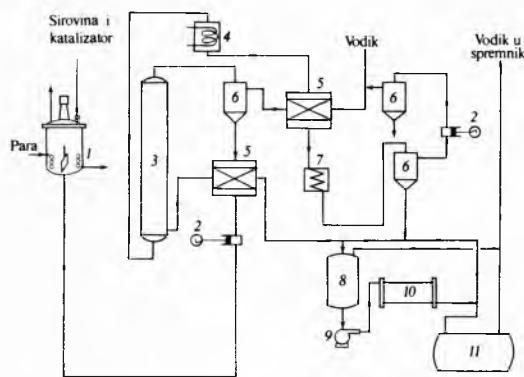


## HIDROGENACIJA — HIDROLOGIJA

primjenu uglavnom samo kontinualni postupci (sl. 13). Reaktori za tu svrhu visoke su kolone. Prije uvođenja u reaktor, smjesa sirovine i katalizatora predgrijije se parom i izmjenom topline s kapljivitim dijelom smjese koja napušta reaktor. Vodik koji se recirkulira u proces i kojemu se (da bi mu se u reakcijskoj zoni održao potreban višak, približno dvadeseterostruka količina od stehiometrijski potrebne za reakciju) dodaje svježi vodik, predgrijava se parnim dijelom te smjese. Kapljeviti se dio ekspandirane smjese iz reaktora zatim ohladi i ekspandira, a iz parnog dijela kondenziraju se masni alkoholi također hlađenjem, pa se smjesa kondenzata, preostalih para i plina također ekspandira. Obje struje ukapljениh proizvoda skupljaju se u posudi za suspenziju katalizatora, iz koje se vodik odušuje u niskotlačni spremnik, pa se ta suspenzija filtrira, katalizator vraća u proces, a produkt prihvata u rezervoar. Ostali produkti reakcije kondenziraju se iz recirkulacijskog plina pri njegovoj kompresiji radi vraćanja u proces. (To su reakcijska voda ili metanol, već prema tome da li se hidrogeniraju masne kiseline ili esteri. Rekuperirani metanol, dakako, može se upotrijebiti za interesterifikaciju prije hidrogenacije.)



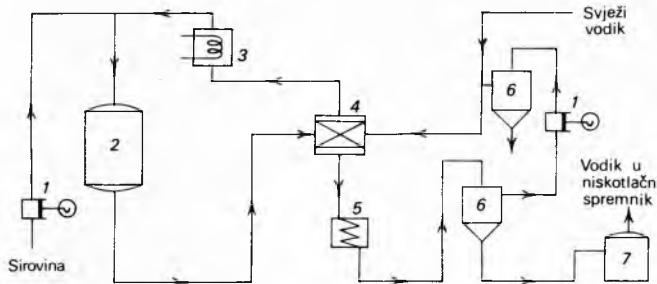
Sl. 13. Princip hidrogenacije masnih kiselina i njihovih estera u suspenziji katalizatora. 1 predgrijач, 2 visokotlačna crpka, 3 reaktor, 4 zagrijач vodika, 5 izmenjivač topline, 6 odvajači, 7 hlađnjak, 8 prihvatna posuda za suspenziju, 9 crpka za filtriranje, 10 filter, 11 rezervoar za proizvod

**Hidrogenacija masnih kiselina i njihovih estera u parnoj fazi** izvediva je samo kontinualno. Za to potrebna postrojenja (sl. 14) jednostavnija su od postrojenja za hidrogenaciju masnih kiselina i njihovih estera u suspenziji katalizatora.

Katalizator se u tim reaktorima nalazi u visokom mirujućem sloju, obično oblikovanih komada, najčešće peleti.

Kromitni katalizatori u ovim postupcima nužni su samo u rijetkim slučajevima hidrogenacija masnih kiselina. Obično se hidrogeniraju esteri masnih kiselina. Tada zadovoljavaju oksidni katalizatori, koji se reduciraju vodikom pri početku hidrogenacije.

Sirovina se ispari odmah na ulasku u reaktor u vodiku predgrijanom i dogrijanom na jednak način kako je već opisano, koji se na jednak način recirkulira u proces uz dodavanje svježeg vodika da se održi njegov višak (ovdje do petstostrukе količine od stehiometrijske). Sva količina masnih alkohola u ovom se postupku izdvaja iz parne faze hlađenjem, zatim se kondenzat ekspandira i, jer nije potrebna filtracija,



Sl. 14. Princip hidrogenacije masnih kiselina i njihovih estera u parnoj fazi. 1 visokotlačna crpka, 2 reaktor, 3 zagrijач vodika, 4 izmenjivač topline, 5 hlađnjak, 6 odvajači, 7 spremnik produkta

izravno prihvata u rezervoar za produkt. Metanol se izdvaja iz recirkulacijskog plina također na već opisani način.

**Perkolacijska hidrogenacija masnih kiselina i njihovih estera.** Princip ovog postupka je hidrogenacija kapljivite sirovine u tankom filmu na površini komada katalizatora u mirujućem sloju.

Za tu svrhu prikladni su kromitni katalizatori sa supstratima od različitih modifikacija silicij-oksida i aluminij-oksida, već prema vrsti sirovine. Zbog toga je volumen reaktora za tu hidrogenaciju veći od volumena reaktora za hidrogenaciju istih sirovina u parnoj fazi.

U reaktor se sirovina, zajedno s vodikom, uvodi s vrha, pa otječe kroz sloj katalizatora. Hlađenje, ekspanzija i kondenzacija produkata, rekuperacija njihove topline, recirkulacija vodika i njegovog grijanja izvan reaktora u ovom su postupku jednaki kao pri suspenzijskoj hidrogenaciji istih sirovina. Prednost ovog postupka u usporedbi sa suspenzijskim jest u tome što nije potrebna filtracija njegovih produkata.

Prednosti perkolacijskog postupka u usporedbi sa hidrogenacijom istih sirovina u parnoj fazi jesu niže temperature procesa ( $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ), manje količine vodika u recirkulaciji (približno stostruku količinu od stehiometrijske) i mogu se kao i suspenzijskim postupcima hidrogenirati nehlapljivi materijali (ne samo esterski voskovi, nego i gliceridi).

**Proizvodi hidrogenacije biljnih i životinjskih ulja i masti.** Svjetska proizvodnja parcijalnom adicijском hidrogenacijom oplemenjenih biljnih i životinjskih ulja i masti za izravnu upotrebu i za potrebe prehrambene industrije teško se može procijeniti. Na temelju visoke godišnje potrošnje po stanovniku u industrijski razvijenim zemljama (npr. u SAD  $\sim 10\text{kg}$ , u Saveznoj Republici Njemačkoj  $15\text{kg}$ , u nekim manjim, posebno u Holandiji, još više) može se zaključiti da je potrošnja  $\sim 3\text{ Mt}$ .

Proizvodnja tih masti u Jugoslaviji jest  $\sim 35\text{ kt}$ , s tendencijom porasta u posljednje vrijeme  $\sim 10\%$  godišnje, uz očekivanje da će se njen rast još mnogo ubrzati gradnjom novih postrojenja koja se za tu svrhu planiraju.

Do početka šezdesetih godina masni su se alkoholi u svijetu skoro isključivo proizvodili hidrogenacijom biljnih i životinjskih masti ili od njih dobivenih estera jednovalentnih alkohola. Iako se ti važni proizvodi danas sve više dobivaju različitim sintezama, još uvek se  $25\ldots 30\%$  njihove proizvodnje ( $\sim 180\text{ kt}$  od ukupnih  $\sim 650\text{ kt}$ ) zasniva na hidrogenaciji prirodnih sirovina.

LIT.: A. E. Bailey, Industrial Oil and Fat Products. Interscience Publishers Inc., New York 1951. — H. Stüpel, Synthetische Wasch- und Reinigungsmittel. Konradin-Verlag, Stuttgart 1954. — M. Rac, Ulja i masti. Poslovno udruženje proizvođača biljnih ulja, Beograd 1964. — R. L. Augustine, Catalytic Hydrogenation. Marcel Dekker Inc., New York 1965. — P. H. Groggins, Tehnološki procesi u organskoj sintezi (prijevod s engleskog). Građevinska knjiga, Beograd 1967. — A. Rieche, Grundriss der technischen organischen Chemie. S. Hirzel Verlag, Leipzig 1961. — B. R. James, Homogeneous Hydrogenation. John Wiley & Sons, New York-London-Sydney-Toronto 1973.

Ž. Viličić

**HIDROLOGIJA**, znanstvena disciplina koja proučava vode i njihovo kretanje na površini Zemlje. Ona je dio geofizike koja pored fizike hidrosfere obuhvaća fiziku litosfere (geologiju) i fiziku atmosfere (meteorologiju). Procesima kretanja i kruženja voda u tlu bavi se hidrogeologija (v. Geologija), a u atmosferi hidrometeorologija (v. Meteorologija). Budući da voda na svojem kružnom putu prolazi kroz atmosferu, teče po površini i prodire u tlo, za proučavanje bilance vode nužno je, pored hidrologije, poznavati pojave koje proučava hidrometeorologija i hidrogeologija. Hidrologija ima, osim toga, dodirnih točaka, npr. s klimatologijom (v. Klimatologija), fizičkom geografijom, mehanikom fluida, poljoprivredom, šumarstvom, jer mnogi činioци, pa i čovjek, djeluju na pojavu voda i njihovo kretanje na tlu (v. i Geokemijska). Hidrometrika, kao dio hidrologije, bavi se metodama mjerjenja hidroloških pojava (vodostaji, protoci) (v. Hidrometrija). Hidrologija ima veliko značenje za praksu, jer se iskorišćivanje voda i zaštita od njih ne može provesti bez

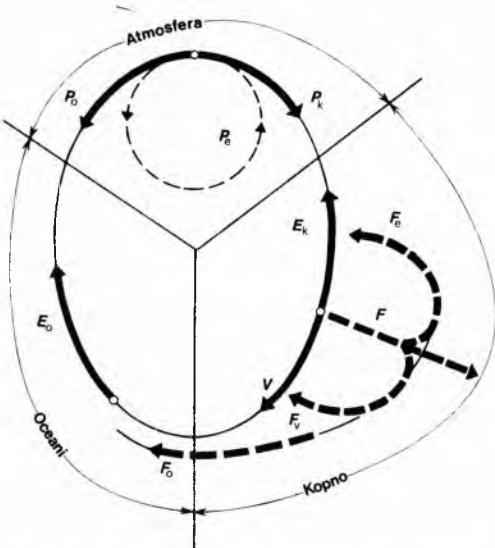
poznavanja pojava na vodotocima (vremenski raspored protoka, pojava velikih i malih voda itd.). Praktična hidrologija obuhvaća iskorišćivanje voda, uređenje vodnih režima, hidrologiju akumulacije, kontrolu velikih voda, hidrologiju poljoprivrede i šumarstva itd.

U antičkim pisaca nailazi se na razmišljanja o kruženju vode u prirodi. L. da Vinci provodi zapažanja pojave voda, ali razvoj hidrologije bio je uvećan razvojem matematičke statistike. Primjena te matematičke grane u hidrologiji bila je, međutim, moguća tek onda kada su organizirana hidrološka opažanja (sredinom XIX stoljeća). Fond podataka o opažanjima vodostaja omogućio je prvu analizu učestalosti (frekvencije) u hidrologiji pomoću krivulja trajanja (C. Herschel i Freeman, 1860–1890. godine). Fond hidroloških podataka, kao jedini izvor informacija na kojima se osnivaju kvantitativna hidrološka istraživanja, postaje sve veći, pa je njihova obrada moguća primjenom statističkih metoda osnovanih na teoriji vjerojatnosti. Njihova upotreba to je više opravdana, jer su prirodne hidrološke pojave redovito stohastičkog karaktera.

Poteškoće u analizi hidroloških pojava pojavljuju se spoznajom da razdioba (distribucija) tih pojava rijetko kada slijedi Gaussovou simetričnu razdiobu. Takvu je razdiobu za analizu učestalosti u hidrologiji prvi primijenio R. L. Horton (1913), ali je ubrzo ustanovljeno (A. Hazen) da se ta razdioba ne može upotrijebiti za proučavanje vrlo velikih i malih voda, a niti za određivanje razdiobe hidroloških pojava. Razdioba je tih pojava, naime, uglavnom asimetrična. Zbog toga se u hidrologiji primjenjuju različiti zakoni distribucije (Galtonova, Pearsonova i ekstremna razdioba). Za analizu hidroloških fenomena, pogotovo zbog njihova stohastičkog karaktera, upotrebljavaju se regresijska i korelačijska analiza, analiza vremenskih serija i sintetička hidrologija koja se temelji na Markovljevin procesima. U najnovije vrijeme teoretska hidrologija nadopunjuje spoznaje mehaničkih fluida na tlu i u njemu, obrađuje probleme kretanja vlažnog zraka i prijelaza topline pri analizi isparivanja i sl. Matematičkom analizom mogu se provjeriti praktičke postavke. Budući da se obrađuje vrlo mnogo podataka i jer se radi o složenim matematičkim izrazima, ta se analiza može uspješno provesti upotrebom elektroničkog računala. To pogotovo vrijedi za primjenu sintetičke hidrologije koja je potrebna za rješavanje najsloženijih hidrotehničkih sustava i traženje najboljeg rješenja.

### HIDROLOŠKI CIKLUS

Djelovanjem Sunčeva zračenja voda se neprestano isparuje s površine mora, jezera i rijeka, te s površine kopna gdje je isparivanje potpomognuto transpiracijom biljaka. Sva ta para diže se u atmosferu gdje se kondenzira u određenim uvjetima i pada kao oborina na Zemlju. To je najjednostavniji prikaz hidrološkog ciklusa. U stvari, taj je ciklus nešto komplikiraniji (sl. 1). Vodena para  $E_0$  koja se isparivanjem diže s površine mora u atmosferu, gdje se kondenzira, djelomično se vraća dio  $P_0$  neposredno u more, dio  $P_k$  pada na kopno, a dio  $P_e$  nakon kondenzacije ponovno isparuje u atmosferi a da nije ni



Sl. 1. Shematski prikaz kružnog kretanja vode u prirodi

dospio do Zemljine površine. Taj dio  $P_e$  cirkulira u atmosferi. Od vode koja pada na kopno dio  $E_k$  nakon isparivanja враћа se u atmosferu, dio  $V$  teče površinskim tokovima u more, a ostatak se  $F$  infiltrira u tlo. Od tih količina vode manji se dio privremeno gubi u dubokoj litosferi, a veći se dio враћa na površinu kroz izvore ili filtracijom iz podzemlja pa povećava površinske tokove  $F_v$ , ili ulazi neposredno u more i, konačno, dio infiltrirane vode  $F_e$  враћa se isparivanjem iz tla ili transpiracijom biljaka.

UKUPNA količina vode na Zemlji ostaje nepromijenjena i pored takve cirkulacije. U taj ciklus mogu doći i vode iz unutrašnjosti Zemlje (kroz vulkane, gejzire i sl. ili kao juvenilna voda nastala u procesima u dubokim dijelovima litosfere), ali je njihova količina neznatna. Taj kružni proces može se kvantitativno prikazati bilancem voda. Pri tom se bilanciraju vode u dužem vremenskom razdoblju da bi se izbjegla računanja s rezervama na početku i na kraju promatranoj razdoblju. Ako  $P$  znači oborine,  $E$  isparavanje,  $V$  otjecanje, a indeksi M, K i A označuju mora, kopno i atmosferu, bilanca je voda za mora

$$P_M + V_K = E_M, \quad (1)$$

za atmosferu

$$E_M + E_K = P_M + P_K \quad (2)$$

i za kopno

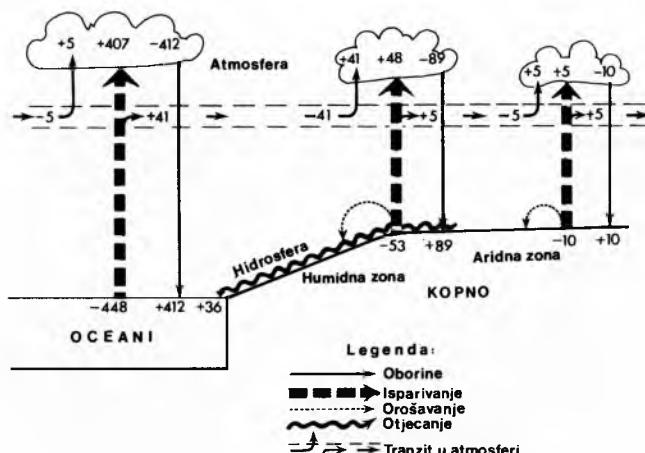
$$P_K = E_K + V_K. \quad (3)$$

U tim jednadžbama nema voda koje se infiltriraju u tlo ( $F$  na sl. 1), jer se one konačno pojavljuju u moru, na kopnu ili u atmosferi, pa su i obuhvaćene jednadžbama (1) do (3). To je moguće jer se razmatra dovoljno dugo vremensko razdoblje unutar kojeg se može zanemariti zakašnjenje dotjecanja vode iz tla. Zbroje li se jednadžbe (1) i (3), dobiva se jednadžba (2) iz koje slijedi da je, u dužem razdoblju, zbroj oborina koje padaju na kopno i more jednak isparivanju s tih dvaju dijelova Zemlje.

Podaci o količinama vode u hidrološkom ciklusu koje navode pojedini autori ne slažu se potpuno. U tabl. 1 nalaze se podaci koji su, izgleda, najbliže stvarnosti. Količine vode prikazane su volumenom ( $10^6 \text{ km}^3$ ) i visinom sloja vode (mm) jednoliko raspoređenog na promatranoj površini. Površina kopna čini humidnu (vlažnu) i aridnu (suhu) zonu. U aridnoj nema otjecanja, jer sve oborine ispare a da ne stvore nikakve vodene tokove. Negativno otjecanje iz oceana ( $-36 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ ,  $-100 \text{ mm}$ ) znači dotjecanje vode s kopna ( $+36 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ ,  $+308 \text{ mm}$ ). Razlika između dotjecanja u oceane i otjecanja s kopna, kad se izraze u mm stupca vode, nastaje zbog različitih površina oceana i kopna. Na sl. 2 vide se količine voda u prosječnom godišnjem hidrološkom ciklusu (prema sl. 1) uz dodatni tranzit u atmosferi.

Tablica 1  
KOLIČINE VODE U PROSJEČNOM GODIŠNJEM HIDROLOŠKOM CIKLUSU

Oblast	Oceani	Kopno		Zemlja ukupno
		humidna zona	aridna zona	
Količina vode $10^6 \text{ km}^3$	$Površina 10^6 \text{ km}^2$	361	117	32
	$Oborine P$	412	89	10
	$Isparivanje E$	448	53	10
Prosječno mm	$Otjecanje V$	-36	+36	-
	$Oborine P$	1141	761	313
	$Isparivanje E$	1241	453	313
	$Otjecanje V$	-100	+308	0

Sl. 2. Kvantitativan prikaz hidrološkog ciklusa ( $10^6 \text{ km}^3$ )Tablica 2  
VODNE BILANCE KONTINENATA

Kontinent	Oborine mm	Otjecanje			Koeficijent otjecanja %	Ispari- vanje mm
		povr- šinsko mm	pod- zemno mm	uku- pno mm		
Afrika	686	91	48	139	20	547
Azija	726	217	76	293	40	433
Australija	736	172	84	226	30	510
Evropa	734	210	109	319	43	415
Sjeverna Amerika	670	203	84	287	43	383
Južna Amerika	1684	373	210	583	35	1065

Interesantne su vodne bilance kontinenata (tabl. 2), prema Schneidelu i M. J. Lvovitchu, iz kojih se vide razlike u oborinama a pogotovo u otjecanju. Omjer između otjecanja i oborina nazvan je koeficijentom otjecanja, i on daje količinu voda koja se pojavljuje u površinskim i podzemnim tokovima kao postotak od ukupnih voda što su u obliku oborina pale na promatrano područje. To su prosječni podaci za čitave kontinente, pa su razlike među pojedinim dijelovima kontinenata znatno veće.

U Jugoslaviji (tabl. 3) oborine su izdašnije nego u Evropi kao cjelini, a povoljniji je i koeficijent otjecanja.

