

[Handwritten signature]

2. HIDROLOGIJA

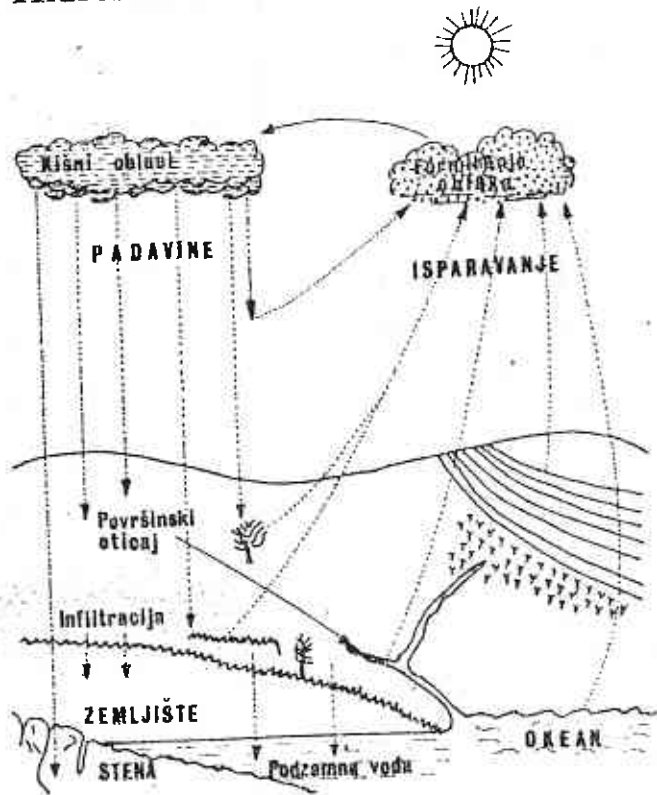
Prof. dr Slavoljub Jovanović, dipl. inž.

2.1 UVOD

Hidrologija je nauka o vodama. Ona proučava osobine, raspodelu i kretanje vode u prirodi. Hidrometeorologija izučava atmosferske procese koji utiču na resurse vode Zemlje, naročito isparavanje i padavine, koji predstavljaju dve fundamentalne faze hidrološkog ciklusa.

2.1.1 Hidrološki ciklus

Pod ovim se podrazumeva proces kretanja, gubljenja i obnavljanja vode Zemlje. Kontinuitet vodenog ciklusa se vidi na sl. 2.1. On se može podeliti na tri glavne faze: 1) padavine, 2) isparavanje i 3) površinski i podzemni oticaj (sa kopna). Pri tome, u ovim fazama dolazi do: a) transporta vode b) privremenog zadržavanja i c) promene agregatnog stanja vode. Sa sl. 2.1 se takođe vidi da dobar deo vode koja je pala na kopno ne dospeva do okeana, nego se neposredno vraća u atmosferu kao vodena para.



Sl. 2.1 Prikaz hidrološkog ciklusa

Približan bilans hidrološkog ciklusa za Zemlju je dat u tabeli 2.1.

Tabela 2.1 – OPŠTI BILANS ZEMLJE
(Budiko i ostali, 1962)

	Površina		Padavine P		Oticaj Q		Isparavanje E	
	10^6 km^2	%	mm	10^3 km^3	mm	10^3 km^3	mm	10^3 km^3 *)
Okeani	361	70	1120	405	0	0	1250	451
Kopno	149	30	720	107	310	46	410	61
Ukupno	510	100	1000	512			1000	512

*) $1 \text{ km}^3 = 10^9 \text{ m}^3$

Za kopno, na osnovu jednačine bilansa

$$P_k = Q_k + E_k \quad (2.1)$$

se dobija $E_k = P_k - Q_k = 720 - 310 = 410 \text{ mm god}^{-1}$ i prosečni koeficijent oticaja $310/720 = 0,43$. Ako se pak, izdvoji deo kopna sa kojeg voda ne otiče, sa površinom od oko $32 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ i padavinama od 240 mm god^{-1} , na površinu sa oticajem otpada $117 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ sa visinom padavina 850 mm god^{-1} , pa je koeficijent oticaja $310/850 = 0,36$, dok je prosečno isparavanje sa te površine $850 - 310 = 540 \text{ mm god}^{-1}$. Oticaj sa okeana je nula, što ne proizilazi iz tabele 2.1. Ako se uzme u obzir dotok sa kopna od 310 mm , onda je odgovarajući sloj vode u okeanu $310 \cdot 0,3/0,7 = 130 \text{ mm}$, pa je $P_o + Q_k = E_o = 1120 + 130 = 1250 \text{ mm god}^{-1}$. Za Evropu, vodni bilans izgleda ovako: $P = 737$; $Q = 319$; i $E = 415 \text{ mm god}^{-1}$ (koeficijent oticaja $0,43$).

Vode sa teritorije Jugoslavije otiču u tri mora. Prema raznim izvorima, u tabeli 2.2 je sačinjen bilans voda koje se formiraju na teritoriji SFRJ.

Tabela 2.2 – BILANS SOPSTVENIH POVRŠINSKIH VODA ZA JUGOSLAVIJU

Sliv mora	Površina km^2	Padavine mm	Oticaj			Koeficijent oticaja
			$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	$\text{l s}^{-1} \text{ km}^2$	mm	
Crnog	183.210	928	2039 ¹⁾	11,1	351	0,38
Jadranskog	48.352	1311	1613	33,4	1052	0,80
Egejskog	24.242	660	160 ²⁾	6,6	208	0,32
Jugoslavija	255.804	975	3812	14,9	470	0,48

Izvori: 1) Jovanović i ostali (1986); 2) Stojev (1986)

Najznačajnija „čisto“ jugoslovenska reka je Sava. Površina njenog sliva (96.400 km^2) predstavlja 38% ukupne površine naše zemlje. Sava unosi u Dunav prosečno $1640 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (specifični oticaj $17 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) čemu odgovara sloj oticaja od 536 mm god^{-1} . Prosečne padavine u slivu Save iznose oko 1090 mm god^{-1} , pa je $E = 553 \text{ mm god}^{-1}$ (koeficijent oticaja $0,51$).

Pored voda koje se formiraju na teritoriji Jugoslavije, u našu zemlju dotiču značajne količine vode iz drugih zemalja. Najveću količinu unosi Dunav (oko $2400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), zatim Tisa, Drava i drugi manji tokovi. Ukupni protok ulaznih voda je reda $3900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($123 \text{ km}^3 \text{ god}^{-1}$), tako da je ukupna količina izlaznih voda sa naše teritorije $3900 + 3812 = 7712 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ili $243 \text{ km}^3 \text{ god}^{-1}$. Od toga samo na Dunav otpada oko $5840 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($184 \text{ km}^3 \text{ god}^{-1}$) a preostali deo na reke koje se ulivaju u Jadransko i Egejsko more.

Iako Dunav po prosečnom protoku i površini sliva nije najveća reka u Evropi (ispred njega je Volga sa površinom sliva 1,380.000 km² i protokom na ušću od 7580 m³s⁻¹), on sigurno predstavlja najznačajniji evropski vodotok. Dunav ima ovaj značaj ne samo zbog vodnog i energetskog potencijala njegovog sliva, nego i zbog 2200 km vodnog puta, koji povezuje ekonomije osam pribrežnih zemalja. U skoroj budućnosti, posle završetka kanala Dunav-Majna-Rajna, Dunav će biti deo gigantskog plovnog sistema, koji će između dva mora, Severnog i Crnog, ići središnjim delom našeg kontinenta. Nacionalni komiteti za Uneskov međunarodni hidrološki program osam podunavskih zemalja su u periodu od 1975. do 1985. organizovali rad na Hidrološkoj monografiji sliva Dunava, koja je, na nemačkom jeziku, izašla iz štampe krajem 1986. god. dok se ruska verzija pojavila 1987. god. Koristiće podatke iz ove Monografije, u tabeli 2.3 su dati elementi vodnog bilansa za pojedine zemlje u slivu Dunava.

Tabela 2.3 - VODNI BILANS SLIVA DUNAVA

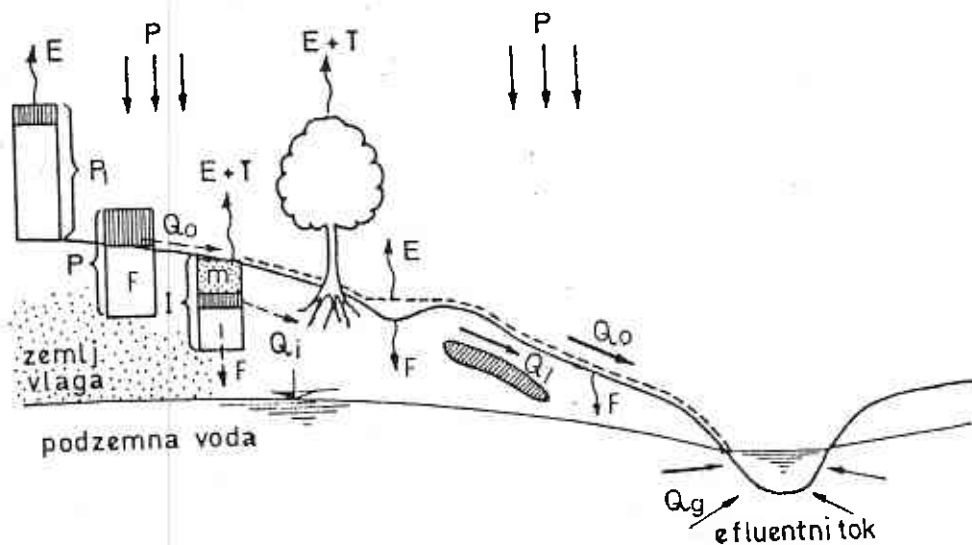
No.	Naziv države	Površina države		Učešće sliva Dunava		Srednja vrednost za državu			Doprinos u ukupnom protoku Dunava	
		ukupna km ²	deła u slivu Dunava km ²	u površini države %	u površini ukupnog sliva Dunava %	padavina mm	oticaja mm	koeficijent oticaja	protok m ³ /s	udeo u ukupnom protoku Dunava %
1	Zapadna Nemačka	248687	59634	23,98	7,30	962	415	0,43	785	11,48
2	Italija	301278	471	0,16	0,06	1425	1139	0,80	17	0,25
3	Švajcarska	41293	1819	4,41	0,22	1136	768	0,68	44	0,64
4	Austrija	83855	80731	96,27	9,88	1098	600	0,55	1536	22,45
5	Poljska	312683	270	0,09	0,03	959	372	0,39	3	0,04
6	Čehoslovačka	127896	73040	57,11	8,94	719	215	0,30	498	7,28
7	Mađarska	93036	93036	100,00	11,39	609	60	0,10	176	2,57
8	Albanija	28748	101	0,35	0,01	1875	1292	0,69	4	0,06
9	Jugoslavija	255804	183210	71,62	22,42	928	351	0,38	2039	29,81
10	Bugarska	110912	48178	43,44	5,90	661	152	0,23	232	3,39
11	Rumunija	237500	232249	97,79	28,43	752	160	0,21	1177	17,21
12	SSSR	22402200	44267	0,20	5,42	748	235	0,31	330	4,82
1-12			817000		100,00	816	264	0,32	6841	100,00

2.1.2 Ciklus oticaja

Hidrološki ciklus opisuje sveukupni proces cirkulacije i preraspodele vode u atmosferi i na zemlji. *Ciklus oticaja* je deo hidrološkog ciklusa koji opisuje raspodelu vode i njenu evoluciju od trenutka kada je kiša pala na tlo, do momenta kada je voda dospela do površinskih vodotoka, ili se neposredno vratila u atmosferu putem evapotranspiracije (ET).

Deo padavina koji oteče površinskim ili podzemnim putem naziva se *oticaaj* („višak“ padavina, efektivne ili neto padavine). To je voda koja se javlja na izlaznom profilu sliva. Razlika između ukupnih (bruto) padavina i neto padavina predstavlja „gubitke“. Gubici su, dakle, preostali deo kiša koji ne doprinosi oticaju.

Ukupni protok Q na izlaznom profilu se sastoji od tri komponente. To su: površinski (Q_o), potpovršinski (Q_i) i podzemni (Q_g) oticaj (sl. 2.2). Ovde je sa F (mm) označena infiltracija, a sa F_e efektivna infiltracija (perkolacija, obnavljanje podzemnih voda) pri čemu je $F > F_e$. Ako je visina padavina P mala i ako kiša kratko traje, $F_e = 0$. Do površinskog oticaja dolazi kada je $i > f$ gde su i i f intenzitet kiše i infiltracije. Ako je $i < f$ onda $Q_o = 0$.



Sl. 2.2 Elementi jednačine bilansa hidrološkog ciklusa

Sa gornjim simbolima, jednačina bilansa hidrološkog ciklusa se može napisati (Jovanović, 1974):

$$P = Q_o + F + E \pm \Delta V |_{A, (t_0, t)} \quad (2.2)$$

gde je: E isparavanje, a ΔV promena zapremine vode u slivu čija je površina A , u poluzatvorenom vremenskom intervalu (t_0, t) . Kako je:

$$F = Q_i + F_e + m$$

gde je: m zemljišna vlaga, i obzirom da $m \rightarrow E_z + T$ (isparavanje iz zemljišta + transpiracija) i $F_e \rightarrow Q_g$, može se dalje napisati:

$$P = Q_o + Q_i + Q_g + E_z + T + E \pm \Delta V \quad (2.3)$$

U hidrološkoj praksi se obično uzima da je ukupni protok u rečnom toku sastavljen iz dve komponente: direktni - Q_d i bazni oticaj - Q_b . Pod pretpostavkom da se Q_i sastoji iz dve komponente:

$$Q_i = {}_1Q_i + {}_2Q_i$$

gde je: ${}_1Q_i$ brzi, a ${}_2Q_i$ spori potpovršinski oticaj, biće $Q_d = Q_o + {}_1Q_i$ i $Q_b = Q_g + {}_2Q_i$, pa jednačina (2.3) dobija oblik:

$$P = Q_d + Q_b + E + T \pm \Delta V |_{A, (t_0, t)} \quad (2.4)$$

Na sl. 2.3 su pokazani *hijetogram* bruto kiše (tj. zavisnost $i = i(t)$), intenzitet infiltracije $f = f(t)$ i *hidrogram oticaja* ($Q = Q(t)$), gde se vide pomenute komponente oticaja.

Ako se sa V_d označi zapremina direktnog oticaja onda se kod nekih proračuna (jedinični hidrogram) efektivna kiša P_e određuje iz odnosa:

$$P_e = V_d/A \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

gde je:

$$V_d = \int_a^b Q_d dt \text{ (m}^3\text{)}.$$

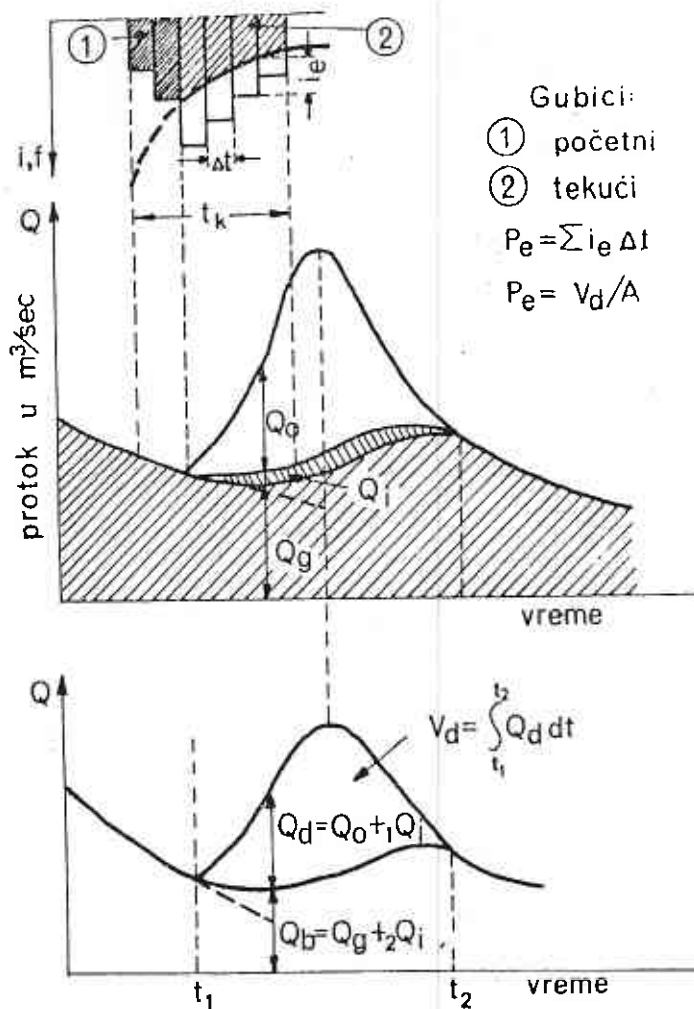
Ovde je „gubitak” sa gledišta direktnog oticaja $P_g = P - P_e$. Ako se posmatra ukupni oticaj Q u dužem vremenskom periodu, onda je sloj oticaja $P_c' = V_Q/A$. Ovde se obično govori o *deficitu oticaja* D , $D = P - P_e'$, gde je u P_e' pored direktnog, uključen i bazni oticaj. Za izdašnost sliva se u praksi koriste dva pokazatelja: 1) *koeficijent oticaja* koji se dobija kao odnos otekle i pale vode, tj. $c = V_Q/V_P$ ($0 < c < 1$), i 2) *specifični oticaj* $q = Q/A$ ($l s^{-1} km^2$), gde je A površina sliva (km^2).

Podzemni oticaj Q_g zavisi od položaja rečnog korita u odnosu na nivo podzemne vode. Za slučaj na sl. 2.3, vodotok prima vodu iz podzemlja. Takvi vodotoci se nazivaju *efluentnim* i kod njih je $Q_g > 0$. Ako je rečno korito iznad nivoa podzemne vode, vodotok hrani podzemlje i ovde je $Q_g < 0$. To su *influentni tokovi*. Tokovi koji su i u sušnoj sezoni godine efluentni, ne presušuju (i obrnuto).

2.1.3 Hidrološki sistemi

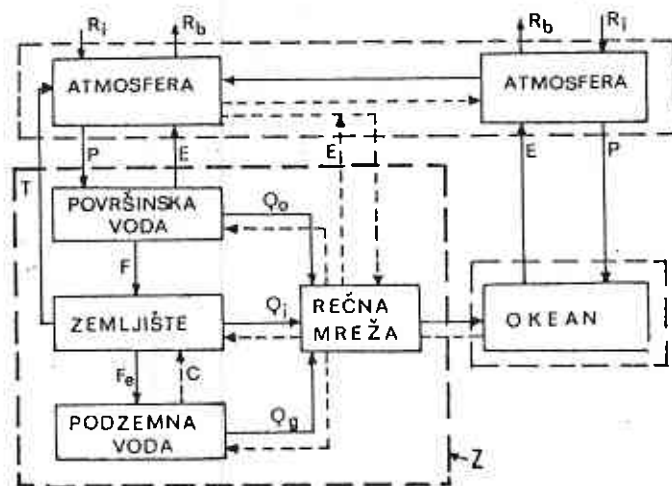
Obzirom na karakter hidrološkog ciklusa, koji predstavlja jedan recirkularan transportni proces, očigledno je da se ovde radi o jednom prirodnom *fizičkom sistemu*. Čitav hidrološki ciklus predstavljen na sl. 2.1 je zatvoren sistem, pošto voda koja u njemu kruži, uvek ostaje u sistemu. Ovaj sistem funkcioniše zahvaljujući višku dolazećeg sunčevog zračenja u odnosu na izračivanje Zemlje.

Kada se analizira jedan sistem, posmatraju se njegovi ulazi, rad sistema i njegovi izlazi. Kod tehničkih sistema (kotlovi, generatori, termo ili hidroelektrane), pomoću analize sistema se utvrđuje da li sistem zadovoljava zadatak koji je pred njega postavljen. Kod drugih sistema se čine određene



Sl. 2.3 Komponente oticaja vode

pretpostavke o prirodi sistema i fizičkim zakonima koji upravljaju njegovim radom. Ova saznanja se, potom, koriste da bi se na osnovi poznatih ulaza, predvideo izlaz sistema. U hidrologiji, ovakav, klasičan pristup se ne može primeniti, jer su fizički zakoni od kojih zavisi rad čitavog sistema veoma kompleksni. Iz ovog razloga, ni klasična niti sistemski hidrologija ne izučava kompletan hidrološki ciklus. Radi lakšeg izučavanja, hidrološki sistem se u praksi, kao i drugi veliki sistemi, deli na podsisteme: atmosferu, okean, podsistem koji obuhvata zemljišnu fazu hidrološkog ciklusa, itd. Poslednji podsistem je označen sa Z na sl. 2.4. Pošto su kod ovog podsistema presečne



Sl. 2.4 Podsistemi hidrološkog sistema. Sa Z je označena zemljišna faza hidrološkog ciklusa

ne izvesne linije transporta vode, ovo više nije zatvoren sistem. Linije transporta vode-padavine, isparavanje, transpiracija, oticaj – su sada ili ulazi ili izlazi novog sistema. Prilikom modeliranja hidroloških procesa u slivu, ovaj podsistem se obično deli na dve ili više komponenti. O ovom će biti reči u glavi 2.7.

Što se tiče ulaza i izlaza hidrološkog sistema, jasno je da padavine predstavljaju ulaz, a oticaj izlaz sistema. U pogledu isparavanja i transpiracije, postoje

različita gledišta. Doog (1973) smatra da potencijalnu evapotranspiraciju treba posmatrati kao ulaz, a stvarnu kao izlaz sistema. Pošto je ovaj proces posledica sunčevog zračenja, nije nelogično da se neto radijacija, pored padavina, tretira kao ulaz hidrološkog sistema.

2.1.4 Hidrometeorološki podaci

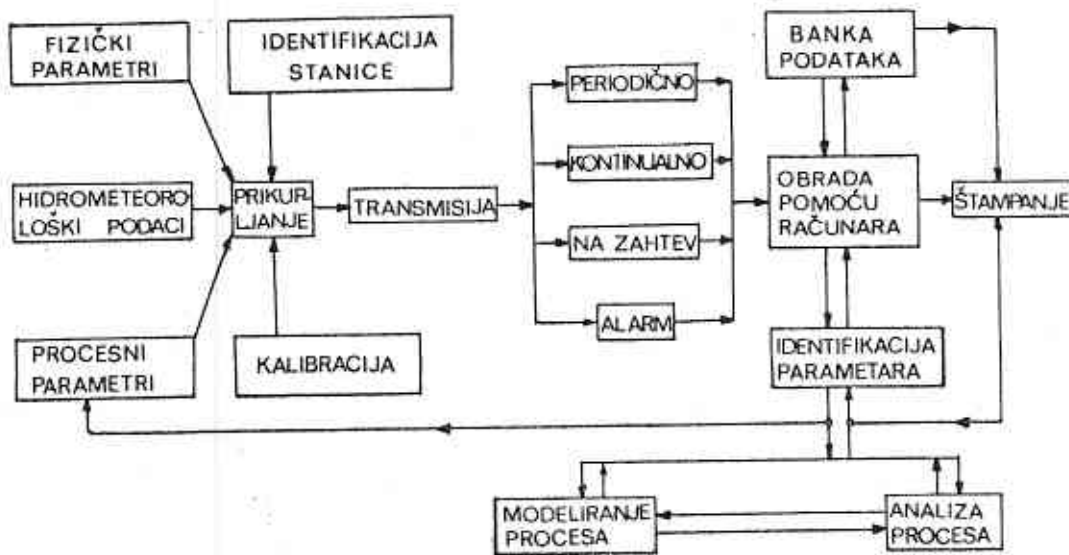
Podaci koji se koriste prilikom hidroloških analiza i modeliranja hidroloških procesa se mogu svrstati u tri klase (UNESCO, 1985): 1) podaci o ulazima i izlazima sliva (dobijaju se na osnovu merenja meteoroloških i hidroloških veličina), 2) podaci o fizičkim karakteristikama sliva, 3) podaci o parametrima koji karakterišu prirodu i intenzitet procesa u slivu.

1. klasa: merenjem hidroloških i meteoroloških veličina se dobija uvid o transferu energije i mase između atmosfere, zemlje i mora. Mere se sledeći elementi hidrološkog ciklusa: radijacija, temperatura i vlažnost vazduha, padavine, vodostaji i protok reka, rečni nanos, nivo podzemne vode, itd. Većina od pomenutih veličina se meri kontinualno (pomoću registrujućih instrumenata). Ukoliko se meri diskontinualno ili ako se vrši diskretizacija kontinualnih merenja, što je veća varijabilnost procesa, uzimaju se manji vremenski intervali.

