
- Gumbel, E. J.** (1941.) - *The Return of Flood Flows*, Ann. Mat. Statist., Vol. 12, no. 2, str. 163-190.
- Gunn, R., Kinzer, G. D.** (1949.) - *The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air*, J. Meteorol., Vol. 8, 243-248.
- Gupta, R. S.** (1989.) - *Hydrology and Hydraulic Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 739 str.
- Havens, A. V.** (1954.) - *Drought and Agriculture*, Weatherwise, 7, 51-55.
- Herbeulidze, I. I.** (1947.) - *Ovražnje i selevie vinosi*, Seljhoziz, Moskva, 214 str.
- Herzberg, A.** (1901.) - *Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder*, J. Gasbeleucht. Wasserversorg., Munich, Vol. 44, 815-819, 842-844.
- Horton, R. E.** (1914.) - *Derivation of Runoff from Rainfall Data*, Discussion, Trans., ASCE, Vol. 77, 369-375.
- Horton, R. E.** (1917.) - *A New Evaporation Formula Developed*, Eng. News - Record, Vol. 78, 196-199.