Tablica 3  
VODNA BILANCA JUGOSLAVIJE

Površina km <sup>2</sup>	Oborine mm	Otjecanje mm	Koeficijent otjecanja %	Isparivanje mm	Godišnje otjecanje $10^9 \text{ m}^3$
255804	975	470	48	505	120

Količine vode koje sudjeluju u godišnjem hidrološkom ciklusu (tabl. 1), a pogotovo vode koje otječu, zнатно су manje od zaliha vode na Zemljji (tabl. 4, prema R. L. Naceu). Ipak su zalihe vode na Zemljji vrlo velike; kad bi se tom vodom pokrila Zemljina kugla, dubina bi vodenog sloja iznosila 240m. Omjer količine vode u hidrosferi, litosferi i atmosferi iznosi 100000:500:1. Veliki je dio tih voda neupotrebljiv ili upotrebljiv tek nakon desalinacije, jer je 97,6% svih zaliha slana voda. Ukupna količina slatke vode iznosi  $33,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ , a od toga je 78% u obliku leda, a 21% u litosferi kao podzemne vode. Interesantno je da se u atmosferi nalazi  $13 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  vode (u obliku pare), a godišnje isparivanjem dolazi u atmosferu  $511 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  vode, što je oko 39 puta više od zaliha u atmosferi. Prema tome, voda se mijenja u atmosferi prosječno svakih devet dana.

Godišnje otjecanje iznosi  $36 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  (tabl. 1), a to je tek oko 0,003% od zaliha vode na Zemljji. To su, međutim, koli-

čine vode koje imaju za čovjeka naročito značenje. Od tih voda danas otpada u prosjeku po  $9000 \text{ m}^3$  po stanovniku u svijetu. Računa se da će potkraj ovog desetljeća potrošnja vode u svijetu iznositi  $\sim 5500 \text{ km}^3$ , što iznosi  $\sim 15\%$  od količina vode koja se godišnje obnavlja. I pored toga danas se pojavljuju poteškoće u opskrbi vodom zbog regionalnih klimatskih raznolikosti, ne-povoljnog rasporeda otjecanja tokom godine i sl. U budućnosti će se problem opskrbe vodom svakako zaoštiti zbog porasta stanovnika i životnog standarda, jer će to uvjetovati povećanje potrošnje vode.

Tablica 4  
ZALIHE VODE NA ZEMLJI

Zalihe vode	Količina $10^3 \text{ km}^3$	% od ukupnih zaliha
Atmosfera Para preračunata u vodu	13,0	0,001
Hidrosfera		
Oceans	1350400,0	97,583
Kopno	26431,7	1,910
rijekе	1,7	0,000
slatkovodna jezera	125,0	0,009
slana jezera	105,0	0,008
vlaga u tlu	150,0	0,011
voda u biomasi	50,0	0,004
ledenjaci, glečeri	26000,0	1,878
Litosfera		
Podzemna voda	7000,0	0,506
Ukupno na Zemlji	1383844,7	100,000

Količine vode koje se obnavljaju iznose u Jugoslaviji nešto manje od  $6000 \text{ m}^3$  po stanovniku. I pored relativno velikih količina bit će potrebno povećati kontrolu otjecanja vode i izjednačiti režime otjecanja u toku godine.

#### UTJECAJI NA OTJECANJE

Hidrološke podloge nisu dovoljne za rješavanje hidroloških zadataka (sl. 3). Često je, naime, potrebno u traženju zakonitosti hidroloških pojava poznavati geografsko-fizičke karakteristike sliva i osloniti se na srodne geofizičke znanosti. U modernoj hidrologiji naglašena je tendencija da se postave *zakoni otjecanja* prema geografsko-fizičkim karakteristikama sliva, koji će poslužiti kao korekcija rezultata dobivenih na temelju opažanja ili kao konačni rezultat kad podloge nisu dovoljno pouzdane.



Sl. 3. Medusobni odnosi aktivnosti za rješavanje hidroloških problema

Utjecaji na otjecanje mogu se svrstati u sljedeće grupe: geografski, geološki, biološki i klimatski činioци, te utjecaji tehničkih zahvata na vodotocima.

**Geografski činioći.** Među geografske činioce spadaju: površina sliva, njegov oblik i pad, gustoća riječne mreže, te jezera, močvaru i glečere unutar sliva.

**Površina sliva** određena je vododjelnicom. To je granična linija što omeđuje oborinsko područje s kojeg dio oborine, koji otječe, dotječe određenoj točki riječnog toka. Vododjelnica može biti topografska i hidrološka. Topografska vododjelnica uvijek je točno definirana reljefom. Hidrološka vododjelnica je promjenljiva i ovisi o režimu podzemnih voda i njegovim promjenama. Hidrološka vododjelnica uvjetovana je postojanjem

nepropusne geološke formacije (sl. 4a) ili hidrauličko-morfološkim karakteristikama dvaju susjednih vodotoka (sl. 4b). Za primjer na sl. 4b treba naglasiti da se hidrološka vododjelница nalazi u vodopropusnim geološkim formacijama.

U nas se, s obzirom na geološka svojstva tla i na režim podzemnih voda, može računati s topografski definiranom površinom sliva. Izuzetak je područje krša gdje nije moguće utvrditi hidrološku vododjelnicu bez detaljnijih geoloških i hidroloških studija.



Sl. 4. Topografska i hidrološka vododjelica

*Oblik i pad sliva.* O obliku i padu uvelike ovisi koncentracija površinskih voda, oblik hidrograma velikih voda i specifični maksimalni protoci.

Relativni pad vodotoka definiran je visinskom razlikom između izvora i ušća te duljinom vodotoka. Obično se relativni pad navodi u km po m (ili u m po m). Relativni pad sliva u cijelini nije u hidrološkom smislu posve definiran. Za točno određivanje pada sliva trebalo bi upotrijebiti formulu

$$I_s = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n eZ_i, \quad (4)$$

gdje je  $e$  ekvidistancija izohipsa,  $Z_i$  duljine izohipsa u slivu, a  $F$  površina sliva. Takav izraz, međutim, ne povezuje oblik s padom sliva.

Cesto se prosječni pad sliva izjednačuje s padovima glavnog vodotoka i njegovih protoka do  $n$ -tog reda, uzimajući pri tom u obzir njihove duljine.

Nastoji se da se oblik i pad sliva prikaže nekim faktorom koji se može upotrijebiti kao karakteristika sliva u multivarijabilnim regresijskim analizama otjecanja. Postupak (D. Srebrenović) se osniva na utvrđivanju pravokutnika koji ima jednak koefficijent koncentriranosti kao i površina promatranog sliva. Koefficijent koncentriranosti definiran je relacijom:

$$K = \frac{2F}{sG}, \quad (5)$$

gdje je  $F$  površina sliva,  $G$  duljina granične linije sliva, a  $s$  udaljenost između težišta površine sliva i promatrane točke u slivu. Pomoću (5) određuju se stranice pravokutnika,  $L$  i  $l$ , koji ima jednaku površinu i isti koefficijent koncentriranosti kao sliv, prema relacijama

$$L = \sqrt{\frac{F(2-K)}{K}}, \quad (6)$$

$$l = \sqrt{\frac{FK}{2-K}}. \quad (7)$$

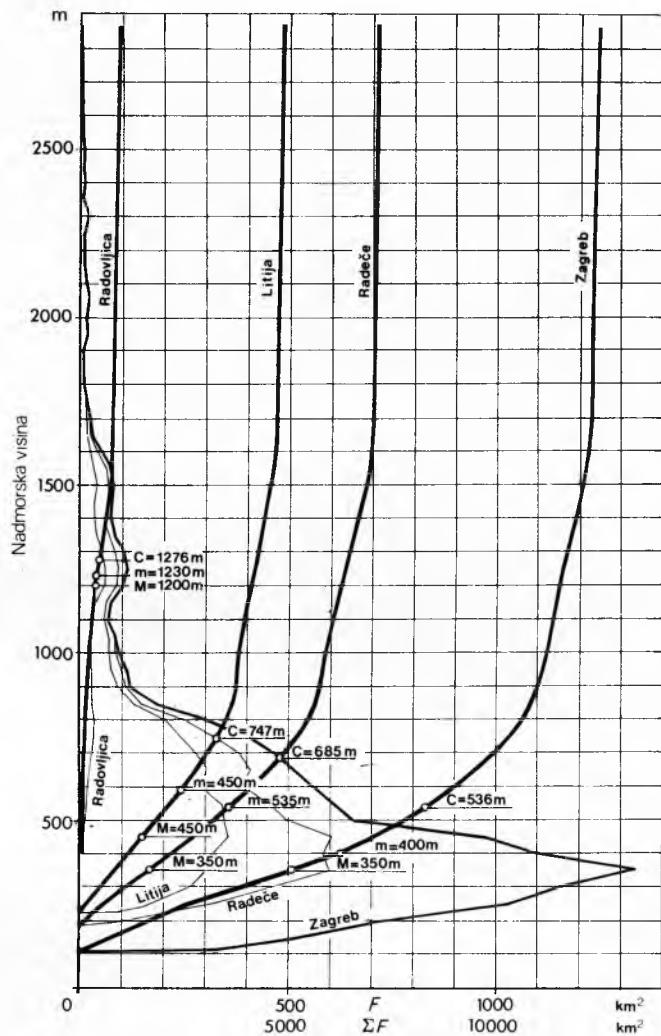
koje se izvode iz (5). Duljom stranicom  $L$  pravokutnika definiran je element sliva pomoću kojeg se izračuna i prosječni pad.

Iz hipsometrijske krivulje sliva (sl. 5) može se odrediti njegova srednja visina nad morem. Ako je  $\Delta A$  razlika srednje visine i nadmorske visine promatrane točke sliva, srednji pad sliva dobiva se iz izraza

$$I_s = \frac{2\Delta A}{L} = 2\Delta A \left| \frac{F(2-K)}{K} \right|^{-\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

gdje je  $L$  duljina veće stranice pravokutnika (6). Tako srednji pad sliva postaje njegova karakteristika u kojoj je sadržan i oblik njegove površine.

Gustoća mreže  $D_u$  također je jedna od karakteristika sliva, a određuje se iz izraza



Sl. 5. Hipsometrijske krivulje i krivulje učestalosti visina slivova na području gornje Save.  $C$  srednja vrijednost visine,  $m$  medijan,  $M$  najveća vrijednost

$$D_u = \frac{1}{F_u} \sum_{u=1}^{u=k} L_u, \quad (9)$$

gdje je  $u$  red vodotoka,  $k$  najviši red vodotoka koji se pojavljuje na promatranom slivu,  $F_u$  površina sliva vodotoka reda  $u$ , a  $L_u$  njegova duljina. Klasifikacija vodotoka prema njihovom redu provodi se od izvora prema ušću. Prema toj klasifikaciji, vodotok bez pritoka ima red  $u = 1$ , vodotok s jednim ili više pritoka ima red  $u = 2$ , vodotok koji nastaje od vodotoka reda  $u = 2$  i vodotoka bilo kojeg reda ima red  $u = 3$ , itd. Primjer klasifikacije vodotoka vidi se na sl. 6.

Smatra se (Horton, Strahler, Nelton) da morfološka analiza sliva, u identičnim geografsko-fizičkim uvjetima, pokazuje da postoji određena veza između broja vodotoka  $N_u$  reda  $u$ , prosječne duljine  $L_{us}$  vodotoka reda  $u$  i ukupne duljine  $L_u$  vodotoka reda  $u$ . To su stohastičke veze pa se utvrđuju regresijskom analizom iz koje se dobivaju regresijski koefficijenti. Pokazuje se, naime, da postoji linearna veza između reda vodotoka  $u$  i logaritma broja vodotoka  $N_u$  toga reda koja je karakterizirana regresijskim koefficijentom  $R_b$ , te da postoji također linearna veza između reda vodotoka  $u$  i logaritma srednje duljine  $L_{us}$  vodotoka toga reda karakterizirana regresijskim koefficijentom  $R_L$ . Iz tih podataka izračunava se broj vodotoka reda  $u$

$$N_u = R_b^{k-u}, \quad (10)$$

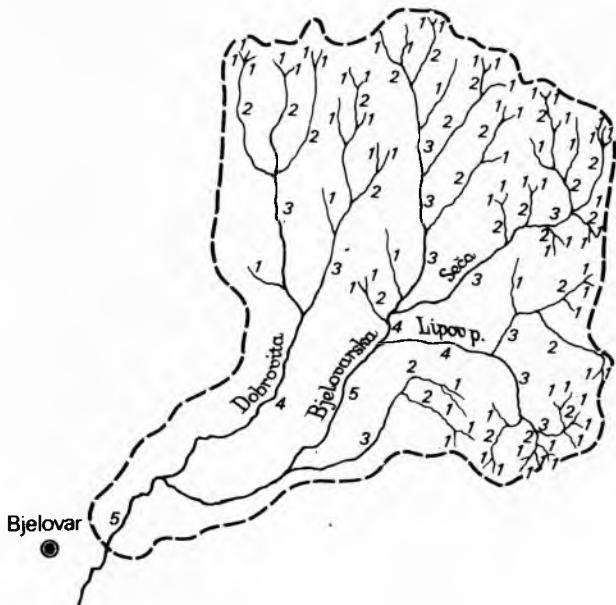
srednja duljina vodotoka reda  $u$

$$L_{us} = L_{ls} R_L^{u-1} \quad (11)$$

i ukupna duljina vodotoka reda  $u$

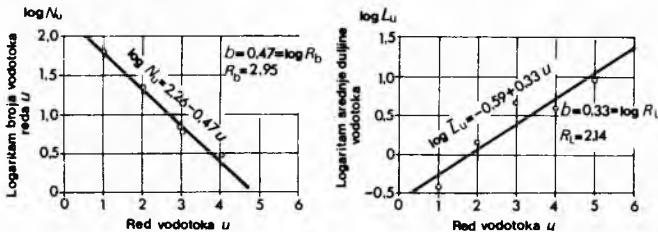
$$L_u = N_u L_{us} = L_{is} R_b^{k-u} R_L^{u-1}, \quad (12)$$

gdje je  $L_{is}$  srednja duljina vodotoka reda  $u = 1$ .



Sl. 6. Klasifikacija reda vodotoka u slivu Bjelovarske rijeke

Za sliv na sl. 6 dobivaju se regresijski pravci prikazani na sl. 7, pa se pomoću njih može izračunati broj vodotoka (10), srednja duljina vodotoka (11) i ukupna duljina vodotoka za sve redove vodotoka koji se pojavljuju u slivu (tabl. 5). Budući da je površina sliva Bjelovarske rijeke  $72 \text{ km}^2$ , a ukupna duljina svih vodotoka u slivu  $\Sigma L_u = 120,8 \text{ km}$ , gustoća mreže (9) iznosi  $D_5 = 1,68 \text{ km km}^{-2}$



Sl. 7. Regresijski pravci kao veza reda vodotoka  $u$  i broja vodotoka  $N_u$ , odnosno duljine vodotoka  $L_u$

Tablica 5

BROJ VODOTOKA  $N_u$ , PROSJEĆNA DULJINA VODOTOKA  $L_{us}$  I UKUPNA DULJINA VODOTOKA  $L_u$  ZA RED VODOTOKA  $u$  ZA SLIV BJELOVARSKE RIJEKE

$u$	$N_u$	$L_{us}$ km	$L_u$ km
1	75,7	0,55	41,6
2	25,7	1,18	30,2
3	8,7	2,52	21,9
4	2,9	5,39	15,6
5	1,0	11,56	11,6
$\Sigma L_u = 120,8 \text{ km}$			

*Jezeri i močvare.* Kad vodotok protječe kroz jezera ili močvare, otjecanje postaje ravnomjernije zbog njihovog retencijskog djelovanja. Ukupno otjecanje postaje manje, jer se povećava površina isparivanja. Posebno jezera i močvare utječu na sploštenost vodenog vala za vrijeme velikih voda, pogotovo kad močvare djeluju kao ekspanzijska područja za velike vode. Primjer za to je močvarno zaobalje Save između Zagreba i Stare Gradiške površine  $\sim 280000 \text{ ha}$ , gdje se veliki vodenih vala Save

znatno prigušuje. Stogodišnja velika voda Save kod Zagreba, naime, iznosi  $3200 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ , a kod Stare Gradiške  $2940 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  i pored toga što je površina sliva više nego trostruko veća.

*Ledenaci* su u našem podneblju velike akumulacije u kojima se sakuplja snijeg u hladnom razdoblju godine. On se topi u toplijim mjesecima, čime se povećava otjecanje u kasnom proljeće i ljeti. Na području Jugoslavije hidrološko značenje imaju snježno-glečerske akumulacije u slivu Drave zbog njihova utjecaja na raspored otjecanja kroz godinu.

**Geološki činioци** mogu se uvrstiti u litološke, koji ovise u prvom redu o sastavu i građi stijena, i strukturalne kao što su rasjedi, nabori i diskontinuiranosti u homogenosti stijena. Tektonski poremećaji uvjetuju jaču eroziju i utječu na oblikovanje riječne površinske mreže, a sastav stijena utječe na infiltraciju vode u podzemlje, što ima odraza na otjecanje na površini. Vrlo porozna tla s jakim infiltracijskim djelovanjem izjednačavaju površinsko otjecanje. U krškim područjima pojave infiltracije veoma su izražene, a mogućnost tokova prema površini smanjena je zbog pukotina, pa je zbog toga isparivanje smanjeno, a otjecanje izjednačenje.

**Biološki činioци.** Biljni pokrivač, pogotovo šume, utječu na bilancu voda i na režim otjecanja. Posebno je za režim otjecanja važna pojava zadržavanja (intercepcije) vode djelovanjem biljnog pokrivača. Prema R. K. Linsleyu, ukupno zadržavanje vode  $V$  može se izraziti jednadžbom

$$V = S + c E t_R, \quad (13)$$

gdje je  $S$  volumen akumulacije na jedinicu horizontalno projektirane površine,  $c$  omjer površine pod vegetacijom i njene horizontalne projekcije,  $E$  isparivanje u jedinici vremena po jedinici površine, a  $t_R$  trajanje kiše. Vrijednost  $S$  ovisi o stanju razvoja biljaka i godišnjem dobu, a posebno u listopadnim šumama i o intenzitetu kiše i brzini vjetra. Jednadžba (13) daje korektne rezultate samo kad su kiše male intenzivnosti. Zbog toga je korisno upotrijebiti jednadžbu

$$V = (S + c E t_R)(1 - \exp k P), \quad (14)$$

u kojoj je  $P$  količina oborina, a  $k$  konstanta. Prema tome, zadržavanje vode znatno ovisi o intenzivnosti kiše, pa je pri vrlo velikim oborinama utjecaj vegetacije na oblikovanje vodenog vala i na njegov volumen praktički bez značenja.

Visoka vegetacija zasjenjuje zemljiste i time se smanjuje isparivanje, jer je temperatura u šumama za  $3\text{--}4^\circ\text{C}$  niža nego u neposrednoj okolici. Na smanjeno isparivanje djeluje i smanjena brzina vjetra u šumi. Bilo bi, međutim, krivo zaključiti da šume pozitivno utječu na bilancu voda, jer se u šumama pojavljuje intenzivno isparivanje s površine lišća (iz hrastove šume isparuje godišnje  $130\text{--}220 \text{ mm}$ , odnosno  $130\text{--}220 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  vode, a ima i drveća s godišnjim isparivanjem  $250\text{--}450 \text{ mm}$ , odnosno  $250\text{--}450 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  po  $\text{km}^2$  površine). Zbog toga se smatra da, s obzirom na otjecanje, nema većih razlika između površina pod šumama i golih površina, jer se smanjeno neposredno isparivanje u šumama nadoknađuje isparivanjem s površine biljaka. Ne smije se pri tome zanemariti utjecaj šuma na eroziju zemljista na strmim padinama.

**Klimatski činioци.** Među klimatske činioce koji utječu na otjecanje i bilancu voda mogu se ubrojiti temperatura zraka, oborine, insolacija i vjetar.