2. klasa: fizički parametri daju informaciju o fizičkim i geografskim faktorima sliva koji se mogu definisati analitički ili geometrijski. Ovde se radi o površini, padu, rečnoj mreži, vegetaciji, vodnim i drugim osobinama zemljišta, itd. Fizički parametri utiču na retencione karakteristike sliva.

3. klasa: procesni parametri su vezani za procese u slivu koji utiču na kretanje i raspodelu vode u zemljišnoj fazi hidrološkog ciklusa (infiltracija, perkolacija, evapotranspiracija, topljenje snega, itd). Većina od ovih parametara se teško meri direktno, nego se određuju indirektno, na bazi drugih podataka.

Način prikupljanja i obrade podataka korišćenjem jednog automatskog hidrološkog informacionog sistema je pokazan na sl. 2.5. (UNESCO, 1985).



Sl. 2.5 Blok dijagram hidrološkog informacionog sistema za prikupljanje i obradu podataka

2.2 HIDROMETEOROLOGIJA

Hidrometeorologija izučava atmosferske procese koji utiču na resurse vode na Zemlji i stoga su od interesa za inženjere i tehničare hidrotehničke struke. U tekstu koji sledi, posebna pažnja je posvećena isparavanju i padavinama, koji predstavljaju dve fundamentalne faze hidrološkog ciklusa. Pomenute su i druge pojave u atmosferi koje su ili u vezi sa pomenutim procesima, ili su pak značajne za pojedine oblasti građevinarstva.

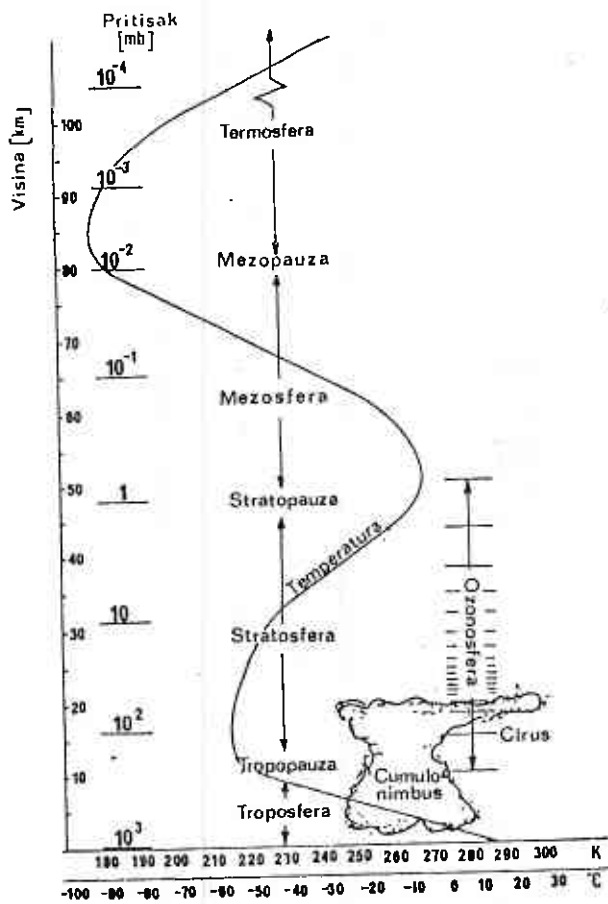
Vreme, u meteorološkom smislu, predstavlja zbir svih meteoroloških promenljivih u određenom vremenu i na datom mestu. Ove promenljive se izražavaju kvantitativno kao sunčeva radijacija, temperatura, pritisak, vetar, sadržaj vlage u vazduhu, količina padavina.

U atmosferskoj fazi hidrološkog ciklusa, sunčeva radijacija predstavlja energiju koja održava ovaj ciklus. Isparavanjem, koje je posledica toplotne energije koja se dobija od Sunca, menja se agregatno stanje vode i obnavlja vlaga u atmosferi. Ovome je suprotan proces formiranje padavina, gde se vrši konverzija vodene pare u čvrsto ili tečno stanje i oslobađa energija.

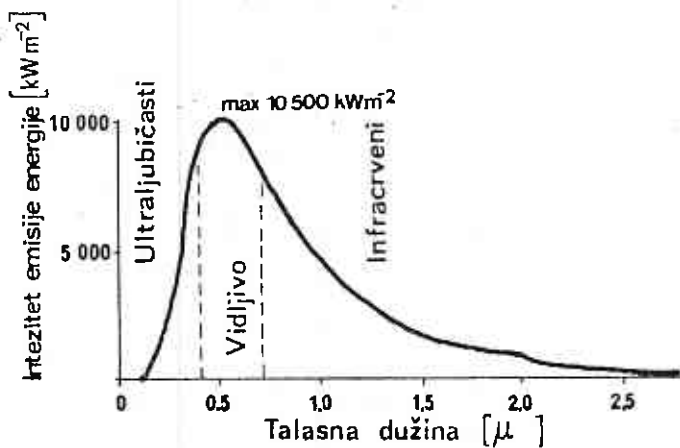
2.2.1 Atmosfera

Suvi vazduh sadrži 75,51% azota, 23,15% kiseonika, 1,28% argona, zatim ugljen-dioksida i drugih gasova oko 0,06%. Promenljivi sastojci vazduha su, pre svega, voda u sva tri agregatna stanja, zatim čvrste čestice: prašina, dim, soli. Čvrste čestice reflektuju i rasipaju sunčevu radijaciju. One, isto tako, igraju ulogu u kondenzaciji vodene pare, formiranju oblaka i u procesu nastajanja padavina.

Atmosfera predstavlja gasoviti omotač Zemlje, debljine oko 100 km. Gustina atmosfere postepeno opada sa visinom, da bi gustina postala beznačajna na visini od oko 600 km. Devet desetina mase atmosfere se nalazi ispod visine od 20 km, a dve trećine ispod 10 km. Prosečna struktura atmosfere je pokazana r.a sl. 2.6. Slojevi atmosfere su definisani obzirom na profil temperature. Od površine zemlje do tropopauze, temperatura se u proseku smanjuje za $6,5^{\circ}\text{C km}^{-1}$. U troposferi se nalazi praktično sva vlaga atmosfere. U ovom sloju se formiraju oblaci i padavine.



Sl. 2.6 Struktura atmosfere (Shaw, 1984)



Sl. 2.7 Solarna radijacija

Gustina vazduha ρ opada sa porastom temperature. Tako, na primer, pri pritisku 1013 mb, za $t = -20^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,395 \text{ kg m}^{-3}$; za $t = 0^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,292$; za $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,204$ i za $t = 35^{\circ}\text{C}$, $\rho = 1,145 \text{ kg m}^{-3}$ (Đorđević, 1986).

2.2.2 Sunčevo zračenje

Najvažniji izvor energije koju dobija površina Zemlje je energija zračenja od Sunca (sunčevo zračenje, insolacija). Sunce emituje energiju u svemir u obliku elektromagnetnih talasa. Intenzitet emisije energije u funkciji dužine talasa je pokazan na sl. 2.7.

Otprilike jedna polovina od ukupne energije koju emituje Sunce pada u opseg talasnih dužina od 0,4 do 0,7 mikrona ($\mu = 10^{-3} \text{ mm}$), a to su talasne dužine vidljive svetlosti. Ostatak predstavljaju ultraljubičasti (do 0,4 μ) i infracrveni talasi (veći od 0,7 μ). Ukupna solarna radijacija u jedinici vremena na granici atmosfere, pod pravim uglom u odnosu na sunčeve zrake i na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca iznosi $1,39 \text{ kW m}^{-2} \approx 2,0 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (solarna konstanta).

Samo jedan deo energije Sunca dospeva do površine Zemlje kao direktna radijacija, dok preostalu energiju reflektuje, rasipa ili apsorbira atmosfera ili površina Zemlje. Količina

primljene energije zavisi od prirode zemljine površine i osobina atmosfere. U nekim prosečnim uslovima (oblačnost 52%), 42% energije se rasipa i reflektuje (u svemir), 15% apsorbuju vodena para i ostali gasovi, a 43% sunčeve energije (direktne i rasute) dospeva do zemljine površine. Procenat reflektovane radijacije od neke površine se naziva albedo. Prema tome, prosečni albedo na Zemlji je 0,42 (za vedar dan je albedo 0,21, a za oblačno nebo 0,75).

Procenti reflektovane radijacije (albedo) za neke karakteristične delove zemljine površine su dati u tabeli 2.4.

Tabela 2.4 – ALBEDO ZA KARAKTERISTIČNE POVRŠINE

Površina tla	Albedo
Gusta i tamna šuma	0,05
Hrastova šuma	0,18
Jelova šuma	0,14
Trava, povrće	0,26
Golo zemljište	0,10-0,20
Sneg	0,46-0,81
Vodena površina (zavisi od ugla zračenja)	0,04-0,39

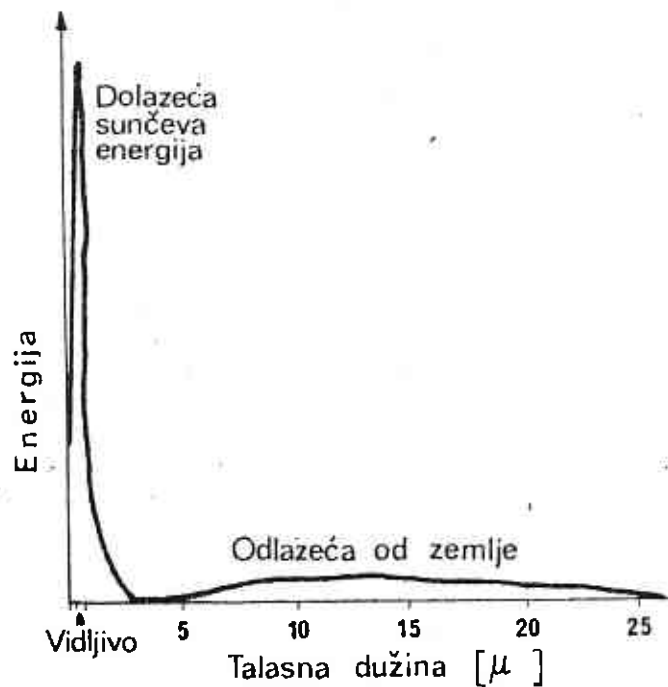
Tlo i atmosfera Zemlje reflektuju deo energije koja je dobijena od Sunca. Zemlja zrači kao „crno telo” i daje duge elektromagnetne talase u opsegu od 4–80 μ , sa maksimumom zračenja kod 10 μ . Ovo je pokazano na sl. 2.8.

Vodena para u atmosferi apsorbuje duge talase, naročito između 5,5 i 7 μ i iznad 27 μ .

Za merenje sunčevog zračenja na površini zemlje, koristi se više tipova instrumenata. Ako se meri zračenje Zemlje, zaklanja se gornji deo instrumenta (ili, senzori se usmeravaju prema Zemlji). Moguće je meriti neto zračenje (zračenje Sunca manje zračenje Zemlje), koje može biti pozitivno ili negativno.

Trajanje sunčevog zračenja. Zemlja se obrće oko svoje ose, a istovremeno se okreće oko Sunca po eliptičkoj putanji, sa Suncem u jednom od fokusa, pri čemu je ekvatorijalna ravan Zemlje nagnuta u odnosu na ravan njene orbite za ugao od 23,5°. Ova dva kretanja utiču na sezonske promene dužine dana, odnosno na trajanje sunčevog zračenja.

Podaci o prosečnoj dužini dana N u mesecima godine (od izlaska do zalaska sunca) na pojedinim geografskim širinama su dati u tabeli 2.5.



Sl. 2.8 Radijacija Sunca i Zemlje

Tabela 2.5 - SREDNJE DNEVNO TRAJANJE MAKSIMALNOG MOGUĆEG ZRAČENJA SUNCA U ČASOVIMA (N)

Geograf. širina	jan.	feb.	mart	apr.	maj	juni	juli	avg.	sep.	okt.	nov.	dec.
50°	8,5	10,0	11,8	13,7	15,3	16,3	15,9	14,4	12,6	10,7	9,0	8,1
48°	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
46°	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44°	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14,0	12,6	11,0	9,7	8,9
42°	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,6	11,1	9,8	9,1
40°	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3
35°	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8

Stvarno trajanje sijanja Sunca n zavisi od oblačnosti i može biti jednako ili manje od vrednosti koje su date u tabeli 2.5. Meri se pomoću heliografa koji se sastoji od staklene kugle prečnika 10 cm. Sunčevi zraci fokusuju se kroz kuglu i spaljuju crni papir na kome je označeno vreme. Na bazi ovoga se određuje dužina trajanja sijanja Sunca u dotičnom danu.

Proračun sunčevog zračenja (R_c). Na osnovi položaja Zemlje u njenoj orbiti i solarne konstante, može se izračunati intenzitet sunčevog zračenja R_a na granici atmosfere. Ove vrednosti su date u tabeli 2.6, u funkciji geografske širine i meseca u godini.

Tabela 2.6 - SUNČEVO ZRAČENJE NA GORNJOJ GRANICI ATMOSFERE R_a (mm dan⁻¹)

Geograf. širina	jan.	feb.	mart	apr.	maj	juni	juli	avg.	sep.	okt.	nov.	dec.
50°	3,7	6,0	9,2	12,7	15,5	16,6	16,1	13,7	10,4	7,1	4,4	3,1
46°	4,7	7,0	10,3	13,4	15,8	16,7	16,0	14,0	11,0	7,8	5,1	4,0
45°	5,0	7,2	10,5	13,5	15,8	16,7	16,1	14,1	11,2	8,0	5,4	4,3
44°	5,2	7,5	10,7	13,7	15,8	16,7	16,1	14,1	11,3	8,2	5,6	4,5
43°	5,4	7,7	10,8	13,7	15,9	16,7	16,1	14,2	11,5	8,4	5,9	4,8
40°	6,2	8,4	11,1	13,8	15,9	16,7	16,3	14,7	12,1	9,3	6,8	5,6
30°	8,1	10,5	12,8	14,7	16,1	16,5	16,2	15,2	13,5	11,2	9,1	7,9

Ako su poznate osobine atmosfere, može se izračunati sunčevo zračenje na površinu zemlje - R_c . Jedna od empirijskih formula ima oblik:

$$R_c = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.6)$$

gde vrednosti koeficijenata a i b variraju sa geografskom širinom i sezonom (u prvoj aproksimaciji $a = 0,2$ i $b = 0,5$), n je stvarno trajanje sunčevog sjaja, a N je moguće trajanje (tabela 2.5). Ako se uzme u obzir albedo (r), količina zračenja koja dospeva do površine (dolazeća energija) je:

$$R_I = R_c(1 - r) = R_a(1 - r) \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (2.7)$$

Proračun zračenja sa površine zemlje (R_b). Može se uzeti da Zemlja zrači kao crno telo u zavisnosti od srednje temperature vazduha. Dugotalasno zračenje Zemlje se smanjuje zbog prisustva oblaka i, u manjoj meri, zbog vodene pare u vazduhu. R_b se izračunava pomoću izraza:

$$R_b = \sigma T_a^4 (0,56 - 0,078 \sqrt{e_d}) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \quad (2.8)$$

gde je: σT_a^4 teoretska radijacija crnog tela, koja se modifikuje funkcijom vlažnosti vazduha (e_d) i stepenom naoblake (n/N). U (2.8) σ je Stefan-Boltzmanova konstanta ($\sigma = 117,74 \cdot 10^{-9}$ cal cm⁻² dan⁻¹, odnosno

$\sigma = 493 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ dan}^{-1}$, pri čemu 59 cal dan^{-1} isparava 1 mm dan^{-1} vode, dok se za istu visinu isparene vode troši 247 J dan^{-1}), $e_d = e$ je stvarni napon vodene pare u mb, $T_a = t_c^{\circ} + 273$ - apsolutna temperatura u $^{\circ}\text{C}$. Da bi se olakšao proračun, na sl. 2.9 je data zavisnost između izraza σT_a^4 , izražena kao ekvivalent isparavanja u mm, i temperature $t^{\circ}\text{C}$.

Proračun neto zračenja (R_n). Neto radijacija predstavlja razliku između dolazeće (R_I) i odlazeće (R_b) radijacije:

$$R_n = R_I - R_b \quad (2.9)$$

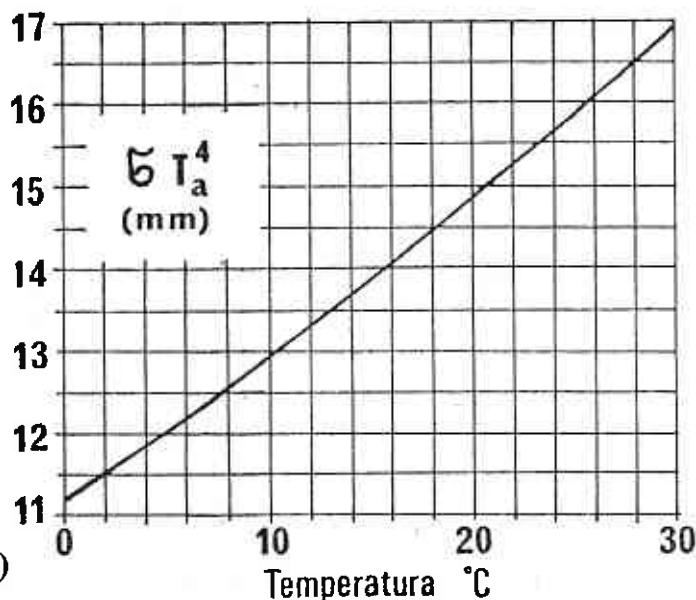
$$R_n = R_c(1 - r) - R_b \quad (2.10)$$

Koristeći napred navedene empirijske jednačine, izraz za proračun neto radijacije koju dobija jedna površina glasi:

$$R_n = R_a(1 - r)\left(a + b \frac{n}{N}\right) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,078 \sqrt{e_d}) \quad (2.11)$$

(prema: Wiesner, 1970)

Relacija (2.11) se primenjuje pri proračunu isparavanja sa vodene površine (metoda Penman-a), pri čemu se koriste meteorološki podaci koji se standardno mere i osmatraju na meteorološkim stanicama. U originalnom radu, Penman je predložio sledeće vrednosti za koeficijente u jednačinama (2.6), (2.7) i (2.11): $a = 0,18$ i $b = 0,55$.



Sl. 2.9 Radijacija crnog tela σT_a^4 u zavisnosti od temperature vazduha

2.2.3 Temperatura vazduha

Na temperaturu vazdušnog omotača Zemlje utiče, između ostalog, sunčeva radijacija. Manji deo toplote koja se nalazi u atmosferi potiče od apsorpcije kratkotalasne sunčeve radijacije, dok pretežni deo toplote dospeva sa površine Zemlje. Posledica ovakvog procesa je promena temperature sa visinom u najnižim slojevima atmosfere - troposferi (sl. 2.6.)

Kao i drugi meteorološki elementi, temperatura vazduha se meri kvantitativno najčešće u stepenima celzijusa ($^{\circ}\text{C}$). Za merenje temperature, koriste se materijali koji menjaju svoje osobine pod uticajem temperature, kao što je živa ili alkohol u staklenim termometrima, dva metala koji se različito šire (bimetal) u termografima, itd. Na meteorološkim stanicama u našoj zemlji se najčešće koriste obični živini termometri (mokri i suhi), maksimalni živin i minimalni alkoholni termometar, termograf (instrument za registrovanje temperature u vremenu) i drugi.

Ako se temperatura očitava diskontinualno, srednja dnevna temperatura vazduha se određuje na sledeći način:

$$\bar{t} = \frac{1}{4} (t_7 + t_{14} + 2t_{21}) \quad (2.12)$$

gde indeksi označavaju termine očitavanja temperature (7, 14 i 21 sat). Termometri (i termograf) su smešteni u meteorološkim zaklonima, na 2 m iznad površine tla.

Prosečne mesečne temperature se određuju kao aritmetička sredina srednjih dnevnih, u datom mesecu. Višegodišnji prosek se dobija kao aritmetička sredina mesečnih temperatura u periodu osmatranja. U tabeli 2.7 su dati višegodišnji proseci mesečnih temperatura koji su dobijeni merenjem na nekoliko meteoroloških stanica u Jugoslaviji.

Tabela 2.7 – PROSEČNE TEMPERATURE (°C)

	jan.	feb.	mart	apr.	maj	juni	juli	avg.	sep.	okt.	nov.	dec.	god.
Sombor	-1,3	1,2	5,5	11,0	16,0	19,5	20,9	20,1	16,3	10,8	5,8	1,4	10,6
Sr. Mitrovica	-0,8	1,6	5,9	8,6	16,2	19,6	21,0	20,3	16,4	11,0	6,2	1,6	10,9
Beograd	-0,3	1,4	7,9	12,4	17,1	20,5	22,7	22,0	18,5	12,5	7,4	1,8	12,0
Už. Požega	-2,6	0,3	4,6	10,2	14,6	18,0	19,5	18,9	15,1	10,0	5,0	-0,3	9,7
Ljubljana	-1,9	0,3	4,9	9,9	14,2	18,0	19,8	18,8	15,3	9,8	4,9	0,0	9,5
Zagreb	0,0	2,3	6,9	12,2	16,3	19,9	22,1	21,4	17,8	11,9	7,0	1,9	11,6
Sarajevo	-1,5	0,3	4,9	10,0	14,2	17,5	19,8	19,3	15,9	10,4	6,2	0,5	9,8
Kolašin	-3,1	-1,0	1,8	6,8	10,8	14,0	15,7	15,4	12,1	8,0	5,2	-0,5	7,1
Žabljak	-5,7	-4,0	-0,7	3,3	8,4	12,0	13,8	13,9	10,5	5,9	2,8	-2,9	4,8
Cetinje	0,6	2,3	4,8	8,2	13,5	17,2	19,2	18,3	14,0	9,0	5,2	1,8	9,5
Titograd	5,3	7,7	10,1	13,2	18,6	22,8	25,4	25,1	20,5	15,0	10,0	6,3	15,0
Mostar	4,8	6,3	9,8	13,4	17,6	22,0	25,4	24,8	20,4	15,6	10,2	6,9	14,8
Opatija	5,7	6,1	8,8	12,7	21,0	23,2	23,0	20,8	14,9	10,2	8,0	4,2	17,5

Temperature u višim slojevima atmosfere se mere pomoću radio-sondi. Radio-odašiljač, koji emituje signale koji su proporcionalni temperaturi, pritisku i vlažnosti vazduha, podiže se u atmosferu pomoću balona napunjenog helijumom ili vodonikom.

2.2.4 Vлага u vazduhu

Pod atmosferskom vlagom se podrazumeva sadržaj vodene pare u vazduhu. Okeani, koji pokrivaju 4/5 površine Zemlje, absorbuju znatan procenat sunčevog zračenja i predstavljaju izvor najvećeg dela atmosferske vlage.

Sadržaj vodene pare, ili vlažnost vazduha se obično izražava kao parcijalni pritisak vodene pare (u mešavini gasova od kojih se sastoji vazduh) i meri se u barima ($1 \text{ bar} = 1000 \text{ mb} = 10^5 \text{ N m}^{-2}$; $1 \text{ mb} = 0,75 \text{ mmHg}$). Značaj vodene pare u vazduhu je ne samo zbog njene uloge kod formiranja oblaka i padavina, nego i u tome što ona apsorbuje veliki deo dugotalasne radijacije Zemlje, čime se reguliše intenzitet gubitaka toplote sa Zemlje.

Pored drugih meteoroloških elemenata (temperatura, pritisak), vlažnost vazduha predstavlja važan faktor klime.

Niže se navodi nekoliko fizičkih karakteristika vlage u atmosferi.