*Temperatura zraka* nekog područja ovisi o dozračenoj Sunčevoj energiji. Ta energija opada od ekvatora prema polovima, pa su godišnje izoterme gotovo usporedne s geografskim paralelama, ali znatno skreću pri prijelazu preko kontinenata. Na temperaturu, osim toga, utječe i nadmorska visina. Sezonska i mjesечne varijacije temperature, koje su posebno zanimljive za hidrološke pojave, opadaju s geografskom širinom i s udaljenošću od mora. Temperature u nas slijede sinusnu zakonitost s maksimumom u srpnju i minimumom u siječnju. Ekstremne vrijednosti ne pojavljuju se svake godine u spomenutim mjesecima. Rasipanje maksimalnih vrijednosti nije veliko, jer se one u 75% slučajeva pojavljuju u srpnju; znatno je veće rasipanje minimalnih godišnjih temperatura, jer se one pojavljuju u siječnju samo u 40% slučajeva.

U sливу Save i Drave može se zanemariti utjecaj geografske širine, jer se ne radi o velikoj površini (može se, naime, računati da se srednja godišnja temperatura mijenja za  $\sim 0,8^{\circ}\text{C}$  za svaki stupanj geografske širine). Zbog toga se može postaviti približan odnos između srednjih godišnjih i mjesecnih temperaturama  $t^{\circ}\text{C}$  i nadmorske visine ( $A$  m n. m.) područja s druge strane. Za sлив Save i Drave vrijedi:

$$\text{za siječanj} \quad t = -0,20 - 0,00305 A, \quad (15)$$

$$\text{za srpanj} \quad t = 22,62 - 0,00614 A, \quad (16)$$

$$\text{za godinu} \quad t = 11,78 - 0,00506 A. \quad (17)$$

Za sлив Save s prosječnom nadmorskog visinom  $A = 504$  m n. m. dobiva se srednja godišnja temperatura od  $9,23^{\circ}\text{C}$ , srednja temperatura u siječnju  $-1,74^{\circ}\text{C}$  i u srpnju  $19,53^{\circ}\text{C}$ . S povećanjem nadmorske visine za 100m smanjuje se srednja godišnja temperatura za  $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ . Iz jednadžba (15) i (16) može se odrediti i godišnja amplituda temperature kao razlika između najtopljeg i najhladnjeg mjeseca, pa ona iznosi

$$a = 22,82 - 0,00309 A. \quad (18)$$

Odstupanja temperature od srednjih mjesecnih vrijednosti mogu biti vrlo velika. Za područje Save razlika srednjih mjesecnih maksimalnih i minimalnih vrijednosti iznosi  $18\cdots26^{\circ}\text{C}$ . Te razlike pojavljuju se u svim mjesecima. Ta odstupanja od prosjeka mogu se prikazati koeficijentom varijacije  $C_v$ , koji je definiran omjerom standardne devijacije  $\sigma_x$  (v. *Statistika*) i srednje vrijednosti promatrane veličine  $\bar{X}$  ( $C_v = \sigma_x/\bar{X}$ ). Koeficijent varijacije nema veliku vrijednost, a razdoba je gotovo simetrična, pa se može smatrati da podaci za razdoblje 20…25 godina mogu dati dovoljno točne rezultate.

U načelu, za hidrološke analize nije potrebno poznavati promjene temperature unutar mjeseca, već su dovoljne srednje mjesecne vrijednosti za procjenu isparivanja i deficitu otjecanja, za prognozu oborina u obliku snijega i njegova zadržavanja na tlu kao akumulacije za buduće otjecanje.

Temperatura vode važna je za hidrologiju samo s ekološkog stanovišta, zbog utvrđivanja učinka onečišćenja, kemijskih i biokemijskih reakcija, mogućnosti samopropiščavanja, itd. U posljednje vrijeme zapažena je tendencija povišenja temperature vode u vodotocima zbog termičkog onečišćenja.

*Oborine* su neosporno najvažniji klimatski činilac koji utječe na otjecanje. To je voda koja padne na površinu Zemlje u tekućem ili čvrstom agregatnom stanju kao kiša, snijeg, inje ili tuča. Pojava oborina redovito je uzrokovanu poreme-

ćajima u atmosferi. Neznatan dio oborina, rosa i mraz, nastaju neposredno kondenzacijom na tlu.

Vodena para nastala isparivanjem s površine mora ili kopna mijeseča se sa zrakom i nastaje smjesa zraka i pare, vlažni zrak. Budući da se para u određenim uvjetima može kondenzirati, razlikuju se dva stanja takve smjese. Kad su obje komponente, zrak i para, u plinovitom stanju, smjesa je u nezasićenom stanju. U zasićenom stanju parcijalni tlak pare jednak je tlaku zasićenja, a zasićena smjesa sastoji se od dvije faze. Plinovitu fazu čini smjesa zraka i zasićene vodene pare, a tekuću kondenzirana para. Obje faze imaju jednaku temperaturu i jednak tlak. Ukupni tlak plinovite faze jednak je zbroju parcijalnih tlakova pare i zraka. Parcijalni tlak proporcionalan je molarnom udjelu svakog sastojka smjese i ukupnom tlaku smjese. Tlak zasićenja  $p_s$  ovisi praktički samo o temperaturi (sl. 8).

Hladni se nezasićeni zrak uz konstantni ukupni tlak, parcijalni tlak pare ostati će nepromijenjen, pa će na nekoj temperaturi postati jednak tlaku zasićenja, kad će započeti kondenzacija pare. To je temperatura rosišta, koja ovisi o parcijalnom tlaku pare, odnosno o vlažnosti zraka.

Vlažnost zraka određuje se kao apsolutna ili relativna vlažnost. Apsolutna vlažnost  $\varrho$  definirana je omjerom mase vodene pare  $m_v$  u volumenu zraka  $V$ , pa se pomoću jednadžbe stanja idealnih plinova (v. *Termodynamika*) dobiva

$$\varrho = \frac{p_v}{R T}, \quad (19)$$

gdje je  $p_v$  parcijalni tlak pare,  $R$  plinska konstanta pare ( $R = 461,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), a  $T$  termodinamička temperatura. Najveća apsolutna vlažnost  $\varrho_s$  pojavljuje se u zasićenom stanju, kad je  $p_v = p_s$ , a ona ovisi samo o temperaturi (sl. 8), jer i  $p_s$  ovisi samo o njoj. Relativna vlažnost  $\varphi \%$  omjer je između  $\varrho$  i  $\varrho_s$ , pa se može prikazati i kao omjer tlakova

$$\varphi \% = \frac{\varrho}{\varrho_s} 100 = \frac{p_v}{p_s} 100. \quad (20)$$

Vlažnost zraka može se prikazati i sadržajem vlage  $x$  (specifična vlažnost) koji se definira omjerom mase pare u masi suhog zraka. Sadržaj vlage određuje se iz relacije

$$x = \frac{M_v}{M_z} \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}, \quad (21)$$

gdje je  $M_z$  molarna masa zraka ( $23,96 \text{ kg kmol}^{-1}$ ),  $M_v$  molarna masa vode ( $18,016 \text{ kg kmol}^{-1}$ ), a  $p$  tlak smjese. U zasićenom stanju sadržaj je vlage maksimalan  $x_s$ , a izračunava se iz (21) ako se postavi  $p_v = p_s$ . Vrijednosti za  $x_s$  vide se na sl. 8. Poraste li sadržaj vlage  $x$  iznad vrijednosti  $x_s$  koja odgovara temperaturi vlažnog zraka, samo dio vode  $x_s$  u jedinici mase zraka ostati će u obliku pare, a ostatak  $x - x_s$  će kondenzirati. Ako je temperatura viša od  $0,01^{\circ}\text{C}$ , para će kondenzirati kao kapljice, a ako je niža od  $0,01^{\circ}\text{C}$ , kao led.

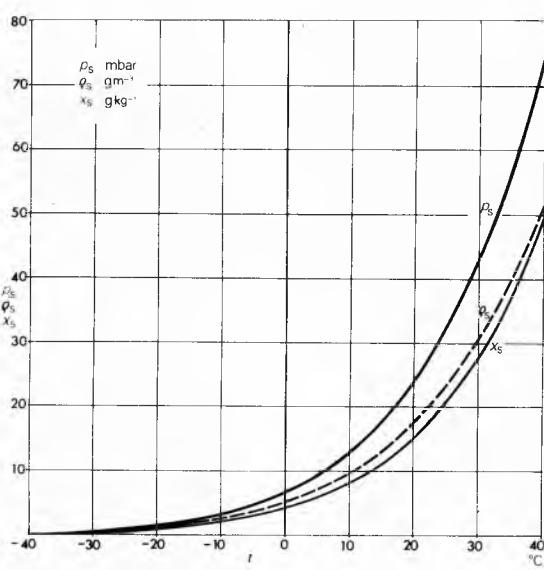
Na sl. 9 vidi se promjena prosječne mjesecne relativne vlažnosti u nas tokom godine.

Oborine, dakle, nastaju hlađenjem zraka do temperature rosišta. S obzirom na procese koji uvjetuju oborine razlikuju se konvektivne, orografske i ciklonske oborine.

Djelovanjem Sunčeva zračenja zagrijava se nezasićeni zrak pri površini Zemlje, diže se i konvekcijom se hlađi sve dok se temperatura ne spusti na temperaturu rosišta. Temperaturni je gradijent hlađenja oko  $1^{\circ}\text{C}$  na 100m. Takav proces uzrokuje većinu olujnih kiša jake intenzivnosti.

Orografske oborine nastaju kad vjetrovi koji pušu s mora donesu vlažni zrak do planinskih lanaca i masiva. Dodirom vlažnog zraka s hladnim planinama pospješuje se kondenzacija.

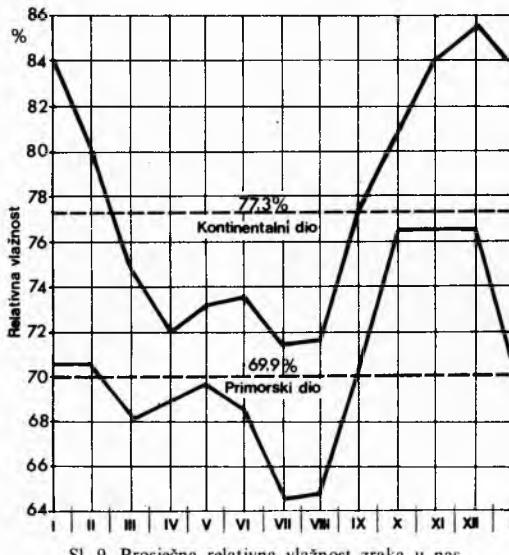
Ciklonske ili frontalne oborine nastaju dodirom zračnih masa različite temperature i vlažnosti. Pojavljuje se adiabatsko hlađenje kad topli zrak nađe na hladne zračne mase ili na klin hladnog zraka. Zbog toga se diže uvis, tamo se hlađi i para se kondenzira. Takve oborine obično dugo traju. U nas su obično manje intenzivne od konvektivnih oborina, ali obuhvaćaju veće područje.



Sl. 8. Ovisnost apsolutne vlažnosti  $\varrho_s$ , specifične vlažnosti  $x_s$  i parcijalnog tlaka  $p_s$  vodene pare u zasićenom zraku o temperaturi

Poplave na manjim slivovima, prema tome, uzrokuju konvektivne i orografske oborine, a na velikim slivovima ciklonske oborine, pogotovo kad se pojave istodobno s topnjom snijega.

Pri obradi pojave oborina izbor vremenskog intervala (godina, mjesec, dekada i sl.) ovisi o namjeni obrade. Obično se utvrđuju prosječne vrijednosti oborina, odstupanja od tih vrijednosti uz određivanje pripadne učestalosti, prostorni raspored oborina, njihova raspodjela u toku godine ili u nizu godina.

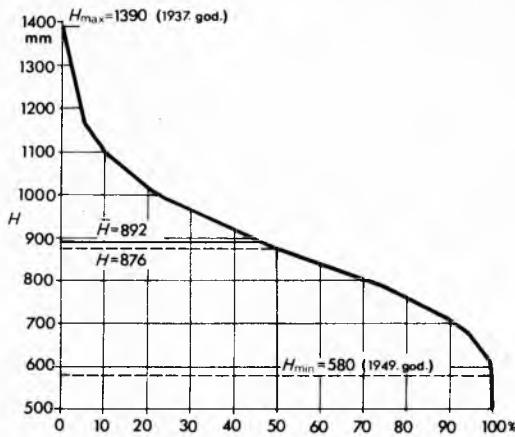


Sl. 9. Prosječna relativna vlažnost zraka u nas

*Godišnje oborine opadaju na Zemljini idući od ekvatora prema polovima. Odstupanja od te zakonitosti ovisna su, posebno na kontinentima, o udaljenosti od mora, kao glavnog izvora vlažnog zraka, o pravcima glavnih vjetrova, o utjecaju planinskih lanaca i o nadmorskoj visini. U Jugoslaviji se pojavljuju svi spomenuti utjecaji, pa godišnje oborine iznose 400...5000mm. Najmanje oborine imaju sjeveroistočni i jugoistočni dijelovi zemlje, a najveće brdska područja priobalnog pojasa. Prema tome, dva su odlučujuća faktora: udaljenost od mora i nadmorska visina. Horizontalna razdioba, idući uzduž meridiana od mora, mijenja se po kilometru od 15 do 1mm, ali je vertikalna razdioba mnogo veća (20...700 puta) i iznosi ~75mm po 100m visine.*

Godišnje oborine znatno odstupaju od dugogodišnjeg prosjeka. Tako npr. u Zagrebu (sl. 10) prosječne godišnje oborine u razdoblju od 1862. do 1971. godine iznose 892mm, a mediana je 876mm. Minimalne godišnje oborine od svega 580mm zabilježene su 1949. godine, a maksimalne od 1390mm u 1937. godini.

*Sezonska raspodjela oborina.* Pod sezonskom raspodjelom oborina obično se misli na raspodjelu godišnjih oborina na tolo (travanj–rujan) i hladno (listopad–ožujak) razdoblje



Sl. 10. Krivulja trajanja godišnjih oborina u Zagrebu (1862–1971)

godine. Na sezonsku raspodjelu oborina u toku godine utječu dva oborinska režima: kontinentalni i maritimni. Kontinentalni režim karakteriziran je takvom sezonskom raspodjelom oborina da većina pada u toplom, vegetacijskom razdoblju, a u području s maritimnim režimom većina se oborina pojavljuje u hladnom razdoblju godine.

Granica između maritimnog i kontinentalnog oborinskog režima može se analitički odrediti, ako se pretpostavi da su udaljenost od Jadranskog mora uzduž meridijana  $\Delta\varphi$  i geografska duljina  $\lambda$  mjerodavne za oborinski režim. Višestrukom regresijskom analizom dobiva se omjer između razlike oborina u topol i hladnoj sezoni  $\Delta H_s$  i ukupnih godišnjih oborina  $H$  iz relacije

$$\frac{\Delta H_s}{H} = 0,1345 \Delta\varphi - 0,0509 \lambda + 0,6393 \quad (22)$$

u kojoj je  $\Delta\varphi = \varphi - 55 + 0,7\lambda$ , što vrijedi ako se položaj Jadranske obale prikaže pravcem  $\varphi = 55 - 0,7\lambda$ . Granica između dva režima dobiva se za  $\Delta H_s/H = 0$ , pa je

$$\varphi + 0,322\lambda = 50,25, \quad (23)$$

koja se vidi na sl. 11.

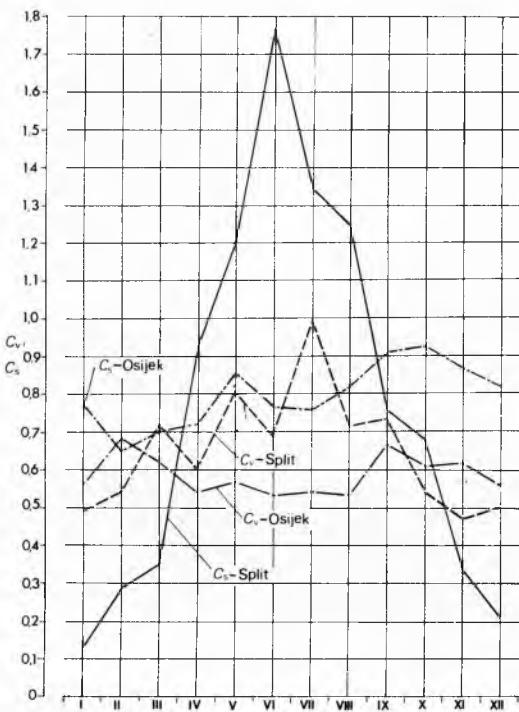


Sl. 11. Granica između kontinentalnog i maritimnog oborinskog režima u Jugoslaviji

*Mjesečne oborine.* U području maritimnog oborinskog režima maksimalne se oborine pojavljuju u listopadu, a minimalne u srpnju, a u području kontinentalnog režima maksimalne u lipnju, a minimalne u veljači. Vrlo je vjerojatno da će se svake godine pojaviti minimum oborina u navedenim mjesecima, što se ne može reći za maksimalne oborine, pa ni onda kad se promatraju dugogodišnji prosjeci. Promjene mjesečnih oborina ne mogu se prikazati jednostavnom cikličkom funkcijom, jer postoje, zbog djelovanja različitih režima, sporedni maksimumi i minimumi tokom godine.

Odstupanja mjesečnih oborina od prosjeka veća su od odstupanja godišnjih od prosječnih godišnjih oborina. Općenito vrijedi da su odstupanja to veća što je kraće vremensko razdoblje promatranja. Te razlike od prosječnih vrijednosti vrlo su važan podatak za određivanje ekstremnih protoka u vodotocima, pojava suša ili suviška vlage u tlu i sl. Zbog toga je potrebna detaljna obrada pojave oborina statističkim metodama i određivanje zakona raspodjele.

Na sl. 12 prikazani su koeficijenti varijacije  $C_v$  i asimetrije  $C_s$  za karakteristične kišomjerne stанице kontinentalnog (Osijek) i maritimnog (Split) oborinskog režima. Koeficijent asimetrije  $C_s$  određen je kao pokretni prosjek tromjesečnih vrijednosti. Koeficijent asimetrije izračunava se iz omjera



Sl. 12. Mjesečni koeficijenti varijacije  $C_v$  i asimetrije  $C_s$  za kišomjerne stанице Osijek i Split

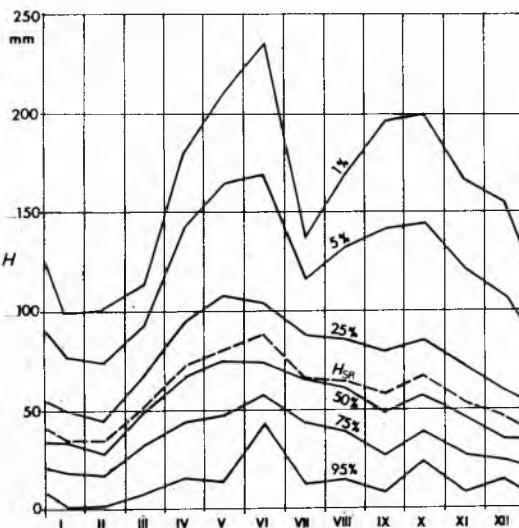
središnjeg momenta trećeg reda  $\mu_3$  i treće potencije varijance  $\sigma^3$  (v. Statistika). Razdioba mjesečnih oborina s naznakom učestalosti pojava (sl. 13 za kišomjernu stanicu Osijek, sl. 14 za Split) vrlo dobro pokazuje odstupanja od prosjeka  $H_{sr}$ . U dijelu ispod krivulje označene sa 50% nalazi se polovica svih pojava, što pokazuje da je raspored oborina uglavnom povoljan za turizam u primorskom, a za poljoprivredu u kontinentalnom području.