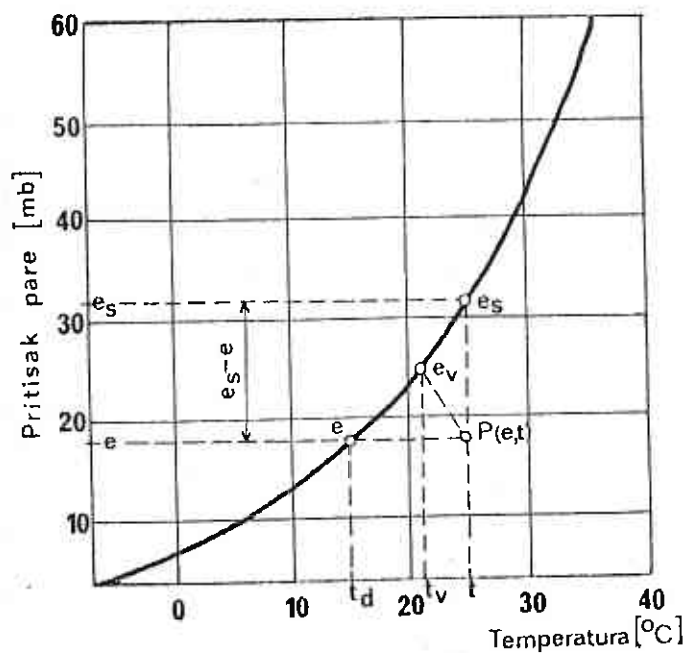
a) *Zasićenje.* Kaže se da je vazduh zasićen (saturisan) ako sadrži maksimalnu količinu vodene pare koju može da primi pri datoj temperaturi i pritisku. Što je temperatura viša, potencijalni sadržaj vlage u vazduhu je veći. Za svaki pritisak vazduha i temperaturu, postoji maksimalna vrednost pritiska vodene pare koji se naziva pritisak zasićenja – e_s . Iznad vrednosti e_s para prelazi u tečnost (kondenzacija) ili čvrsto stanje (sublimacija) ukoliko je temperatura ispod 0°C .

b) *Tačka rose* je temperatura t_d pri kojoj neka masa nesaturisanog vazduha $P(e,t)$ postaje zasićena kada se hladi, pri pritisku koji ostaje konstantan (vidi sl. 2.10). Ako se vazduh dalje hladi dolazi do kondenzacije vodene pare.

c) *Deficit saturacije* je razlika između pritiska saturisane vodene pare pri temperaturi vazduha t i stvarnog pritiska (nesaturisane) vodene pare. Deficit ($e_s - e$) ukazuje na dodatnu količinu pare koju bi mogao da primi vazduh na temperaturi t , pre nego što postane saturisan.

d) *Latentna toplota isparavanja*. Kada voda slobodno isparava troši se određena toplotna energija. Prema tome, kada raste vlažnost, odnosno pritisak pare, pritisak e u masi vazduha P postoje e_v pri temperaturi t_v (sl. 2.10). Ova temperatura t_v se naziva temperatura vlažnog termometra i pred-

$t(^{\circ}\text{C})$	$e_s(\text{mb})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$e_s(\text{mb})$
-10	2,9	22	26,4
-5	4,2	24	29,8
0	6,1	26	33,6
2	7,1	28	37,8
4	8,1	30	42,4
6	9,4	32	47,6
8	10,7	34	53,2
10	12,3	36	59,4
12	14,0	38	66,3
14	16,1		
16	18,2		
18	20,6		
20	23,4		



Sl. 2.10 Veza između pritiska saturisane vodene pare e_s i temperature vazduha

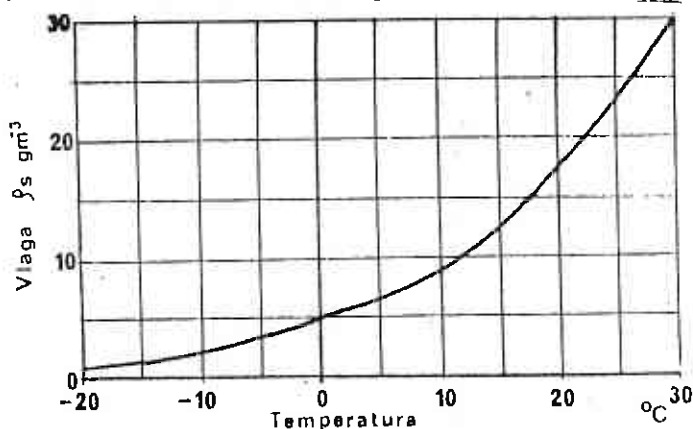
stavlja temperaturu do koje se originalni vazduh (sa temperaturom t) može ohladiti pri isparavanju vode.

e) *Relativna vlažnost* je odnos stvarne količine vlage u vazduhu i količine koja odgovara saturisanom vazduhu pri istoj temperaturi vazduha, tj.

$$R = e/e_s = \rho_v/\rho_s \quad (2.13)$$

gde je ρ_v apsolutna vlažnost. Kao i e_s , količina vlage ρ_s zavisi od temperature vazduha (sl. 2.11). R se menja u zavisnosti od količine prisutne vlage i inverzno, od temperature. Drugim, rečima, ako se količina vlage ne menja a temperatura raste, relativna vlažnost opada, i obrnuto.

Relativna vlaga ima značajnu ulogu kod sušenja predmeta. Ako je $R < 70\%$, predmeti se brzo suše. Ljudski organizam teško podnosi visoku relativnu vlažnost, naročito ako je udružena sa visokim temperaturama (R reguliše isparavanje sa tela, koje se tada hladi u odgovarajućem odnosu). R utiče na žive organizme uopšte (rast biljaka, razvoj bakterija, na životinje).



Sl. 2.11 Količina vlage u saturisanom vazduhu

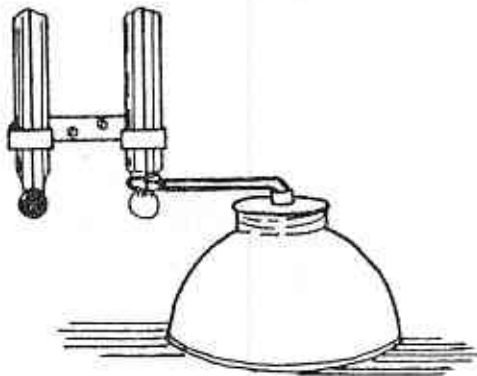
f) *Apsolutna vlažnost* je ekvivalentna gustini vodene pare:

$$\rho_v = \frac{\text{masa vodene pare (g)}}{\text{zapremina vazduha (m}^3\text{)}} = \frac{m_v}{V} \text{ (gm}^{-3}\text{)} \quad (2.14)$$

g) *Specifična vlažnost* (q) vezuje masu vodene pare sa masom vlažnog vazduha u datoj zapremini. Ovome, u stvari, odgovara odnos apsolutne vlage ρ_v (g m^{-3}) i gustine iste zapremine nesaturisanog vazduha ρ (kg m^{-3}):

$$q = \frac{\rho_v}{\rho} \text{ (g kg}^{-1}\text{)} \quad (2.15)$$

Merenje sadržaja vlage u atmosferi. Najčešće korišćen instrument se sastoji od dva termometra, suhog i vlažnog. Vlažni termometar je pomoću pamučnog fitilja povezan sa posudom u kojoj se nalazi destilisana voda (sl. 2.12).



Sl. 2.12 Suhi i vlažni termometar

Pritisak vodene pare se određuje pomoću formule:

$$e = e_{sv} - A \frac{P}{1000} (t - t_v) \quad (2.16)$$

gde je e pritisak vodene pare (mb) pri temperaturi vazduha t koju pokazuje suhi termometar, e_{sv} pritisak saturisane vodene pare koji odgovara temperaturi t_v koja se meri na vlažnom termometru, P je pritisak vazduha (mb) dok je A koeficijent.

Instrument je smešten u meteorološkom zaklonu (kućici), pri čemu se koristi ili prirodna ventilacija (koja je promenljiva) ili veštačka. Kod nas se većinom koristi psihometar sa ventilatorom. U prvom slučaju (prirodna ventilacija) je $A = 0,79$, dok je u drugom $A = 0,66$.

Primer: Neka je u trenutku merenja na psihometru sa ventilatorom ($A = 0,66$) $t = 24,4^\circ\text{C}$ i $t_v = 20,2^\circ\text{C}$, dok je na barometru očitano $P = 900$ mb. Na osnovu ovih merenja, potrebno je odrediti relativnu vlažnost $R\%$. Temperaturi $t_v = 20,2^\circ\text{C}$ odgovara $e_{sv} = 23,61$ mb (iz tabele ili sa krive na sl. 2.10). Na osnovi jednačine (2.16) biće:

$$e = 23,61 - 0,66 \frac{900}{1000} (24,4 - 20,2)$$

$$e = 21,12 \text{ mb.}$$

Kako za temperaturu vazduha na suhom termometru $t = 24,4^\circ\text{C}$ odgovara $e_s = 30,47$ mb, to je odgovarajuća relativna vlažnost:

$$R\% = \frac{e}{e_s} \cdot 100 = \frac{21,12}{30,47} \cdot 100 = 69,3\%$$

Kod drugih tipova instrumenata za merenje sadržaja vodene pare u vazduhu, kao elementi se koriste materijali čije se fizičke osobine menjaju pod uticajem vlage u vazduhu (papir, kosa). Kod higrografa se koristi pramen kose koji, pri promenama vlažnosti, pokreće polugu sa pisaljkom na kraju. Pisljka ostavlja trag na dobošu sa satnim mehanizmom.

Tabela 2.8 – PROSEČNE VREDNOSTI RELATIVNE VLAŽNOSTI VAZDUHA

	jan.	feb.	mart	apr.	maj	juni	juli	avg.	sep.	okt.	nov.	dec.	god.
Sombor	87	83	75	71	70	71	71	72	76	78	85	88	77
Sr. Mitrov.	86	83	75	71	73	74	73	75	78	80	85	88	78
Už. Požega	85	80	75	71	74	76	74	75	79	82	85	88	79
Nikšić	84	82	80	76	78	82	79	79	82	82	84	87	81
Zabljak	80	80	79	76	72	74	71	68	73	77	79	82	76
Titograd	76	69	68	67	67	61	54	53	65	70	77	76	66
Cetinje	84	83	80	77	77	74	71	73	81	84	86	84	79

U tabeli 2.8 su dati podaci o relativnoj vlažnosti na nekoliko meteoroloških stanica.

2.2.5 Pritisak atmosfere

Pritisak vazduha se definiše kao pritisak stuba vazduha od površine zemlje do granice atmosfere, na površinu od 1 cm^2 . Jedinica za merenje pritiska je Paskal; obično se koriste milibari (ranije: visina stuba žive). Odnos ovih mernih jedinica je sledeći:

$$1 \text{ bar} = 10^3 \text{ mb} = 10^5 \text{ Paskala} = 10^2 \text{ kPa}$$

Vazdušni pritisak opada sa visinom (vidi sl. 2.6), približno 1 mb za 10 m u nižim slojevima atmosfere. Meri se živinim ili aneroidnim barometrom. Drugi instrument sadrži aneroidnu ćeliju (senzor); to je hermetički zatvorena kutija iz koje je (delimično) izvučen vazduh. Kako se menja atmosferski pritisak tako se pomeraju zidovi kutije; ovo kretanje se prenosi na polugu (pokazivač) kod aneroidnog barometra, odnosno na pisaljku koja beleži pritisak u funkciji vremena, kod barografa.

Ukupni pritisak vazduha je jednak sumi parcijalnih pritisaka gasova od kojih je sastavljen vazduh (Daltonov zakon). Napred je parcijalan pritisak vodene pare označen sa e , a (parcijalan) pritisak saturisane vodene pare sa e_s .

2.2.6 Vetar

Vetar je strujanje vazduha koje je posledica nejednakog rasporeda pritiska vazduha. Vetar ima značajnu ulogu u procesu isparavanja kao i u transportu vlage. Dugotrajne i obilne padavine dospevaju na kontinentalna područja zahvaljujući vetru koji donosi vlažne vazdušne mase koje se formiraju iznad okeana.

2.2.6.1 Merenje vetra i obrada podataka merenja

Horizontalna komponenta kretanja vazduha paralelna sa površinom Zemlje naziva se vetar; to je vektorska veličina koja ima pravac i intenzitet (jačinu, brzinu). Vertikalna komponenta (vazdušna struja) je manja po intenzitetu ali je značajna za kondenzaciju vodene pare. Pravac vetra se meri na osam ili šesnaest tačaka kompasa i izražava se u stepenima od severa. Kada se govori o pravcu vetra, to je pravac iz kojeg vetar duva. Na primer, severozapadni vetar je vetar koji dolazi iz severozapadnog pravca (duva ka jugoistoku). Brzina vetra se meri anemometrom (propelernim ili sa čašicama). Propelerni tip anemometra meri obe komponente vetra: smer i jačinu. Drugi tip se konstruiše u kombinaciji sa vetrokazom. Za kontinualno beleženje karakteristika vetra se koriste razni tipovi anemografa.

Brzina vetra se izražava u metrima u sekundi, kilometrima na čas, čvorovima. Ovde se koriste sledeći faktori za konverzaciju:

$$1 \text{ ms}^{-1} = 3,6 \text{ kmh}^{-1} = 1,9 \text{ čvorova} = 2,2 \text{ milje h}^{-1},$$

$$1 \text{ km h}^{-1} = 0,278 \text{ ms}^{-1} = 0,53 \text{ čvorova} = 0,62 \text{ milje h}^{-1}.$$

Brzina vetra se meri i u boforima. Na primer, jačini od 5 bofora odgovara brzina od 8,0 do 10,7 m s^{-1} , jačini 10 bofora - 24,5 do 28,4 m s^{-1} , itd. Potpuni pregled se može videti kod Bonaćija (1984).

Uobičajeno je da se vetrovi prikazuju grafički, u obliku ruže vetrova. Ruža prikazuje učestalost pojedinih pravaca i odgovarajuće srednje brzine.

2.2.6.2 Opterećenje objekata od vetra

Merenje vetra se u meteorološkim službama vrši na standardnoj visini od 10 m. Kako vetar menja brzinu sa visinom, predloženo je više formula za određivanje srednje brzine vetra w_z na visini $z > 10$ m. Često se koristi oblik:

$$w_z = w_{10} (z/10)^\alpha \quad (2.17)$$

gde je: w_{10} brzina vetra na 10 m, dok se α kreće u granicama od 1/7 do 1/5.

Turbulentno strujanje vetra je praćeno pulziranjem, promenom brzine oko srednje vrednosti u vremenu. Ove fluktuacije su slučajne; sa visinom, raste srednja brzina vetra ali se amplitude fluktuacija smanjuju. U prizemnom sloju, varijacije oko srednje brzine zavise od hrapavosti podloge.

Radi dimenzionisanja građevinskih objekata na uticaj vetra, vrši se statistička analiza maksimalnih brzina vetra (udara). Na seriju čiji se elementi sastoje od vrednosti maksimalnog registrovanog udara za svaku godinu u periodu osmatranja, primenjuje se teorija ekstrema (Gumbelova raspodela verovatnoće ili Jenkinsonov model), i određuje povratni period različite vrednosti brzine. U sadašnjoj projektantskoj praksi se, kao merodavna za dimenzionisanje, obično uzima vrednost brzine vetra za povratni period od 50 godina, a kada se traži veća sigurnost, 100 godina. Za Novi Sad, gde je zabeležena najveća brzina košave od $33,5 \text{ ms}^{-1}$, 50-to godišnji računski maksimalni vetar je reda $37,5 \text{ ms}^{-1}$ po modelu Jenkinsona, a 42 ms^{-1} po Gumbelu (Đorđević, 1986).

Pritisak (kinetička energija) vetra je srazmeran kvadratu brzine; na jedinicu površine je pritisak:

$$P = C_x \frac{\rho w^2}{2} \text{ (Pa)} \quad (2.18)$$

gde je: ρ gustina vazduha (kg m^{-3}) i w brzina vetra (m s^{-1}). Relacija (2.18), koja proističe iz Bernulijeve jednačine, je u važnosti za slučaj kada je prepreka dovoljno velika pa u težištu njene površine dolazi do potpunog zaustavljanja vazduha. Kod objekata konačnih dimenzija (dimnjaci, tornjevi, visoke zgrade), oko objekta se formira strujna slika sa vrtlogom iza objekta, čiji oblik zavisi od veličine građevine i brzine vetra. Za cilindar, vrednost koeficijenta oblika C_x je bliska jedinici za Reynoldsov broj $10^3 < Re < 10^5$; za male vrednosti Re , C_x je znatno veće od jedan, za $Re > 10^6$, $C_x < 1$ ($Re = wD/v$, gde je: v kinematski koeficijent viskoziteta; Re dakle zavisi od prečnika D). Za profile aerodinamičkog oblika, pri $Re < 10^5$, $C_x = 0,05 - 0,08$. Detaljnije informacije o ovome se mogu naći u knjizi G. Hajdina (1983).

Odstupanja od srednje brzine vetra su utoliko veća, ukoliko je veća hrapavost terena; ova odstupanja opadaju sa visinom. Za određenu visinu se može napisati:

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.19)$$

gde je: w' odstupanje od srednje brzine \bar{w} . Smatrajući da je komponenta w' slučajna promenljiva, da sledi normalnu raspodelu verovatnoće i da zavisi samo od vremena, za ovaj vremenski proces se može definisati autokorelaciona funkcija kao i spektar energije vetra. Tok ovih analiza je prikazao Đorđević (1986).

Trenutni udar vetra povratnog perioda T se može odrediti pomoću relacije:

$$w(T) = w_s + K(T) S_v \quad (2.20)$$

gde je: w_s ocena matematičkog očekivanja trenutnih maksimalnih udara vetra, K je faktor verovatnoće a S_v ocena standardne devijacije.

2.2.7 Isparavanje

Pod isparavanjem se podrazumeva prelaz vode iz tečnog (ili čvrstog) stanja u vodenu paru (gas). Isparavanje predstavlja bitni deo hidrološkog ciklusa; ono preraspodeljuje toplotnu energiju između površine Zemlje i atmosfere.

Do isparavanja dolazi sve dok postoji izvor vlage, gradijent pritiska vodene pare između površine vode i atmosfere i izvor energije. Energija ili latentna toplota se dobija od Sunca, iz zemljišta, iz vazduha i iz same vode. Sa sl. 2.10 se vidi da isparavanje zavisi od deficita saturacije ($e_s - e$). Kada voda isparava, vazduh iznad vode se postepeno približava zasićenju i, pošto ne može (pri datoj temperaturi) da primi više vlage, postaje zasićen vodenom parom te isparavanje prestaje. Ako se saturisani vazduh zamenjuje sa suvljim vazduhom, nastavlja se proces isparavanja. Prema tome, ovde brzina vetra igra značajnu ulogu. U zaključku se može reći da isparavanje sa vodene površine zavisi od raspoložive energije, temperature vode i vazduha, deficita saturacije i brzine vetra.

2.2.7.1 Proračun isparavanja metodom bilansa energije

Kod ovog pristupa se ne ulazi u proces transfera pare, nego se koriste faktori koji učestvuju u toplotnom bilansu na površini koja isparava. Glavni faktori su: (1) dolazeća radijacija, R_c , (2) odlazeća radijacija, R_b (kratkotalasna i dugotalasna), (3) transfer toplote iz vazduha ka površini ili u obrnutom smeru, H , (4) toplota koja se koristi za pretvaranje tečnosti u paru LE , gde je L latentna toplota a E isparavanje, (5) toplotni fluks ka Zemlji ili u obrnutom pravcu, G , (6) neto radijacija koju dobija površina $R_n = R_c(1 - r) - R_b$, gde je r albedo.

Ako se zanemare neki faktori koji doprinose toplotnom bilansu pri površini koja isparava (na primer, toplota koja je akumulisana u vodi, toplota koja ulazi i izlazi iz sistema, i drugo), izraz za energiju Q_E koja je potrebna za isparavanje glasi:

$$Q_E = R_c - rR_c - R_b - H - G = R_n - H - G \quad (2.21)$$

gde je: rR_c reflektovano kratkotalasno zračenje. Kako je $Q_E = L\rho E$ i ako se zanemari G , izraz (2.21) se može napisati:

$$L\rho E = R_n - H$$

i

$$R_n = H + L\rho E \quad (2.22)$$

Bowen je pokazao da postoji proporcionalnost između transfera toplote i vode:

$$\beta = \frac{H}{L E} = \gamma \frac{t_p - t}{e_p - e} \quad (2.23)$$

(Bowen-ov odnos), gde su: t_p i e_p temperatura i pritisak vodene pare na površini vode, t i e temperatura vazduha i stvarni napon vodene pare u vazduhu, ρ je gustina vazduha, a γ je psihometarska konstanta.

Ako se (2.23) reši po H i to zameni u (2.22), dobija se

$$E = \frac{R_n}{L(\rho + \beta)} \quad (2.24)$$

Pošto se po pravilu ne raspolaze potrebnim podacima merenja, opisana metoda se u praksi retko koristi.

2.2.7.2 Proračun isparavanja metodom transfera mase

Metoda počiva na postavci da transfer vodene pare mora postojati pri deficitu saturacije ($e_s - e$) sa intenzitetom koji zavisi od turbulentnog mešanja; mera koeficijenata transfera može biti neka funkcija brzine vetra; drugim rečima:

$$E = f(w) (e_p - e) \quad (2.25)$$

Funkcija vetra obično ima oblik $f(w) = a(1 + bw)$, gde je: w brzina vetra. U gornjoj jednačini e_p predstavlja pritisak vodene pare pri površini vode. U empirijskim formulama se ova veličina zamenjuje sa naponom saturisane vodene pare e_s , odnosno,

$$E_a = f(w) (e_s - e) \quad (2.26)$$

pri čemu se e_s određuje iz tabele ili grafikona (sl. 2.10), na bazi temperature vazduha koja se meri na meteorološkoj stanici.

Od brojnih formula oblika (2.26) za proračun isparavanja sa slobodne vodene površine, niže se navodi Penmanova formula:

$$E_a = 0,263 (e_s - e) (0,5 + 0,53 w_2) \quad (2.27)$$

gde se e_s i e unose u mb, a w_2 u ms^{-1} (brzina vetra merena na 2 m od površine zemlje), pri čemu se E dobija u $mm\ dan^{-1}$.

U SAD i Australiji se za član u formuli koji se odnosi na vetar koristi izraz $N \cdot w$. pa jednačina ima oblik:

$$E = N w_2 (e_s - e) \quad (2.28)$$

gde se brzina vetra na 2 m unosi u $m\ s^{-1}$, pritisak vodene pare u mb, pa se E dobija u $cm\ dan^{-1}$. Prema podacima koje navodi Shaw (1984), vrednosti za

koeficijent N za nekoliko akumulacija sa značajnom površinom vode, kreću se u granicama od 0,011 do 0,012. Harbeck je u formulu za isparavanje sa vodenih površina do 12.000 ha uneo i površinu rezervoara:

$$E = 0,291 A^{-0,05} w_2 (e_s - e) \quad (2.29)$$

gde se površina A unosi u m^2 , w_2 u $m s^{-1}$, e_s i e u mb; E se dobija u $mm dan^{-1}$.

Primer: Ako je prosečna brzina vetra u nekom mesecu $1,2 ms^{-1}$ i deficit saturacije $(e_s - e) = 10 mb$, onda se po jednačini (2.28) za $N = 0,011$ dobija $E = 1,3 mm^{-1}$ a po (2.29) (za $A = 50 km^2$) $E = 1,44 dan^{-1}$, dok formula Penman-a (2.27) daje $E = 2,99 mm dan^{-1}$.

2.2.7.3 Kombinovana metoda (metoda Penmana)

Nedostatak podataka o temperaturi i naponu vodene pare pri površini praktično onemogućava proračun isparavanja po metodi bilansa energije. Kombinovanjem napred pokazanih formula, i uz određene pretpostavke kojima se ne uvode velike greške, moguće je izračunati isparavanje, uz korišćenje meteoroloških veličina koje se standardno mere i osmatraju.

Jednačina bilansa energije (2.22) se može uprostiti:

$$R_n = E + H$$

gde je R_n raspoloživa toplota, E je energija za isparavanje i H energija za zagrevanje vazduha, kao i jednačina (2.24):

$$E = \frac{R_n}{1 + \beta} \quad (2.30)$$

gde je:

$$\beta = \gamma \frac{t_p - t}{e_p - e} \quad (2.31)$$

Kako je nagib na krivoj $e_s = f(t)$ na sl. 2.10 približno:

$$\Delta = \frac{e_p - e_s}{t_p - t}$$

to ako se $t_p - t$ u (2.31) zameni sa $(e_p - e_s) / \Delta$, dobija se:

$$\beta = \frac{\gamma}{\Delta} \frac{e_p - e_s}{e_p - e} \quad (2.32)$$

Može se pokazati da je izraz $(e_p - e_s) / (e_p - e)$ ekvivalentan izrazu $(1 - E_a/E)$, pa (2.32) dobija oblik:

$$\beta = \frac{\gamma}{\Delta} (1 - E_a/E) \quad (2.33)$$

što, ako se zameni u (2.30) i posle sređivanja, daje:

$$E = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.34)$$

Jednačina (2.34) je poznata pod nazivom Penman-ova formula za proračun isparavanja sa slobodne površine vode. Ona je proverena u mno-

gim delovima sveta i preporučuje se za korišćenje u studijama i projektima, ako za datu lokaciju ne postoje dugogodišnja merenja isparavanja.

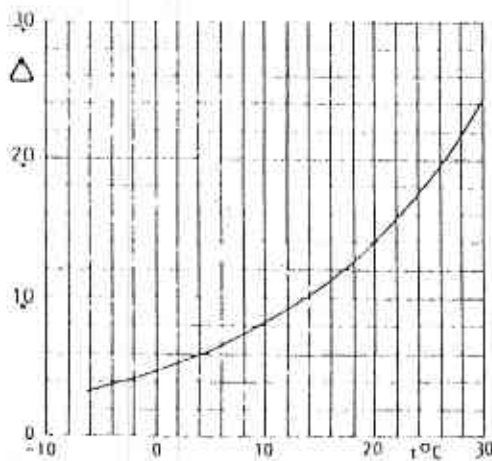
Da bi se primenila formula (2.34) potrebno je raspolagati sledećim meteorološkim podacima (proseci za sedmicu ili mesec): srednja temperatura vazduha t ($^{\circ}\text{C}$), prosečna vrednost napona vodene pare e (mb), broj časova sunčevog sjaja za isti period - n , srednja brzina vetra na 2 m iznad površine u_2 (ms^{-1}). Pri proračunu se koriste tabele i grafikoni koji su dati u prethodnom tekstu.