Kratkotrajne kiše jake intenzivnosti posebno su važne za hidrološke analize pojave velikih otjecanja i erozijskih procesa. Intenzivnost oborina opada s trajanjem, pa se ovisnost intenzivnosti i u jedinici vremena može prikazati izrazom

$$i = at^{-n}, \quad (24)$$

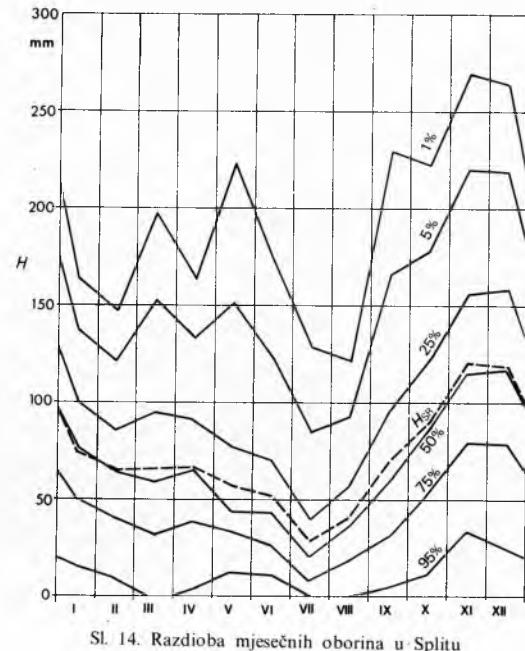
gdje je  $t$  trajanje kiše, a  $a$  i  $n$  su konstante ovisne o klimatskim uvjetima. Za područje između Save i Drave približno vrijedi relacija

$$i = \frac{16,5}{t^{0,75}} (1 + 1,5 \log P) H \text{ mm h}^{-1}, \quad (25)$$



Sl. 13. Razdioba mjesečnih oborina u Osijeku

gdje su  $H$  godišnje oborine u m, a  $P$  je povrtni period intenzivnih oborina. Povrtni period je recipročna vrijednost vjerojatnosti pojave (v. Statistika).



Sl. 14. Razdioba mjesečnih oborina u Splitu

Proračun prosječnih oborina provodi se metodom izohijeta, metodom aritmetičke sredine oborina i Thiessenovom metodom.

Izohijete (sl. 15) su linije jednakih godišnjih, mjesečnih i sl. oborina. Metoda izohijeta za proračun prosječnih oborina osniva se na planimetriranju površina  $F_i$  koje su ograničene izohijetama. Prikažu li se te površine kao udjeli  $f_i$  ukupne površine sliva ili promatranoj područja  $F$  ( $f_i = 100 F_i / F\%$ ), može se nacrtati krivulja prosječnih oborina (sl. 16) prema relativnoj površini  $f_i$ . Planimetriranjem površine ispod te krivulje i pretvaranjem te površine u pravokutnik dobivaju se prosječne oborine  $H_{sr}$ .

Metoda aritmetičke sredine opaženih oborina u kišomjernim stanicama u slivu može se primjeniti kad je sliv malen, reljef miran i kad su kišomjerne stanice jednoliko raspoređene po površini sliva.

Thiessenova metoda osniva se na podjeli na područja za koja približno vrijede podaci svake od postojećih kišomjernih stanic. Ako se sa  $H_1, H_2, \dots, H_n$  označe prosječne oborine u godini ili mjesecu u kišomjernim stanicama 1, 2, ...,  $n$ , a sa  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  udjeli površine područja za koje vrijede podaci pojedinih kišomjernih stanic u ukupnoj površini sliva  $F$ , prosječne oborine izračunavaju se iz formule

$$H_{sr} = \beta_1 H_1 + \beta_2 H_2 + \dots + \beta_n H_n. \quad (26)$$

Primjena te metode s podjelom površina za koje su mjerodavni podaci pojedinih kišomjernih stanic vidi se na sl. 17 za sliv Česme. Točnost rezultata ovisi o gustoći mreže kišomjernih stanic, a za dugogodišnje prosjekte i o trajanju opažanja u pojedinim stanicama.

Raspodjela intenzivnosti kiše po površini može se odrediti analitičkim izrazima koji se osnivaju na opažanjima i statističkoj obradi. Za područje između Save i Drave srednja intenzivnost oborina  $i_{sr}$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) približno je prema relaciji

$$i_{sr} = i_{max} \exp[-0,004 F_k^{\frac{2}{3}} + 0,01(d - 1,5)], \quad (27)$$

gdje je  $i_{max}$  intenzivnost u središtu kiše ( $\text{mm h}^{-1}$ ) prema (25),  $F_k$  površina rasprostiranja jake kiše, a  $d$  trajanje kiše (dana). Uz pretpostavku da je površina rasprostiranja jake kiše slična elipsi, da je njezina dulja os jednaka duljoj stranici  $L$  fiktivnog pravokutnika prema relaciji (6), da je njezina kraća os jednaka promjeru kruga koji ima površinu jednaku površini sliva

## HIDROLOGIJA

$F$ , te da približno vrijedi da je  $L = 0,5^{0,5}$ , može se srednja intenzivnost oborina izračunati iz relacije

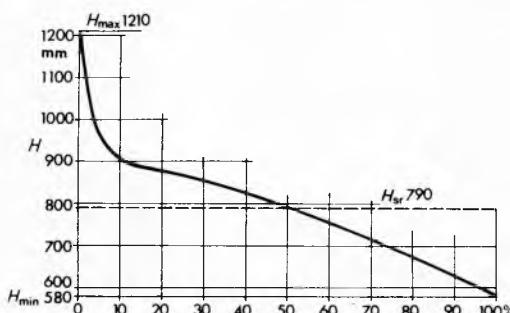
$$i_{sr} = i_{\max} \exp(-0,0054 F^{\frac{2}{3}}). \quad (28)$$

*Snijeg* je jedan od oblika oborina, koji ima znatan utjecaj na otjecanje jer u režim otjecanja unosi komponentu retardacije. Zbog toga su akumulirane količine snijega u slivu zanimljive

za buduće otjecanje koje ovisi otopljenju snijega. Zbog složenosti procesa topljenja snijega na koje djeluje Sunčev zračenje, toplina oslobođena kondenzacijom vodene pare iz zraka, toplina koju nose kapljice kiše i toplina koja dopire do površine iz unutrašnjosti Zemlje, oni se ne mogu točnije prikazati u analitičkom obliku. Utjecaj topljenja snijega na protjecanje određuje se empirički. U tu svrhu može poslužiti sniježni



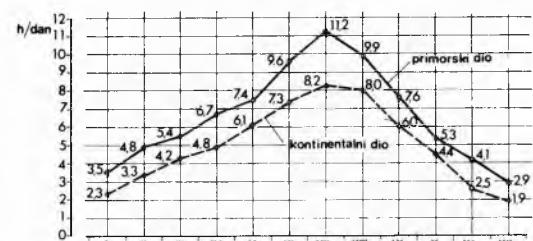
Sl. 15. Godišnje izohijete za područje Slavonije (mm)



Sl. 16. Srednje godišnje oborine u Slavoniji određene metodom izohijeta prema sl. 15



Sl. 17. Prikaz Thiessenove metode za proračun oborina u slivu Česme



Sl. 18. Trajanje prosječne insolacije u Jugoslaviji

*Vjetar* je karakteriziran brzinom strujanja zraka i smjerom toga strujanja. Brzina strujanja ima više utjecaja na otjecanje nego smjer vjetra. Budući da se obično računa sa srednjim vrijednostima brzina, ne može se zapravo ni utvrditi njihov utjecaj. Srednje brzine vjetra iznose  $2\text{--}3 \text{ ms}^{-1}$ , a maksimalne srednje brzine slabo su izražene u proljetnim mjesecima.

*Isparavanje*. Obično se razlikuje isparavanje s vodenih površina (evaporacija) od isparavanja s tla i s površine lišća (evapotranspiracija). Mnogi činioци utječu na evapotranspiraciju: Sunčev zračenje, temperatura zraka i vode, vjetar i atmosferski tlak, a na evapotranspiraciju još temperatura tla, njegova svojstva i karakteristike biljnog pokrivača.

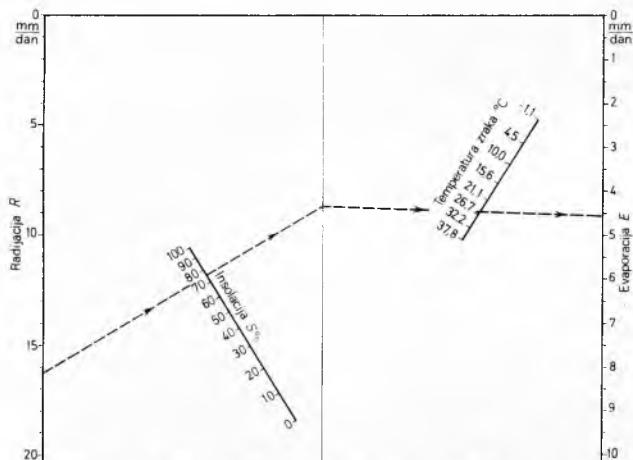
Isparivanje s vodene površine (A. F. Meyer) može se izračunati iz formule

$$e = 15 p_s (1 - \varphi) (1 + 0,225 v) \text{ mm/mjesec}, \quad (29)$$

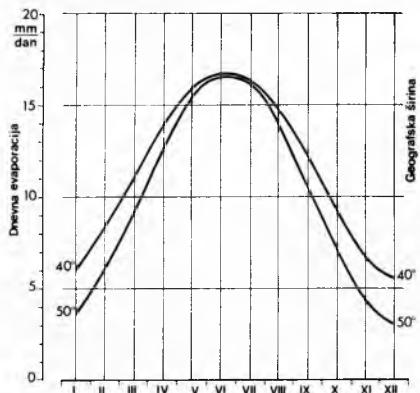
gdje je  $p_s$  tlak zasićenja (sl. 8),  $\varphi$  relativna vlažnost (20), a  $v$  brzina vjetra  $\text{m s}^{-1}$ . U formulu (29) uvrštavaju se prosječne vrijednosti. To je empirička formula, a slične se mogu naći u radovima Albrechta (1950). A. I. Budagovskoga (1957, 1965), Uliga (1954), S. Savina (1960) i dr.

Godišnje isparivanje s vodene površine u primorskom dijelu Jugoslavije veće je od godišnjih oborina. U kontinentalnom dijelu isparivanje je manje od oborina, pa se u toplijem razdoblju pojavljuje deficit u bilanci voda.

Polazeći od energetske bilance H. L. Penman je odredio formulu za određivanje isparivanja u koju je uključio i iskustvene odnose. Formula ima mnogo članova, pa je za praktičnu upotrebu pogodniji nomogram van Bavela (sl. 19). Polazni je podatak za taj nomogram Sunčev zračenje (sl. 20) izraženo kao dnevna evaporacija ( $\text{mm/dan}$ ), koja ovisi o godišnjem dobu i geografskoj širini.



Sl. 19. Nomogram za rješenje Penmanove jednadžbe za evapotranspiraciju



Sl. 20. Intenzitet Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu izražen ekvivalentnom evaporacijom

C. W. Thorntwait definira maksimalno moguću evapotranspiraciju samo kao funkciju temperature zraka  $t$ . Dakle, ne uzima se u obzir vodni režim na tlu i u njemu. Mjesečna evapotranspiracija ( $\text{cm/mjesec}$ ) određuje se iz formule

$$e = ct^a, \quad (30)$$

gdje je  $t$  prosječna mjesečna temperatura, a  $a$  se dobiva po moću godišnjeg temperaturnog indeksa  $I$  iz relacije

$$a = 675 \cdot 10^{-9} I^3 + 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} I + 0,49239. \quad (31)$$

Godišnji je indeks  $I$  zbroj 12 mjesečnih indeksa

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (32)$$

Veličina  $e$  ovisi o inverznoj vrijednosti godišnjeg indeksa, pa se relacija (30) može napisati u obliku

$$e = 1,6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a. \quad (33)$$

Točnost koja se može postići takvim formulama nije u skladu s brojem decimalnih mesta u formuli (31), pa je L. Serra predložio jednostavnije izraze

$$i = 0,09 t^{\frac{3}{2}}, \quad (34)$$

$$a = 0,0016 I + 0,5. \quad (35)$$

Izračunate vrijednosti evapotranspiracije i pogotovo potencijalne evapotranspiracije često su vrlo daleko od onih vrijednosti koje daje vodna bilanca sliva. One se približuju stvarnim vrijednostima, koje se mogu nazvati deficitom otjecanja, kad se promatra duže vremensko razdoblje i kad se u tlu nalazi dovoljno vlage. To se pojavljuje tamo gdje su visoke razine podzemnih voda i gdje se voda kapilarnim uzgonom podiže do površine. I pored toga izračunate vrijednosti evapotranspiracije i potencijalne evapotranspiracije imaju svoje značenje jer su one vrlo indikativan pokazatelj deficitu otjecanja i jer nalaze primjenu u primjenjenoj poljoprivrednoj hidrologiji.

**Utjecaj ljudske aktivnosti.** Svaka ljudska aktivnost u slijvu, a pogotovo u riječnim tokovima, odražava se na vodni režim. To ne moraju biti ni hidrotehnički zahvati, već npr. poljoprivredni ili šumarski, pa iako su neznatni po opsegu, ali vremenski česti, oni mogu uzrokovati vidljive promjene vodnog režima. Te su promjene mahom negativne: velike vode postaju veće, a male vode manje. Hidrotehnička djelatnost (obrana od poplava, regulacija riječnog korita, energetsko iskorištavanje vodnih snaga i sl.) krije u sebi latentnu opasnost pogoršanja vodnog režima u nizvodnom toku, pogotovo kad se pri projektiranju takvog zahvata ne sagleda cijeli vodotok. Zbog toga je nužno izraditi vodoprivrednu osnovu kojom se usklađuju svи vodoprivredni zahvati na vodotoku.

U nas je zapaženo pogoršanje vodnog režima na svim riječnim tokovima, što je potvrđeno tendencijom porasta godišnjih velikih voda i smanjenja malih voda.

## KONSUMPCIJSKA KRIVULJA I HOMOGENOST HIDROLOŠKIH PODLOGA

Protoci vodotoka neprekidno se mijenjaju, a oni se utvrđuju uglavnom opažanjem vodostaja uz prethodno definiranje ovisnosti vodostaja o protoku konsumpcijskom krivuljom. O opažanju i mjerenu vodostaja te o mjerenu protoka  $v$ . *Hidrometrija*. Ta ovisnost između vodostaja i protoka može biti jednoznačna ili nejednoznačna, konstantna ili vremenski promjenljiva, ali je svakako treba izračunati.

Konsumpcijska krivulja  $Q = f(H)$ , gdje je  $Q$  protok (obično  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), a  $H$  vodostaj, trebala bi dati jednoznačnu ovisnost protoka i vodostaja, što je teorijski neodrživo kad se promatraju prirodni vodotoci. Nemoguće je, naime, pronaći profil na rijeci na kojem vlada režim jednolikog stacionarnog strujanja. Takva ovisnost, međutim, nužna je za praksu, a pogreške koje se pojavljuju zbog pretpostavke o stacionarnom strujanju mogu se eliminirati samo povećanim brojem mjerjenja protoka. To mjerjenje mora biti raspoređeno po cijeloj amplitudi vodostaja, ali se mora nastojati da se mjerena provedu i za vrijeme porasta i za vrijeme opadanja vodenog vala. To je pogotovo važno za mjerjenja pri visokim vodostajima kad je nestacionarnost strujanja najveća.

Na temelju mjerjenja vodostaja i protoka može se grafički ili analitički odrediti funkcionalna veza među tim dvjema veličinama. Grafička metoda danas se sve manje upotrebljava, jer se elektroničkim računalima mogu jednostavno izračunati konstante i u najkomplikiranijim izrazima.

Najčešće se konsumpcijske krivulje aproksimiraju relacijama oblika

$$Q = A(H + h)^n \quad (36)$$

$$Q = A + BH + CH^2 + \dots, \quad (37)$$

gdje su  $n$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , ... konstante koje se određuju metodom najmanjih kvadrata (v. *Statistika*), a  $h$  je konstanta koja se određuje pokušavanjem uz uvjet da koeficijent prilagođavanja

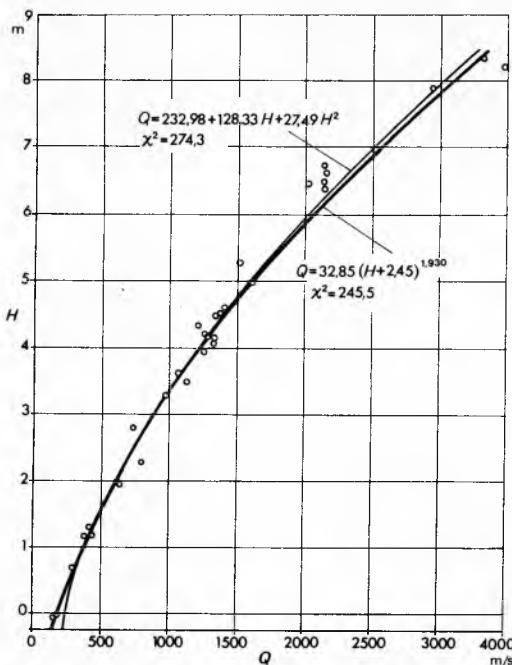
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{ri})}{Q_{ri}} \quad (38)$$

bude minimalan. U (38)  $Q_i$  jest izmjerena vrijednost protoka, a  $Q_{ri}$  izračunata vrijednost iz konsumpcijske krivulje uz pretpostavljenu vrijednost za  $h$ . Vrijednost konstante  $h$  trebala bi da bude približno jednaka razlici visine nul-točke vodokaza i dna korita. Prije određivanja konstanta  $n$  i  $A$  metodom najmanjih kvadrata treba izraz (36) pretvoriti u logaritamski oblik

$$\log Q = \log A + n \log(H + h). \quad (39)$$

Pri određivanju konsumpcijske krivulje prema (37) ne računa se s polinomom višim od 3. reda.

Na sl. 21 vide se konsumpcijske krivulje za Savu kod Slavonskog Broda, određene prema relacijama (36) i (37). Pored jednadžba nalaze se i podaci za koeficijent prilagodivanja.



Sl. 21. Konsumpcijske krivulje za Savu kod Slavonskog Broda

Napouzdanost zaključivanja na temelju hidroloških podataka iz mreže vodomjernih stanica nikada se ne smije zanemariti. Nastojanja mogući ići u smislu procjene točnosti rezultata i nastojanja da se poveća gustoća mreže vodomjernih stanica, pogotovo kad se predviđaju opsežniji hidrotehnički radovi na vodotoku.

Točnost rezultata ovisi o trajanju vremenskog razdoblja opažanja. Prema računu vjerojatnosti (v. *Teorija vjerojatnosti*), pogreška prosječne vrijednosti iznosi

$$\delta_{\bar{x}} = 100 C_v N^{-0.5}, \quad (40)$$

gdje je  $C_v$  koeficijent varijacije, a  $N$  broj godina opažanja. Koeficijent varijacije može, dakle, poslužiti za utvrđivanje potrebnog trajanja vremenskog razdoblja opažanja da bi se osigurala zadovoljavajuća točnost. Koeficijent varijacije ovisi o vremenskom razdoblju za koji se određuje prosječna vrijednost. U slivu Save, već prema površini promatranoj sliva, koeficijent varijacije godišnjih protoka iznosi 0,2...0,4, a taj je koeficijent za mjesecne protote gotovo tri puta veći. Za tolike koeficijente varijacije poželjno je da postoje opažanja kroz najmanje 30-50 godina da bi se ostvarila jedva prihvatljiva točnost rezultata hidroloških analiza.

Hidrotehnički sustavi i smještaj hidrotehničkih objekata rijetko se poklapaju s hidrometričkim profilom za koji postoje podaci opažanja kroz dovoljni broj godina. Kad se analizom utvrdi opravdanost gradnje nekog hidrotehničkog sustava ili objekta, obično se pokaže da je potrebno uspostaviti vodomjernu stanicu na nekom profilu vodotoka. Tada se postavlja pitanje kako prenijeti informacije s nekog postojećeg ili više postojećih profila na novo postavljeni profil s namjerom da se produženjem vremenskog razdoblja smanji hidrološka nepouzdanost. Pokazuje se da je prijenos tih informacija moguć pomoću regresijske i korelacijske analize (v. *Statistika*).