Nagib tangente Δ na krivoj $e_s = f(t^{\circ}\text{C})$ sa sl. 2.10 se može dobiti diferenciranjem jednačine koja aproksimira ovu krivu. Na taj način se dobija:

$$\Delta = (0.00815 t + 0.8912)^7 \quad (2.35)$$

gde je: t temperatura vazduha u $^{\circ}\text{C}$. Grafička predstava ove zavisnosti je data na sl. 2.13.

Način proračuna isparavanja E je pokazan na primeru.



t ($^{\circ}\text{C}$)	Δ
10	0,23
-5	0,32
0	0,45
5	0,61
10	0,82
15	1,10
20	1,45
25	1,89
30	2,44
35	3,12

Sl. 2.13 Nagib tangente Δ na krivoj $e_s = f(t)$ sa sl. 2.10

Primer: Prosečna temperatura u mesecu julu 1980. godine na jednoj lokaciji $N40^{\circ}$ je iznosila $t = 20^{\circ}\text{C}$, prosečna vrednost napona vodene pare $e = 17$ mb, brzina vetra $u_2 = 2,0$ ms^{-1} , dok je broj časova sunčevog sjaja bio 280 čas mes⁻¹, odnosno $n = 280/31 = 9,03$ čas dan⁻¹.

- Za geografsku širinu $N40^{\circ}$ i mesec juli se u tabeli 2.6 čita $R_s = 16,3$ mm dan⁻¹.
- Iz tabele 2.5 za 40° i mesec juli se čita $N = 14,7$ čas dan⁻¹.
- Iz sl. 2.10 se za $t = 20^{\circ}\text{C}$ očitava $e_s = 23,37$ mb.
- Sa krive na sl. 2.13 za $t = 20^{\circ}\text{C}$ se očitava $\Delta = 1,43$.
- Dolazeća radijacija se izračunava pomoću jednačine (2.7).

$$R_i = 0,95 \cdot 16,3 (0,18 + 0,55 \cdot 9,03/14,7) = 7,98 \text{ mm dan}^{-1}$$

(albedo za vodu $r = 0,05$, pa je $(1 - r) = 0,95$).

- Odlazeća radijacija se određuje prema jednačini (2.8); ovde je $T_s = t (^{\circ}\text{C}) + 273 = 293$, pa je vrednost prvog člana:

$$\sigma T_s^4 = 493 \cdot 10^9 \cdot 293^4 = 3633 \text{ (J sm}^{-2} \text{ dan}^{-1}\text{)}$$

Kako 247 J dan⁻¹ isparava 1 mm dan⁻¹ vode, biće:

$$\sigma T_s^4 = 3633/247 = 14,71 \text{ mm dan}^{-1}$$

Dalje je:

$$R_o = 14,71 (0,56 - 0,078 \sqrt{17}) (0,1 + 0,9 \cdot 9,03/14,7)$$

$$R_o = 2,29 \text{ mm dan}^{-1}$$

- neto radijacija

$$R_n = 7,98 - 2,29 = 5,69 \text{ mm dan}^{-1}$$

- prema jednačini (2.27):

$$E_x = 0,263 (23,37 - 17) (0,5 + 0,53 \cdot 2,0)$$

$$E_x = 2,61 \text{ mm dan}^{-1}$$

i konačno prema jednačini (2.34):

$$E = \frac{1,43 \cdot 5,69 + 0,653 \cdot 2,61}{1,43 + 0,653}$$

$$E = 4,72 \text{ mm dan}^{-1}$$

gde je psihometarska konstanta $\gamma = 0,653$.

Za mesec juli:

$$E_{\text{VII}} = 4,72 \cdot 31 = 146,32 \text{ mm.}$$

Isparavanje se meri pomoću raznih tipova isparitelja pri čemu se u našoj zemlji najčešće koriste tzv. Piche-ov isparitelj i isparitelj klase A. Prvi tip se stavlja u meteorološku kućicu; sastoji se od staklene cevi dužine oko 80 cm koja je savijena za 180° pri dnu. Cev se ispuni vodom; na donjem kraju je otvor na koji se stavlja upijajući papir sa kojeg voda isparava. Količina isparene vode se meri na graduisanom (vertikalnom) delu cevi. Isparitelj klase A se sastoji od metalnog suda (beli lim) prečnika 120 cm i dubine 25 cm koji se puni vodom. Isparavanje (sniženje nivoa vode) se meri pomoću mikrometra.

U tabeli 2.9 je prikazano isparavanje (mm) na nekim meteorološkim stanicama.

Tabela 2.9 – ISPARAVANJE SA SLOBODNE VODENE POVRŠINE (isparitelj klase A)

	apr.	maj	juni	juli	avg.	sep.	okt.	nov.	god.
Beograd	125,3	161,3	182,6	199,2	208,7	146,8	103,5	58,7	1178
Zlatibor	66,6	102,0	113,9	122,5	125,7	79,6	42,2	22,9	675
Priština	104,3	132,9	150,6	175,6	179,6	125,1	86,7	30,0	983
Plevlja			103,3	115,8	94,7	63,5			
Titograd	96,0	124,0	174,0	232,5	204,6	138,0	83,7	39,0	1272,4

Relativno mala dubina vode u isparitelju u odnosu na dubine u prirodnom i veštačkim jezerima uslovljava da se u isparitelju dobija veće isparavanje nego sa vodenih površina u prirodi. Za isparitelj klase A se primenjuje koeficijent redukcije čija je vrednost reda 0,7.

2.2.8 Padavine

Voda je prisutna u atmosferi u gasovitom (vodena para), tečnom (vodene kapljice u oblacima) i čvrstom stanju (ledeni kristali). Vodena para, koja potiče sa površine Zemlje (najvećim delom kao posledica isparavanja mora i okeana), se zbog turbulencije i vertikalnih strujanja podiže u gornje slojeve atmosfere. Kako količina vodene pare u određenoj zapremini vazduha zavisi od temperature, sadržaj vodene pare varira sa visinom, na sličan način kao i temperatura. Postoji, znači, vertikalni gradijent sadržine vodene pare, sa maksimalnom vrednošću blizu površine.

2.2.8.1 Kondenzacija vodene pare i formiranje oblaka

Oblaci se sastoje od sićušnih vodenih kapljica (prečnika od 10 do 50 μ) i kristala leda, što čini da je oblak vidljiv. Ako bi vazduh bio sasvim čist, do kondenzacije vodene pare u kapljice vode bi došlo u trenutku kada, zbog hlađenja, vazduh postane supersaturisan. Prisustvo čvrstih čestica u atmosferi (aerosola) prečnika od 10^{-3} μ do 10 μ , olakšava i ubrzava ovaj proces. Postoje dva tipa kondenzacionih jezgara: *higroskopske čestice* na kojima počinje kondenzacija pre nego što vazduh postane saturisan (čestice soli), i *nehigroskopske čestice* koje uslovljavljavaju određeni stepen supersaturacije (prašina, dim, pepeo).

Sledeći procesi u atmosferi utiču na vertikalno strujanje vazdušnih masa, što može dovesti do kondenzacije vodene pare i, eventualno, do formiranja padavina: a) turbulencija, b) horizontalna konvergencija (horizontalno se kreću jedna prema drugoj dve mase vazduha i zbog jednačine kontinuiteta dolazi do vertikalnog kretanja naviše), c) orografsko podizanje (podizanje usled neke fizičke barijere – planinski lanac), d) konvekcija (podizanje usled zagrevanja vazduha u kontaktu sa tlom), e) frontovi (zone koje odvajaju velike mase vazduha sa različitim fizičkim karakteristikama).

Oblaci pa i padavine, ako do njih dode, često se klasifikuju obzirom na procese koji utiču na njihovo formiranje. Turbulencija velikih razmera daje oblake kumulonimbose, kretanje preko planinske barijere – orografske oblake (padavine), konvekcija – konvektivne oblake i padavine, a kada je u pitanju kretanje vazdušne mase preko neke druge mase koja ima različitu temperaturu, dolazi do formiranja frontalnog oblačnog sistema i frontalnih padavina. Nefrontalne padavine se javljaju u slučaju procesa pod d) kada vazdušne mase ulaze u područje niskog pritiska.

Dve najznačajnije karakteristike oblaka su njegova baza (nivo na kome počinje kondenzacija) i njegov oblik koji zavisi od procesa koji doprinosi njegovom formiranju. Na osnovu ovog, najjednostavnija klasifikacija oblaka bi bila: 1) visoki oblaci (baza na visini od 6 do 12 km): cirusi, cirokumulusi i cirostratusi, 2) srednji (baza od 2 do 6 km): alto-kumulusi i alto-stratusi i 3) niski oblaci (baza od površine zemlje do 2 km): kumulusi, kumulonimbusi, stratusi, i dr.).

2.2.8.2 Nastanak padavina

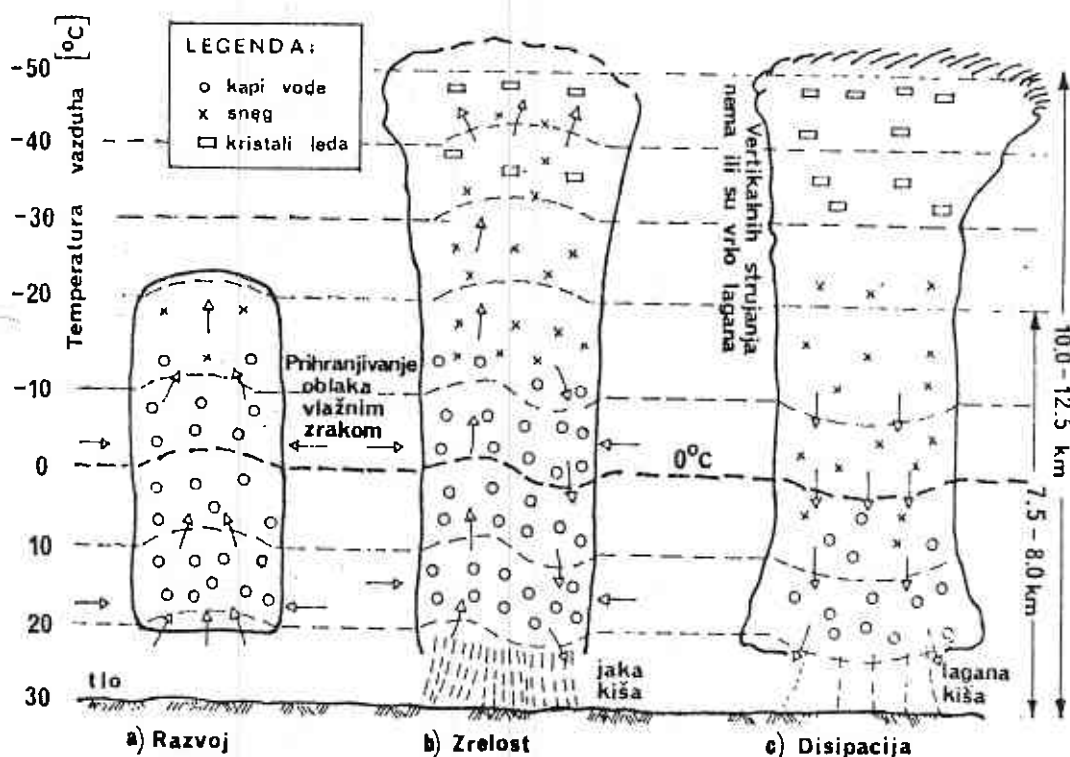
Rast već formiranih kapljica vode od kojih se sastoji oblak, zavisi od vlažnosti vazduha, intenziteta transfera pare na vodene kapljice, količine latentne toplote koja se troši na kondenzaciju i drugih faktora.

Voda može ostati u tečnom stanju i u uslovima negativnih temperatura. Čista voda se može ohladiti do -40 °C, pre nego što počne da se spontano zamrzava. U normalnim uslovima, kapljice u oblacima se ne smrzavaju pri temperaturama -20 °C. Ledeni kristali u oblacima nastaju zbog prisustva sitnih čestica (organskog i neorganskog porekla), ledenih jezgara, posle čega vodena para direktno sublimira na ledene kristale. Visoki oblaci su sastavljeni od ledenih kristala, kumulonimbusi koji su razvijeni do velikih visina (vrhovi često probijaju tropopauzu) se sastoje od vodenih kapljica u donjim slojevima i čestica leda pri vrhu oblaka.

Postoji više teorija o tome kako iz kapljica (prečnika 10 μ) od kojih je sastavljen oblak, nastaju kišne kapi prečnika reda 1000 μ (znači, jedan milion kapljica odgovara, po zapremini, jednoj kapi kiše). Najpoznatije su dve teorije od kojih je prva bazirana na procesu kristalizacije a druga na procesu spajanja kapljica vode.

Proces kristalizacije (proces Bergeron-a) uslovljava postojanje u oblaku prehladenih kapljica vode i ledenih kristala, pri temperaturama od -10 do -30 °C. U ovim uslovima, vazduh je saturisan obzirom na vodu, ali je supersaturisan obzirom na led. Ako koncentracija kristala leda dostigne određeni nivo (1 kristal po cm^3), vodena para direktno sublimira na čestice leda, formirajući ledene kristale čija veličina raste. Vazduh, sada, postaje nenasaturisan obzirom na vodu, pa kapljice isparavaju. Ovaj proces se nastavlja dotele dok ledeni kristali ne dostignu dovoljnu težinu i počnu da padaju ka zemlji nad kojom se pojavljuju, u zavisnosti od temperature nižih slojeva atmosfere, u vidu snega ili kao kiša. Pri dužim kišama, oblak se neprekidno obnavlja na taj način što se vodena para, doneta uzlaznim strujama u više slojeva atmosfere, kondenzuje formirajući nove vodene kapljice.

Proces spajanja. U oblacima u kojima je temperatura iznad 0 °C, nema kristala leda. Veličina kapljica vode ovde varira u širokim granicama, u zavisnosti od kondenzacionih jezgara (kapljice koje nastaju kondenzacijom na česticama soli dostižu prečnik i preko 100μ). Kapljice rastu usled kontakta sa ostalim kapima; veće kapljice padaju većom brzinom nego one manjih dimenzija, sa kojima se sudaraju i spajaju, da bi dostigle veličinu kišnih



Sl. 2.14 Tri faze razvoja jake konvektivne oluje: (a) razvoj – približno 20 min., (b) jaka kiša i grad, sa grmljavinom – oko 20 min. i (c) opadanje intenziteta kiše – 30 min. do 2 časa. Ukupno trajanje nepogode jedan do dva časa

kapli. Opisani proces dolazi do izražaja u primorskim regionima i tropskim oblastima, u letnjim mesecima i u niskim oblacima.

Ako su kišne kapi ili pahuljice snega dovoljno narasle da bi, uprkos uzlaznom strujanju, počele da padaju, u uslovima visokih temperatura nenasaturisanog vazduha u prizemnim slojevima, kišne kapi mogu ispariti pre nego što su dospele do zemlje. U letnjim mesecima se često upravo ovo dešava, kada se suvi vazduh nalazi ispod baze oblaka koja je na velikoj visini.

Za inženjersku praksu su od interesa kiše jakog intenziteta, koje su posledica oluja sa grmljavinom i zahvataju manje površine. Faze razvoja oluje su pokazane na sl. 2.14 (prema O. Bonaćiju, 1984).

2.3 MERENJE PADAVINA. OBRADA I ANALIZA PODATAKA MERENJA

Padavine ili oborine predstavljaju sve vidove kondenzovane ili sublimirane vodene pare koji se javljaju na površini zemlje u tekućem ili čvrstom stanju. Dele se na horizontalne padavine (rosa, slana, inje) i vertikalne, gde spadaju grad, kiša i sneg. Pod ukupnim padavinama za određeni period vremena (dan, mesec, sezonu, godinu) se podrazumeva visina kiše (u mm vodenog stuba) i visina snežnih padavina, izražena kao ekvivalent vode, takođe u mm. Kiša učestvuje u ciklusu oticaja neposredno pošto je dospela do tla. Naprotiv, sneg predstavlja zalihu vode u slivu, koja se javlja kao ulaz hidrološkog sistema, kada temperatura prelazi 0°C .

Za inženjersku praksu su od interesa kiša i sneg. Stoga se u daljem tekstu govori samo o ova dva vida padavina.

Oborine se mere na određenim lokacijama (padavinskim stanicama); rezultati merenja (i statističke obrade) se, striktno uzevši, odnose samo na tu lokaciju. Obzirom da padavine karakteriše neravnomernost u prostoru, koja je utoliko veća ukoliko je reljef više izražen, propisuje se minimalna gustina mreže padavinskih stanica. Prema uputstvima Svetske meteorološke organizacije, treba postaviti *najmanje jednu stanicu*:

1. U ravničarskim područjima na svakih $600\text{--}900\text{ km}^2$;
2. U planinskim područjima na svakih $100\text{--}250\text{ km}^2$;
3. Na ostrvima i planinskim regionima sa veoma gustom hidrografskom mrežom, na svakih $25\text{ do }100\text{ km}^2$.

Prema podacima iz 1978. god. u našoj zemlji je najgušća mreža padavinskih stanica u ravničarskim regionima (jedna stanica na svakih $62\text{--}75\text{ km}^2$) dok u izrazito planinskim predelima postoji jedna stanica na 374 km^2 , što je nedovoljno za izučavanje prostorne raspodele padavina. Inače, u okviru Hidrometeorološke službe Jugoslavije radi preko 3000 padavinskih stanica svih kategorija.

2.3.1 Instrumenti i metode za merenje padavina

Koriste se dva tipa kišomera: a) pluviometri, kojima se meri visina dnevnih, mesečnih ili sezonskih padavina i b) kišomeri-registratori (pluviografi).

2.3.1.1 Ne-registrujući kišomeri (pluviometri)

Osnovni instrument je kišomer za merenje *dnevnih količina padavina* (obični kišomer). U našoj zemlji je u upotrebi kišomer sa površinom otvora od 200 mm^2 (prečnik otvora $159,6\text{ mm}$). Gornja posuda sa levkom prihvata i snežne padavine (sl. 2.15).

Jedan milimetar kiše kroz otvor površine 200 cm^2 daje 20 cm^3 vode. Obzirom na ovaj odnos izvršeno je graduisanje staklene menzure pomoću koje se visina padavina čita direktno u milimetrima. Često se količina kiše izražava u $l\text{ m}^{-2}$. Kako je $1\text{ mm} \times 1\text{ m}^2 = 0,001\text{ m}^3\text{ m}^{-2} = 1\text{ l m}^{-2}$, izlazi da visi-

ni (sloju) kiše od 1 mm odgovara količina kiše od $1 / m^{-2}$. Redovna merenja padavina se vrše u 7 časova i ovaj podatak se beleži (i publikuje) kao oborina pala toga dana, a odnosi se na padavine iz prethodna 24 časa. Ukoliko je u toku dana pao jak pljusak ili ako se prilikom vejavice gornja posuda kišomera napunila snegom, vrše se vanredna merenja padavina. Sneg iz kišomera se otopi u toploj prostoriji pa se dobijena voda meri pomoću menzure u mm. U međuvremenu, merenje se nastavlja pomoću rezervnog kišomera.

Totalizator je kišomer za merenje ukupnih padavina u dužem periodu vremena. Postavlja se na terenima koji su teško pristupačni (naročito u zimskom periodu). Totalizator ima znatnu zapreminu (80 l) kako bi mogao da primi padavine do kojih dolazi između dva pražnjenja. U njega se sipa rastvor koji utiče da se padavine u vidu snega tope. Da bi se sprečilo isparavanje dodaje se vazelinsko ulje koje pliva po površini sakupljene vode. Otvor totalizatora je prečnika 159,6 mm i nalazi se na oko 3 m iznad terena. Sud se prazni (i sadržina meri) mesečno ili kad to vremenske prilike dozvole (najmanje dva puta godišnje).

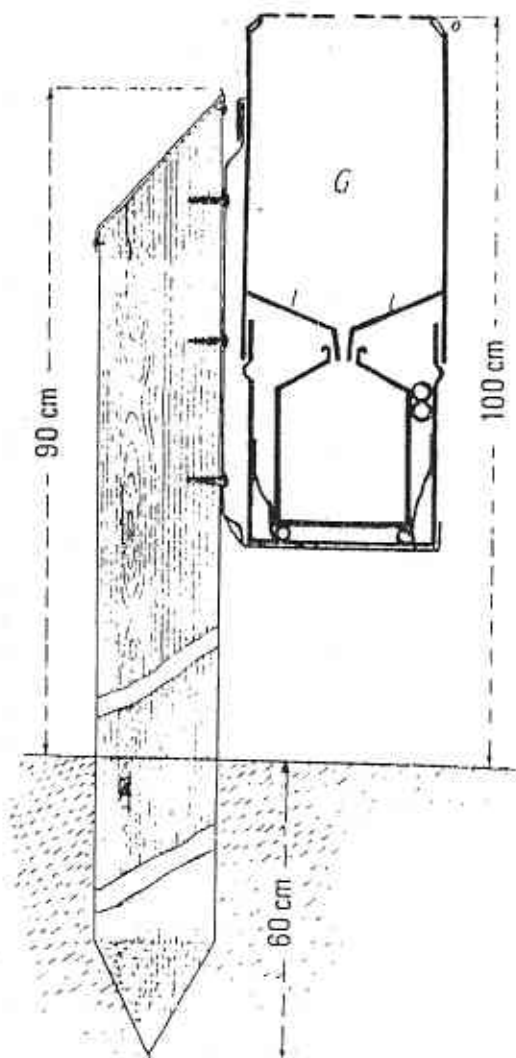
2.3.1.2 Regstrujući instrumenti (pluviografi ili ombrografi)

Da bi se dobio intenzitet kiše, potrebno je vršiti kontinualno merenje. U tu svrhu se najčešće koriste tri tipa pluviografa: sa plovkom, sa posudom koja se prevrće i sa vagom.

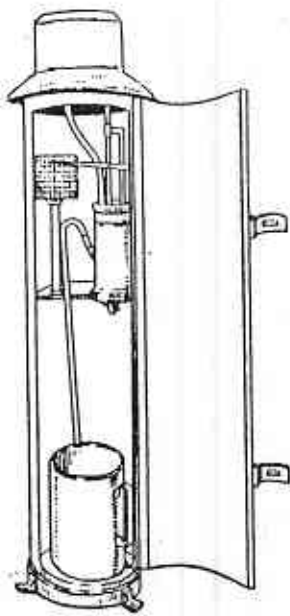
Pluviograf sa plovkom. Kiša se dovodi u jednu cilindričnu posudu u kojoj je plovak. Vertikalno kretanje plovka se pomoću poluge prenosi na pero koje ostavlja trag na papiru. Papir je namotan na cilindru (dobošu) koji pokreće satni mehanizam (jedan obrtaj za 24 časa). Kada se posuda sa plovkom napuni (10 mm kiše) sifonski uređaj naglo prazni posudu (vidi sl. 2.16 i 2.17). Iz sl. 2.17 se vidi da se kao rezultat registrovanja dobija sumarna linija pale kiše (visina kiše u funkciji vremena).

Ako postoji opasnost od zamrzavanja vode tokom zime, u instrument se ugrađuje uređaj za zagrevanje.

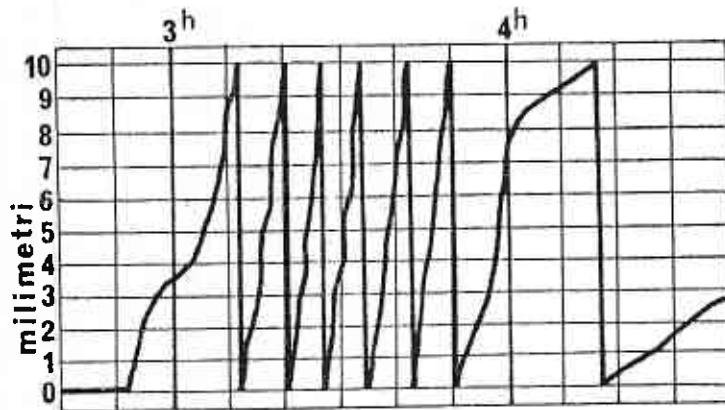
Pluviograf sa klackalicom. Osnovni deo uređaja predstavlja posuda koja je podeljena na dva dela i koja balansira oko horizontalne osovine. Iz sheme na sl. 2.18 se vidi da se kišnica uvek dovodi u gornju posudu koja se u momentu potpunog punjenja, prevrće i trenutno prazni, dok druga posuda počinje da se puni. Kretanje posude gore – dole se može preneti na električni kontakt relea. Ovo omogućuje daljinsko merenje padavina što predstavlja glavnu prednost ovog tipa instrumenta. Zapis registrovanja, koji se može do-



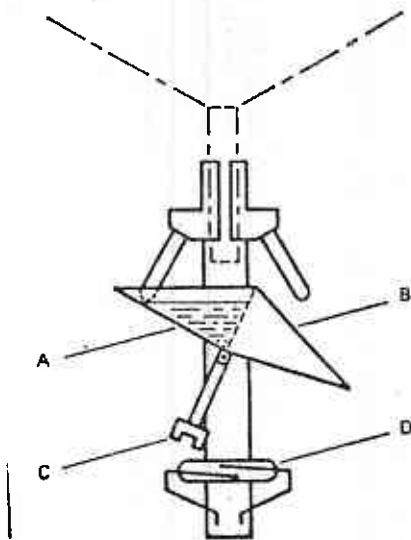
Sl. 2.15 Kišomer za diskontinualno merenje padavina



Sl. 2.16 Pluviograf



Sl. 2.17 Pluviogram



Sl. 2.18 Princip mehanizma pluviografa sa posudom.
A, B: posude, C: magnet, D: kontaktni uredaj (prema Shaw, 1983)

biti i mehaničkim putem, se sastoji od stepenaste linije, pri čemu rastojanje između stepenica predstavlja vreme koje je potrebno da padne jedna mala količina kiše (u jednu od dve posude instrumenta). Ova količina kiše je reda 0,2 do 1 mm. O nedostacima ovog instrumenta su pisali Maksimović i Radojković (1986).

Pluviografi sa vagom. Ovde se kontinualno meri i registruje težina posude u koju se dovodi zahvaćena kiša. Posuda se ne prazni automatski. Dodavanjem ulja, koje formira tanak film na površini vode, sprečava se isparavanje.

U Jugoslaviji je instalirano preko 220 pluviografa, od kojih 110 radi duže od 15, a 150

duže od 10 godina. To su većinom pluviografi sa plovkom, bez grejača, pa im je period rada ograničen na topliji deo godine (od aprila do novemba), što na prvi pogled predstavlja nedostatak ovakvog načina osmatranja. Međutim, istraživanja na podacima sa 10 pluviografa u regiji grada Zagreba su pokazala da u toku zimskog perioda padne samo 1 do 3% intenzivnih oborina, s napomenom da ti pljuskovi ne spadaju među najjače u toku godine (Bonačić, 1984). Iz ovoga se izvlači zaključak, važan za inženjersku praksu, da najjači pljuskovi padaju u toplom periodu godine, i da tada postoji opasnost od poplava sa malih slivnih površina.

2.3.1.3 Merenje padavina pomoću radara

Radar omogućuje da se otkriju i lociraju padavine. Mada radar ne može da zameni mrežu izveštajnih zemaljskih kišomernih stanica, u kombi-

naciji sa ovom mrežom, radar predstavlja izuzetno korisno sredstvo u operativnoj hidrologiji, naročito kada se radi o prognozama oticaja vode od kišnih padavina.

2.3.1.4 Merenje snežnog pokrivača

Kod *stacionarnog* merenja, visina snežnog pokrivača se osmatra na određenoj lokaciji. Merenje se obično vrši na tri snegomera (letve) na rastojanju od 10 m. Pored ukupne visine snega meri se i sveži sneg (na 24 časa). Radi određivanja sadržaja vode u snegu, uzimaju se uzorci snega, koji se mere specijalnom vagom. *Ekspediciono* merenje pruža mogućnost da se odredi prosečna visina snežnog pokrivača i odgovarajući sadržaj vode na većem prostranstvu. Ekvivalent vode u snežnom pokrivaču se, na odabranim lokacijama, može meriti i pomoću uređaja koji emituju gama-zrake. Površina terena pod snegom se ocenjuje sa zemlje, iz aviona ili satelita. Osmatranja snega omogućuju da se ocene rezerve vode u slivu radi prognoze prolejnog dotoka.

2.3.2 Dnevne, mesečne i godišnje padavine

Mesečne visine oborina (u mm) se dobijaju sumiranjem dnevnih visina. Godišnja količina padavina je zbir mesečnih visina (ili zbir dnevnih u toj godini). Na bazi osmatranja u dužem periodu godina, određuju se višegodišnji proseci mesečnih, sezonskih i godišnjih visina padavina. Za serije mesečnih i godišnjih padavina se često radi analiza verovatnoće javljanja padavina u određenom mesecu ili godini.

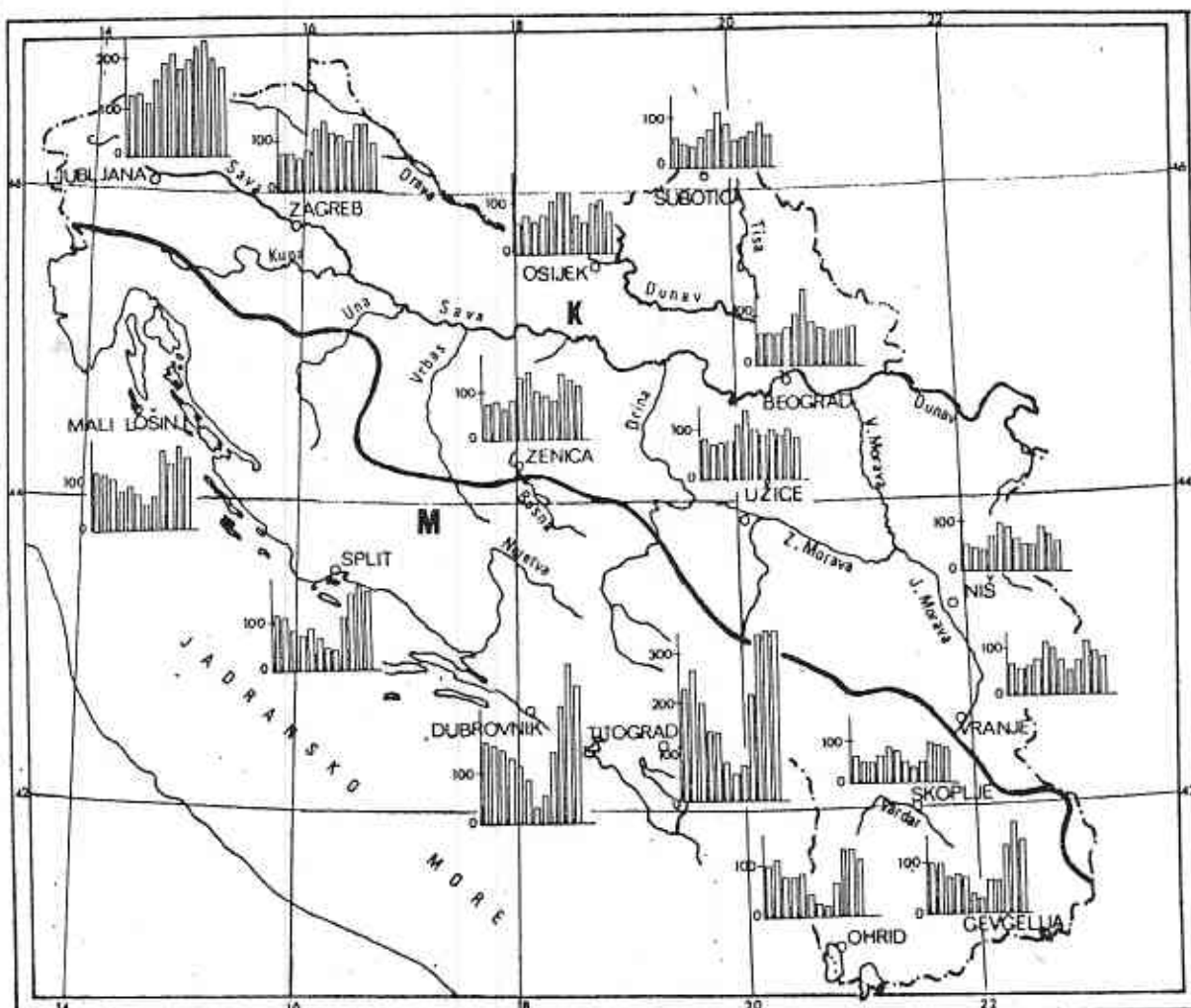
Ako se sumnja da serija godišnjih padavina nije homogena, zbog grešaka pri merenju, izmeštanja kišomera i drugih uzroka, potrebno je testirati homogenost ovakve serije. Za ove analize korisno je da se prethodno konstruiše dvostruka sumarna linija (vidi odeljak 2.9.1).

U tabeli 2.10 su date prosečne mesečne i godišnje visine padavina na nekoliko kišomernih stanica u Jugoslaviji.

Tabela 2.10 – MESEČNE I GODIŠNJE VISINE PDAVINA (mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	God.
Kranj. Gora	110	110	125	145	180	165	170	155	175	185	200	135	1875
Ljubijana	85	80	85	105	125	135	115	135	160	150	145	110	1430
Zagreb	55	50	50	60	85	90	75	75	80	95	85	60	870
Mostar	100	95	120	130	95	70	54	55	95	160	140	145	1245
Sarajevo	60	60	60	60	85	90	55	65	75	100	95	85	885
Šibenik	81	60	67	63	48	55	33	50	81	95	121	107	861
Maribor	45	45	50	70	105	125	105	105	105	100	90	70	1015
Slav. Požega	45	45	40	55	75	85	55	65	65	85	80	60	750
Tuzla	55	50	70	80	105	105	90	90	80	95	80	75	980
Palić	35	33	30	43	54	69	62	47	35	31	51	47	537
Zrenjanin	36	39	33	46	61	77	56	48	38	34	48	52	568
Sr. Mitrovica	42	43	37	50	62	88	65	53	42	40	58	59	639
Beograd	46	47	44	54	75	98	71	48	54	41	57	59	697
Valjevo	48	47	51	63	87	93	86	72	60	53	62	59	776
Vrnj. Banja	54	52	58	71	90	95	81	51	61	55	65	7	793
Niš	39	42	40	50	66	71	43	39	46	41	59	53	596
Čuprija	43	43	40	55	82	83	65	45	50	41	54	51	655
Priština	35	35	34	51	72	73	47	43	48	54	62	51	598
Dakovica	108	90	80	72	75	48	53	42	75	90	122	128	981
Junik	158	142	113	107	94	83	64	46	88	140	194	183	1406
Kolašin	232	210	191	210	120	99	86	88	132	213	318	306	2205
Žabljak	115	100	112	134	106	111	102	83	121	165	234	174	1557
Bijelo Polje	79	64	58	81	77	80	78	59	74	77	103	92	922
Plevlja	61	48	49	66	74	91	78	62	72	69	81	72	823
Titograd	199	172	153	150	97	65	47	74	117	181	248	232	1735
Cetinje	432	382	356	295	163	96	74	117	197	320	524	507	3456
Nikašić	226	199	176	190	114	101	67	90	126	216	313	281	2098

Obzirom na atmosferske procese i karakteristike reljefa, padavine na teritoriji SFRJ su nepravilno raspoređene u vremenu i prostoru. Glavno obeležje režima padavina je raspodela količina padavina u toku godine. Ukoliko neko područje ima u hladnijoj polovini godine (X-III) više od 50% od ukupne godišnje količine padavina, ono pripada *maritimnom* režimu padavina. Nasuprot tome, ako u toplijoj polovini godine (IV-IX) padne više od 50% od ukupne godišnje količine padavina, onda to područje pripada *kontinentalnom* režimu padavina. Na sl. 2.19 su pokazani hijetogrami mesečnih padavina na petnaestak kišomernih stanica na osnovi kojih se mogu uočiti pomenuti režimi, kao i granica koja približno odvaja maritimni i kontinentalni režim padavina.



Sl. 2.19 Granica koja približno odvaja maritimni i kontinentalni režim padavina. Pokazane su tipične raspodele mesečnih padavina (mm) na nekim kišomernim stanicama

2.3.3 Padavine na površini

Na osnovi merenja u određenim tačkama (kišomernim stanicama), vrši se analiza i ocena ukupne zapremine (m^3) ili prosečne visine (mm) padavina na posmatranu površinu (sliv) i u određenom intervalu vremena. Pored uobičajenog termina „prosečna visina padavina”, koristi se i termin „ekvivalentna visina padavina”, kojim se bolje izražava značenje ovog pojma, pošto proizvod između prosečne visine padavina i površine sliva, mora biti jednak

zapremine palih oborina. Vremenski interval za koji se ovaj proračun vrši može biti nekoliko desetina minuta ili nekoliko časova (pljusak), jedan dan, mesec, sezona, godina.

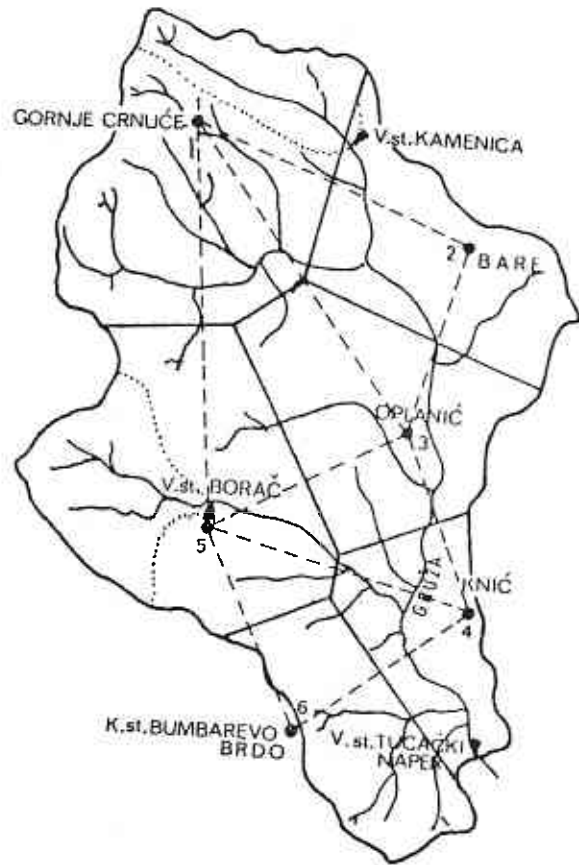
Za određivanje zapremine pale vode i prosečne (ekvivalentne) visine padavina, koriste se sledeće metode: a) aritmetička sredina, b) Thiessen-ovi poligoni, c) izohijete, d) hipsometrijski metod i e) metoda padavinskih površi. Poslednje dve metode su predložene u novije vreme i o njima neće biti govora na ovom mestu; principi ovih metoda, kod kojih se uzima u obzir topografija sliva, se mogu videti u članku Anđelića i Radića (1985.) kao i u publikacijama Svetske meteorološke organizacije (WMO).

a) Metoda aritmetičkih sredina se svodi na

$$P = \sum_{i=1}^n P_i/n \quad (2.36)$$

gde je: P_i visina kiše zabeležena na i -toj stanici, a n je broj stanica u slivu (i oko nje-ga). Zapremina pale vode je $V_p = P \cdot A$, gde je A površina sliva.

b) Metodu poligona je predložio američki hidrolog Thiessen još 1911. godine. Princip konstrukcije poligona je pokazan na sl. 2.20, dok je način proračuna prosečne godišnje visine padavina na slivu reke Gruže do profila Tučački naper pokazan tabelom 2.11. Ovde je a (km^2) površina poligona, $A = 318,0 \text{ km}^2$ ukupna površina sliva, dok suma ponderisanih vrednosti u koloni (5) daje prosečnu visinu (mm).



Sl. 2.20 Tisenovi poligoni

Tabela 2.11

Kišomer no	P_{god} (mm)	a (km^2)	a/A	(5) = (2) · (4)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	814	82,9	0,26	212,2
2	696	41,1	0,13	90,0
3	708	54,0	0,17	120,2
4	708	30,1	0,09	67,0
5	661	76,7	0,24	159,4
6	692	33,2	0,10	72,3
SUMA		318,0	1,00	721,1

$$P = \sum_{i=1}^n P_i(a_i/A) \quad (2.37)$$

Vrednosti u koloni (2) se mogu shvatiti kao izmerene visine padavina u konkretnoj godini, ili kao višegodišnji prosek za datu stanicu. Metoda je pogodna za slučaj da se ne menja broj (i lokacija) stanica u dužem periodu vreme-



Sl. 2.21 Karta izohijeta prosečnih godišnjih visina padavina na teritoriji Jugoslavije (mm), (prema Đorđeviću, 1961.)

na. Ako su sve stanice u slivu uvek operative, prosečna visina P i zapremina $V_p = P \cdot A$ se mogu odrediti po (2.37) za pljusak, mesec, godinu, a da se iznova ne konstruišu poligoni. Iz ovog razloga je ova metoda u širokoj upotrebi, mada metode pod c), d) i e) daju pouzdanije rezultate.

c) Izohijete su linije koje spajaju mesta sa istom visinom padavina (vidi sl. 2.21). Konstruišu se na bazi podataka osmatranja visine padavina na kišomernim stanicama, pri čemu se koriste i druge raspoložive informacije (topografske karakteristike, podaci radarskih osmatranja i dr.). Jasno je da ukoliko je mreža kišomernih stanica gušća, utoliko se dobija bolja slika o raspodeli padavina na posmatranoj površini (slivu). Formula za određivanje prosečnih padavina na slivu ima oblik:

$$P = \sum_{i=1}^n a_i P_i / A \quad (2.38)$$

znači kao i (2.37), s tom razlikom što je u (2.38) a_i površina ograničena izohijetama i i $i + 1$, $P_i = (P_i + P_{i+1})/2$ (srednja vrednost visine dveju susednih izohijeta) dok je n ukupan broj elementarnih površina a_i . Metoda izohijeta je daleko pouzdanija od prethodne dve metode (naročito za planinska područja) ali zahteva više rada i veći broj stanica.

Na sl. 2.21 je data karta izohijeta godišnjih padavina na teritoriji Jugoslavije.

2.3.4 Analiza jakih kiša

Pod jakom kišom se podrazumeva kratkotrajna intenzivna oborina trajanja od nekoliko minuta do nekoliko časova. Kao što je to napred pomenuto (odjeljak 2.3.1), zapis pluviografa predstavlja sumarnu liniju pale kiše $P = P(t)$; jedna takva kriva je shematski pokazana na sl. 2.22/a. Intenzitet kiše i u nekom vremenu t je:

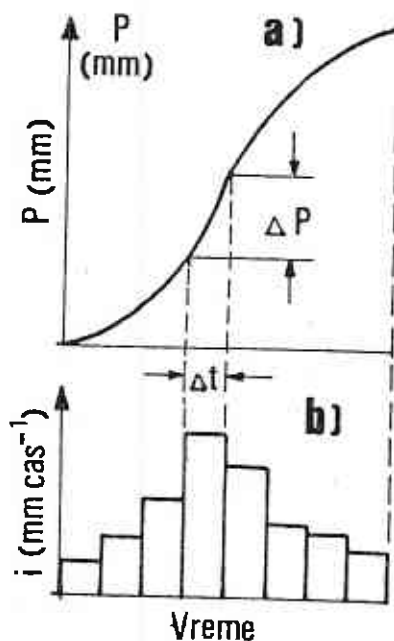
$$i = \frac{dP}{dt} \quad (2.39)$$

(nagib tangente), dok je jednačina sumarne (integralne) linije:

$$P = \int_0^t i dt \quad (2.40)$$

Prosečni intenzitet kiše u konačnom vremenskom intervalu Δt će prema (2.39) biti:

gde je: ΔP prirast visine kiše u vremenu Δt . Grafik intenziteta u funkciji vremena se naziva hijetogram (sl. 2.22/b). U praksi se po pravilu konstruiše u histogramskom obliku, pri čemu intervali diskretizacije Δt mogu biti iste ili različite širine. Ako $\Delta t \rightarrow 0$, dobija se kontinualna linija sa jednačinom (2.39). (diferencijalna kriva).



Sl. 2.22 Sumarna linija pale kiše i hijetogram

Intenzitet kiše se izražava u mm čas^{-1} , mm min^{-1} , mm s^{-1} ili, ls^{-1}ha , pri čemu postoje sledeći odnosi između ovih dimenzija:

$$1 \text{ ls}^{-1} \text{ ha} = 10^{-4} \text{ mm s}^{-1} = 0,006 \text{ mm min}^{-1} = 0,36 \text{ mm čas}^{-1}$$

$$1 \text{ mm s}^{-1} = 10.000 \text{ ls}^{-1} \text{ ha}$$

$$1 \text{ mm min}^{-1} = 166,67 \text{ ls}^{-1} \text{ ha}$$

$$1 \text{ mm čas}^{-1} = 2,78 \text{ ls}^{-1} \text{ ha}$$

2.3.4.1 Primarna obrada podataka osmatranja

Krajnji cilj analize jakih kiša je da se dobije zavisnost intenzitet (ili visina) – trajanje – povratni period kiše ($I_t T$ – krive). Verovatnoća pojave kiša različitog intenziteta je važna kod ocene velikih voda sa manjih slivova gde nisu vršena osmatranja, merodavnih voda za projektovanje kišne kanalizacije u urbanim sredinama, itd.

Primarnom obradom pluviografskih traka se dolazi do podataka o intenzitetima (visinama) kiše trajanja 5, 10, 15, ..., 60 min, 2, 3, ..., 24 časa. Ovde se, uglavnom, sreću dva problema: 1) izbor donje granice kišnih intenziteta, i 2) definisanje stvarnog trajanja kiše, način tretiranja prekida tokom pljuska i pitanje porekla nepogode. Na ovom mestu se neće ulaziti u gore navedene probleme; zainteresovani čitalac se upućuje na odgovarajuću literaturu (Đorđević, 1969, 1977, 1979, 1981; Bonaći, 1984; Hrelja, 1984.). Napominje se da problem donje granice nije od značaja kada se formiraju statističke serije godišnjih maksimuma (10-to minutnih, ..., 1-časovnih, ..., intenziteta ili visina kiše). Ovde se, dakle, uzima samo jedan podatak u toku godine, kao ekstrem za određeno trajanje kiše. Iako se ovaj metod široko (i, uglavnom, uspešno) koristi u praksi, treba naglasiti da ekstrem u jednoj godini može biti višestruko prevaziđen tokom neke druge godine, a ti se podaci odbacuju i ne ulaze u model. Iz toga razloga su razvijene i druge metode u kojima se za analizu koristi više vrednost (u toku jedne godine) iznad određenog praga. Što se tiče problema prekida tokom pljuska, kiša dužeg trajanja, u jednoj tački šireg područja, može prestajati više puta, ali to ne mora biti razlog da se ovakav događaj posmatra kao dve ili više kišnih epizoda. Sa hidrološkog aspekta, mali prekidi, zbog inercije sliva, nemaju uticaja na oblik hidrograma oticaja. Ostaje otvoreno pitanje koliki se prekid može tolerisati da bi se kiša tretirala kao jedna kišna epizoda. Ovo pitanje je očigledno povezano sa veličinom sliva.

Kada se ne raspolaže pluviografskim osmatranjima, u inženjerskoj praksi se često koriste podaci o dnevnim visinama padavina, koje se mere sa običnim kišomerima. Iako je potpuno jasno da ovako dobijena „dnevna” visina kiše može poticati od pljuska koji je trajao samo 20 min, postoji tendencija kod nekih obrađivača da takve kiše proglase 24-časovnim kišama. Jovanović i Savić (1980) su za KS Kragujevac i Kraljevo analizirali serije maksimalnih dnevnih kiša, za koje se raspolagalo informacijama o njihovom stvarnom trajanju. Za Kragujevac, za seriju $N = 18$ (god) je dobijeno srednje trajanje „dnevne” kiše od 8,55 časova (standardna devijacija $S = 7,25$ čas) a za drugu stanicu je srednje trajanje 12,57 čas ($S = 7,73$ čas) za seriju godišnjih maksimuma obima $N = 24$. U prvom slučaju gustina verovatnoće trajanja kiše ima oblik J – krive (troparametarska gama – raspodela) dok u drugom, dijagram empirijske frekvencije sugerise na ravnomernu raspodelu; drugim rečima, ovde je svako trajanje (od 1 do 24 časa) podjednako verovatno.