Poželjna je upotreba linearne korelacije, pa se dobivaju regresijski pravci u obliku

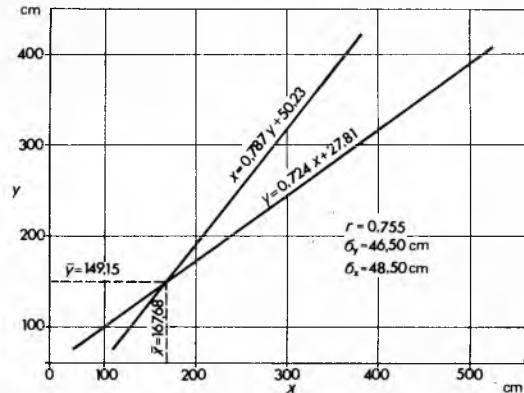
$$x = R_y y + a_1, \quad (41)$$

$$y = R_x x + a_2, \quad (42)$$

gdje su  $x$  i  $y$  varijable (vodostaji ili protoci),  $R_x$  i  $R_y$  koeficijenti smjera regresijskih pravaca ili koeficijenti regresije, a  $a_1$  i  $a_2$  konstante. Koeficijent korelacije iznosi

$$r = \sqrt{R_x R_y}. \quad (43)$$

Na sl. 22 prikazani su regresijski pravci vodostaja Drave i Mure neposredno prije njihova sastava.



Sl. 22. Regresijski pravci za vodostaje Drave (Varaždin,  $x$ ) i Mure (Mursko Središće,  $y$ )

Vrijednost koeficijenta korelacije može poslužiti za utvrđivanje opravdanosti prijenosa informacija s postojećih na novu hidrometričku stanicu. Smatra se (H. A. Thomas, N. C. Matallas), naime, da je taj prijenos opravдан kad je zadovoljena nejednadžba

$$r^2 > \frac{1}{n_1 - 2}, \quad (44)$$

u kojoj je  $n_1$  broj godina opažanja nove stанице. Na prvi pogled nejednadžba (44) daje optimističke izglede za produženje razdoblja opažanja novoosnovane stаницe. Da bi, međutim, to bilo opravданo, potrebno je da koeficijent korelacije bude signifikantan (v. *Statistika*), što se utvrđuje testom  $t$

$$t = r \sqrt{\frac{n_1 - 2}{1 - r^2}}. \quad (45)$$

Za osiguranje razine vjerojatnosti od 95%, potrebno je da je  $t \approx 2$ , pa je koeficijent korelacije signifikantan ako je

$$r \sqrt{\frac{n_1 - 2}{1 - r^2}} \geq 2. \quad (46)$$

Ako, npr., nova stаницa radi  $n_1 = 4$  godine, tada bi koeficijent korelacije trebao biti  $r \approx 0.75$ . Postizanje tolike vrijednosti koeficijenta korelacije ovisi o gustoći postojećih vodomjernih stanica 1. reda koje su mjerodavne za novu stanicu, o karakteristikama vodnog režima vodotoka i o hidrološkim veličinama koje se određuju. Vrijednost koeficijenta korelacije, naime, opada sa skraćivanjem vremenskog razdoblja za koje se traži hidrološka veličina (prosječni godišnji protoci imaju

znatno veći koeficijent korelacijske nego prosječni mjesecni protoci).

U slivu Save, u kojem su hidrometrička mjerena najviše organizirana, jedva bi se našlo 60 hidrometričkih profila s dovoljno dugim razdobljem opažanja. Na svaku takvu stanicu otpada oko  $1600 \text{ km}^2$  sliva, što je prevelika površina za jednu stanicu, to više što razdioba tih stanica po površini sliva nije jednolika. U brdskim dijelovima slivova na manjim vodotocima gustoća je stanica obično najmanja. Prema tome, prijenos informacija metodom regresije s postojeće na novu stanicu neće uvijek dati zadovoljavajuće rezultate.

Niz opažanja mora biti dovoljno dug da bi rezultati obradbe bili dovoljno točni. Taj niz opažanja, osim toga, mora biti reprezentativan i homogen, tj. da svaki član niza potječe, u statističkom smislu, iz iste raspodjele. To je važno naglasiti, jer se često opaža da se analiziraju nehomogeni nizovi. Ako, npr., rijeka neuravnoteženo transportira nanos, korito se zasipa, a vodostaj raste. Ne korigiraju li se opažene vrijednosti vodostaja na isto (obično aktualno) stanje korita, opažanje vodostaja neće biti reprezentativno. Vrlo se često događa da se vodostaji skokovito promijene, što pokazuje da s nul-točkom vodokaza nešto nije u redu. Ako postoji dulje razdoblje opažanja, ima više načina za utvrđivanje pravog stanja. Jedan je od njih pomoću tzv. krivulje iscrpljenja, koja je određena izrazom

$$Q = Q_0 \exp(-\alpha T), \quad (47)$$

gdje je  $T$  vrijeme koje se računa od trenutka kad je zabilježen protok  $Q_0$ , a  $\alpha$  konstanta koju treba odrediti. Pomoću relacije (36) dobiva se jednadžba iscrpljenja u koju je uključen i položaj vodokazne letve

$$H - h = (H'_0 - h) \exp\left(-\frac{\alpha}{n} T\right). \quad (48)$$

Pretpostavi li se da je na istom mjestu postojala letva s nepoznatom visinom nul-točke, na toj letvi umjesto vodostaja  $H$  očitava se vodostaj  $H + \Delta H$  ( $\Delta H$  je pozitivno ako je nul-točka stare letve bila na manjoj visini), pa je  $\Delta H$  razlika nul-točaka dviju letava. Ta se razlika dobiva iz relacije

$$\Delta H = \frac{(H'_0 - h) \exp\left(-\frac{\alpha}{n} T\right) - H'}{\exp\left(-\frac{\alpha}{n} T\right) - 1}. \quad (49)$$

Da se odredi  $\Delta H$ , treba pomoću krivulje iscrpljenja (46) odrediti vrijednost  $\alpha$  na postojećoj letvi, te  $n$  i  $h$  za konsumpcionu krivulju aktualnog stanja, zatim s konsumpcionih krivulja otčitati dva vodostaja  $H'_0$  i  $H'$  prema staroj letvi. Vremenski razmak između ta dva vodostaja iznosi  $T$ .

Postoji više metoda za aktualizaciju mjernih podataka, već prema raspoloživim podlogama i intuiciji obradivača. Uvijek je potrebno nakon aktualizacije provjeriti homogenost niza jednim od testova za takvu provjeru.

### SREDNJI GODIŠNJI I MJESEČNI PROTOCI

Srednji godišnji i mjesecni protoci aritmetička su sredina svih dnevnih protoka u godini, odnosno u mjesecu.

**Srednji godišnji protok** može se odrediti za svaku godinu posebno, ali se obično srednjim godišnjim protokom smatra aritmetička sredina svih dnevnih protoka u nizu godina. Srednji godišnji protok za više godina to je bliži realnoj vrijednosti što je u razmatranju uključeno više godina. To je veličina koja daje prvu, osnovnu karakteristiku vodnog režima. Pomoću srednjeg godišnjeg protoka  $Q_{sr}$   $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  određuje se srednje godišnje otjecanje  $V \text{ m}^3$  iz relacije

$$V = 31,536 \cdot 10^6 Q_{sr}, \quad (50)$$

gdje je  $31,536 \cdot 10^6$  broj sekunda u godini. Često se protok prikazuje kao specifični srednji godišnji protok  $q \text{ s}^{-1} \text{km}^{-2}$  po jedinici površine slivnog područja  $F \text{ km}^2$

$$q = \frac{Q_{sr}}{F} \cdot 10^3. \quad (51)$$

Središnji godišnji protok može se prikazati i kao visina oborina  $Q_h \text{ mm}$  koje otječu

$$Q_h = \frac{31,536 Q_{sr}}{F} \cdot 10^3. \quad (52)$$

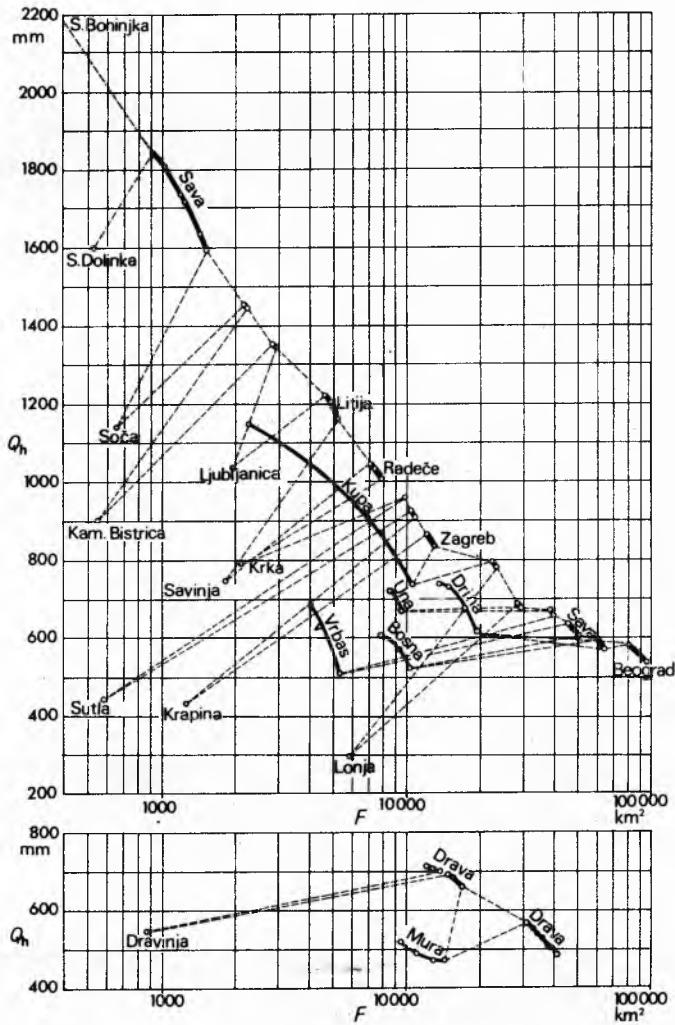
Srednji godišnji protoci u pojedinim godinama razlikuju se od dugogodišnjeg prosjeka. Te se razlike mogu definirati koefficijentima varijacije  $C_v$  i asimetrije  $C_s$ . O značenju tih koefficijenata već je bilo riječi, a treba spomenuti da se s povećanjem površine slivnog područja smanjuju vrijednosti tih koefficijenata.

**Odnos godišnjih oborina i otjecanja.** Otjecanje se može smatrati reakcijom riječnog sliva na oborine. Trenutne promjene protoka (otjecanja)  $Q$  ovise o trenutnim promjenama oborina  $H$ , gubitka vode  $D$  zbog isparivanja i akumuliranog volumena vode  $V_a$ , pa se mogu prikazati relacijom

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dH}{dt} - \frac{dD}{dt} + \frac{dV_a}{dt}. \quad (53)$$

Kad se promatra taj proces u dužem vremenskom razdoblju, moguće je ispuštiti iz razmatranja učinak akumuliranja vode, pa ostaje pored oborina samo utjecaj evapotranspiracije koji se može nazvati deficitom otjecanja.

Kad se promatra neko ograničeno područje, deficit otjecanja može se svesti na utjecaj temperature  $T$ , pada sliva  $I_s$  i prostranja vodopropusnih površina. U nas je područje krša vodopropusno, pa se to prostiranje može odrediti omjerom površine krškog područja  $F_k$  i ukupne površine  $F$  ( $f = F_k/F$ ). Omjer  $f$  nema utjecaja na zakašnjelo otjecanje ako se proučava bilanciranje oborina koje padnu i otječu u okviru dužeg vremenskog razdoblja (npr. godinu dana). Međutim, ta veličina  $f$



Sl. 23. Specifično godišnje otjecanje  $Q$  mm prema površini sliva  $F \text{ km}^2$

postaje važna u krškim oblastima pukotinske poroznosti zbog toga što u tom području nema ascendentnih tokova (ili su veoma slabii), pa podzemna voda veoma teško može ponovno dospjeti na površinu gdje bi mogla biti izložena procesima evaporacije. To je i razlog smanjenja gubitaka zbog isparivanja. Opća formula za srednje godišnje otjecanje  $Q_h$  mm mogla bi imati oblik

$$Q_h = A H^a T^b I_s^c \exp(fd), \quad (54)$$

gdje su  $A$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  parametri. Linearnom višestrukom regresijom mogu se izračunati parametri nakon prethodnog logaritmiranja jednadžbe (54). Za slivove Save, Drave i naših rijeka koje utječu u Jadransko more dobiva se formula

$$Q_h = 0,025 H^{1.5} \left( \frac{I_s^{0.1}}{T} \right)^{0.167} \exp(0,222f). \quad (55)$$

Na spomenutim slivovima raspolagalo se s podacima za 90 hidrometričkih profila. Ovisnost srednjeg godišnjeg protoka  $Q_h$  o površini slivnog područja vidi se na sl. 23.

$\beta$  koeficijenti višestruke korelacije za varijable  $I_s$  i  $T$  imaju vrlo malu vrijednost, što znači da se mogu ispuštiti iz razmatranja. To, međutim, ne znači da te dvije varijable nemaju utjecaja na godišnje otjecanje, jer su temperatura i pad sliva na neki način uključeni u visinu oborina  $H$ . To upućuje na to da se može otjecanje prikazati s manje varijabla, pa se može postaviti opća jednadžba

$$Q = aH - b + cf, \quad (56)$$

gdje su  $a$ ,  $b$  i  $c$  konstante koje ovise o karakteristikama sliva. Za već navedene slivove dobiva se:

$$Q = 0,880H + 215f - 420. \quad (57)$$

Opći koeficijent te višestruke korelacije iznosi 0,91, što pokazuje da je korelacija dobra. Iz (57) deficit je godišnjeg otjecanja

$$D = H - Q = 0,120H - 215f + 420, \quad (58)$$

a koeficijent otjecanja

$$\gamma = \frac{Q}{H} = 0,880 + \frac{215f - 420}{H}, \quad (59)$$

koji prikazuje omjer otjecanja i oborina.

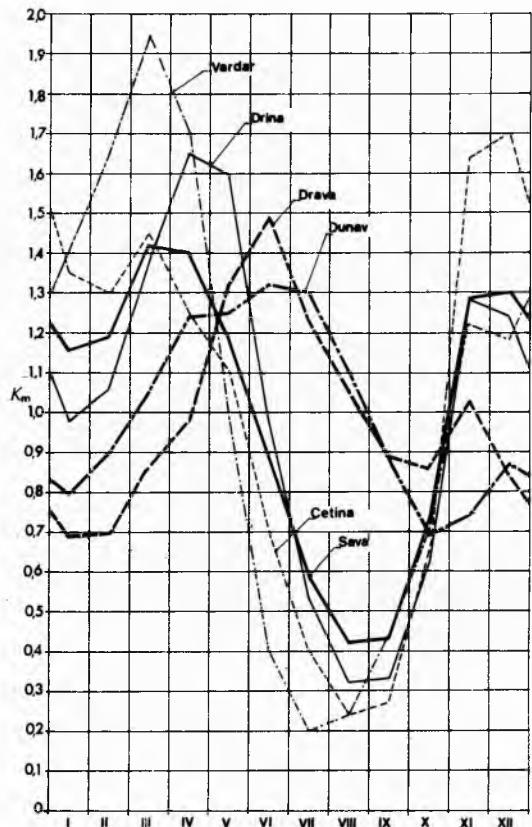
**Klasifikacija vodnih režima.** Specifičnosti oborinskog režima moraju imati odraza na režim otjecanja kroz godinu. Osnovnu karakteristiku režima otjecanja najjednostavnije je prikazati mjesecnim protocima (sl. 24). Radi usporedbe srednji mjesecni protoci prikazani su modularnim koeficijentima srednjeg godišnjeg protoka. Taj je modularni koeficijent

$$K_m = \frac{Q_m}{Q_{sr}}, \quad (60)$$

gdje je  $Q_m$  srednji mjesecni protok.

Takav prikaz mjesecnih protoka nije sasvim usporediv. Da se to postigne, trebalo bi da površine sliva budu približno međusobno jednake. Velike rijeke, naiime, imaju mirniji režim otjecanja, manje razlike između maksimalnih i minimalnih modularnih koeficijenata, jer imaju veću sposobnost akumuliranja i retardacije voda, sposobnost smanjenja velikih voda što nastaje zbog dugog vremena propagacije vodenih valova.

Već prema raspodjeli mjesecnih protoka kroz godinu, razlikuju se (M. Pardé) tri režima otjecanja. Jednostavni režim otjecanja imaju rijeke s takvim protjecanjem da se pojavljuju dvije hidrološke sezone u godini s izrazitim razlikama u vodnosti. Složeni režim otjecanja imaju rijeke u kojima je otjecanje uzrokovano dvama faktorima ili više njih (npr. proljetne ili jesenske kiše, topljenje snijega i glečera, te sl.). Taj složeni režim može biti jednostavniji, kad su klimatski faktori približno jednakim na cijelom slivu, i složeniji, kad se ti faktori mijenjaju uzduž sliva. Jednostavniji tip složenog režima imaju vodotoci s manjom površinom sliva, jer se samo na manjoj površini mogu očekivati homogeni klimatski činiovi. Na rijeckama koje imaju složeni režim otjecanja imaju najmanje četiri hidrološke sezone s najmanje dva maksimuma i dva minimuma u toku godine.



Sl. 24. Mjesecni protoci prikazani modularnim koeficijentima srednjeg protoka

Prema toj klasifikaciji, Dunav u svojem toku po Jugoslaviji ima složeni režim s jače izraženom glečerskom komponentom. Sličan režim ima i Drava, ali s još jače izraženom glečerskom komponentom, jer se maksimalni protoci pojavljuju u lipnju, a glavni minimum, koji je jako izražen, u siječnju. Rijeka Sava ima složeni sniježno-kišni režim s obiljem voda u proljeću i jeseni. To vrijedi za njezin donji tok, a u gornjem i srednjem toku glavni se maksimum pojavljuje u jesen, a manji, sporedni, u proljeće. Glavni, jako izraženi minimum pada u kasno ljeto. Drina ima sličan režim kao donja Sava, samo što je glavni jesenji maksimum izraženiji nego sekundarni zimski maksimum. Cetina ima skoro jednostavni režim zahvaljujući mediteranskom oborinskom režimu s obiljem oborina u hladnom dijelu godine. Maksimalno otjecanje pojavljuje se početkom zime, a minimalno u kasno ljeto. Taj je minimum vrlo izrazit, što odgovara kišnom režimu s malim ljetnim oborinama. To ujedno pokazuje da nije znatan akumulacijsko-retardacijski utjecaj krša. Sličan režim imaju ostale krške rijeke i Vardar, koji je pod utjecajem mediteranskog oborinskog režima.

**Srednji sezonski i mjesecni protoci.** Iz prikaza mjesecnih protoka (sl. 24) može se razabrati da se režim otjecanja ne poklapa s oborinskim režimom. Te se razlike pojavljuju na rijeckama sa sniježno-kišnim režimom, posebno u toploj godišnjoj sezonu zbog intenzivnog isparivanja. One su manje na rijeckama na kojima je izrazit utjecaj topljenja glečera. Može se sasvim općeno reći da rijeke sa sniježno-kišnim režimom imaju manje protoke u topлом dijelu godine nego u hladnom dijelu. Naravno da razlike ovise o oborinskom režimu. Omjer između otjecanja u topлом godišnjem razdoblju i ukupnog godišnjeg otjecanja za neke naše rijeke iznosi: Cetina (Gardunska Mlinica) 0,32, Sava (Slavonski Brod) 0,41, Drava (Donji Miholjac) 0,58.

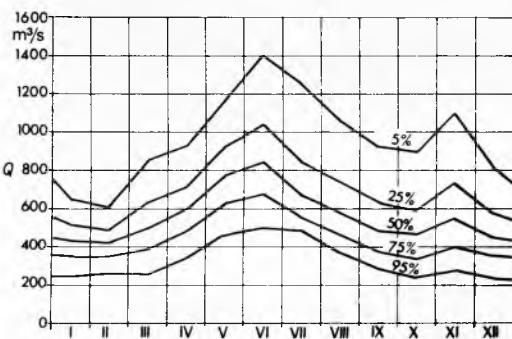
**Srednji sezonski protoci.** Razdioba otjecanja među sezonama nije na našim rijeckama najpovoljnija s obzirom na sezonske potrebe voda. U toploj vegetacijskoj razdoblju, kad su potrebe najveće, otjecanje je najmanje. Izuzetak su rijeke s glečerskom komponentom, koje imaju režim otjecanja što se dobro poklapa s potrebama.