Do sličnih rezultata je došao Brajković (1983). Zelenhasić (1983) je na primeru dnevnih kiša u Beogradu pokazao kako treba da izgleda rezultat primarne obrade podataka osmatranja dnevnih padavina (za period od 1888. do 1976). On je kao „referentni nivo” (prag) uzeo 25 mm i sa tim uslovom se

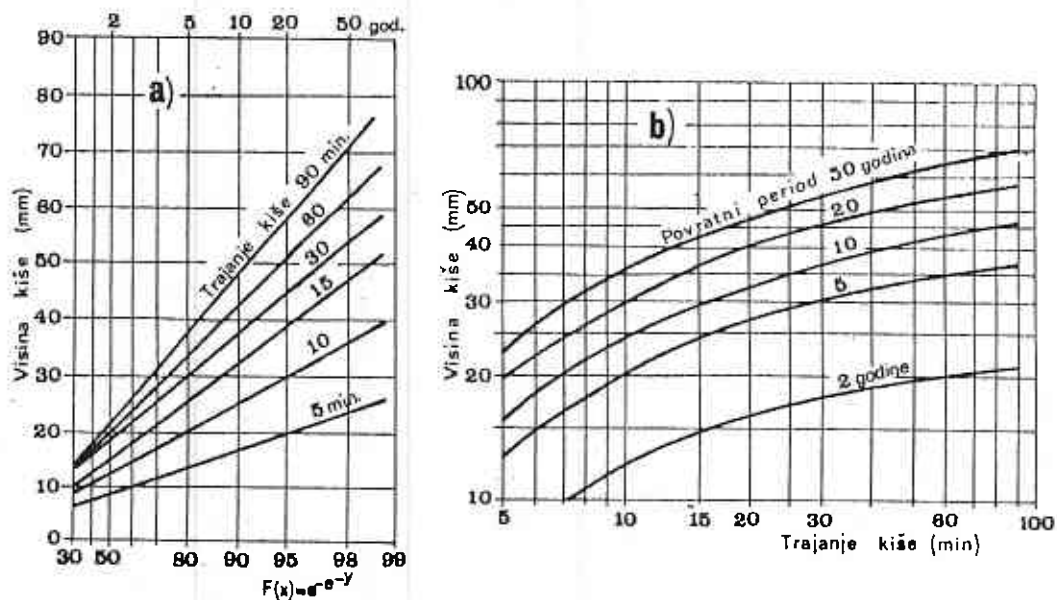
broj jakih kiša većih od 25 mm u godini kretao od 0 do 7. Međutim, on je te kiše nazvao „24-časovni pljuskovi“, što, obzirom na gore izloženo, nije korektno.

2.3.4.2 Metode proračuna

Kao rezultat primarne obrade pluviografskih traka, dobija se pregled (tabela) visina kiše, za razna trajanja pljuska (10, 20, 30, ... min). Zadatak sekundarne obrade je da se primenom jedne od statističkih metoda definiše zavisnost $I_t T$. Od više metoda koje se koriste u praksi, na ovom mestu se pominju metoda godišnjih maksimuma i metoda pikova (naziva se još: metoda pragova ili analiza POT-serija; POT = Peaks over a Threshold).

Metoda godišnjih maksimuma. Ovde se formiraju serije (uzorci) čiji su elementi godišnji maksimumi kiša određenog trajanja. Prema tome, obim svakog uzorka odgovara broju godina osmatranja. Za svaku seriju se radi empirijska funkcija raspodele i izračunavaju statistike \bar{X} , S_x , C_v , C_s (vidi poglavlje 2.12). U sledećem koraku se bira teorijska funkcija raspodele verovatnoće koja najbolje aproksimira empirijsku raspodelu (primena testova saglasnosti). U praksi se često koriste troparametarske Pearson-3 i log-Pearson-3 raspodele. Pošto su ovde u pitanju retki događaji i kako je u pitanju izučavanje ekstremnih slučajeva (male verovatnoće javljanja), koristi se i teorija ekstremnih vrednosti (Đorđević, 1986). Ovde se, praktično, radi o primeni Gumbelovog i Jenkinsonovog zakona raspodele. Na sl. 2.23/a su nanete funkcije raspodele verovatnoće po Gumbelu koje su određene na osnovi serija godišnjih jakih kiša trajanja od 5 do 90 min. za kišomernu stanicu Beograd-Vračar (1925–1975. god.) (prema Đorđeviću, 1977). Na bazi ovih analiza su dalje, konstruisane zavisnosti $P_t T$ – sl. 2.23/b. Detalji standardne računске procedure sa primenom Pearson-3 raspodele se mogu videti kod Jovanovića i Radića (1987) i kod Zelenhasića (1979) gde je korišćena log-Pearson-3 raspodela.

Kanali kišne kanalizacije nižeg reda se obično projektuju na maksimalne protoke malog povratnog perioda (1 do 2 godine). Problem određivanja merodavnih kiša u ovakvim slučajevima se može rešiti i korišćenjem empirijskih raspodela kiša odgovarajućeg trajanja, pod uslovom da se raspolaze uzorkom obima $N > 50$ (god.). Ako je obim uzorka mali, u praksi su se rani-



Sl. 2.23 Funkcije raspodele verovatnoće jakih kiša trajanja od 5 do 90 min. i odgovarajući dijagram: visina - trajanje - povratni period (k.s. Beograd-Vračar)

je koristile empirijske i kvazi-statističke metode koje, pored toga što su podložne subjektivnim ocenama, nisu čvrsto zasnovane na principima matematičke statistike. S druge strane, teorija ekstremnih vrednosti daje pouzdane rezultate samo za pojave male verovatnoće javljanja. Jovanović i Vukmirović (1979) su prikazali dve metode koje nisu opterećene navedenim nedostacima: metoda kod koje se određuju kvantili serija godišnjih maksimuma i analiza POT-serija.

Kvantili su vrednosti promenljivih koje dele uređeni uzorak $(x_i; i = 1, 2, \dots, N)$ na 4 jednaka dela. Ako su X_1, X_2 i X_3 kvantili, tada je $F(X_1) = 0,25, F(X_2) = 0,50$ i $F(X_3) = 0,75$, gde je $F(X)$ funkcija raspodele. Srednja vrednost kvantila $QM_j (j = \overline{1,4})$ je prosek vrednosti elemenata x_i između dva kvantila. Na primer, ako je obim uzorka N , i ako je N deljivo sa 4, onda je ocena srednje vrednosti drugog kvantila

$$QM2 = (1/N) 4 \sum_{i_1}^{i_2} x_i \quad (2.42)$$

gde je: $i_1 = (N/4) + 1$, a $i_2 = N/2$, i uzorak je uređen po rastućim vrednostima $(x_1 < x_2 < \dots < x_N)$.

Pored srednjih vrednosti kvantila $QM1, QM2, QM3$ i $QM4$, izračunavaju se geometrijska sredina srednje polovine

$$G1 = \sqrt{QM2 \cdot QM3} \quad (2.43)$$

i geometrijska sredina gornje polovine:

$$G2 = \sqrt{QM3 \cdot QM4} \quad (2.44)$$

Povratni periodi koji u serijama godišnjih maksimuma odgovaraju veličinama QM_j i GK navedeni su u koloni (2) tabele 2.12. Radi nanošenja vrednosti i za QM_j i GK na dijagram Gumbelove verovatnoće, koristi se Gumbelova standardizovana promenljiva:

$$y = -\ln \ln \frac{T-1}{T} \quad (2.45)$$

gde je T povratni period godišnjih ekstrema. Za $T = 0,5$ i 1 godinu se može koristiti poznata veza Langbein-a:

$$TPOT = 0,5 \text{ god.} \rightarrow T = 1,16 \text{ god.}$$

$$TPOT = 1 \text{ god.} \rightarrow T = 1,58 \text{ god.}$$

Sa navedenim korekcijama za T , vrednosti za y su, prema (2.45), date u koloni (3) tabele 2.12. U kolonu (4) iste tabele su unete vrednosti prema Jenkinson-u.

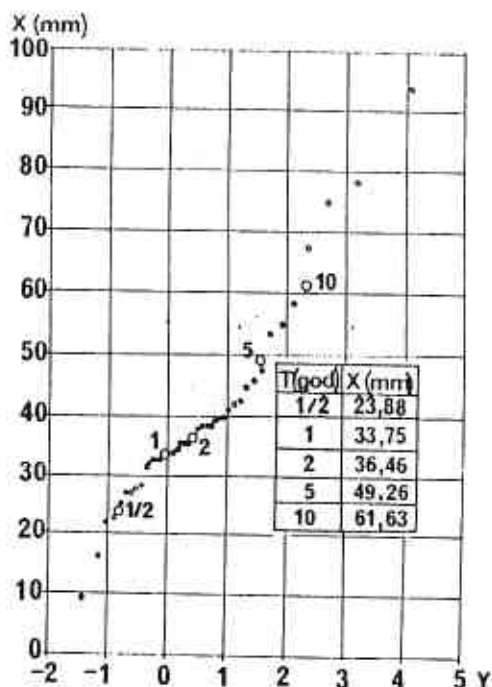
Tabela 2.12

Oznaka	Povr. period T (godina)	Standardizovano y	
		Relacija (2.45)	Jenkinson ($N \approx \infty$)
(1)	(2)	(3)	(4)
QM1	0,5	-0,68	-0,80
QM2	1,0	-0,002	0,02
QM3	-	-	0,77
G1	2	0,37	0,40
G2	5	1,50	1,55
QM4	10	2,25	2,32

Empirijske tačke se takođe mogu naneti pomoću (2.45) s tim što se uzima $T = 1/(1-F(x_m))$, gde je $F(x_m) = (m-0,31)/(N+0,38)$ – kumulativna frekvencija m -tog elementa serije $\{x_i\}$ uređene po rastućim vrednostima.

Na sl. 2.24 je naneta empirijska funkcija raspodele serije maksimalnih dnevnih padavina u godini za KS Pančevo kao i vrednosti za QM_j i GK . Zanimljivo je da ova veoma ekspeditivna metoda za određivanje vrednosti promenljive X malog povratnog perioda, nije kod nas našla širu primenu u praksi.

Primer. U tabeli 2.13 je data godišnja serija maksimalnih dnevnih padavina (uređeni niz) za 22 godine osmatranja na jednoj kišomernoj stanici. Pošto niz nije deljiv sa 4, pokazan je način podele ovog niza na kvartile. Svaka vrednost u nizu je uzeta četiri puta, pa se tako dobija 88 vrednosti, koje su podeljene na grupe od po $N = 22$ vrednosti.



Sl. 2.24 Empirijska funkcija raspodele serije godišnjih maksimuma dnevnih padavina. Nanetu su i vrednosti za QM_j i GK za povratne periode iz table 2.12 (KS Pančevo)

Tabela 2.13

m	X		(2) × (3)	Σ (4)	$N = \Sigma$ (3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	30,3	4	121,2		22
2	30,9	4	123,6		
3	31,4	4	125,6		
4	33,4	4	133,6		
5	34,0	4	136,0		
6	34,5	2	69,0	708,8	
7	35,0	4	140,0		22
8	35,6	4	142,4		
9	40,0	4	160,0		
10	40,3	4	161,2		
11	41,0	4	164,0		
				836,6	
12	42,5	4	170,0		22
13	42,8	4	171,2		
14	46,1	4	184,4		
15	47,8	4	191,2		
16	48,0	4	192,0		
17	52,2	2	104,4	1013,2	
18	57,6	4	230,4		22
19	59,8	4	239,2		
20	61,0	4	244,0		
21	65,0	4	260,0		
22	75,3	4	301,2		
				1379,2	

Srednje vrednosti kvartila iznose:

$$\begin{aligned}
 QM1 &= 708,8/22 = 32,2 \\
 QM2 &= 836,6/22 = 38,03 \\
 QM3 &= 1013,2/22 = 46,05 \\
 QM4 &= 1379,2/22 = 62,69
 \end{aligned}$$

Geometrijska sredina srednje polovine:

$$G1 = \sqrt{38,03 \cdot 46,05} = 41,85$$

Geometrijska sredina gornje polovine:

$$G_2 = \sqrt{46,05 \cdot 62,69} = 53,73$$

Na osnovi tabele 2.12 imamo:

Povratni period (god.)	P dnevno (mm)
0,5 (dva puta godišnje)	32,2
1 (1 put godišnje)	38,03
2 (1 put u 2 god.)	41,85
5 (1 put u 5 god.)	53,73
10 (1 put u 10 god.)	62,69

Osnovna zamerka metodi godišnjih maksimuma je što se prilikom formiranja statističke serije uzima samo po jedan podatak godišnje, čime se zanemaruju ostali maksimumi koji često mogu biti znatno veći nego maksimalne vrednosti u nekarakterističnim godinama. *Metoda pikova* obuhvata analizu svih maksimalnih vrednosti većih od neke bazne vrednosti (praga) X_b . Teorijske osnove metode pikova pomoću slučajnih prekidnih procesa je postavio Todorović (1970). Slučajni proces se definiše izrazom:

$$\chi(t) = \sup_{\tau_v \leq t} \xi_v, \quad \xi = X - X_b \quad (2.46)$$

$$\tau_v \leq t; \quad v = 1, 2, \dots$$

Proces (2.46) se može opisati pomoću funkcije raspodele verovatnoće

$$F_t(x) = P(\chi(t) < x) \quad (2.47)$$

Da bi se izračunala funkcija (2.47), potrebno je da se prethodno analiziraju dve slučajne pojave:

- 1) broj javljanja pikova (kiša većih od X_b) u intervalu $(0, t)$, i
- 2) visine pikova.

Kod ove metode se izbor bazne vrednosti X_b obavlja korišćenjem određenih kriterijuma i nije zadat unapred.

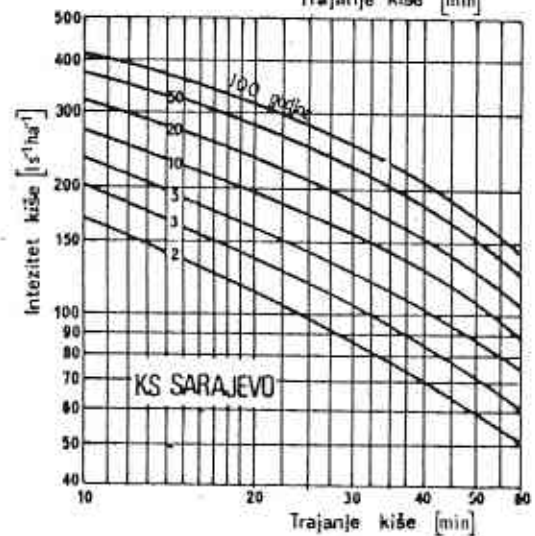
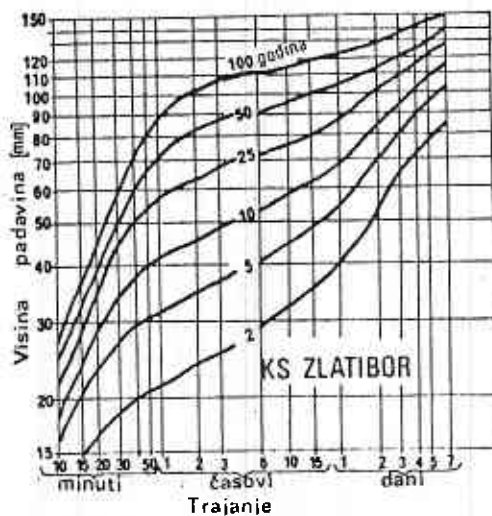
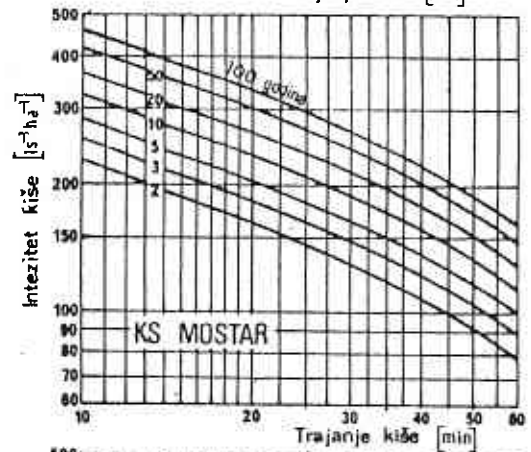
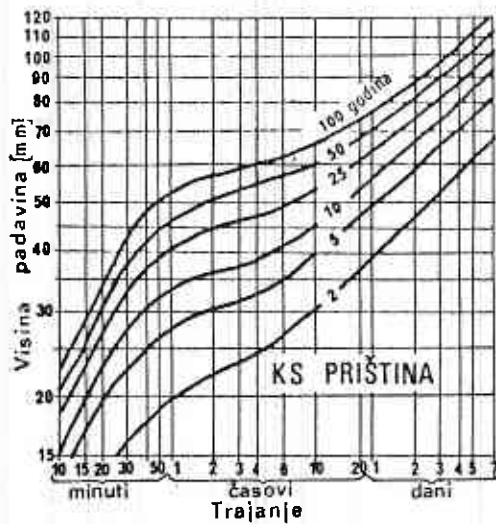
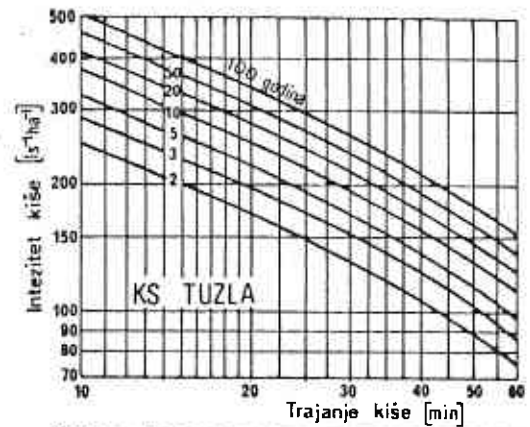
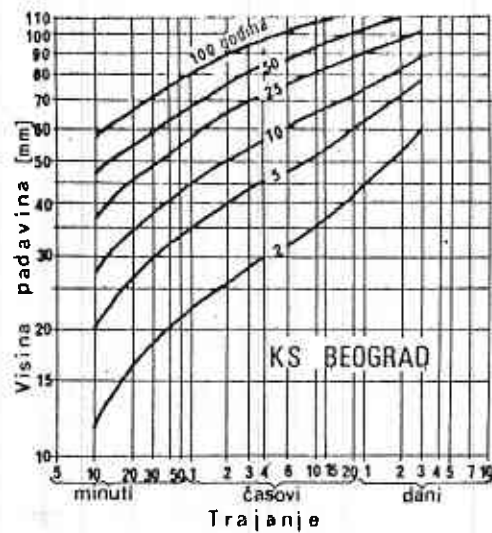
Pomenuta metoda pruža mogućnost da se iz podataka osmatranja izvuče više informacija nego bilo koja druga metoda. Može se primeniti za analizu raznih geofizičkih veličina koje imaju izraženu slučajnu komponentu kao što je kretanje vučenog nanosa, pojava jakih kiša ili velikih voda itd. U stvari, začetak ove metode i prve teorijske osnove su postavili Todorović i Vukmirović 60-ih godina, kada su činjeni pokušaji da se za stohastički proces: pređeni put pojedinih čestica vučenog nanosa, odredi funkcija raspodele verovatnoće. Prve rezultate ovih istraživanja su Vukmirović i Todorović objavili 1963., zatim Vukmirović i ostali (1964), Todorović i ostali (1966), Vukmirović i Jovanović (1967). Kasnijih godina je razvijena metoda za analizu velikih voda (Zelenhasić, 1970; Todorović i Zelenhasić, 1970). i jakih kiša (Vukmirović, 1976; Zelenhasić, 1979). U novije vreme se pojavila monografija Zelenhasića (1983), dok je Hrelja (1984) pokazao primenu ove metode za analizu jakih kiša u Tuzli, Mostaru i Sarajevu, i dobijene rezultate uporedio sa metodom godišnjih maksimuma.

Ovde treba napomenuti da u domenu većih povratnih perioda dve metode daju iste rezultate. Hrelja (1984) je ustanovio da familije $It_k T$ krivih dobijene po dve metode, imaju praktično isti oblik. Prednost metode pikova je u tome što daje tačnije rezultate u domenu malih povratnih perioda (Jovanović i Vukmirović, 1979), što se, pored raspodele verovatnoće visine pikova, dobija i raspodela broja javljanja, itd.

2.3.4.3 Zavisnosti: visina (intenzitet) – trajanje – povratni period kiše

Procedura koja se koristi radi dobijanja ove zavisnosti je pokazana na sl. 2.23. Obično se uzimaju sledeći povratni periodi: 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina, mada pojedini autori, s pravom, ne prikazuju rezulta-

te za povratne periode preko 100 godina. Visine kiša povratnih perioda 0,5 i 1 godine se dobijaju pomoću metode kvartila ili metodom pragova. Vrednosti za visine određenog trajanja i povratnog perioda se nanose na dijagram sa logaritamskim podelama, pri čemu je visina na ordinati, a trajanje kiše na



Sl. 2.25 Zavisnosti: visina - trajanje - povratni period kiše za stanice Beograd, Priština i Zlatibor i zavisnosti: intenzitet - trajanje - povratni period za stanice Tuzla, Mostar i Sarajevo.

apscisi. Kriva linija koja odgovara određenom povratnom periodu se dobija interpolacijom (ručno). Na sl. 2.25 su pokazani rezultati nekih obrada. Zavisnosti $P(t_k, T)$ za Beograd, Prištinu i Zlatibor su izradili Zelenhasić i ostali (1979), a krive za kišomerne stanice Tuzla, Mostar i Sarajevo, Hrelja (1984). Neujednačenost krivih za prve tri lokacije verovatno potiče iz prethodno pomenutih problema o određivanju stvarnog trajanja kiše.

Bonacci i Stupalo (1979) su izvršili analizu jakih kiša za Split, Knin i Zadar. Ovim problemom su se bavili i drugi autori u našoj zemlji.

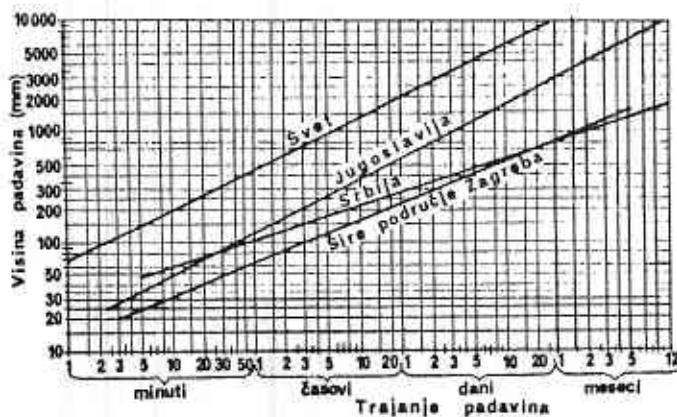
Obzirom na značaj koji imaju analize jakih kiša u inženjerskoj praksi, Savezni hidrometeorološki zavod je pokrenuo akciju da se za sve pluviografske stanice u zemlji koje rade duže od 10 godina, izvrši primarna i sekundarna obrada jakih kiša po jedinstvenoj metodologiji. Ovaj posao, koji je započeo 1982, nažalost još nije završen.

Budući da je mreža običnih kišomera daleko gušća od mreže automatskih stanica, razrađene su metode koje omogućuju da se za analizu kiša kratkog trajanja koriste podaci o dnevnim maksimalnim visinama kiše. Metoda koju je predložio Aleksejev (1969), a za naše prilike detaljno razradio Petković (1976), sastoji se u konstruisanju tzv. bezdimenzionalnih redukcionih krivih za određena područja. Za pluviografsku stanicu, redukciona kriva je definisana izrazom

$$R(t_k, T) = P(t_k, T) / P(T) \quad (2.48)$$

gde je: $R(t_k, T)$ koeficijent redukcije za kišu trajanja t_k i povratnog perioda T (godina), $P(t_k, T)$ se odnosi na kišu trajanja $t_k < 24$ časa, a $P(T)$ je visina dnevne kiše povratnog perioda T . Za određeni region se može definisati osrednjena redukciona kriva $R(t_k, T)$. Sa poznatom visinom kiše $P(T)$, koja se izračunava za stanicu (u tom regionu) sa dnevnim osmatranjima, moguće je na osnovi (2.48), obrnutim postupkom, odrediti visinu kiše $P(t_k, T)$.

Prilikom analize javljanja jakih kiša, korisno je da se dobijeni rezultati uporede sa najvećim opaženim padavinama u posmatranom regionu. U tu svrhu se najčešće rade anvelope najvećih osmotrenih visina kiše, raznih trajanja. Na sl. 2.26 su date anvelope maksimalnih osmotrenih visina padavina na pojedinim kišomernim stanicama u Jugoslaviji (Marković, 1979), Srbiji (Zelenhasić i ostali, 1978) i za šire područje Zagreba (Bonacci, 1984). Razume se da ovakve anvelope ne mogu da zamene statističke analize padavina u tački, ali one daju ideju o redu veličina, što je naročito od interesa kada se analiziraju padavine



Sl. 2.26 Anvelope najvećih osmotrenih visina kiše

ne male verovatnoće javljanja kao i verovatno maksimalne padavine. Položaj anvelope na sl. 2.26 zavisi od dužine perioda osmatranja. Prema tome, može se očekivati da će se tokom nastupajućeg vremena anvelope pomerati „naviše”.

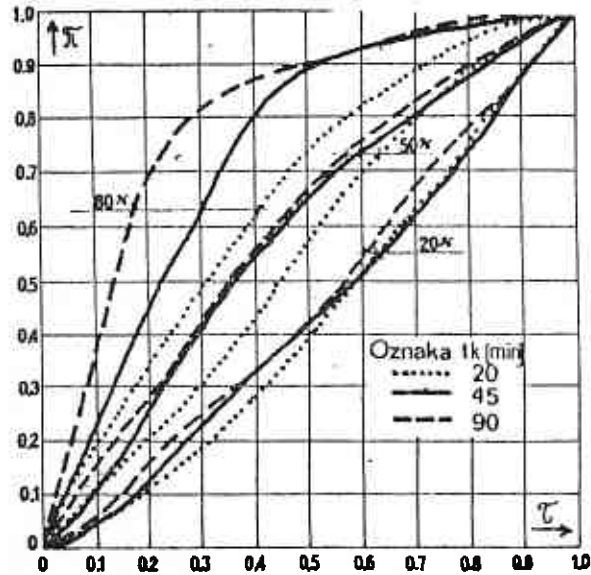
2.3.4.4 Raspodela intenziteta kiša u vremenu

Kada se hidrogram oticaja sa urbane ili prirodne slivne površine izračunava preko padavina, pored intenziteta (visine) kiše određenog trajanja i povratnog perioda, potrebno je poznavati i raspodelu intenziteta (visine) kiše u vremenu.

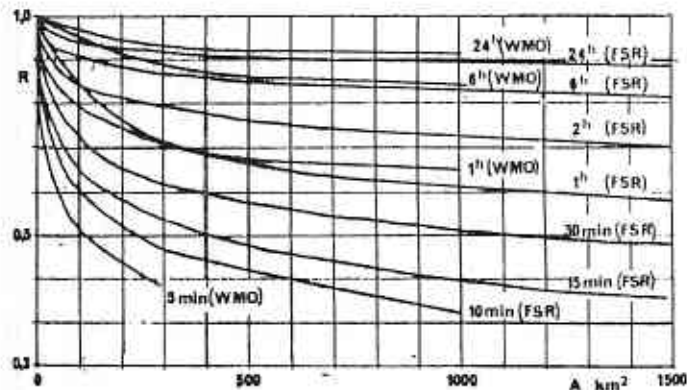
Problem raspodele intenziteta kiše u vremenu se može rešiti statističkim metodama. Na sl. 2.27 su pokazane sumarne linije kiše za tri trajanja (KS Beograd) za razne verovatnoće ne-prevazilaženja, obzirom na oblik date krive (Vukmirović i ostali 1986). Izlazi da je za dato područje, sa odgovarajućom verovatnoćom, moguća svaka raspodela kiše u vremenu. Ukoliko je cilj proračuna da se za datu visinu kiše dobije hidrogram sa maksimalnim vršnim protokom, koristiće se onaj hijetogram koji daje ovakav rezultat. Drugi način se sastoji u tome da se kod proračuna poplavnih talasa, kao model rasporeda kiše u vremenu uzimaju hijetogrami registrovanih pljuskova koji su u prošlosti prouzrokovali poplave na toj lokaciji. Razumljivo je da projektant može, u razumnim granicama, da uzme i druge kombinacije intenziteta (empirijska procedura) i da uporedi dobijene rezultate.

2.3.4.5 Prostorna raspodela jakih kiša

Varijabilnost jakih kiša u prostoru je po pravilu veoma izražena. Obzirom da se napred pokazane analize odnose na tačku (kišomernu stanicu), prilikom proračuna oticaja sa sliva, potrebno je da se izvrši redukcija visine računске kiše, obzirom na njeno trajanje i površinu sliva. Postoji veliki broj grafika i formula koji daju vezu: visina – površina – trajanje ili zavisnosti: redukcioni faktor – površina – trajanje (krive RA_t_k). Na sl. 2.28 su date dve familije krivih RA_t_k . Zavisnosti koje preporučuje Svetska meteorološka organizacija (WMO) su dobijene u SAD za godišnje serije kiša odgovarajućeg trajanja i imaju prosečni povratni period od oko pet godina. Druga familija krivih (označene sa FSR) je dobijena na osnovu analiza podataka o padavinama u V. Britaniji (Flood Studies Report, NE-



Sl. 2.27 Raspodela visine kiše za vreme trajanja kiše (bezdimezionalne sumarne linije za $t_k=20, 45$ i 90 min.). Na slici je $\pi = P/\Sigma P$ i $\tau = t/t_k$.



Sl. 2.28 Krive: redukcioni faktor (R) – površina sliva (A) – trajanje kiše (t_k). WMO – Svetska meteorološka organizacija, FSR – Flood Studies Report (1975).

RC, 1975). Skorin (1983) je za područje grada Zagreba definisao analitički izraz koji daje visinu padavina na slivu P_A , u funkciji visine kiše u centru oluje P_C , njenog trajanja t_k i površine sliva A .

Obzirom da oblik krivih redukcije zavisi od klimatskih i drugih karakteristika regiona nije preporučivo da se nekritički koriste zavisnosti koje su dobijene za udaljena područja. Tehniku koja se za ove analize upotrebljava u Engleskoj je prikazala E. Shaw (1983).

Kod korišćenja RA_{t_k} krivih se polazi od pretpostavke da je stanica (tačka) za koju se raspolaže sa zavisnosti intenzitet – povratni period – trajanje kiše, u centru oluje. Za poznatu površinu sliva i za dato trajanje kiše t_k , sa dijagrama se očitava vrednost redukcionog faktora R , pa je $P_A = R \cdot P_C$, gde je P_C računski kiša u tački trajanja t_k .

2.3.4.6 Verovatno maksimalne padavine (VMP)

Pod nazivom „verovatno maksimalne padavine” (VMP) se podrazumeva teorijski najveća količina padavina za određeno trajanje koja je fizički moguća iznad neke slivne površine u pojedinim delovima godine. Za ocenu VMP se koriste dva metoda: 1) deterministička (fizička) i 2) statistička metoda.

1) U prvom slučaju se VMP određuju kombinacijom teorijskih i empirijskih prikala. Tehnika za ocenu VMP uslovljava, ovde, da se maksimizira: a) sadržaj vlage u atmosferi iznad sliva, b) transport vlage u posmatrani region (advekcija vlage) i c) realne kišne epizode koje su se desile u oblasti koja se posmatra.

a) Pod pretpostavkom da su procesi u atmosferi pseudoadijabatski (tj. da nema ni odvođenja ni dovođenja toplote na jednom širem području), sadržina vodene pare se menja kao i tačke rose – t_d . Prema tome, preko promene tačke rose sa visinom može se odrediti sadržina vlage u atmosferi. Ako postoji dovoljno dugi niz merenja, ekstremne vrednosti tačke rose određuju anvelopu sa koje se uzimaju vrednosti t_d za dalje analize.

b) Vrednost vodnog potencijala preko maksimalne tačke rose u atmosferi se ne može posmatrati statično, pošto se vrši advekcija vlage. Drugi korak procedure je, prema tome, baziran na transportu vlažnosti u tu oblast. Glavni transporter vlage je vetar, čime se dobija realno stanje fluksa vlažnosti. Određuje se, dakle, anvelopa maksimalnih brzina vetra. Ukupna količina vlažnosti koja se donosi u region izražava se *indeksom vlažnosti* I_p koji se dobija kao proizvod između brzine vetra i sadržine vode u atmosferi (kišnog potencijala).

c) Na kraju, odabiraju se kišne epizode koje su približno rezultat ekstremnih uslova za stvaranje kiše. Određuju se karte izohijeta i karakteristični hijetogram. Maksimalni hijetogrami (za VMP) se dobijaju na bazi realnih kišnih epizoda, uz pomoć faktora maksimizacije – r . Tako na primer, za sliv r. Gruže je za kišu koja je osmotrena maja 1929. god. ($P = 116$ mm) izračunat (stvarni) indeks vlažnosti I_p kao proizvod kišnog potencijala (31 mm) i brzine vetra pri toj nepogodi (9 m s^{-1}) $I_p = 9 \cdot 31 = 280 \text{ m s}^{-1}$ l. Za to područje je dobijena vrednost maksimalnog indeksa vlažnosti $I_m = 1100 \text{ m s}^{-1}$ l (kao proizvod maksimalnog kišnog potencijala i maksimalne ustaljene 12-časovne brzine vetra), pa je faktor maksimizacije $r = I_m / I_p = 1100 / 280 = 3,93$. Sa prosečnom visinom kiše na slivu Gruže ($A = 318 \text{ km}^2$) od maja 1929. god. se dobija VMP = $r \cdot P = 3,93 \cdot 116 = 456$ mm. Na isti način je za kišu od 21. maja 1967. ($P = 78$ mm) dobijeno $r = 5,2$ i VMP = 400 mm.

U tabeli 2.14 se navode rezultati proračuna VMP za nekoliko slivova u SR Srbiji.

Tabela 2.14 - VEROVATNO MAKSIMALNE 24-ČASOVNE PADAVINE I FAKTORI MAKSIMIZACIJE

Reka	Profil	Površina sliva (km ²)	24-čas VMP (mm) (za sliv)	r
Beli Rzav	Kruščica	18,5	330	
Ribnica	Paštrić	104	305	2,3-3,0
Detinja	Vrutci	140	297	2,8-4,2
Veternica	Barje	233	271	7
Gruža	Tuc. Naper	318	400	3,9-5,2
Lepenac	Firaja	219	315	2,6-2,7
Toplica	Selova	349	268	4,7

Detaljnije informacije o determinističkom pristupu se mogu videti u publikaciji Svetske meteorološke organizacije (1973) i kod Đorđevića (1986).

2) Statistički metod se koristi za brzu i orijentacionu ocenu VMP u situacijama kada se ne raspolaze podacima merenja tačke rose i brzine vetra.

Procedura koju je razvio i kasnije modifikovao Hershfield (1961, 1965) je bazirana na generalnoj jednačini:

$$X(T) = \bar{X}_n + K(T) \cdot S_n \quad (2.49)$$

gde je: $X(T)$ padavine povratnog perioda T godina, $K(T)$ odgovarajući faktor verovatnoće, \bar{X}_n i S_n su srednja vrednost i standardna devijacija serije od n godišnjih maksimuma. Ako se u (2.49) $X(T)$ zameni sa X_m , gde je X_m najveća opažena kiša na stanici, i \bar{X}_n i S_n izračunavaju bez vrednosti za X_m , može se odrediti vrednost K_m koja odgovara izuzetno jakim kišama na toj stanici. Na osnovi podataka o 24-časovnim ekstremnim kišama za oko 2600 stanica (poglavito na teritoriji SAD) utvrđena je najveća vrednost $K_m = 15$. Kasnija istraživanja kiša trajanja kraćeg od 24 časa su pokazala da je maksimalna vrednost za K_m reda 20.

Svetska meteorološka organizacija (SMO) je 1973. izdala uputstva za proračun VMP (WMO, 1973). U odeljku koji se odnosi na tzv. statističku ocenu VMP se, uz zadržavanje osnovne ideje Hershfield-a, preporučuje procedura koja bi trebalo da poveća tačnost proračuna VMP. Ovde se uvode korekcije za \bar{X}_n i S_n u vezi sa obimom uzorka i postojanja izuzetnih vrednosti u seriji zabeleženih kiša (outlier), kao i korekcija obzirom na termine u kojima se (u toku dana) vrše osmatranja padavina.

V. Marković (1986) je po statističkoj metodi SMO izvršio proračun VMP za stanice koje su bile merodavne za proračun VMP za slivove iz tabele 2.14. Dobio je $K_m = 17,3 - 17,8$. Da bi odredio K_{max} , on je za iste stanice koristio rezultate proračuna VMP pomoću determinističke metode - VMP(d):

$$K_{max} = (VMP(d) - \bar{X}_n) / S_n \quad (2.50)$$

gde su: \bar{X}_n i S_n napred pomenute statistike godišnjih serija maksimalnih dnevnih padavina. Ova analiza je pokazala da se za stanice u rejonu posmatranih slivova vrednosti za K_{max} kreću u granicama od 17 do 21,6, u proseku 20. Prema tome, za tačku se može napisati:

$$VMP = X_n + 20 S_n \quad (2.51)$$

Da bi se dobila orijentaciona vrednost verovatnih maksimalnih padavina za sliv površine A , treba, dalje, koristiti zavisnost RAt_k (poput one na sl. 2.28) koja je izrađena za posmatrani region.

2.3.5 Suše

Pod sušom se podrazumeva period vremena u kome se javlja manja visina padavina u odnosu na količinu koja se očekuje u datom klimatu. Fenomen suše, sa gledišta javljanja određenog broja beskišnih dana, analiziran je od strane K. Milosavljević (1951).

Jovanović i Đorđević (1974) su, koristeći Markovljev model suše, ispitivali različite aspekte pojave sušnih i kišnih epizoda. Pod pretpostavkom da pojava kiše nekog dana zavisi samo od toga da li je prethodni dan bio kišan ili sušan, može se definisati Markovljev lanac čiji su parametri dve uslovne verovatnoće:

$$\begin{aligned} p_1 &= P(x_k = 1 \mid x_{k-1} = 1) \\ p_0 &= P(x_k = 0 \mid x_{k-1} = 0) \\ k &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.52)$$

gde je: sa 1 označena pojava kišnog, a sa 0 beskišnog dana.

Sušni period trajanja m dana je definisan kao niz od m sušnih dana, kojima prethodi, odnosno koje sledi jedan kišni dan. Na sličan način je definisan kišni period trajanja k dana. Vremenski ciklus dužine n dana se sastoji od jednog sušnog i jednog kišnog perioda. Ako se sa Y označi trajanje sušnog, a sa X trajanje kišnog perioda, onda su verovatnoće:

$$P(y = m) = p_0 \cdot (1 - p_0)^{m-1} \quad (2.53)$$

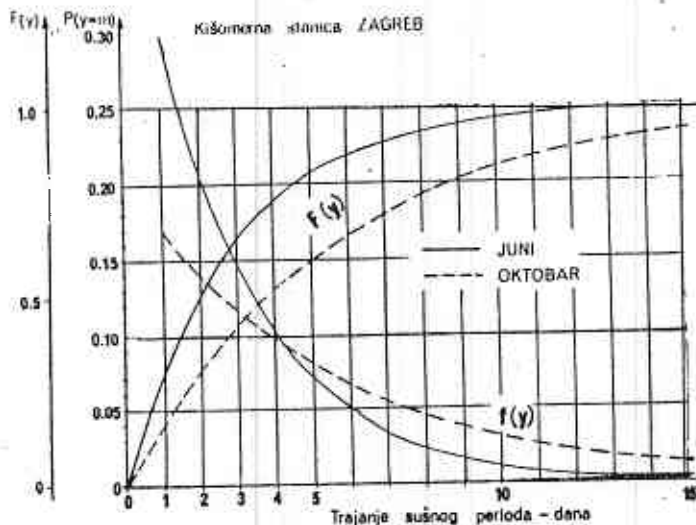
$$P(x = k) = (1 - p_1) p_1^{k-1} \quad (2.54)$$

Očekivanje i varijansa raspodele (2.53) su:

$$E(y) = 1/p_0 \text{ i } \text{Var}(y) = (1 - p_0)/p_0^2 \quad (2.55)$$

a raspodele (2.54):

$$E(x) = 1/(1 - p_1) \text{ i } \text{Var}(x) = p_1/(1 - p_1)^2 \quad (2.56)$$



Sl. 2.29

Verovatnoća vremenskog ciklusa od n dana je:

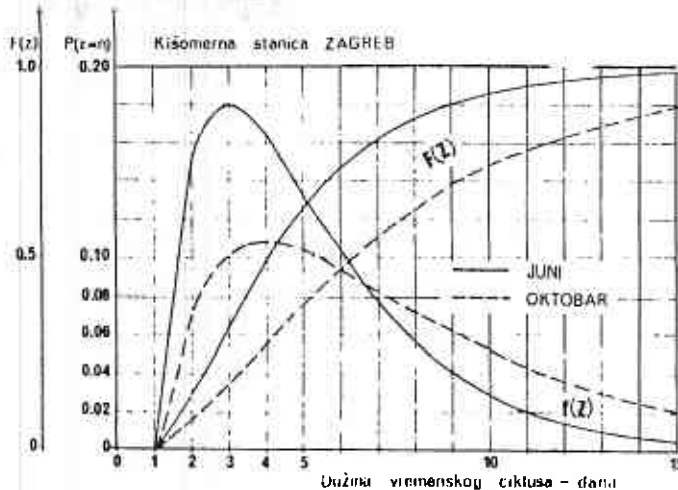
$$\begin{aligned} P(z = n) &= p_0(1 - p_0) \\ &[(1 - p_0)^{n-1} - p_1^{n-1}] / \\ &(1 - p_0 - p_1) \end{aligned} \quad (2.57)$$

sa očekivanjem

$$\begin{aligned} E(z) &= E(y + x) = \\ &= E(y) + E(x) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Koristeći podatke o dnevnim merenjima količine padavina u Zagrebu i Vrnjačkoj Banji, određene su uslovne vero-

vatnoće p_0 i p_1 za 12 meseci u godini. Pri tome, svaki dan u kome je palo više od 0,5 mm kiše, smatran je kišnim danom. Na sl. 2.29 su za KS Zagreb pokazane krive gustine verovatnoće $f(y)$ i funkcije raspodele $F(y)$ trajanja sušnog perioda za mesece juni i oktobar, a na sl. 2.30 verovatnoća trajanja vremenskog ciklusa od n dana za iste mesece.



Sl. 2.30

2.4 FIZIČKE KARAKTERISTIKE SLIVA

Površina i pad sliva, njegov oblik, gustina rečne mreže, zatim tipovi vegetacije, karakteristike zemljišta i drugi fizički faktori, utiču na odgovor sliva, odnosno oblik hidrograma oticaja u kišnom i beskišnom periodu.

2.4.1 Površina i oblik sliva

Sliv je površina u prirodi ili urbanoj sredini koju drenira sistem međusobno povezanih tokova, tako da se oticaj sa te površine javlja na jednom izlaznom profilu. Sliv omeđuje *vododelnica* koja ga deli od susednih slivova. *Topografska vododelnica* sledi tačke sa najvećom nadmorskom visinom između dva sliva. *Geološka vododelnica* i odgovarajuća površina sliva se mogu razlikovati od topografske. Mada se, striktno govoreći, ove dve vododelnice nikad ne poklapaju u potpunosti, u nekim situacijama (karstni regioni) razlike mogu biti drastične.

Postoji veza između površine sliva A i dužine glavnog toka L . Gray (1961) je na osnovi eksperimentalnih podataka izveo relaciju:

$$L = 1,31 \cdot A^{0,568} \quad (2.59)$$

gde je A u km^2 i L u km .

Na osnovi (2.59) može se napisati:

$$R_f = \frac{A}{L^2} = \frac{1}{1,72} A^{-0,136} \quad (2.60)$$

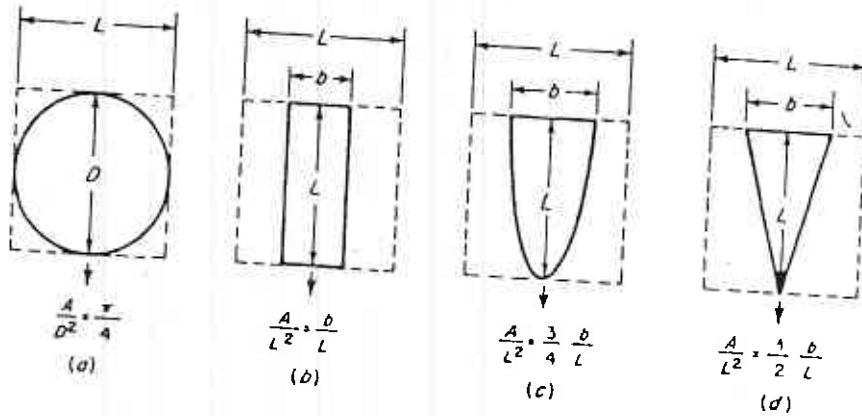
gde je: R_f faktor oblika sliva. Izraz (2.60) ukazuje da slivovi različitih površina nemaju sličan oblik. Drugim rečima, kako raste površina, vrednost faktora A/L^2 opada što znači da se kod većih slivova javlja tendencija da budu srazmerno duži od malih. Ovo je, za nekoliko karakterističnih oblika slivova, pokazano na sl. 2.31 (Eagleson, 1970).

Za geometrijski slične slivove, odnos (2.60) postaje $A/L^2 = 1/3$.

2.4.2 Hidrografska mreža

Kada je sliv jasno definisan na topografskoj karti, najmanje pritoke predstavljaju pritoke 1. reda. Posle spajanja dve pritoke prvog reda, formira

se segment drugog reda itd. Ovo je pokazano na sl. 2.32. Odnos broja segmenata datog reda N_u sa brojem segmenata višeg reda N_{u+1} se, prema Horton-u, naziva *odnos bifurkacije* R_b :



Sl. 2.31 Efektivna površina sliva, $A = mbL$.



Sl. 2.32 Način označavanja reda tokova u slivu

$$R_b = N_u / N_{u+1} \quad (2.61)$$

Horton je našao da N_u u jednom slivu sa tokom najvišeg reda k zavisi od R_b :

$$N_u \cong R_b^{(k-u)}; 1 \leq u \leq k \quad (2.62)$$

Na osnovi analiza slivova u SAD prosečna vrednost odnosa R_b je 3,5, dok je teorijski najmanja vrednost 2. Najčešće: $3,0 \leq R_b \leq 5,0$. Izduženi slivovi (mala vrednost odnosa A/L^2 iz (2.60)) imaju visoku vrednost za R_b i proizvode razvučene poplavne talase. Slivovima čiji se oblik približava onom sa sl. 2.31/a odgovara mala vrednost R_b i kod njih se javlja oštar pik. O ovome će biti reči u odeljku 2.6.3.2.

Srednja dužina tokova reda u je:

$$\bar{L}_u = \frac{\sum_{i=1}^N L_u}{N_u} \quad 2.63$$

gde je: $\sum L_u$ ukupna dužina kanala reda u , a N_u je broj segmenata toga reda.

Gustina hidrografske mreže u km/km^2 se dobija kada se sumiraju dužine svih tokova i podele se površinom sliva.

2.4.3 Pad toka i sliva

U većini slučajeva podužni profil rečnog toka pokazuje karakteristično smanjivanje pada idući nizvodno; ovo je ilustrovano na sl. 2.33. *Bruto pad* se dobija kada se razlika u nadmorskoj visini najviše i najniže tačke podeli sa dužinom toka. *Uravnati (srednji) pad* se određuje tako da postoji jednakost $A_1 = A_2$ na sl. 2.33.

Jedan uprošćen način da se odredi *prosečni pad sliva* se sastoji u sledećem (Viessman i dr. 1977): preko topografske karte se postavi providni pa-

pir sa centimentarskom mrežom (sl. 2.34). Broje se vertikalni n_v i horizontalni n_h preseki sa izohipsama; odmerava se ukupna dužina segmenata vertikalne L_v i horizontalne L_h mreže (do granice sliva).

Zatim se izračunavaju padovi:

$$i_v = \frac{n_v \cdot h}{L_v}; \quad i_h = \frac{n_h \cdot h}{L_h} \quad (2.64)$$

gde je: h visinsko rastojanje izohipsi. Srednji pad sliva je:

$$i_{sl} = (i_v + i_h)/2 \quad (2.65)$$

Primer:

$h = 15$ m; $n_v = 72$; $n_h = 120$; $L_v = 31.668$ m; $L_h = 30.845$ m.