Promatraju li se otjecanja u hladnom  $Q_s$  i toploj  $Q_t$  razdoblju godine u nizu godina, korelacija je nultog pomaka između te dvije sezone slaba. Za Savu kod Slavonskog Broda koeficijent korelacije iznosi  $r = -0,48$ . Pod korelacijom nultog pomaka razumijeva se korelacija dviju vrijednosti koje u vremenskom nizu slijede jedna neposredno iza druge. Taj je koeficijent malen, ali je signifikantan u statističkom smislu, pa se može govoriti o tendenciji izravnjanja srednjih sezonskih protoka u toku godine, tj. da se poslije sušnje hladne sezone može očekivati vlažnija topla sezona i obratno, ali ne s velikim stupnjem pouzdanosti. Za Dravu se dobiva koeficijent korelacije  $r = 0,36$ . Budući da je pozitivan, ne postoji ni tendencija izravnjanja protoka u hladnoj i toploj sezoni, što vrijedi za Savu. To se pojavljuje zbog djelovanja glečerske komponente.

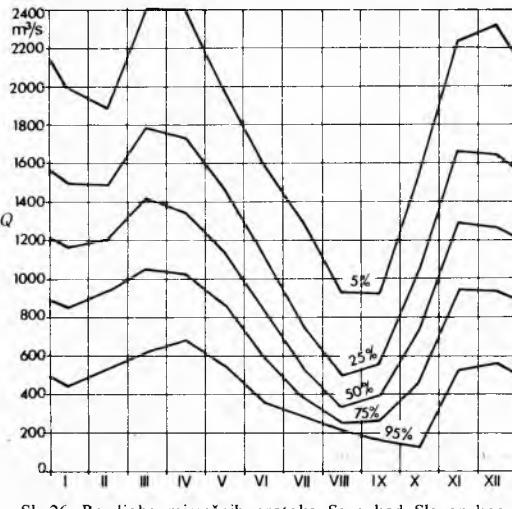
*Srednji mjesечni protoci.* Razlike između srednjih mjesечnih i srednjih godišnjih veće su nego između srednjih sezonskih i srednjih godišnjih protoka, što se poklapa s činjenicom da su varijacije hidroloških pojava to veće što je kraće vrijeme opažanja.

Koefficijent varijacije  $C_v$  za Savu (Slavonski Brod) iznosi između 0,37 (veljača) i 0,57 (rujan), a koefficijent asimetrije  $C_s$  između 0,13 (veljača) i 1,90 (kolovoz). Za Dravu (Donji Miholjac) koefficijent je varijacije 0,30 (veljača) do 0,45 (listopad), a koefficijent asimetrije 0,45 (veljača) do 1,57 (kolovoz). Za Cetinu, vodotok u izrazito krškom području, koefficijent varijacije iznosi 0,32 (kolovoz) do 0,85 (listopad), a asimetrije 0,62 (siječanj) do 2,34 (rujan). To je još jedna od indikacija da akumulacijsko-retardacijske sposobnosti krša nisu tako izrazite kao što se to očekuje.

Na sl. 25, 26 i 27 nalaze se razdiobe mjesечnih protoka Drave, Save i Cetine. Protoci Cetine sredinom i krajem ljeta s frekvencijom pojave od 95% imaju tako male vrijednosti, pa se može smatrati da je horizontalna i sifonska cirkulacija u kršu jedva zamjetljiva. Razdioba protoka Save i Drave zaslužuje posebnu pažnju, jer se mogu smatrati reprezentantima vodotoka

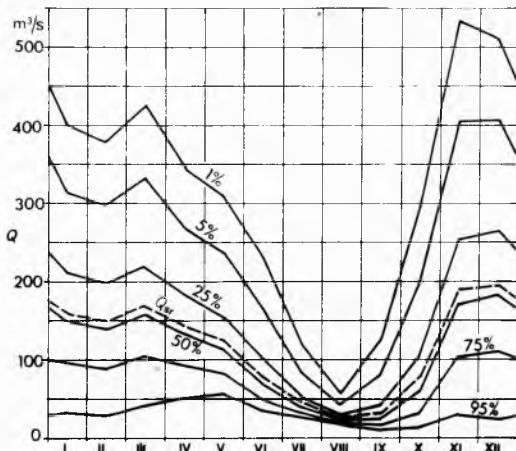


Sl. 25. Razdioba mjesечnih protoka Drave kod Donjeg Miholjca



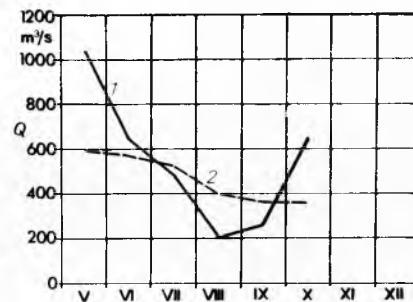
Sl. 26. Razdioba mjesечnih protoka Save kod Slavonskog Broda

sa sniježno-kišnim režimom, od kojih jedan nema, a drugi ima glacijalnu komponentu. Poljoprivreda treba najveće količine vode za natapanje u toploj dijelu godine, a baš se tada pojavljuju najveće razlike protoka u Dravi i Savi (sl. 25 i 26), što potvrđuje konstataciju da glacijalna komponenta daje kvalitetu vodnom režimu. Ta se kvaliteta traži u razdiobi malih voda s frekvencijom pojava većom od 75%.



Sl. 27. Razdioba mjesечnih protoka Cetine kod Gardunske Mlinice

Razdioba mjesечnih protoka ne mora biti jedina karakteristika koja pokazuje vrijednost vodotoka. Znatno ilustrativnija može biti razdioba voda u uzastopno sušnim mjesecima. Ta se razdioba može prikazati polazeći od nekog središnjeg mjeseca, u kojem se javljaju najveće vodoprivredne potrebe za vodom. S obzirom na naše klimatske prilike to je mjesec kolovoz, jer je poljoprivreda najveći korisnik voda, a ona u tom mjesecu treba oko 35% od potrebnih godišnjih količina. Ako se odredi razdioba protoka u kolovozu, zatim u dva mjeseca (srpanj-kolovoz i kolovoz-rujan), pa u tri mjeseca, od kojih je uvijek jedan središnji mjesec (kolovoz), može se odrediti promjena protoka u tim razdobljima, a odatle i protoci za bilo koju frekvenciju.



Sl. 28. Mjesečni protoci trajanja 90%. 1. Sava—Slavonski Brod, 2. Drava—Donji Miholjac

Za vodoprivredu su vrijedni protoci koji se osiguravaju sa sigurnošću od 80...98%. Na sl. 28 vide se mali protoci koji se pojavljuju u Savi i Dravi sa sigurnošću od 90%. Drava ima ljeti veće male vode od Save i pored toga što je prosječno godišnje otjecanje Savom (Slavonski Brod)  $33,48 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ , a Dravom (Donji Miholjac) samo  $18,65 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Uz takav složeni sniježno-kišni režim kao što je režim Save, poboljšanje režima u ljetnom razdoblju može se postići gradnjom akumulacija u slivu. U slivu Drave takvi zahvati nisu potrebni zahvaljujući povoljno raspodjeli voda tokom godine.

**Mjesečna bilanca voda** obuhvaća oborine, otjecanje i manjak otjecanja. U tabl. 6 vide se prosječne mjesечne bilance za Savu kod Sremske Mitrovice. U tablicu su unijeti i podaci o evapotranspiraciji na bazi opažanja u svega tri stанице (Ljubljana, Slavonska Požega, Bijeljina). Spomenuti su podaci samo približni i vjerojatno bi trebali biti nešto niži. Ipak, i takvi podaci

pokazuju osnovnu karakteristiku evapotranspiracije: ona je veća od manjka otjecanja ljeti, a manja zimi. To pokazuje nepovoljno stanje podzemnih voda u našim aluvijalnim nizinama. Razina je podzemne vode zimi i u poljeće visoka, a ljeti vrlo niska, pa to stvara poteškoće u poljoprivredi koje se mogu eliminirati melioracijskim zahvatima. S hidrološkog stanovišta takav raspored pokazuje na pojavu zakašnjelog otjecanja u hladnoj i intenzivnog isparivanja u toploj sezoni. Zakašnjelo otjecanje nastaje zbog akumuliranja sniježnih oborina i retencijskog djelovanja geoloških, bioloških i dr. činilaca.

Vrijeme koncentracije otjecanja jest vrijeme od pojave efektivne oborine (one koja preostaje za otjecanje) u najudaljenijoj točki sliva do pojave maksimalnog protoka u nekom profilu vodo-toka. U literaturi mogu se naći i veličine kojima se karakterizira pojava velikih voda: vrijeme reakcije sliva (vrijeme od pojave maksimalne oborine do pojave vrha vodenog vala), trajanje porasta vodenog vala (vrijeme od pojave porasta protoka do pojave maksimalnog protoka) i dr.

Vrijeme koncentracije na malim slivovima vrlo je kratko (desetak sati). To dopušta pri analizi velikih voda u malim

Tablica 6  
MJESEČNE BILANCE VODA, SAVA KOD SREMSKE MITROVICE  
(Površina sliva 87000 km<sup>2</sup>)

		Mjeseci												Godina
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Oborine mm	mm	70	65	84	94	123	114	91	87	109	124	110	89	1160
Otjecanje m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mm		1728 53	1757 49	2354 72	2399 71	2138 65	1461 43	952 29	626 19	619 18	1017 31	1959 58	2033 62	1587 570
Manjak otjecanja mm		17	16	12	23	58	71	62	68	91	93	52	27	590
Evapotranspiracija mm		3	13	34	62	87	105	117	99	57	25	8	3	613
Koefficijent otjecanja %		76	75	86	75	53	38	32	22	17	25	52	70	49

Manjak mjesecnog otjecanja u slivu koji ima homogeni vodni režim teži konstanti. Promjene manjaka mjesecnog otjecanja mogu se prikazati harmonijskom analizom (Fourierovim redom). Rezultati takve analize za Savu, Dravu i Cetinu vide se na sl. 29. Manjkovi mjesecnih otjecanja najravnomjerniji su na Dravi zahvaljujući glacijalnom utjecaju, a najveće varijacije manjkova pojavljuju se u slivu Cetine zbog akumulacijskog djelovanja krša. Svakako da oborinski režim ima utjecaja na raspored manjkova otjecanja.

slivovima da se podje od postavke da jedna jaka kiša definirana relacijama (25) i (28) obuhvaća cijeli sliv, te da on sudjeluje u oblikovanju vodenog vala.

U velikim slivovima ne može se govoriti o nekom homogenom rasprostiranju kiše po površini sliva. Tu su jače izraženi hidraulički utjecaji na propagaciju vodenog vala, pa praćenja vršnih dijelova vodenih valova uzduž toka pokazuju pojave porasta protoka uvezvi to u načelu, ali je sigurno da one imaju različite frekvencije. Razloge treba tražiti u raznolikosti faktora koji djeluju na pojavu poplave u velikom slivu. U prvom redu to se odnosi na oborine koje nastaju zbog turbulentne ciklonalne aktivnosti. Na velikom slijivu ne postoji, naime, jača stohastička povezanost između oborina i vrlo velikih voda. Tako je npr. promatran slijiv Save za koji se pokušalo utvrditi povezanost između istodobnih desetodnevnih, odnosno dvadesetodnevnih kiša, koje bi trebale biti uzročnici poplava na Savi kod Mačkovca (Bosanska Gradiška) i kod Sremske Mitrovice. Promatrane su kišomjerne stanice Ljubljana, Zagreb, Slavonski Brod, Sarajevo i Beograd. Sume desetodnevnih, odnosno dvadesetodnevnih kiša uzete su iz razdoblja koje je prethodilo pojavama godišnjih maksimuma Save kod Mačkovca i Sremske Mitrovice. Budući da su udaljenosti kišomjernih stanica poznate, mogu se izračunati koefficijenti korelacije  $r$  prema udaljenosti stanica (sl. 30). Dobivaju se slijedeći izrazi za određivanje koefficijenta korelacije

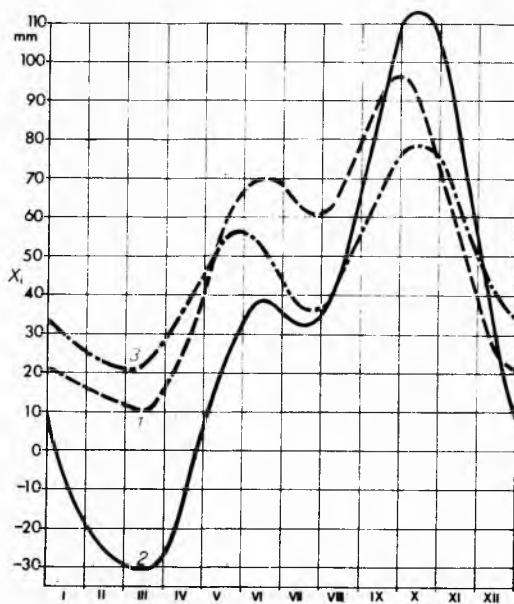
$$\text{za 10-dnevne kiše } r = 2 \exp(-0,00146L) - 1, \quad (61)$$

$$\text{za 20-dnevne kiše } r = 2 \exp(-0,00158L) - 1, \quad (62)$$

gdje je  $L$  km udaljenost između kišomjernih stanica i profila kod Mačkovca i Sremske Mitrovice. Analizirano je 40 opažanja, a testiranje pokazuje da koefficijent korelacije  $r \leq 0,39$  nije signifikantan. To znači da je izvan polumjera  $L \geq 250$  km utjecaj oborina samo slučajan.

Na velikim slivovima frekvencije pojave velikih voda nisu jednake uzduž sliva. Za Savu je utvrđena čvrsta stohastička veza među povratnim periodima velikih voda na gornjem i donjem toku.

Tako npr. stogodišnjoj velikoj vodi Save kod Siska odgovara povratni period od 12 godina, a velikoj vodi koja se pojavljuje u 100 godina kod Sremske Mitrovice korespondentan je visoki protok kod Siska s povratnim periodom od 17 godina. Dakle, s porastom slivnog područja raste heterogenost raspodjele kiša i ostalih činilaca, a interferencije valova pritoka i glavne rijeke

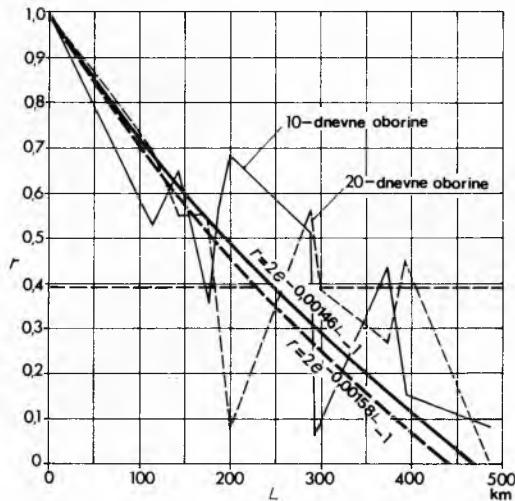


Sl. 29. Mjesечni manjkovi otjecanja aproksimirani Fourierovim redom. 1 Sava — Sremska Mitrovica, 2 Cetina — Gar-dunska Mlinica, 3 Drava — Donji Miholjac

### MAKSIMALNI PROTOCI U VELIKIM I MALIM SLIVOVIMA

Pojava velikih voda povezana je s pojavom jakih kiša. To se može dogoditi i istodobno s topljenjem snijega (glečera). Vrijeme je koncentracije otjecanja bitno u analizi velikih voda.

postaju složenije. Sve to pokazuje da treba razlikovati proračun velikih voda za male od proračuna za velike slike. Na velikim slikeima ima dovoljno opažanja i mjerjenja, koja su dovoljna da se odredi raspodjela velikih voda i njihova učestalost pojva, te da se multivariantnom regresijom pokuša naći analitički izraz kojim će se utvrditi ovisnost velikih protoka o nekim karakteristikama slike. Za male slike redovito ne postoji dovoljno hidroloških podloga, pa ne preostaje drugo nego da se analizom ekstremnih oborina i otjecanja dođe do spoznaja o velikim vodama. Takav je postupak i lakše provediv, jer se neizbjegne pretpostavke o raspodjeli oborina i sl. na malom sliju mogu prihvati.



Sl. 30. Koeficijenti korelacije dugotrajnih kiša prema udaljenosti  $L$

**Maksimalni protoci velikih slikeva.** Hidrološka opažanja i podaci sređuju se u vremenske nizove koji mogu biti stacionarni ili nestacionarni. Homogenost, odnosno reprezentativnost podloga ovisi o stacionarnosti niza. Ako podaci za neko vremensko razdoblje uzeti iz cijelog niza imaju iste parametre, tada je promatrana serija podataka stacionarna. Većina statističkih metoda koje se upotrebljavaju u hidrološkim studijama temelji se na pretpostavci da su opažanja nezavisno distribuirana u vremenu. To ne mora biti točno, jer je hidrološka vremenska serija zbroj slučajnih i neslučajnih pojava. Budući da je otjecanje kontinuirano, uvijek postoji mogućnost da se velike vrijednosti okupljaju uz velike, a male vrijednosti da slijede iza malih. To je pojava perzistencije, a njena vrijednost kao mera ovisnosti dviju vrijednosti određuje se serijskom korelacijom  $k$ -tog reda. Koeficijent serijske korelacije analogan je koeficijentu korelacije za dvije grupe podataka (v. *Statistika*). Te specifičnosti vremenske serije, koje mogu dezavuirati slučajnu varijablu, mogu biti važne za tvorbu nizova za proračun razdiobe. Neslučajne pojave i njihovo značenje sigurno opada s trajanjem vremenskog intervala u kojem se iskazuju hidrološka varijabla. Uzastopni dnevni protoci imaju veći stupanj uzajamne povezanosti nego dekadni, a dekadni veći nego mjesečni protoci itd.

Serijske ekstremne vrijednosti uključuju najveće i najmanje vrijednosti od kojih je svaka izabrana iz jednakih vremenskih intervala. Obično je osnovni vremenski interval hidrološka godina, pa se takva serija naziva nizom godišnjih maksimuma ili minimuma. Tada se teško može pretpostaviti da niz nije sačuvan od slučajnih varijabli. Postoji, osim toga, i izradba niza prekoračenja u koji ulaze članovi veći (analiza maksimalnih voda) ili manji (proučavanje malih voda) od neke osnovne vrijednosti. Kad je takva serija formirana tako da je broj podataka u nizu jednak broju godina, takva se serija naziva godišnjim nizom prekoračenja. Kad se u niz uključuju dvije ili više vrijednosti iz iste godine, odabrani podaci mogu biti opterećeni neslučajnim pojavama, jer jedan hidrološki događaj može utjecati na drugi kad on slijedi ubrzo nakon prvog. V. T. Chow ispitao je odnose između povratnih perioda dobivenih pomoću

niza godišnjih prekoračenja  $P_p$  i niza godišnjih ekstremnih vrijednosti  $P_e$ , te je postavio relaciju

$$P_p = \frac{1}{\ln P_e - \ln(P_e - 1)}. \quad (63)$$

Postaje  $P_p \approx P_e$  kad je povratni period dovoljno dug ( $P > 10$  godina), te prema tome ne bi trebala postojati dilema pri odabiranju metode za oblikovanje nizova.

**Distribucija frekvencije pojava** primjenjuje se u hidrologiji u različitim oblicima, a ona se određuje različitim zakonima raspodjele (v. *Statistika*). Koji se od zakona razdiobe (distribucije) najbolje prilagodava opaženim vrijednostima, može se utvrditi usporedbom parametara razdiobe ili grafički. Za grafičko određivanje razdiobe služi dijagram kojem je na ordinati mjerilo za vrijednosti varijable, a na apscisi mjerilo za vjeroatnosti ili povratni period koji odgovara promatranoj zakonu distribucije. Ako se u takav dijagram unesu opaženi podaci, te ako oni približno teže pravcu, može se smatrati da je taj zakon razdiobe primjenljiv za promatranoj varijablu.

Distribucija opaženih vrijednosti određuje se empiričkom razdiobom, za koju se preporučuju različite formule iz kojih se izračunava povratni period:

$$P = \frac{2N}{2m - 1} \quad (\text{A. Hazen}), \quad (64a)$$

$$P = \frac{N + 1}{m} \quad (\text{Weibull}), \quad (64b)$$

$$P = \frac{N + 0,4}{m - 0,3} \quad (\text{Čegodajev}), \quad (64c)$$

gdje je  $N$  broj članova niza, a  $m$  redni broj člana u nizu srednjem prema opadajućim vrijednostima (kad se promatra razdioba velikih voda), odnosno prema rastućim vrijednostima (razdioba malih voda). Razlike se između tih empiričkih razdioba umanjuju kad  $N$  raste. Kad je  $N$  vrlo velik, relacija  $P = N/m$  potpuno zadovoljava.

Kad grafička metoda ne daje sigurnu odrednicu za izbor zakona razdiobe, valja izvršiti razdiobu po dva, tri ili više zakona i odabrati onu distribuciju koja jednim od testova pokazuje da se najbolje prilagođava.

Za određivanje ekstremnih voda najčešće se upotrebljavaju: gama-razdioba, Pearsonove, ekstremne i logaritamske distribucije, a u hidrološkoj praksi još se upotrebljavaju normalna (Gaussova) razdioba, binomna i Poissonova distribucija.

Radi ilustracije navest će se podaci analize velikih voda Save kod Slavonskog Broda, koja se osniva na podacima za stogodišnje razdoblje (1856—1955), dakle na nizu od 100 članova. Karakteristični su podaci:

prosječni godišnji protok:  $Q_{sf} = 2572 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ,  
varijanca:  $\sigma^2 = 167276 \text{ m}^6 \text{s}^{-2}$ ,  
standardna devijacija:  $\sigma = 409 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ,  
središnji moment 3. reda:  $\mu_3 = 4098350 \text{ m}^9 \text{s}^{-3}$ ,  
koeficijent varijacije:  $C_v = \pm 0,16$ ,  
koeficijent asimetrije:  $C_s = 0,06$ .

Upotrebljavajući različite zakone raspodjele dobivaju se različite velike vode (tabl. 7). Dobivene vrijednosti dosta se razlikuju, a neke od razdioba (npr. normalna) ne bi se ni računale da se ne radi o primjeru kojem je svrha da pokaže razlike među zakonima razdiobe.

Tablica 7  
VELIKE VODE SAVE KOD SL. BRODA PREMA RAZLIČITIM ZAKONIMA RAZDIODE

Povratno razdoblje (godina)	1000	100	10
Normalna razdioba	3840	3525	3095
Log-normalna razdioba	4145	3670	3110
Gumbelova razdioba	4590	3855	3105
Pearsonova razdioba (III tip)	3860	3600	3085

S praktičnog stajališta analiza učestalosti samo je postupak za prilagodivanje hidroloških podataka matematičkom modelu distribucije. Iskustvo i provjera podataka (s obzirom na homogenost, međusobnu ovisnost varijabli) odlučuju o upotrebi neke distribucije. Pokazalo se, npr., da Gumbelova raspodjela daje za temperature prevelike vrijednosti, a za oborine preniske ako su povratni periodi dugi. Većina teorijskih raspodjela ima asimptotski karakter, pa njihova primjena ovisi o trajanju razdoblja opažanja, odnosno o broju članova niza. Razdoblje od 100 godina hidroloških opažanja rijetko je i u svijetu, jer ima malo vodomjernih stanica osnovanih 1856. godine ili prije. S tako dugim razdobljem opažanja ima u nas desetak profila na Savi, Dravi i Dunavu, ali se zapravo podaci samo za dva-tri profila mogu iskoristiti, jer se njihovi nizovi podataka mogu načiniti homogenima.

Kad nizovi opažanja na hidrometričkom profilu nisu homogeni, treba jednom od metoda testiranja ( $\chi^2$  test, Gringortenov test i dr.) preispitati prilagodljivost zakona razdiobe da se odredi onaj koji se najbolje prilagođuje označenim vrijednostima. Za profil Save kod Slavonskog Broda dokazano je da je to log-normalna razdioba, pa se rezultati te razdiobe prihvaćaju kao mjerodavni.

Kad postoji malo podataka, samo testiranje nije dovoljno. O broju podataka ovisi pogreška karakterističkih vrijednosti niza. Relacijom (40) određena je pogreška prosječne vrijednosti. Pogreška koeficijenta varijacije % određuje se izrazom

$$\delta_{C_v} = 100 C_v (2N)^{-0.5}, \quad (65)$$

gdje je  $N$  broj podataka. Izraz (65) vrijedi kad se može primijeniti normalna razdioba, što obično nije prihvatljivo za hidrološke podatke. Zbog toga se preporuča (Blohinov, Kricki, Menkel) da se pogreške % koeficijenta varijacije  $C_v$  i asimetrije  $C_s$  izračunaju iz relacije:

$$\delta_C = 100(2N)^{-0.5}(1 + 2C_v^2)^{0.5} \quad (66)$$

$$\delta_{C_s} = \frac{100}{C_s} \left| \frac{6}{N} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4) \right|^{0.5}. \quad (67)$$

Za velike vode koeficijent varijacije  $C_v$  i asimetrije  $C_s$  primaju vrijednosti u širokom rasponu, već prema režimu velikih voda koji je uvjetovan geografsko-fizičkim faktorima. Najveći je utjecaj površine sliva  $F$ , pa se može postaviti približan odnos za sливove Save, Drave i one na području krša:

$$C_v = 5F^{-\frac{1}{3}}. \quad (68)$$

Iz (68) vidi se da je  $C_v = 0,5$  već za površinu sliva  $F = 1000 \text{ km}^2$ , pa pogreška prema (66) za  $N = 40$  iznosi  $\delta_{C_v} = \pm 14\%$ . Može se računati da je  $C_s \approx 2C_v$  (za većinu razdioba vrijedi da je  $C_s \geq 2C_v$ , pa je za promatrani primjer  $C_s = 1$ ). Pogreška koeficijenta asimetrije (67) iznosi tada  $\delta_{C_s} = \pm 65\%$ . Taj primjer pokazuje da i za niz od 40 članova postoji opasnost slabog definiranja parametara razdiobe. Pogotovo se to odnosi na koeficijent asimetrije  $C_s$ , koji ovisi o srednjem momentu 3. reda. Zbog toga se preporuča (Forster) da se pri primjeni Pearsonove distribucije (III tipa) koeficijent asimetrije  $C_s$  poveća za  $1 + 6/N$ .

Veoma je opasno potcijeniti važnost pouzdanog utvrđivanja visokih protoka velikog povratnog perioda (500, 1000 ili 10000 godina), smatrajući da su to pojave koje će u tom vremenskom razdoblju vjerojatno postati nerealne zbog promjene klimatskih činilaca. Otvoreno je pitanje, koliko je vremensko razdoblje u kojem se mogu promjene hidrološkog ili hidrometeorološkog režima statistički utvrditi. Treba, međutim, spomenuti da vremenski nizovi hidrometeoroloških varijabli u stanicama za koje postoje zapisi od 100 i više godina u našem podneblju nisu pokazali nikakve promjene, tj. da su ti nizovi u statističkom smislu ostali stacionarni. Razdoblja u kojima se te promjene mogu utvrditi vjerojatno iznose 500 i više godina. U analizi pojave velikih voda to nije ni važno, jer pojam povratnog perioda, kao prosječnog vremenskog intervala u kojem se može javiti određena hidrološka pojava, nikako ne isključuje mogućnost njene pojave u neposrednoj budućnosti.

Takva ili slična pitanja može rastumačiti Poissonova razdioba (v. Statistika).

Tom razdiobom moguće je odrediti vjerojatnost pojave velikih voda, što se ilustrira primjerom za Zagreb. Grad Zagreb branjen je od velikih voda Save sa stupnjem sigurnosti od 99,9% ili od velikih voda povratnog perioda  $P = 1000$  godina. U životu Zagreba vremensko je razdoblje od slijedećih 200 godina razdoblje njegovog daljeg intenzivnog razvoja, u kojemu će on postati grad kojem će kroz središte teći Sava. Opravданo je zbog toga postaviti pitanje o vjerojatnosti da li će se velika voda Save s povratnim periodom od 1000 godina pojavit kroz slijedećih 200 godina. Tada je  $m = 200/1000 = 0,2$ , pa se pomoću Poissonove razdiobe dobiva da postoji vjerojatnost od 16,4% da će se tisućugodišnja voda pojavit jednom ( $x = 1$ ) u 200 godina, vjerojatnost 1,6% da će se ta pojava dogoditi dva puta ( $x = 2$ ), a vjerojatnost 0,1% da će se pojavit tri puta u 200 godina. To, međutim, ne osporava potrebu obrane od poplava uz stupanj sigurnosti koji odgovara tisućugodišnjem povratnom periodu.

**Prijenos informacija o velikim vodama.** Zapažanja o velikim vodama i njihova razdioba na nekom profilu može poslužiti kao baza za prijenos informacija na bilo koji profil ako se regionalnom analizom pokaže da taj profil leži u statistički homogenom području. Postoje različite metode regionalnih analiza koje se uglavnom temelje na testu frekvencije lokalnih podataka s tim da oni odgovaraju karakteristikama frekvencije cijelog područja.

U sливovima Save, Drave i onima u krškom području mogu se sa stanovišta ekstremno velikog otjecanja smatrati homogenima slijedeći slivovi: a) brdski slivovi površine  $2000 \dots 20000 \text{ km}^2$ , b) sliv srednjeg i donjeg toka Save površine  $< 20000 \text{ km}^2$  i c) sliv srednjeg i donjeg toka Drave površine  $< 20000 \text{ km}^2$ .

Za srednji i donji tok Save i Drave veliki protoci ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) mogu se izračunati iz slijedećih formula:

$$\text{Save: } Q_{\max P} = 0,155 F^{0,909} (1 + 0,10 \log P), \quad (69)$$

$$\text{Drava: } Q_{\max P} = 13,25 F^{0,455} (1 + 0,49 \log P), \quad (70)$$

gdje je  $F \text{ km}^2$  površina sliva, a  $P$  (godina) povratni period. Veliki protoci prema (69) i (70) relativno su mali. Takve se velike vode pojavljuju zbog neuređenosti slijeva za velike vode i zbog toga što postoje velika ekspanzijska područja u slivu Save i vrlo veliki inundacijski prostori u slivu Drave, koji prigušuju vršni dio vodenog vala i smanjuju velike protoke. Zbog toga svaka zaštita zemljišta od poplave nosi u sebi tendenciju pogoršanja režima velikih voda u srednjem i donjem toku Save i Drave, ako se paralelno ne izvedu radovi koji će nadomjestiti prirodnu retardaciju otjecanja.

Srednje Posavlje, sustav za obranu od poplava, sa 1800 milijuna  $\text{m}^3$  retardacijsko-akumulacijskog volumena bitno će utjecati na vodni režim rijeke Save. Taj se sustav gradi i bez njega nema zaštite od velikih voda nizinskih područja od Zagreba do Stare Gradiške, koja obuhvaćaju močvarne površine Mokrog, Lonjskog, Ribarskog, Odranskog i drugih polja, na kojima danas ima viška vode na tlu i u njemu koja ih pedološki degradira. Gradnjom sustava srednje Posavlje stabilizirat će se režim velikih voda i nešto ga poboljšati.

Žarišta pogoršavanja vodnog režima na Dravi nalaze se uglavnom izvan naše zemlje, na gornjim tokovima Drave i Mure, što komplikira njegovo poboljšanje. Smanjenje prirodnih retencijskih prostora pogoršava režim velikih voda. Na Dravi oni se ne smanjuju samo gradnjom zaštitnih objekata, koji štite bivše ekspanzijske prostore od poplave, već i gradnjom hidroelektrana u lancu. Izgradnjom takvih hidroelektrana s malim korisnim akumulacijskim prostorom gubi se retencijski volumen u koritu rijeke. To neposredno pogoršava režim velikih voda, ali djeluje i posredno u istom smislu, jer se mijenja i vrijeme propagacije vodenih valova, što može uzrokovati nepovoljne interferencije, pa čak i superpozicije valova matične rijeke i pritoka. Smatra se da je pogoršanje režima velikih voda Drave neizbjegno, i da ga je moguće poboljšati međunarodnim dogovorom o manipulaciji s vodama koje se energetski iskoristavaju.

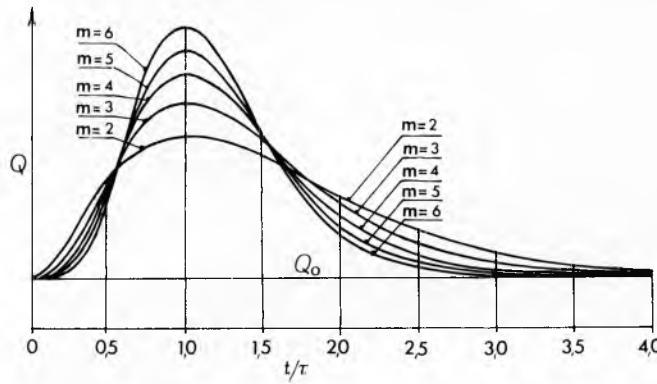
Za brdovito-planinske slivove na osnovi multivarijabilne regresije, analogno postupku za godišnje otjecanje (54), dobiva se opći izraz za proračun maksimalnih voda

$$Q_{\max P} = 0,45 F^{0,78} I_s^{0,15} H (1 + 1,25 \log P) \exp [-0,6f(1 + 0,4 \log P)], \quad (71)$$

u kojem su iste oznake kao u (54).

**Oblik vodenog vala** (hidrograma) potrebno je analizirati, jer često nije dovoljno poznavati samo maksimalni protok.

Potrebno je znati volumen vala iznad nekog osnovnog protoka ili trajanje toga protoka u vodenom valu. Te veličine mogu se odrediti analitičkim oblikovanjem vodenog vala.



Sl. 31. Oblici vodenih valova prema relaciji (72)

U praksi se upotrebljava oblik hidrograma koji odgovara Pearsonovo razdiobi (III tip) i oblik određen jednadžbom

$$Q = Q_{\max} \left( \frac{t}{\tau} \right)^m \exp \left[ m \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) \right] + Q_0, \quad (72)$$

gdje je  $Q$  protok u trenutku  $t$ ,  $Q_{\max}$  maksimalni protok koji se pojavljuje u trenutku  $\tau$ ,  $Q_0$  protok koji se pojavljuje s vjerojatnošću od 95%, a  $m$  konstanta. Na sl. 31 vidi se oblik vodenog vala za nekoliko vrijednosti konstante  $m$ . Integriranjem jednadžbe (72), ali bez člana  $Q_0$ , dobiva se volumen vodenog vala  $V$  iznad protoka  $Q_0$ , pa se, kad je  $m$  prirodni broj, dobiva

$$V = Q_{\max} \frac{m!}{m^{m+1}}. \quad (73)$$

Interesantan je, međutim, volumen vodenog vala iznad nekog protoka  $Q$  pri kojem se može intervenirati nekim tehničkim zahvatom. Označi li se sa

$$\varphi = \frac{Q - Q_0}{Q_{\max} - Q_0}, \quad (74)$$

volumen vodenog vala iznad protoka  $Q$  izračunava se iz relacije

$$V = (Q_{\max} - Q_0) \tau \gamma, \quad (75)$$

gdje je

$$\gamma = 9450 m^{-0,515} (1 - \varphi)^{1,5} \exp(-0,5\varphi). \quad (76)$$

Vrijeme  $\tau$  h može se pronaći u zabilješkama opažanja. Ono na slivovima Save i Drave iznosi

$$\tau = 33 L^{0,25} S^{-0,15} \exp f. \quad (77)$$

Ako se za sve vodene valove iz dužeg razdoblja opažanja izračunaju njihovi volumeni iznad nekog protoka  $Q$ , moguće je odrediti distribuciju tih volumena, i izračunati korelacije između zapaženih maksimalnih protoka i odgovarajućih volumena. Veoma je vjerojatno da će postojati čvrsta linearna stohastička povezanost tih varijabli, pa tada nema razloga da se pojavi maksimalnog protoka  $Q_{\max P}$  određene frekvencije ili povratnog perioda ne pripše i volumen iste frekvencije. Tada je još potrebno proračunati konstantu  $m$ , pa se pomoću (75) i (76) dobiva

$$m = \frac{9450 \tau (Q_{\max} - Q_0) (1 - \varphi)^{1,5}}{V \exp(-0,5\varphi)}^{1,94}. \quad (78)$$

Konstanta  $m$  ima vrijednost 1–6, a opada s povećanjem površine sliva.

**Velike vode malih slivova.** Hidrologija površinskih voda malih slivova svodi se praktički na utvrđivanje ovisnosti oborina i otjecanja, koje za analize velikih voda postaje posebno složeno.

Sliv se promatra kao sustav u kome se ulazna veličina (oborine) transformira u izlazne veličine (otjecanje), pri čemu se polazi od različitih odnosa između oborina i otjecanja. Ti odnosi mogu se smatrati linearnim ili nelinearnim, vremenski varijabilnim ili invarijsantnim. Djelovanje takvog sustava može se pojednostavljeno prikazati običnim rezervoarom (sl. 32) kojemu se može lako promijeniti ulaz ( $I$  oborina), zaliha ( $S$  akumulacija) i izlaz ( $Q$  protjecanje). U najopćenitijem obliku ovisnost je između tih triju veličina:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (79)$$

$$Q^m = \frac{S}{K}, \quad (80)$$

gdje je  $m$  konstanta, a  $K$  veličina koja može biti ovisna o vremenu. Ako je  $m = 1$ , ulazno-uzlazna ovisnost postaje linearna, a za  $m \neq 1$  nelinearna; kad  $K$  nije funkcija vremena, ovisnost je invarijsantna, a kad je  $K$  funkcija vremena  $K(t)$ , ona je vremenski varijabilna. Za linearnu i invarijsantnu ovisnost vrijedi jednadžba

$$I = K \frac{dQ}{dt} + Q, \quad (81)$$

za linearnu i vremenski varijabilnu

$$I = K(t) \frac{dQ}{dt} + \left[ 1 + \frac{dK(t)}{dt} \right] Q, \quad (82)$$

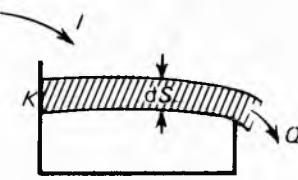
za nelinearnu i invarijsantnu

$$I = m K(t) Q^{m-1} \frac{dQ}{dt} + Q \quad (83)$$

a za nelinearnu i vremenski varijabilnu

$$I = m K(t) Q^{m-1} \frac{dQ}{dt} + \left[ 1 + \frac{dK(t)}{dt} \right] Q. \quad (84)$$

U prirodi postoje zapravo samo nelinearni i vremenski varijabilni slivni sustavi, pa se sve ostalo može smatrati aproksimacijama. To, međutim, ne znači da te približne metode nemaju svoje opravdanje, kad se rezultati mogu upotrijebiti u praksi. Konačno, složene metode nelinearnih i vremenski varijabilnih sustava zahtijevaju poznavanje brojnih fizičko-hidroloških zavisnosti za koje redovito nedostaju podloge.



Sl. 32. Shematski prikaz tečenja u akumulaciji

**Praktične metode.** Većina metoda koje se upotrebljavaju u praksi spadaju među linearne i invarijsantne sustave sa sintetičkim približenjem. U sintezi se formira fizički model kojim se pokušava na najbolji mogući način opisati prirodna pojava, pri čemu se moraju prihvati određene pretpostavke.

Najpoznatije su racionalna metoda i metoda jediničnog hidrograma.

Racionalna metoda polazi od postavke da se maksimalni protok pojavljuje pri mjerodavnom kišnom intenzitetu koji se dobiva iz odnosa intenziteta i trajanja. Računa se da je trajanje jednako vremenu koncentracije. Takvo je otjecanje ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) definirano formulom

$$Q = F i_m \alpha, \quad (85)$$

gdje je  $F \text{ km}^2$  površina sliva,  $i_m \text{ mm h}^{-1}$  mjerodavna intenzivnost kiše, a  $\alpha$  koeficijent otjecanja. Nakon dobrih iskustava u Italiji (Montanari, Turazza, Pasini) formula (85) uvedena je u našu praksu, ali s korekcijama s obzirom na naše podneblje. Trajanje koncentracije  $t_k$  najvažniji je faktor koji utječe implicitno, a sadržan je u formuli (85). Ako se prihvati da se ono sastoji od dva dijela, trajanje  $t_1$  tečenja po površini i trajanje  $t_2$  tečenja po otvorenem prirodnom recipijentu, dobiva se za savsko-dravsko međurjeće

$$t_k = \frac{20\beta}{H(1 + 1,5\log P)^{0,57} S^{0,43}} + 2,6 \left(\frac{F}{S}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (86)$$

gdje je  $\beta$  faktor koji ovisi o geološko-biološkim faktorima ( $\beta = 1 - 3$ ; za vodonepropusno zemljiste s niskom vegetacijom  $\beta \rightarrow 1$ , a za vodopropusno zemljiste obraslo šumom  $\beta \rightarrow 3$ ),  $H$  godišnje oborine  $\text{m}$ ,  $S$  faktor koji uzima u obzir pad i oblik sliva  $\text{m}/\text{km}$ , a  $F$  površina sliva  $\text{km}^2$ . Formula (86) rezultat je teorijskih postavki o progresivnom tečenju površinom koje se osnivaju na gustoći mreže otvorenih tokova (9). Koeficijent otjecanja  $\alpha$  u krajnjoj liniji ovisi o frekvenciji jake kiše, te o činiocima sadržanim u faktoru  $\beta$ . Taj je koeficijent približno

$$\alpha = 0,80[1 + 0,075(\log P - \beta)]. \quad (87)$$

Ako se za intenzivnost kiše uzme formula (25), a za njenu rasprostranjenost (28), maksimalni protok s povratnim periodom  $P$  može se izračunati iz izraza

$$Q_{\max P} = 0,278 F \frac{16,5}{t_k^{0,75}} H(1 + 1,5\log P) \exp(-0,0054 F^{\frac{2}{3}}). \quad (88)$$

U toj formuli sve se veličine, osim vremena koncentracije  $t_k$ , mogu odrediti na praktično zadovoljavajući način. Trajanje koncentracije znatno ovisi o faktoru  $\beta$ , koji treba odabrat. Derivira li se jednadžba (87) po  $Q$  i  $t_k$ , dobivaju se omjeri relativnih pogrešaka:

$$\frac{\Delta Q_{\max}}{Q_{\max}} = -0,75 \frac{\Delta t_k}{t_k}. \quad (89)$$

To znači da se uz relativnu pogrešku trajanja koncentracije od, npr.,  $\pm 10\%$  pojavljuje pogreška maksimalnog protoka  $\pm 7,5\%$ . To pokazuje da proračunu trajanja koncentracije valja posvetiti izuzetnu pažnju. Poželjno je da se ono provjeri empiričkim formulama (R. K. Linsley i dr.).

Formula (88) vrijedi za male slivove u brdovitim predjelima. Ona se može primijeniti i za slivove u ravnici s obradivim i melioriranim površinama uz izvjesna pojednostavljenja.

Površinska odvodnja melioracijskih ili uopće obradivih površina dopušta da se postavi model utemeljen na retencijskoj sposobnosti površinskog sloja i na njegovoj vodopropusnosti. Vodopropusnost ovisna je o strukturi zemljista i njenoj stabilnosti. U površinskom sloju tla sadržaj je organske materije najvažniji faktor stabilnosti tla, a u većim dubinama to se pripisuje, u našim uvjetima, koloidnim glinama. Prema tome, može se govoriti o površinskom sloju velike propusnosti, koji leži na gotovo nepropusnim ili slabo propusnim slojevima. Jake konvektivne kiše nastaju obično nakon dugotrajnih suša, pa se voda sakuplja u uvjetima nesaturiranog zemljista, što mehanizam zadržavanja vode čini komplikiranim. Vlagu zatečenu u tlu utvrđuje se obično s nekoliko konstanti vlažnosti tla, pomoću kojih se može bar naslutiti sposobnost zadržavanja oborina. U načelu, obrađeno zemljiste imade intenzitet upijanja veći nego što je intenzitet kiše. Prema tome, zadržavanje početnih oborina ovisi o debljini propusnog obradivog sloja, te o slobodnim porama u kojima se može zadržati voda.

Označi li se sa  $V$  volumen vode koji se može zadržati u tlu i na njemu, vrijeme  $t_0$  potrebno da tlo bude zasićeno vodom iznosi prema jednadžbi (25)

$$t_0 = \left( \frac{V}{16,5(1 + 1,5\log P)H} \right)^4 \text{ sati.} \quad (90)$$

Nakon zasićenja tla voda otjeće bez gubitaka, dakle s koeficijentom otjecanja  $\alpha = 1$ . Dalji proračun ovisi o potrebnom vremenu  $t_1$  tečenja po melioriranoj površini do sabirnog kanala ili brazde i o vremenu tečenja  $t_2$  od najudaljenijeg sa birnog kanala do mjesta promatranja.

Vrijeme tečenja  $t_1$  može se točno odrediti, a o vremenu  $t_2$  već je bilo riječi.

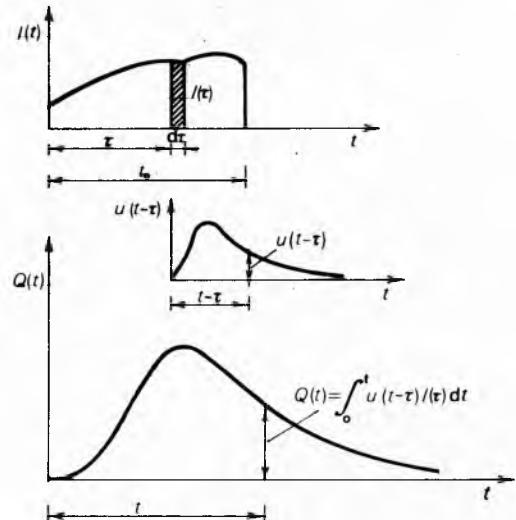
Vrijeme tečenja iznosi 5...20 sati, već prema vrsti poljoprivredne kulture. Za poljoprivrednu obično se računa s osiguranjem u 80% slučajeva (povratni period  $P = 5$  godina). Pretpostavi li se da je prosječni pad terena  $I_s \approx 0,1 \text{ m/km}$ , pojednostavljeni je izraz za maksimalne vode ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) ravnih melioracijskih područja:

$$Q_{\max} = 9,4 F \frac{(t_1 + 5,6 F^{\frac{1}{3}} - t_0)^{0,25} - t_0^{0,25}}{t_1 + 5,6 F^{\frac{1}{3}}} H \exp(-0,0054 F^{\frac{2}{3}}). \quad (91)$$

Metoda jediničnog hidrograma (L. K. Sherman) osniva se na pretpostavci da su fizičke karakteristike sliva (oblik, površina, nagib, vegetacije i dr.) konstantne, te da hidrogrami visokih voda na promatranom profilu moraju biti po formi slični. To znači, ako se konstruira na temelju hidrometričkih mjerjenja jedinični hidrogram oborina ili površinskog otjecanja na promatranom slivu, tada će ordinate svakog drugog hidrograma biti proporcionalne volumenu kiša. Tako bi svaki sliv trebao imati svoj stalni oblik jediničnog hidrograma, koji odgovara trajanju specifične kiše. Ako se to trajanje smanji na neizmjerno kratko vrijeme, a volumen ostane jedinični, tad se govorи o trenutnom jediničnom hidrogramu (IUH, prema američkoj literaturi). On je, prema tome, trenutna reakcija sliva. Ako je ona određena funkcijom  $u(t)$ , a oborine funkcijom  $I(t)$ , tada je hidrogram (sl. 33)

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) u(t-\tau) d\tau. \quad (92)$$

To je Duhamelov integral pomoću kojeg je moguće konstruirati hidrogram za svaku vrijednost oborine. Uobičajeno je da se za pronalaženje trenutnog jediničnog hidrograma postavi fizički model za određivanje njegovih matematičkih svojstava i da se zatim uvedu fizički parametri sliva u matematički izvedenu funkciju trenutnog jediničnog hidrograma. Njegova upotreba dopušta ne samo promatranje vremenski invarijantnog i linearnog sustava, već i vremenski varijabilnog i nelinearnog. Većinom se, međutim, računa s vremenskom invarijantnosti i



Sl. 33. Ovisnost  $I(t)$  i IUH

linearnom ovisnosti. Iz jednadžba (79) i (80) uz  $S = 1$ ,  $I = 0$  i  $m = 1$  (linearni sustav) može se odrediti izlazni protok u trenutku  $t$ , pa se dobiva

$$Q(t) = \frac{1}{K} \exp\left(-\frac{t}{K}\right). \quad (93)$$

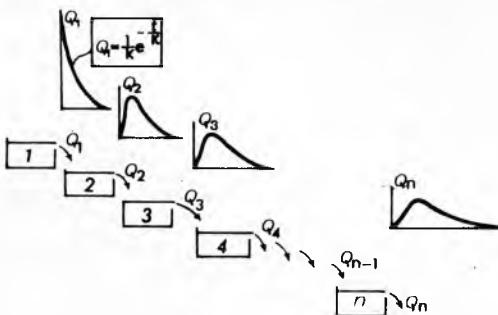
jednadžba daje trenutni jedinični hidrogram jer je njezin integral u granicama  $t = 0$  i  $t = \infty$  jednak 1. Ako se istjecanje prema jednadžbi (93) smatra pritjecanjem u drugi rezervoar (pri čemu je izlazna veličina prikazana istim modelom), trenutni jedinični hidrogram koji obuhvaća dva rezervoara ima oblik

$$Q_2(t) = \frac{t}{K^2} \exp\left(-\frac{t}{K}\right). \quad (94)$$

Za istjecanje iz  $n$ -og rezervoara dobiva se

$$Q_n(t) = \frac{1}{K} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \exp\left(-\frac{t}{K}\right). \quad (95)$$

Na sl. 34 vide se hidrogrami istjecanja iz  $n$  rezervoara.



Sl. 34. Trenutni hidrogrami prema broju  $n$  akumulacije

Površina ispod hidrograma istjecanja mora biti jednaka 1 da se dobije trenutni jedinični hidrogram. To se postiže dijeljenjem protoka  $Q_n$  s  $\Gamma(n)$ , koji ima vrijednost  $(n-1)!$  kad je  $n$  prirodni broj. Prema tome, jedinični trenutni hidrogram dobiva se iz izraza

$$u_n(t) = \frac{1}{K(n-1)!} \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \exp\left(-\frac{t}{K}\right). \quad (96)$$

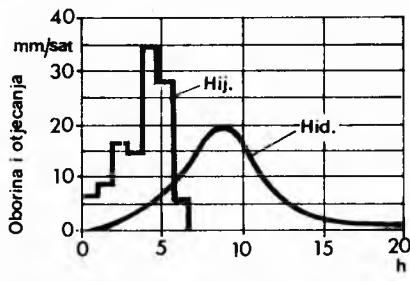
To je Nachov model kojim trenutni jedinični hidrogram simuliра otjecanje u slivu, koje je prikazano gama-razdiobom.

Matematički modeli sadrže parametre koji se moraju odrediti tako da odražavaju specifičnost sliva. Treba naći vezu između trenutnog jediničnog hidrograma i opažene oborine prikazane hijetogramom, te distribucije otjecanja prikazanog hidrogramom. I. E. Nach predlaže da se vrijednosti veličina  $K$  i  $n$  odrede metodom momenata. Prvi i drugi moment jediničnog trenutnog hidrograma oko ishodišta  $t = 0$  jesu:

$$M_1 = nK, \quad (97)$$

$$M_2 = n(n+1)K^2. \quad (98)$$

Prvi je moment  $M_1$  zakašnjenje centra trenutačnog jediničnog hidrograma. Iz principa linearnosti slijedi da će vremenska razlika težišta hijetograma i hidrograma biti jednaka  $M_1$ . Označe



Sl. 35. Primjer hijetograma (HIJ) i hidrograma (Hid.)

li se da  $M_{HIJ1}$  i  $M_{HID1}$  prvi momenti hijetograma i hidrograma, a sa  $M_{HIJ2}$  i  $M_{HID2}$  drugi momenti, može se postaviti da je

$$M_{HID1} - M_{HIJ1} = nK, \quad (99)$$

$$M_{HID2} - M_{HIJ2} = n(n+1)K^2 + 2nK M_{HIJ1}. \quad (100)$$

Ako su, dakle, poznati hijetogram HIJ i hidrogram HID (sl. 35), moguće je izračunati  $n$  i  $K$ , koji definiraju jedinični trenutni hidrogram.

Nachov je model linearan, ali postoje nelinearni i vremenski invarijantni modeli, koji se rješavaju metodom sinteze. Ima pokušaja rješavanja vremenski invarijantnih i nelinearnih modela metodom analize. Pitanje je, međutim, koliko sve to doprinosi točnosti rezultata s obzirom na nedostatak podloga.

## MALE VODE

Režim malih voda ovisi o vremenskoj raspodjeli kiša i o volumenu podzemne akumulacije. One se prazne prema zakonu iscrpljenja (koji je definiran izrazom 47).

Litološke, morfološke i tektonske karakteristike mogu biti u nekom većem sливу veoma heterogene, pa prema tome retencijsko-akumulacijske sposobnosti tla raznolike.

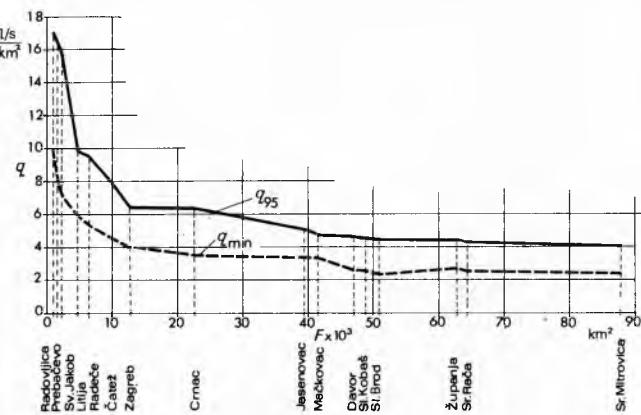
U sливу Save postoje nekoliko hidrogeoloških zona. Kvartarne naslage pružaju se uz Savu kao pojaz širine 20–40 km od Beograda do Zagreba i dalje, nešto manje širine, do Krškog. One se pojavljuju ponovno kao prostrana oaza oko Ljubljane. Uskih pojaza kvartarnih naslaga ima uz sve pritoke Save, s proširenjem u Kupu kod Karlovca, uz Orljavu u Požeškoj kotlini, uz Unu kod Prijedora itd. Kvartarne naslage su deblji, gruboklastični akviferi. Veličina zrna opada idući niz rijeku, pa se pojavljuju ulošci sitnozrnih i glinovitih slojeva. Koeficijent filtracije i izdašnost kvartarnih slojeva mogu biti dosta visoki. Prema tome, može se očekivati dotjecanje iz podzemlja u rijeke za vrijeme srednjih i malih vodostaja, i obratno, iz rijeke u podzemlje za visokih vodostaja.

Tercijarni slojevi naslanjaju se na kvartarne naslage na obje strane saveške doline od Krškog do utoka u Dunav. To je područje sliva Save gdje postoji česta vertikalna izmjena klastičnih, propusnih i nepropusnih naslaga, te prostrani arteški bazeni z bog pretežno sinklinalnog položaja tih naslaga. Izvori su malog kapaciteta i rijetki, a arteški bunari do dubine od 200 m imaju najčešće malu izdašnost (do 2 l/s), a temperatura vode i sadržaj otopljenih minerala rastu s dubinom. Paleozojske i mezozojske klastične stijene pojavljuju se kao manji blokovi u savsko-dravskom medurječju, a na području gornjeg toka Save i njenih desnih pritoka njihova je pojava češća. One imaju malu poroznost, malo akvifera malog kapaciteta (do 10 l/s).

Krš se slabije izraženim krškim pojavama prostire se kontinuirano uz desne pritoke Save, od Krke do Drine. U gornjem toku Save nalazi se uklopljen među paleozojsko-mezozojske klastične stijene. To su tanje karbonatske naslage, pa ni krški procesi nisu duboki. Stoga se na tom području pojavljuju uglavnom površinski tokovi.

Visoki krš zahvaća izvorišne dijelove desnih pritoka Save (osim Bosne). U slivovima Vrbasa, Une, Kupe i Krke čini pojaz širine 20–50 km. To su vrlo debele naslage s intenzivnim tektonskim poremećajima, velike pukotinske poroznosti. Krške su pojave maksimalno razvijene, pa ne postoje površinski vodeni tokovi ili se oni samo periodički pojavljuju. Gotovo sva voda otjeće u podzemlje, da bi se pojavila na kontaktima s drugim slojevima kao izvori velike izdašnosti ( $4\text{--}12 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

U većim rijekama obično su specifični protoci (na jedinicu površine sliva) za vrijeme malih voda sve veći što se ide niz rijeku. To pravilo ne vrijedi za Savu (sl. 36). Minimalni su specifični protoci u gornjem toku 6–10, u srednjem 3–6, a u donjem tek  $2\text{--}3 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ . To se može rastumačiti nejednolikom razdiobom vodopropusnih slojeva i postojanjem jezera u



Sl. 36. Specifični mali protoci Save

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

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

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

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

D. Srebrenović

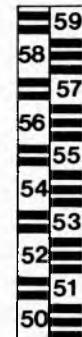
**HIDROMETRIJA**, znanstvena disciplina o metodama i tehnički mjerjenja i osnovne obrade različitih karakteristika vezanih uz vodu u svim njenim oblicima pojavljivanja na Zemljinoj kugli. Smatra se još uvjek dijelom hidrologije iako sadrži mnogo elemenata hidraulike. Hidrologija naročito, a hidrotehnika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

Riječ hidrometrija vuče korijen od dvije grčke riječi *ὕδωρ* hidor voda i *μέτρεω* mjeriti. Mjerjenja na vodi i u vezi s vodom stara su kao i civilizacija ljudskog roda. Poticaji za mjerjenje pojavili su se najprije radi održavanja egzistencije, obrane od poplave i prehrane. Budući da ne postoje otkriveni zapisi o razvoju hidrometrije u Kini i Mezopotamiji, za najstarije hidrometrijske podatke smatraju se oni koji se odnose na rijeku Nil. To su označi visokih vodostaja uklesanih u stijeni oko  $250 \text{ km}$  uzvodno od Asuana. Otkriveno je 179 takvih oznaka, a smatra se da potječu iz  $\sim 1827$ . godine. Za mjerjenje razine vode (vodostaja) služili su tzv. nilometri. Organizirana i uzvodno povezana mjerjenja razine vode provođena su na najmanje 30 nilo-

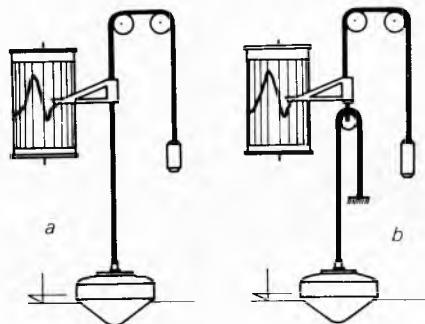
mjera smještenih ili u blizini hramova ili u njihovoj unutrašnjosti. Svećenici su registrirali vodostaje, a posebno uvježbani i vrlo brzi veslači prenosili su nizvodno informacije o porastu razine Nila na uzvodnom potoku. Mjerjenja na Nilu bila su organizirana za potrebe obrane od poplave radi razvoja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

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

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



Sl. 1. Vodomjerna letva



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

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

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