$i_v = 72 \cdot 15 / 31.668 = 0,035$; $i_h = 120 \cdot 15 / 30.845 = 0,059$

$i_{sl} = (0,035 + 0,059) / 2 = 0,047$

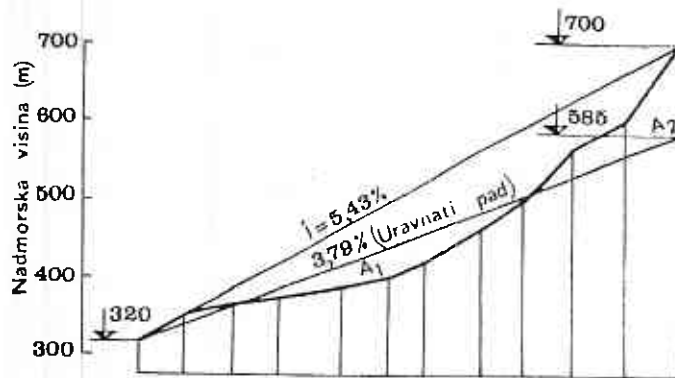
2.4.4 Visinski odnosi u slivu

Prosečna visina sliva H_{sl} se najlakše određuje planimetrisanjem površina između izohipsi ΔA :

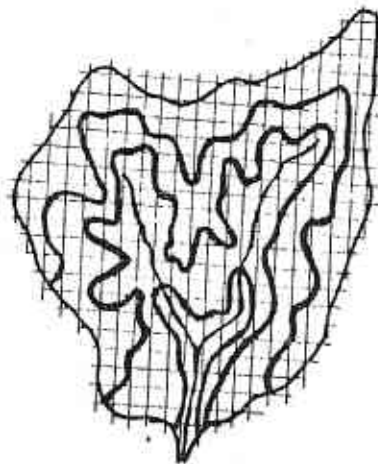
$$H_{sl} = \sum_{j=1}^n (\Delta A_j \cdot H_{srj}) / A \quad (2.66)$$

gde je: H_{sr} srednja nadmorska visina između susednih izohipsi (odnosno površine ΔA) i A ukupna površina sliva. Približna metoda se sastoji u određivanju kote H_x u sredini svakog kvadrata na sl. 2.34, pa je $H_{sl} = \sum H_x / n$, gde je n broj kvadrata mreže koja pokriva sliv (Jevđević, 1956). Često se radi hipsometrijska kriva

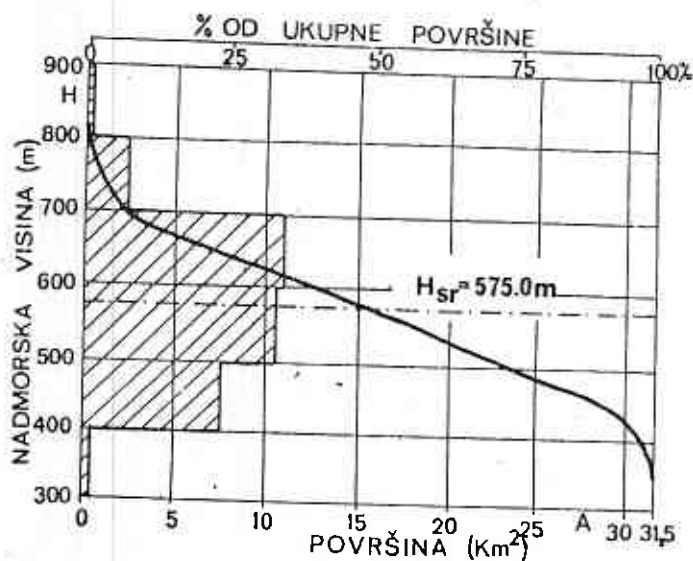
(veza: površina-nadmorska visina), koja daje površinu (ili procenat ukupne površine) iznad pojedinih nadmorskih visina. Prvo se radi diferencijalna linija, gde se određuje procenat u kome površina ΔA učestvuje u ukupnoj površini (tj. $\Delta A / A \cdot 100$). Ovaj odnos se obično predstavlja grafički (sl. 2.35). Potom se vrši sumiranje odnosa $\Delta A / A\%$ da bi



Sl. 2.33 Bruto i uravnati pad rečnog toka



Sl. 2.34 Određivanje srednjeg pada sliva



Sl. 2.35 Hipsometrijska kriva sliva

se dobila integralna (hipsometrijska) kriva. Prosečna visina sliva H_{sl} (jednačina (2.66)) je predstavljena pravom linijom na sl. 2.35. Ovde mora biti zadovoljen uslov da je površina pravougaonika $H_{sl} \cdot A$ jednaka površini ispod hipsometrijske krive.

2.4.5 Karakteristike zemljišta.

Podzemna voda

Stene koje obrazuju koru Zemlje – litosferu – dele se po načinu njihovog postanka na: *magmatske*, *sedimentne* i *metamorfne*. Razlikuju se, zatim, *čvrste* (kompaktne) i *rastresite* (nevezane) stene. Površinski sloj, obično nevezan, nastao raspadanjem stena (pod uticajem atmosfere i organskog sveta) zove se *zemljište* (Marjanov, 1979). Profil zemljišta se često deli na četiri horizontalna sloja (horizonta): *A* – zemljište bogato organskim materijalom, *B* – sloj izložen uticaju vazduha, modifikovan zbog dejstva korenja vegetacije, *C* – nekonsolidovani materijal koji se sastoji od čestica raznih dimenzija i *D* – osnovna stena. Debljina ovih slojeva zavisi od geološke strukture i geomorfoloških prilika.

Stene obrazuju sistem čvrstih čestica čiji kontinuitet prekida mreža šupljina raznih dimenzija, oblika i povezanosti, koje zavisno od toga nose naziv *pore*, *prslina*, *pukotine*. Ako su prslina veće od 0,2 do 0,3 mm one propuštaju vodu na čije kretanje preovladuje delovanje zemljine teže. Pore razmera od 0,2 do 0,0002 mm (0,2 μ) su kapilarne. One propuštaju i gravitacionu vodu ali, kada se ova ocedi, preostala voda se kreće pod dejstvom *kapilarnih sila*. Pore, čije su dimenzije manje od 0,2–0,1 μ , su mikropore (subkapilarne) i kroz njih se voda ne može kretati. U zavisnosti od njihove propustljivosti, stene se dele na *vodonosne* (propustljive) i *vododržive* (nepropustljive). Sastav i konfiguracija stena, u kombinaciji sa reljefom, uslovljavaju pojavu raznih vidova podzemne vode u slivu. Voda u podzemlju se obično klasifikuje kao *zemljišna vlaga* i *vodena izdan* (podzemna voda u užem smislu, akvifer).

2.4.5.1 Vlaga u zemljištu

Sadržaj vode u zemljištu je u tesnoj vezi sa njegovom strukturom. Zemljišta sa česticama manjim od 2 μ čine *glinu*, dok zemljišta koja su sastavljena od zrnaca sa prečnikom većim od 2 mm su poznata pod nazivom *šljunak*. Opseg između ova dva ekstrema se klasifikuje na različite načine. Na sl. 2.36 je data klasifikacija zemljišta prema Međunarodnom udruženju za nauku o zemljištu (ISSS) i Britanskoj ustanovi za standarde (BSI).

Naziv pojedinih tipova zemljišta zavisi od udela pojedinih frakcija u njemu. Na primer, *ilovača* sadrži u proseku 20% gline, 40% prašine i oko 40% peska, dok je kod peskovite ilovače ovaj odnos 10–25–65%. Neki nazivi zemljišta su dati u tabeli 2.15 i sl. 2.44.

Funkcionisanje zemljišta kao rezervoara za vodu zavisi od kompozicije čestica gline i peska i raspoloživog prostora između čvrstih zrnaca. Ovaj prostor sadrži gas (vazduh i/ili vodenu paru) i/ili vodu u tečnom stanju. Ako se sa V_s , V_v , V_g i V_t označe zapremine čvrstih čestica, vode, gasa i ukupna zapremina zemljišta, a sa m_s , m_v , m_g i m_t odgovarajuće mase, onda se mogu definisati sledeći odnosi (Shaw, 1983):

ISSS	Glina	Prašina			Sitan pesak	Krupni pesak		Šljunak
BSI	Glina	P r a š i n a			Sitan pesak	P e s a k		Šljunak
		fina	srednja	krupna		srednji	krupan	
Prečnik čestica	1	2	5	20	50	200	500	2000 (μ)
Poljski kapacitet		325	300	270		116	100	
Tačka venjenja		200	133	100		33	25	mm m ⁻¹
Raspoloživa vlaga		125	167	170		83	75	

Sl. 2.36 Klasifikacija čestica u zemljištu. Orientacione vrednosti vlage u zemljištu

gustina čvrste faze:

$$\rho_s = m_s / V_s$$

(za mineralna zemljišta prosečno 2,65 g cm⁻³);

gustina zemljišta:

$$\rho_b = m_s / V_t$$

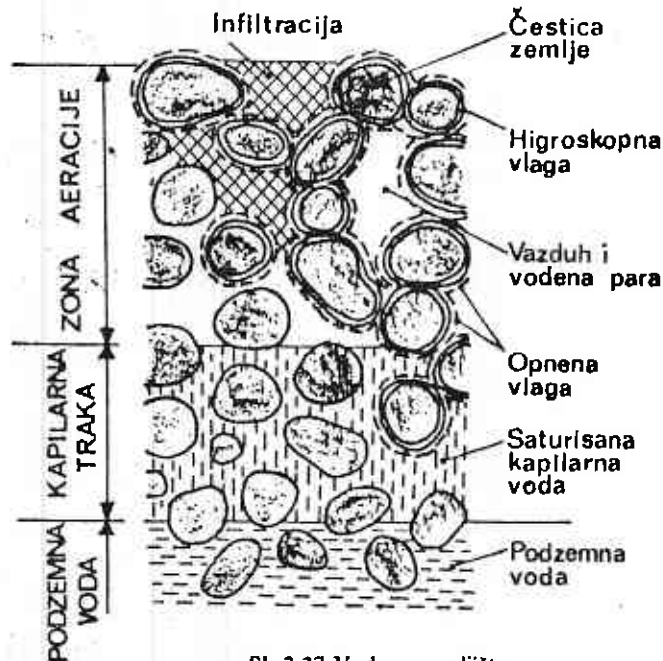
(peskovita 1,6 g cm⁻³; glina 1,1 g cm⁻³;

poroznost:

$$p = (V_v + V_g) / V_t$$

(krupne čestice 0,2; sitne 0,6).

U prirodnim uslovima, najveći deo vode u zemljištu potiče od kiše ili otapanja snega. Voda sa površine popunjava prostor između čestica pod uticajem sila gravitacije i površinskih napona. Na česticama se obrazuje tanak sloj higroskopne vode koja uz česticu prijanja zbog elektrostatičkih sila i ne može se otkloniti drugim silama (sl. 2.37).



Sl. 2.37 Voda u zemljištu

Gornji sloj zemljišta, koji se sastoji od mešavine čvrstih čestica, vode i gasova je zona *aeracije*. Na većoj dubini, neposredno iznad slobodnog nivoa podzemne izdani, nalazi se *saturisani* (zasićeni) sloj, gde je sav prostor između čvrstih čestica ispunjen vodom. Ovo je *kapilarna traka*. Visina kapilarne trake zavisi od kompozicije čestica i varira od nekoliko centimetara za peskovito, do nekoliko metara za zemljište sa velikim procentom gline.

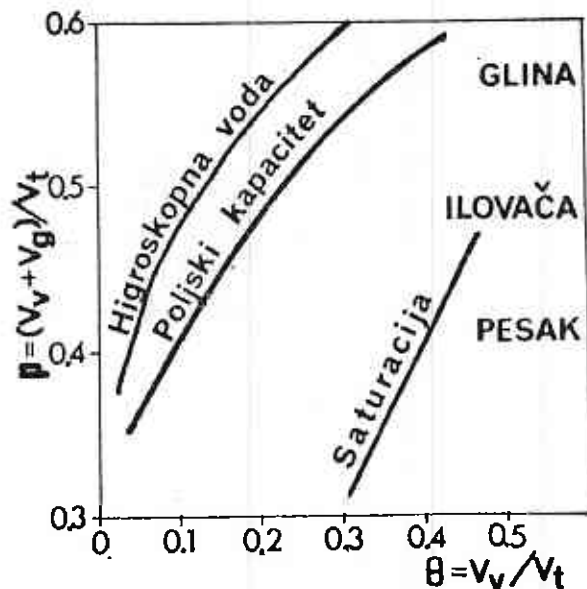
Stepen vlažnosti zemljišta se može definisati na sledeći način:

sadržaj vode po masi: $\theta_m = m_v/m_s$,

sadržaj vode po zapremini: $\theta = V_v/V_t$.

Sadržaj vode θ se može dovesti u vezu sa visinom slobodne vode u odnosu na dubinu zemljišta na jedinicu površine. Neka je, na primer, $\theta = 20\%$ i neka na higroskopnu vodu otpada 5% od V_t . Znači, zemljište

može da primi $20 - 5 = 15\%$ vode što na jedinicu površine (1 m^2) odgovara zapremini od $0,15 \text{ m}^3$ vode na 1 m dubine, odnosno 150 mm/m . Ova količina vode će strujati u dublje slojeve ako je $i \geq f$, gde su i i f intenziteti kiše i infiltracije, i pod uslovom da kiša traje dovoljno dugo. Na sl. 2.38 je pokazan sadržaj vode θ za razne tipove zemljišta. Orientaciono se vidi poroznost za glavne tipove zemljišta; što je veći deo gline (veća poroznost), zemljište može da zadrži veću količinu vode.



Sl. 2.38 Sadržaj vode u zemljištu

Poljski kapacitet je količina vode koju sadrži zemljište u uslovima kada vladava ravnoteža između kapilarnih sila i sila gravitacije. Svaki višak vode

sa površine predstavlja gravitacionu vodu koja struji u niže slojeve (Darcyjev zakon) da bi, eventualno, dospela do podzemne izdani (obnavljanje podzemne vode). Permanentna tačka *svenjavanja* odgovara zapremini (pelikularne) vode u suhom zemljištu, kada biljke venu, i ne mogu se povratiti ako ponovo dobiju vodu.

Obzirom da je brzina kretanja vode u zemljištu veoma mala, ovde dominantan uticaj ima potencijalna energija (kinetička energija se može zanemariti). Ako se potencijalna energija izrazi kao energija po jedinici zapremine (J m^{-3}), tada je

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_p \quad (2.67)$$

gde je: Φ_t ukupni potencijal, Φ_g potencijal gravitacije i Φ_p kapilarni potencijal. Ovde je $\Phi_g = z \cdot \rho_v \cdot g$, gde je: z visina posmatrane tačke u odnosu na referentnu ravan, ρ_v gustina vode i $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$. Kako je $\Phi_p = -\psi \rho_v g$, gde je: ψ visina kapilarnog dizanja iznad nivoa vode (gde je $\psi_p = 0$), to je ukupni potencijal u tački na visini ψ :

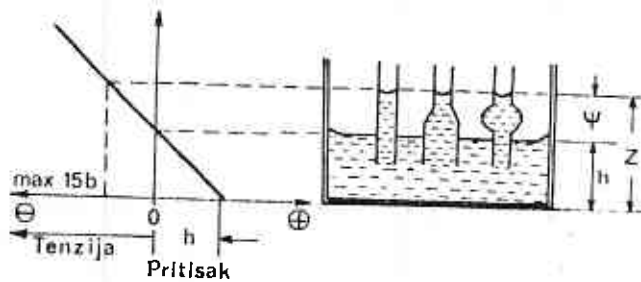
$$\Phi_t = z\rho_v g - \psi\rho_v g$$

$$\Phi_t = \rho_v g(z - \psi) \quad (2.68)$$

$$\Phi_t = \rho_v \cdot g \cdot h$$

gde je: $h = z - \psi$ (vidi sl. 2.39).

Definisanje tenzije na jedinicu zapremine tečnosti ima svoje puno opravdanje ako se vodi računa o mogućoj promeni gustine tečnosti usled prisustva strane materije (soli) u rastvoru. U suprotnom slučaju, kada se ρ_r (gustina rastvora) može smatrati identičnim sa ρ_v (gustinom vode), tenzija se može definisati u odnosu na jedinicu težine tečnosti, kao što se radi sa potencijalnom energijom u Bernulijevoj jednačini.



Sl. 2.39 Potencijal vode u zemljištu

Do kretanja vode u zemljištu dolazi zbog razlike u pritisku u pojedinim tačkama. Kapilarni potencijal $\Phi_p = -\psi\rho_v g$ se naziva *tenzija* (pritisak sisanja) i ima dominantnu ulogu kod ocene zemljišne vlage. Izražava se u cm i u barima (bar = 1000 mb = 100 kPa = 10^5 Nm^{-2} , odnosno 1000 cm vodenog stuba). Pri tenziji $\Phi_p = -1$ cm vodenog stuba čemu odgovara -1 mb, zemljište je saturisano, poljskom kapacitetu odgovara $\Phi_p \approx -100$ cm vodenog stuba ili -0,1 bar, a tački svenjavanja $\Phi_p \approx -100$ m vodenog stuba odnosno -10 bara.

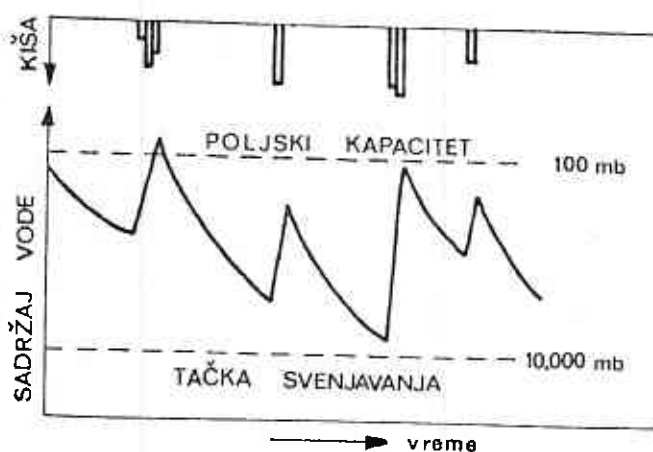
U tabeli 2.15 je za prosečne uslove vlažnosti zemljišta (50-80% zapreminskih od poljskog kapaciteta) data tenzija za nekoliko tipova zemljišta (prema Vladisavljeviću, 1979.).

Tabela 2.15

Zemljište	Tenzija (cm)
Ilovača	400 - 200
Suglinak	300 - 150
Supesak	150 - 100
Pesak	100 - 50

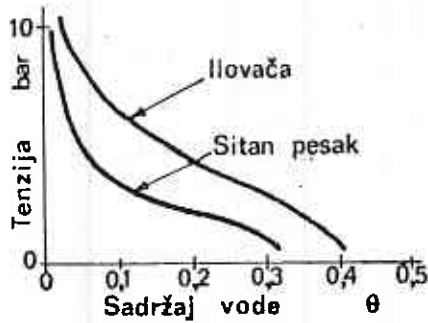
U prirodi, vlažnost zemljišta se povećava zbog kiše, kada dolazi do poniranja vode; ono, kasnije, gubi vodu zbog evapotranspiracije. Sadržaj vode u zemljištu se, dakle, kreće od saturacije do tačke svenjavanja pri čemu se javlja tenzija od 1 do 10.000 (15.000) mb. Ovo je pokazano na sl. 2.40.

Gubljenje vode iz zemljišta zbog povećane



Sl. 2.40 Promena sadržaja vode u zemljištu u vremenu

tenzije (proces sušenja) se naziva *desorpcija*. Proces vlaženja, kada se povećava količina vode u nesaturisanom zemljištu se naziva *sorpcija*. Veza sadržaj vode – pritisak u porama zemljišta je kompleksan i zavisi od početnog stanja zemljišta, od uticaja zarobljenog vazduha i drugih faktora.



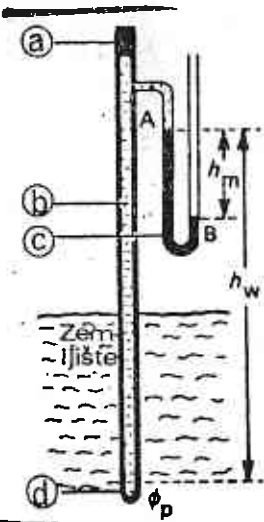
Sl. 2.41 Shematski prikaz veze tenzija – sadržaj vode

premine (V_t), meri (m_t) i suši (na 105–110 °C) dok se ne dobije konstantna težina suvog uzorka (m_s). Težinski sadržaj vode je $\theta_m = m_v/m_s = (m_t - m_s)/m_s$, dok je zapreminski sadržaj $\theta = \theta_m(\rho_b/\rho_v)$, gde je $\rho_b = m_s/V_t$ i $\rho_v = 1 \text{ g cm}^{-3}$.

Na sl. 2.41 je pokazana principijelna shema ove veze, za dva karakteristična tipa zemljišta. Vidi se da zemljište finije strukture sadrži više vode za istu tenziju.

Sadržaj vode se u laboratorijskim uslovima meri tako što se uzorak zemljišta poznate za-

Princip merenja vodnog potencijala zemljišta u prirodi (većinom na melioracionim sistemima) pomoću *tenziometra* je pokazan na sl. 2.42. Ova sprava se sastoji od porozne keramičke posude koja je spojena sa uređajem za merenje pritiska. U praksi se obično koriste tenziometri sa živinim manometrom.



Sl. 2.42 Tenziometar sa živinim manometrom: (a) čep, (b) voda, (c) živa, (d) porozna keramička posuda

2.4.5.2 Vodena izdan

Deo vodonosne stene zasićen vodom je *vodena izdan* (podzemna voda u užem smislu). Kada se poniranje vode zaustavlja zbog nekog nepropusnog sloja, kao što je kompaktna stena ili zbijena glina, dolazi do saturacije vodonosnog sloja, iznad vododržljivog sloja. Iznad slobodnog nivoa vodene izdani, formira se zona kapilarne vode (sl. 2.37). Neki od mogućih vidova pojave podzemne vode su pokazani na sl. 2.43. Na ovoj slici su pokazana dva tipa vodotoka: 1) *influentni tokovi* koji prihranjuju podzemnu vodu, i 2) *efluentni tokovi* koji dobijaju vodu iz podzemlja. Jasno je da se isti tokovi mogu ponašati i drugačije, što zavisi od odnosa nivoa vode u otvorenom toku i u podzemlju, koji se menja u vremenu.

Na sl. 2.43 su dati primeri *slobodne vodene izdani* kao i *arteske izdani*. Ovi akviferi se mogu posmatrati kao rezervoari u koje se voda proceduje gravitacijom i iz kojih odlazi takođe zbog gravitacije. Pijezometrijski pritisak odgovara nivou do kojeg bi se podigla voda u bunaru koji bi se izbušio u odgovarajući akvifer. Za arteskku izdan, to je nivo koji odgovara pritisku u izdani.

U saturisanom vodonosnom sloju je kretanje vode po pravilu laminarno. U ovim uslovima strujanja i u homogenoj sredini je u važnosti Darcyjev zakon:

$$v = K \cdot i \quad (2.69)$$

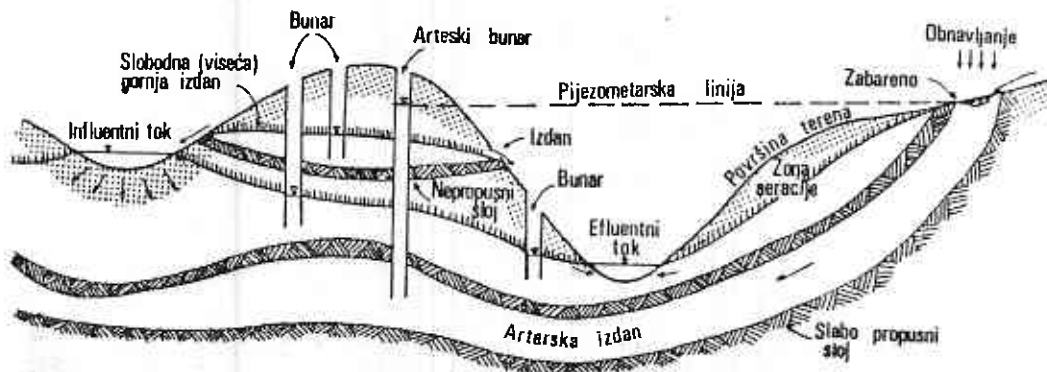
gde je: i hidraulički gradijent, a K hidraulički konduktivitet (koeficijent filtracije) koji ima istu dimenziju kao brzina v , i predstavlja osobinu ne samo

poroznog medijuma nego i fluida koji teče kroz taj medijum. Za vodu, K ima visoke vrednosti za krupan pesak i šljunak (10^{-3} do 10^{-1}ms^{-1}), a niske vrednosti za kompaktnu glinu (10^{-9}ms^{-1}).

Kada je u pitanju strujanje vode u sredini koja nije saturisana vodom (prisutan je i vazduh, pa je tenzija > 0), može se primeniti modifikovana jednačina:

$$v = \lambda \cdot K \cdot i; \quad \lambda = 0 \div 1 \quad (2.70)$$

Parametar λ mnogo zavisi od sadržaja vode θ . Njegova vrednost se naglo smanjuje sa opadanjem θ .



Sl. 2.43 Mogući vidovi pojave podzemne vode

2. 5. PROCESI U SLIVU

Fizički parametri sliva, kao što je pad sliva, njegov geološki sastav, gustina hidrografske mreže i drugi, nisu podložni promenama tokom vremena.

Grupa parametara koji su promenljivi u vremenu, kao što je intenzitet infiltracije, sadržaj vode u zemljištu, zadržavanje vode na lišću vegetacije i u depresijama terena, evapotranspiracija, zatim hidrauličke karakteristike površine terena i rečnih korita, koji kvantifikuju kretanje i akumulisanje vode u zemljištu, odnosno tečenje vode po površini terena i u rečnoj mreži, često se nazivaju *procesni parametri*.

Procese zemaljske faze hidrološkog ciklusa Fleming (1975) je klasifikovao na sledeći način:

