



UNIVERZITET U TUZLI
RUDARSKO-GEOLOŠKO-GRAĐEVINSKI FAKULTET



HIDROLOGIJA

Prof. dr. sc. NEDIM SULJIĆ, dipl.ing.građ.

1

PROCESI U SLIVU

•To su vremenski promjenjivi parametri:

- a) **evapotranspiracija**
- b) **upijanje (infiltracija)**
- c) **površinski procesi**
- d) **potpovršinski procesi**
- e) **proces u riječnom koritu**

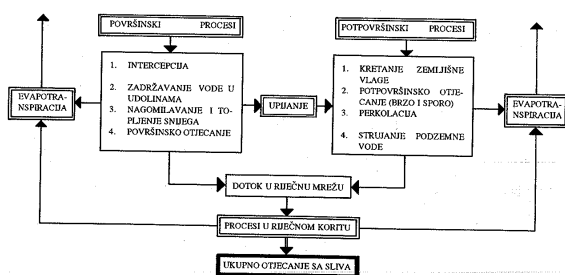
•Navedeni parametri zovu se **PROCESNIM PARAMETRIMA**

•Procesni parametri = temeljni procesi u slivu koji se odvijaju tokom vremena

•Oticanje ima temeljnu važnost ➡ posebna pažnja tokom predavanja

2

•Procesni parametri zemaljske faze hidrološkog ciklusa po Flemingu (1975):



Procesi zemaljske faze hidrološkog ciklusa

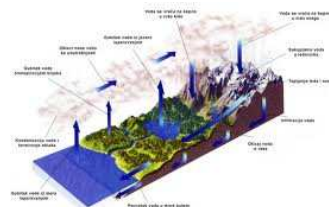
3

4.a) EVAPOTRANSPIRACIJA

•Predstavlja direktan gubitak u bilansiranju vode koja padne i otiče

•Pojam evapotranspiracije = gubicima vode u (voda se kao vodena para vraća u atmosferu – hidrološki ciklus)

•Ranije detaljno obrađena tokom predavanja



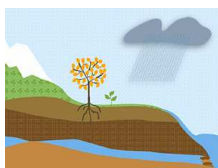
4

4. b) UPIJANJE (INFILTRACIJA)

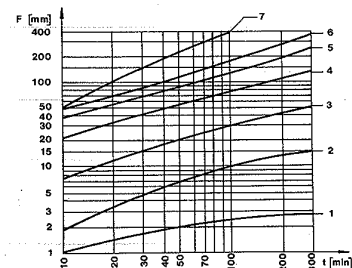
- **Infiltracija** = proces prolaska vode sa površine u tlo i kretanje vode ka površini **PV**
- **Infiltracija** = neustaljeno strujanje (nestacionarno) kroz nezasićenu poroznu sredinu

• **Filtracija (procjeđivanje)** = strujanje vode kroz zasićenu sredinu (tlo)

- Jačina upijanja (intenzitet infiltracije) = mm / ha
- Intenzitet infiltracije $\Rightarrow$ f-ja jačine **P**, poroznosti tla, granulacije tla, gustine tla ...)
- Intenzitet infiltracije $\Rightarrow$ različit za razne vrste tla



5



Dijagram upijanja (infiltracije) za razna tla

1-glina 2-ilovača 3-glina sa malo pijeska 4-glina sa puno pijeska
5-pijesak sa puno gline 6-pijesak sa umjerenom količinom gline 7-pijesak sa malo gline

$$F = \int_0^t f dt \quad F - \text{zbrino upijanje (sumarna infiltracija) (mm)}$$

6

• Upijanje (infiltracija) – tokom t se smanjuje

• U praksi određivanje upijanja:

- 1) matematičko modeliranje
- 2) direktno mjerenje

1) Matematičko modeliranje:

- Izrada matematičkih modela upijanja
- Hortonova j-na (1940) $\Rightarrow$ jednostavan izraz česti korišten u praksi

$$F = f_c t + \left(\frac{f_o - f_c}{k} \right) (1 - e^{-kt})$$

f_o, f_c, k – parametri dati tabelarno u f-ji vrste tla

t – vrijeme (min)

e – baza prirodnog logaritma ($e=2,718$)

7

Vrsta i osobina tla	f_o	f_c	k
	[mm min ⁻¹]	[mm min ⁻¹]	[min ⁻¹]
Pijesak (visok intenzitet upijanja)	4.23	0.42	0.033
Pjeskovita ilovača (umjereno upijanje)	3.29	0.21	
Ilavača (slabo upijanje)	2.12	0.11	
Glina (vrlo slabo upijanje)	1.27	0.04	

Vrijednosti parametara u Hortonovoj j-ni za neke vrste tla

• Hortonova j-na: upijanje u tački $\Rightarrow$ za veću površinu pretpostaviti jednolike uslove u slivu

• Parametar f_c – odnosi se na neobraslo zemljište

8

2) Direktno mjerenje

-Određujemo pomoću infiltrometara

- infiltrometri koje voda preplavljuje
- infiltrometri rasprskivači

-Infiltrometri koje voda preplavljuje –

Cijev ili koncentrisani prstenovi koji se urone u tlo do $h=40 - 50$ cm

Voda iz menzure se toči u cijev ili prstenove

Očitavanjem vode iz menzure $\Rightarrow$ direktno mjerenje infiltracije

- Infiltrometri rasprskivači –

Dva reda posebnih prskalica postavljeni duž parcele

Voda se const dovodi na parcelu $\Rightarrow$ simulacija kiše

Oticanje sa parcele mjerimo dok ne postignemo const veličinu

Tada prskalice isključimo $\Rightarrow$ nastavak mjerenja oticaja dok ono ne prestane

Ponovno uključivanje prskalica i ponavljanje postupka



9

4. c) POVRŠINSKI PROCESI

Intercepcija

•Proces zadržavanja dijela **P** na lišću ili granama vegetacije

•Te **P** ne dolaze na tlo $\Rightarrow$ povratak u atmosferu u vidu vodene pare

•Ovaj gubitak uzimamo u oticanju kroz koeficijent oticanja (standardan proračun) ili kao ukupna evapotranspiracija (složeni matematski modeli)

•Više analitičkih izraza $\Rightarrow$ intercepciju izražavamo u f-jji:

-padavina (**P** ili **H**), dnevne **t** zraka, **v** vjetra, evaporacije ...

Vrsta šume	Oborine, H [mm]			
	10	20	50	75
Intercepcija, [mm]				
Zimzelena	2.5	4.3	4.8	5.6
Listopadna	1.5	2.0	3.1	3.4

Intercepcija zavisna o vrsti šume

10

Zadržavanje vode u udolinama

•Udoline (depresije) $\Rightarrow$ voda ne otiče površinski $\Rightarrow$ infiltracija ili evaporacija

•Količina vode u depresijama (udolinama) = **DS** (mm)

•**DS** f-ja pada terena

•Istraživanja Kidd-a (1978) provedena u GB, Švedskoj i NL:

$$DS = 0.77 \bar{I}^{-0.40}$$

$\bar{I}$ – prosječan pad terena (%)

•**DS** po Viesman-u (1977):

$$DS = 3.35 - 0.78 \bar{I} ; 1[\%] < \bar{I} < 3[\%]$$

Po Viesman-u dobijamo znatno veće vrijednosti za **DS** nego po Kidd-u

11

Nagomilavanje i topljenje snijega

•Bitan uticaj snijega na režim oticanja

•Oticanje vode nije posljedica samo topljenja snijega $\Rightarrow$ javljaju se i **P** u slivu

$\Rightarrow$
brže topljenje ranijeg snijega

•Potrebni podaci za određivanje oticanja vode zbog postojanja snijega

- zalihe snijega u slivu

- **t** zraka

- ukupne **P**

- vjetar



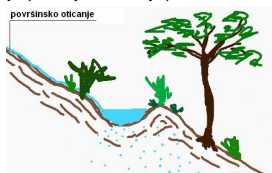
12

Površinsko oticanje

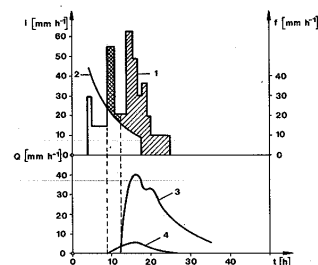
- F-ja količine P i vremenske raspodjele P
- Za i mali (npr. $i < \text{infiltracije ili ETP}$) $\Rightarrow$ sve P ulaze u tlo ili ispariti
- Za i veliki (npr. $i > \text{infiltracije ili ETP}$) $\Rightarrow$ dolazi do površinskog oticanja
- Površinsko oticanje: P koje preostaju nakon potreba tla (infiltracija) i potreba vegetacije za vodom, nakon ETP i nakon zadržavanja vode u udolinama


površinsko oticanje niz nagib terena

- Površinsko oticanje: pod dejstvom trenja površine terena i površinskog napona



13



Prikaz površinskog oticanja i površinskog zadržavanja sa jačinom P i jačinom infiltracije
1 – padavine 2 – infiltracija 3 – površinsko oticanje 4 – površinsko zadržavanje

14

- Površinsko oticanje sa sliva:

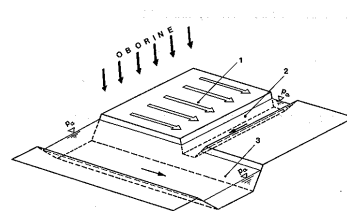
- a) površinsko ili primarno oticanje sa manjih slivnih površina
- b) oticanje u vodotocima nižeg reda koji bočno kontinualno prihvataju površinsko oticanje
- c) oticanje u vodotocima višeg reda koji koncentrično prihvataju vodu od pritoka (nižeg reda)

- Površinsko oticanje: **NEJEDNOLIKO** (promjenjivo u prostoru) i **NEUSTALJENO** (promjenjivo vremenski)

- Proračun ovog tečenja:

- a) hidraulički postupci (rješenje j-na koje opisuju zakon kretanja i zakon održanja mase)
- b) hidrološki postupci (korištenje j-ne neprekidnosti)

15



Prikaz površinskog oticanja

- 1 – oticanje sa manje slivne površine (primarno oticanje)
- 2 – oticanje u vodotoku nižeg reda
- 3 – oticanje u vodotoku višeg reda

16

•Bitan parametar: **vrijeme sabiranja sliva (vrijeme koncentracije sliva)**

•**Vrijeme sabiranja sliva (t_c)** = vrijeme potrebno da elementarna efektivna V vode sa najudaljenije tačke sliva dospije do mjesta opažanja protoka u vodotoku

•Elementarna V vode treba neko t da od vododjelnice dođe do određenog mjesta

•Određeno mjesto = izlazni profil

•Kretanje elementarne $V \Rightarrow$ različite v (f-ja hidrauličkih parametara)

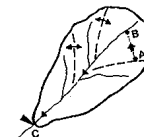
•U hidrološkim analizama: ukupno t tečenja (sabiranja) t_c dijelimo na:

1) vrijeme tečenja po površini sliva (t_{sl})

2) vrijeme tečenja u vodotocima višeg i nižeg reda (t_v)

$$t_c = t_{sl} + t_v$$

17



Vrijeme sabiranja sliva: površinsko i u vodotoku

- 1) Vrijeme tečenja po površini = vrijeme potrebno da ΔQ iz tačke A dođe do B
- 2) Vrijeme tečenja vodotokom = vrijeme tečenja od tačke B do C (izlazni profil)

•Potrebno je odrediti srednje brzine tečenja $\Rightarrow$ problem kod određivanja t tečenja

•Složeno je definisati t tečenja po slivu (t_{sl}) $\Rightarrow$ empirijske metode

•Manji problem određivanje t tečenja u vodotocima (t_v) $\Rightarrow$ hidrauličke metode

•I t_{sl} i t_v f-ja: koeficijenta hrapavosti, srednjeg pada, visine P ...

18

•U praksi: odnos t_{sl} / t_v uzima se kod kategorizacije veličine slivova

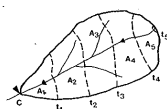
•Mali slivovi: $t_{sl} \gg t_v$

•Veliki slivovi: $t_v \gg t_{sl}$

Pojam izohronalne karte sliva:

Izohrone = linije koje povezuju tačke u prostoru između kojih je jednako t putovanja ΔV vode $\Rightarrow$ slučaj intenzitet $P >$ intenziteta infiltracije ($i > f$)

Izohronalna karta sliva = karta sa gore navedenim grafičkim prikazom



Izohronalna karta sliva

Položaj izohrona u prostoru nije const.

Položaj f-ja kišnih intenziteta i infiltracije

usloženjen proračun na analizi izohrona

19

4. d) POTPOVRŠINSKI PROCESI

Kretanje zemljišne vlage

•Voda u tlu $\Rightarrow$ uticaj molekularnih sila (adhezijska voda), površinskog napona (kapilarna voda) i sile teže (**PV**)

•Smjer kretanja vode $\Rightarrow$ od tačke sa višim ka tački sa nižim potencijalom

•Nezasićen tok kretanja vode rezultira promjenom sadržaja vode u nekoj tački toka

Potpovršinsko oticanje

•Proces oticanja vode kroz porozan i nezasićen sloj tla.

•Sastavljeno od dvije komponente:

- 1) brzi potpovršinski oticaj
- 2) spori potpovršinski oticaj

20

- Brzo potpovršinsko oticanje = komponenta direktnog oticanja
- Sporo potpovršinsko oticanje = komponenta baznog oticanja
- Mjerenje potpovršinskog oticanja praktično nedostupno
- Veliki značaj potpovršinskog oticanja u ukupnom oticanju $\Rightarrow$ hidrološki modeli
- Hidrološki modeli $\Rightarrow$ simulacija komponente potpovršinskog oticanja

Perkolacija

- Proces poniranja vode kroz dublje slojeve tla ka slobodnoj površini **PV**
- Proces prolaska kroz tlo onog dijela infiltriranih voda kojima se obnavlja **PV**
- **Perkolacija** = efektivno upijanje (efektivna infiltracija) F_e (mm)

$$F > F_e$$

21

Strujanje podzemne vode (PV)

- Proces kretanja vode kroz zasićeno porozno tlo
- Hidraulički aspekti strujanja **PV** veoma bitni za hidrotehničku praksu



Prodiranje PV u podzemne objekte

22

4. e) PROCESI U RIJEČNOM KORITU

- 1) Evaporacija
- 2) Protok (tečenje vode)
- 3) Pronos nanosa
- 4) Deformacija korita (sinteza tečenja vode i pronosa nanosa)

- Evaporacija: već razmatrano u ranijim predavanjima
- Ostala tri procesa: većina u nauci $\Rightarrow$ izučavaju se u hidraulici
- Mjerenje Q i mjerenje nanosa $\Rightarrow$ postupci obrade $\Rightarrow$ **HIDROMETRIJA**

23

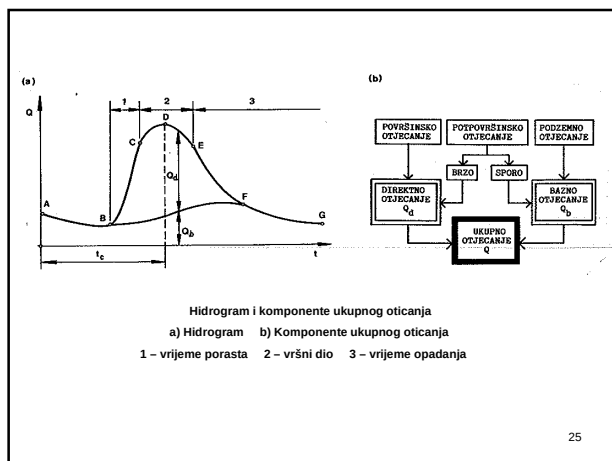
4. f) OTICANJE

- Ukupno oticanje = efektivni dio P koji otiče
- Ostatak P koji nakon gubitaka dolazi površinskim, potpovršinskim i podzemnim putem u vodotoke
- Dio ukupnih ili bruto padavina (P_b ili H_b) koji otiče $\Rightarrow$ efektivne ili neto P (H_e)
- Proces oticanja u hidrologiji i općenito u hidrotehnici $\Rightarrow$ **BAZNA VAŽNOST**

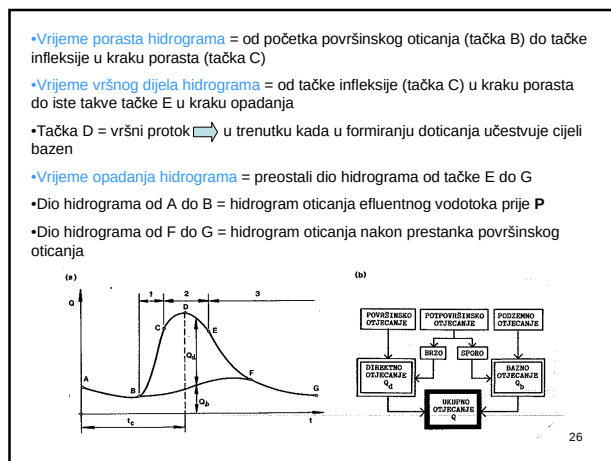
Hidrogram

- Grafički prikaz promjene protoka (Q) u vremenu (t)
- Oblik hidrograma $\Rightarrow$ tri razdoblja
 - 1) vrijeme porasta (povećanje protoka)
 - 2) vršni dio (kulminacijski dio)
 - 3) vrijeme (opadanja (recesija)

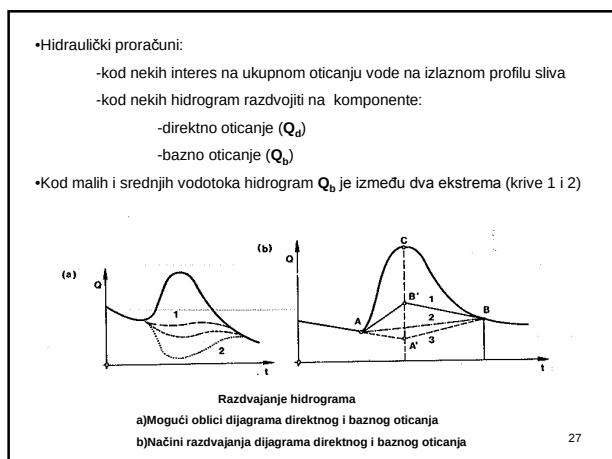
24



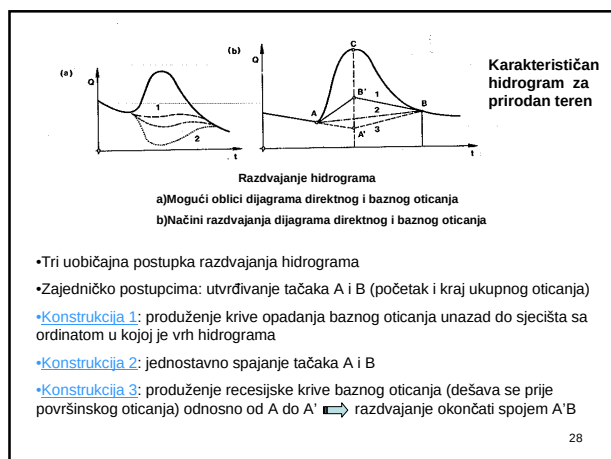
25



26



27



28

- Razdvajanje hidrograma nije teško ukoliko tačno definišemo tačke A i B
- Pretpostavka za rješenje: padajući krak hidrograma $\Rightarrow$ matematički izraz:

$$Q_2 = Q_1 e^{-\alpha(t_2 - t_1)}$$

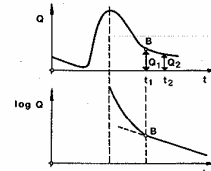
Q_1 – protok u vremenu t_1

Q_2 – protok u vremenu t_2

t_2, t_1 – vrijeme ($t_2 > t_1$)

α – koeficijent ($\alpha=0,003$ do $0,03$) $1/s$

29



Određivanje trenutka prestanka površinskog oticanja

- Ako na ordinatu naneseemo logaritme Q
- Ako na apcisu naneseemo vrijeme u normalnoj raspodjeli



na grafiku kriva recesije baznog oticanja je pravac

30

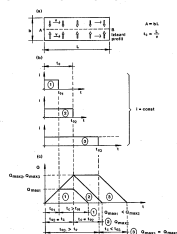
- Pretpostavka P const. jačine (i), trajanja (t_0) $\Rightarrow$ padnu na:

- pravilnu (pravougaonu) površinu
- glatku površinu
- nepropusnu površinu (bez infiltracije $\Rightarrow$ gubici samo na evaporaciju)



oblik hidrograma aproksimiramo trouglom ili trapezom

- Oblik aproksimacije hidrograma f-ja trajanja kiše



31

- Odnos trajanja P prema vremenu sabiranja $\Rightarrow$ tri karakteristična slučaja:

- (1) Ako je trajanje P (t_0) < od vremena sabiranja (t_c) $t_0 = t_{01} < t_c \Rightarrow$

hidrogram $\Rightarrow$ oblik trapeza

Najveći Q (Q_{max1}) je u vremenu t_{01} :

$$Q_{max1} = \frac{i A t_{01}}{t_c}$$

- (2) Ako je trajanje P (t_0) jednako vremenu sabiranja (t_c) $\Rightarrow t_0 = t_{02} = t_c$

hidrogram $\Rightarrow$ oblik trougla

Najveći Q (Q_{max2}) je u vremenu $t_{02} = t_c$ i iznosi:

$$Q_{max2} = i A$$

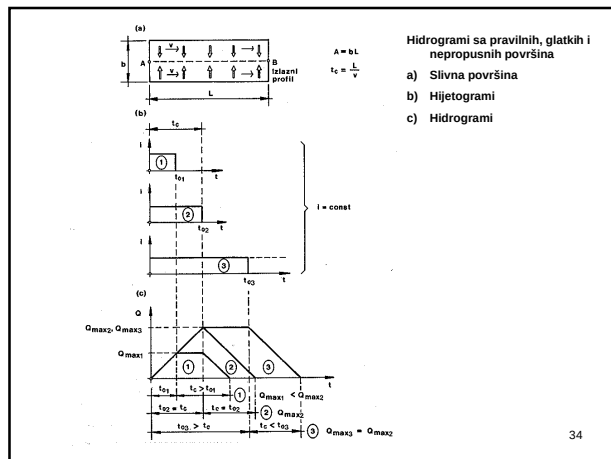
32

(3) Ako je trajanje P (t_0) > od vremena sabiranja (t_c) $\Rightarrow t_0 = t_{03} > t_c$
hidrogram $\Rightarrow$ oblik trapeza
Najveći Q (Q_{max3}) > od Q_{max} iz prvog slučaja (Q_{max1}) i iznosi:

$$Q_{max3} = Q_{max2} = iA$$

•Prvi slučaj: najveći realizovani Q < od najvećeg mogućeg, proporcionalno t_{01} i t_c

33



34

•Provedene analize $\Rightarrow$ produženje trajanja kiše t_0 const. jačine i , iznad vremena sabiranja sliva (t_c) **NE nastaje** povećanje max. Q hidrograma

u trenutku $t_0 = t$ $\Rightarrow$ učešće cijelog sliva u oticanju

bitna konstatacija $\Rightarrow$ logika: Q sa sliva f -ja trajanja P

konstataciju proširiti: Q se povećava samo do $t_0 = t$

trajanje kiše iznad vremena sabiranja sliva u pogledu max. oticanja $\Rightarrow$ nema uticaj

35

•Slučajevi hidrograma pravilnog oblika su aproksimativnog karaktera

u prirodi nema slivnih površina koje zadovoljavaju prethodne uslove

kod znatnog broja praktičnih problema koriste se neki parametri ovih hidrograma

36

POJAM JEDINIČNOG HIDROGRAMA

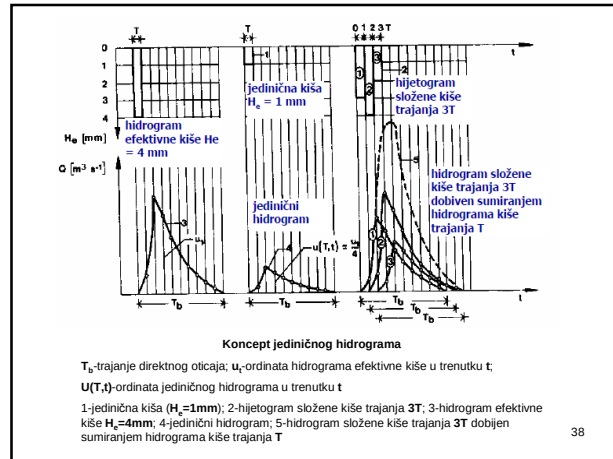
•Konceptiju JH predložio Sherman (1932) – američki inženjer

•**JEDINIČNI HIDROGRAM SLIVA** = hidrogram direktnog oticaja nastalog od 1mm efektivne padavine (H_e) koja je ravnomjerno pala po cijeloj slivnoj površini, const. jačinom (i), tokom zadatog vremenskog intervala (T)

- vremenski interval ili jedinično trajanje $P \Rightarrow$ odabir po želji u f-ji veličine sliva
- obično se uzima za T : $5\text{min} < T < 24\text{h}$

•Problem definisanja JH $\Rightarrow$ isključivo na transformaciju H_e u hidrogramu direktnog oticaja

37



38

•Osnovna pretpostavka teorije JH = **LINEARNOST I USTALJENOST SISTEMA**

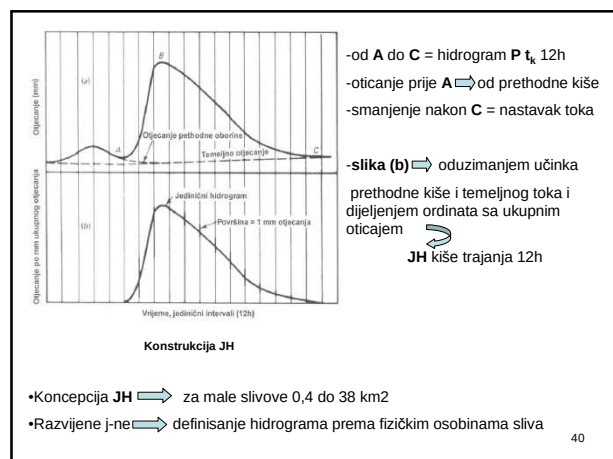
vrijede **NAČELA PROPORCIONALNOSTI I SUPERPOZICIJE**

- pljuskovi istog trajanja daju hidrogram sa istom bazom T_b nezavisno od i
- ordinate kiše (H_e) proporcionalne za pljuskove istog trajanja (t_b)
- oblik hidrograma neovisan od prethodnih ili budućih kiša

•Korisnost JH $\Rightarrow$ tvrdnja da će sve pojedinačne P u slivu sa istim t_k imati oticanje u istom t

primjer $\Rightarrow$ sve P u slivu sa t_k 12h rezultirat će oticanjem koje traje preko 5 dana

39



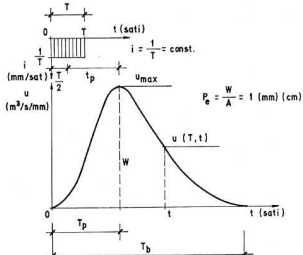
•Konceptija JH $\Rightarrow$ za male slivove 0,4 do 38 km²

•Razvijene j-ne $\Rightarrow$ definisanje hidrograma prema fizičkim osobinama sliva

40

T-satni JEDINIČNI HIDROGRAM

- T-satni JH → hidrogram direktnog oticaja od 1cm (ili 1mm) P_e , trajanja T , koja je uniformno raspoređena na površini sliva i ujednačenog i tokom vremena T



T-satni JH i njegov uzrok-hijetogram jed. padavine trajanja T

-Ordinate JH: $u=u(T,t)$

$U(T,t)$ – ordinata T-satnog JH u t

T – trajanje P_e

-Intenzitet P_e je const.:

$$i_e = \text{const} = 1/T$$

-Sloj P_e :

$$P_e = W/F = i_e * T = 1\text{cm}$$

W – zapremina T-satnog JH

F – površina sliva

41

SCS METODA

- SCS metoda → ponašanje VV na malim slivovima → vrlo pogodna
- USA hidrolozi razvili prije 40-ak godina
- SCS → metoda efektivnog oticanja kao f-ja kumulativnih P i raspoloživog kapaciteta podzemne retenzije sliva
- SCS → na malom slivu za vrijeme dugih kiša → kumulativno oticanje porastom t postaje = kumulativnim P
- Kumulativne padavine P
- Oticanje P_e
- Razlika P i P_e u nekoj tački = višak P koji odlazi u podzemnu retenziju sliva
- S = max. kapacitet podzemne retenzije

SCS – Soil Conservation Service → američka institucija

42

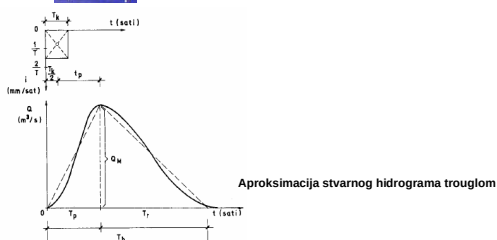
- SCS metoda → sintetički hidrogram u vidu trougla koji je definisan:

a) max. Q

b) $Q_{max,p} = U_{max} P_{e,p}$ U_{max} – max ordinata JH

c) $T_p = t_p + \frac{T_k}{2}$ T_p – vrijeme porasta; T_k – trajanje kiše (mjerodavno)
 t_p – vrijeme "zakašnjenja" sliva

d) $T_r = K T_p$ T_r – vrijeme opadanja; K – faktor sliva (f-ja F sliva)



43

- Pretpostavimo da nema početnog gubitka I_a → u svakom trenutku važi relacija:

$$\frac{P - P_e}{S} = \frac{P_e}{P}$$

- I_a = gubitak prije početka površinskog oticanja

$P - P_e$ = trenutno ispunjen kapacitet retenzije

S = max. kapacitet retenzije

P_e = trenutna kumulativna efektivna P

P = trenutna kumulativna P odnosno max potencijalno tečenje

- Prema preporuci SCS metode → I_a ne zanemarujemo i dobijamo:

$$\frac{P - I_a - P_e}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a - S}$$

44

•Smatra se da parametri **la** i **S** su međusobno zavisni i da je **la=0,2S**

•Znači treba znati **S**

•**S** nije const. $\Rightarrow$ f-ja uslova vlažnosti tla

•Ne postoji kontinualna relacija **S** i prethodnih uslova vlažnosti tla

•Izraz za **Pe** (efektivna **P**) $\Rightarrow$ bolje koristiti izraz **CN** nego parametar **S**

•**CN** = broj krive oticanja ili hidrološki kompleks pokriva terena

•Odnos parametara **CN** i **S**:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad \text{ili} \quad S = \frac{1000}{CN} - 10$$

•Konačan izraz za **Pe**:

$$Pe = 25,4 \frac{(0,03937P - \frac{200}{CN} + 2)^2}{0,03937P + \frac{800}{CN} - 8}$$

P = kumulativna **P** (mm)

CN = broj krive oticanja (iz tabela se određuje) odgovara uslovima vlažnosti 45

• Vrijednost **CN** određuje se na osnovu tri faktora:

- vegetacijski pokrov
- način površinske obrade zemljišta
- tip tla

• Prema **SCS** metodi koristimo slijedeće grupe tla:

- Tip A**: najslabiji uslovi oticanja (vrlo visok stepen infiltracije-propusne podloge)
- Tip B**: nešto bolji uslovi oticanja (srednji stepen v_f -djelimično propusne naslage)
- Tip C**: dobri uslovi oticanja (srednji stepen v_f -djelimično propusne naslage)
- Tip D**: najbolji uslovi oticanja (nizak stepen v_f -nepropusne naslage)

46

Izbor broja krive oticanja **CN** za srednje uslove vlažnosti

Način korištenja zemljišta	Način obrade	Stanje	Tip tla			
			A	B	C	D
Otvorjene knjeve s otvornicom:						
do 500 m ² (60% nepropusno)			77	83	90	92
do 1000 m ² (38% nepropusno)			61	75	83	87
do 2000 m ² (25% nepropusno)			54	70	80	85
do 4000 m ² (20% nepropusno)			51	68	79	84
Popločani parkirni i staze, krovnji			98	98	98	98
Ulice i putevi:						
popločani, s klatnom kanalizacijom			98	98	98	98
popločani, bitumski			76	85	89	91
Zemljani			72	82	87	89
Poslovne površine (85% neprop.)			89	92	94	95
Industrijske zone (72% neprop.)			81	88	91	93
Travnjaci, parkovi, golf tereni, groblja						
pod travom preko 75%			39	61	74	80
pod travom od 50% do 75%			49	69	79	84
Neobrađeno poljoprivredno zemljište			77	86	91	94
Kulture u redovima (vinogradi)	Obrada u smjeru pada terena	slabo	72	81	88	91
	Obrada u smjeru pada terena	dobro	67	78	85	89

47

•**Hidrogram** = grafički prikaz veličine oticanja nekog vodotoka u f-ji vremena

•Oblik hidrograma zavisi od:

- geografskih karakteristika slivnog područja (kapacitet v_f , geološki sastav, pad sliva, oblik sliva)
- trajanja **P** na slivu
- intenzitetu **P** na slivu
- raspodjeli **P** na slivu

48

•Razlikujemo slijedeće tipove hidrograma:

-prirodni hidrogram

(određen direktnim mjerenjem vodostaja na nekom profilu vodotoka)

-sintetički (vještački) hidrogram

(simulira prirodni hidrogram $\Rightarrow$ određen računski preko parametara sliva i kratkotrajnih kiša jakog intenziteta)

-jedinični hidrogram

(prirodni ili sintetički hidrograme od 1mm (ili 10mm) direktnog oticanja koje je jednolično na cijelom slivu u određenom trenutku)

-indeksni ili bezdimenzionalni hidrogram

(konstrukcija na osnovu brojnih jediničnih hidrograma koje prezentira)

49

REZIME I BITNE NAPOMENE – HIDROGRAM OTICAJA

•Teoriju **jediničnog hidrograma** postavio Sherman 1932. godine



pretpostavka da se sliv ponaša kao linearan i stacionaran sistem
kod tog sliva vrijede principi proporcionalnosti i superpozicije

•Po ovoj teoriji na određenom slivu pljuskovi istog trajanja čine hidrograme koji imaju:

- približno jednake vremenske baze nezavisno o trajanju **P**
- veličine ordinata proporcionalne **V** efektivne kiše
- raspodjele oticanja u vremenu nezavisne o prethodnim i budućim kišama

50

•Krivolinijski bezdimenzionalni jedinični hidrogram **SCS** metode možemo aproksimirati ekvivalentnim **troglim hidrogramom**

•Troglog hidrogram ima iste jedinice za vrijeme i protoke i isti % **V** (37,5%) unutar vremena podizanja vala **T_p**

•Koristeći geometriju trougla $\Rightarrow$ slijedeće relacije:

-bazno vrijeme trouglog hidrograma

$$T_B = \frac{1}{0,375} = 2,67 \text{ jedinica vremena}$$

-vrijeme opadanje (recesije) hidrograma:

$$T_R = T_B - T_P = 1,67 \text{ jedinica vremena}$$

$$T_R = 1,67 T_P$$

51

-Ukupna **V** trouglog hidrograma:

$$V = \frac{q_P}{2} (T_P + T_R)$$

-Max. ordinata trouglog hidrograma:

$$q_P = \frac{2V}{T_P (1 + \frac{T_R}{T_P})}$$

-Ukupna **V** trouglog jediničnog hidrograma $\Rightarrow$ moguća i relacijom:

$$V = 10^3 A P_e$$

V – zapremina hidrograma (m³)

A – površina sliva (km²)

P_e – efektivne padavine (mm) $\Rightarrow$ (za jedinični hidrogram **P_e=1mm**)

52

-Korištenjem prethodnih relacija $\Rightarrow$ konačni izraz za max. ordinatu jediničnog trouglog hidrograma

$$q_p = \frac{2(10^3 A)}{3600(2,67T_p)} = 0,208 \frac{A}{T_p} \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm})$$

T_p – u satima

-Vrijeme podizanja jediničnog hidrograma:

$$T_p = \frac{dD}{2} + T_L$$

dD – jedinično trajanje efektivne **P** (sati)

T_L – vrijeme zakašnjenja sliva

T_L = vrijeme od centra mase efektivne padavine **dD** do formiranja maksimuma (h)

53

-Po **SCS** metodi proračun **T_L** iznosi:

$$T_L = 0,001362L^{0,8}(S+1)^{0,7}J^{-0,5}$$

L – hidraulička dužina toka (m)

J – srednji pad terena (%)

S – kapacitet retenzije tla

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

•Najčešća relacija između **T_L** i vremena koncentracije **t_c** je:

$$T_L = 0,6t_c$$

54

• Vrijeme koncentracije **t_c** $\Rightarrow$ definicije:

a) Vrijeme potrebno da voda koja površinski otiče stigne iz najudaljenije tačke sliva do izlaznog profila sliva

b) Vrijeme od kraja ekscesne **P** do tačke infleksije jediničnog hidrograma i iznosi 1,7 jedinice vremena ili **1,7 T_p**, odnosno:

$$t_c = 1,7T_p - dD$$

dD – jedinično trajanje efektivne **P** (sati)

•Pomoću dvije j-ne: $t_c + dD = 1,7T_p$ i $\frac{dD}{2} + 0,6 t_c = T_p$

$$\downarrow$$

$$dD = 0,133 t_c$$

dD treba iznositi oko **1/5 T_p** ili oko **1/7,5 t_c** $\Rightarrow$ da pouzdano formiramo oblik jediničnog hidrograma

55

KOEFICIJENT OTICANJA

•Koeficijent oticanja (**c**) = odnos efektivnih padavina (**H_e**) i bruto padavina (**H_b**)

$$c = \frac{H_e}{H_b}$$

c možemo iskazati i kao odnos **V** oticanja i **V** padavine pale na neku površinu

•Naprijed navedeno shvatanje "c" opravdano $\Rightarrow$ smatra se kako otiču samo neto padavine od ukupnih **P**

•Količina koja se pojavi u oticanju je "efektivna" = stvarno izvršeno

•Količina koja ne otiče = izgubljeno (infiltracija, **ETP**)

•Jednostavno poimanje "c" $\Rightarrow$ određivanje i izbor među najsloženijim problemima u hidrologiji

56

- Koeficijent oticanja: 0,2 do 0,8 (obično)
- Nepropusnost tla u slivu, urbanizacija sliva, zasićenost tla vodom od prethodnih kiša ili sliv pokriven bujnom vegetacijom $\Rightarrow$ čanje koeficijenta oticanja
- Koeficijent oticanja potrebno definisati za:
 - a) cjelokupni sliv ili dio slivnog područja neke rijeke (Bosna, Drina, Sava)
 - b) pojedine urbane sredine (grad Doboj, Zvornik, Brčko)
- a) Slučaj primjeren kod složenijih hidroloških analiza efektivnog oticanja
 - na ovom problemu radio **prof. Srebrenović** (1986)
 - Srebrenović: formula srednjeg godišnjeg oticanja ($\bar{Q}_g$) za sliv rijeke Save:

$$\bar{Q}_g = 0.90\bar{H}_g - 480$$

$\bar{H}_g$ (mm) – srednja godišnja visina padavina

57

- Ako je D (mm) = deficit oticanja
- Deficit oticanja = razlika palih padavina i efektivnog oticanja, onda imamo za:

$$\bar{Q}_g = 0.90\bar{H}_g - 480 \Rightarrow \bar{D}_g = \bar{H}_g - \bar{Q}_g = 0.1\bar{H}_g + 480$$

$\bar{D}_g$ = srednji godišnji deficit oticanja

- Deficit oticanja prilično slabo zavisi od veličine P
- ETP (evapotranspiracija) ima osnovnu važnost
- Isparavanje = preferentni faktor deficita oticaja
- Na osnovu izraza: $\bar{D}_g = \bar{H}_g - \bar{Q}_g = 0.1\bar{H}_g + 480$

koeficijent oticanja možemo izraziti:

$$c = \frac{H_b - D}{H_b}$$

H_b – bruto padavine

58

b) Određivanje vrijednosti "c" sa urbanih ili drugih (manjih) slivnih površina

- Hidrološke analize: uvode se određene specifičnosti prema projektnom zadatku
- Primjena: analiza odvodnje oborinskih voda iz urbanih sredina

osnovni problem: definisanje srednje vrijednosti "c"

različite vrste slivnih površina (asfalt, krovovi, parkovi ...)

- U inženjerskoj praksi: koristimo vrijednosti "c" izražene zavisno od vrste površine

59

Vrsta slivne površine	Koeficijent oticanja c [1]
Metalni krovovi, pocakljeni crijevovi	0.95
Obični krovovi i pakrovi ljevakom	0.90
Asfaltni pokrivi i popunjeni pokriveni hodnici	0.85 do 0.90
Stari, gusto izgrađeni dijelovi grada	0.70 do 0.90
Kamenji ili drveni pločnici bez spojnica	0.80 do 0.85
Kamenji ili drveni pločnici sa spojnica	0.70 do 0.80
Drveni ili cementni krovovi	0.50 do 0.70
Dijelovi grada sa asfalcem, blokovskom, izgrađenim	0.50 do 0.70
Razno vrste pločnika (mozaik, kamen)	0.40 do 0.50
Dijelovi grada sivozemne izgradnje	0.35 do 0.50
Kolovoz od tucanika	0.25 do 0.45
Špinetni putovi	0.15 do 0.30
Sportska igrališta	0.10 do 0.25
Neizgrađene površine	0.10 do 0.15
Parkovi, zeleni površine, vrtovi, livade, omlaske i sl.	0.05 do 0.10
Šumsko površine koje se odvodnjavaju prema gradu	0.01 do 0.10

Vrijednosti koeficijenta oticanja u ovisnosti o vrsti slivne površine

- Iz tabele: mjerodavno $\Rightarrow$ srednja vrijednost koeficijenta oticanja "c" na osnovu:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c_i A_i}{A}$$

c_i – koeficijent oticanja i-te vrste slivne površine

A_i – veličina i-te vrste slivne površine (ha)

A – ukupna površina obrađenog sliva (ha)

60

MAKSIMALNO OTICANJE SA MALIH SLIVOVA

•Postupci za proračun (najčešće zastupljeni u hidrološkoj praksi):

- 1) postupak translacije
- 2) postupak zaliha (akumulacije)

1) Postupak translacije

- a) Racionalni postupak
- b) Postupak izohrona
- c) Postupak jediničnog hidrograma

Navedeni postupci $\Rightarrow$ ne uzimaju u obzir efekte zadržavanja vode u slivu

Zadržavanje vode: depresije, riječna mreža ...

Hidrogram dobijen po ovim metodama $\Rightarrow$ veći vršni protok (Q)


ukupno vrijeme oticanja kraće nego kod realnog hidrograma

61

2) Postupak zaliha (akumulacije)

- a) Postupak trenutnog JH
- b) Postupak sintetičkog JH
- c) Savremeni postupci bazirani na fizikalnim i matematičkim modelima površinskog oticanja

Svi postupci zasnovani na daljem razvoju teorije racionalne metode.

Obrazložiti ćemo **RACIONALNU metodu**


Racionalna metoda $\Rightarrow$ relativno jednostavna i najveća primjena u praksi

62

Racionalna metoda (postupak ili formula)

•Za proračun max. oticanja zadatog povratnog razdoblja na urbanim i drugim manjim slivovima

•Smatra se: postupak primjenjiv samo na slivovima čija A nije veća od 5 km²
druga mišljenja: primjena i na slivovima do 50 km²

•Racionalna metoda: ispunjen uslov $t_{si} > t_v$

t_{si} – vrijeme površinskog sabiranja

t_v – vrijeme tečenja u vodotocima nižeg i višeg reda

•Ograničenje primjene samo na male slivove


metoda ne obuhvata efekat retardacije zbog akumulisanja vode na površini sliva $\Rightarrow$ pretpostavka nepromijenjena jačina P na cijelom slivu

-Veći sliv teže održiva pretpostavka o eliminaciji efekta zadržavanja vode i const. jačine P

63

•Max. protok (Q_{max}) određenog povratnog razdoblja (P_R) na nekom slivnom području:

$$Q_{max} = i(t_o, P_R) A c \quad (1)$$

$i(t_o, P_R)$ – prosječna jačina P određenog trajanja (t_o – min) i određenog P_R (god.)
(l/s/ha)

A – površina sliva (ha)

c – koeficijent oticanja

•Apsolutni vršni Q na hidrogramu $\Rightarrow$ kada u oticanju učestvuje cijela slivna površina, i kada je:

$$t_o = t_c$$

Izraz (1) dobija oblik:

$$Q_{max} = i(t_c, P_R) A c \quad (2)$$

64

•Ako uvrstimo jačinu P u (mm/min), a Q želimo u (m³/s) $\Rightarrow$ izraz (2) prikazati u modificovanom obliku:

$$Q_{max} = 0.166 i(t_c, P_R) A c \quad (3)$$

- Nepropusna podloga u slivu $\Rightarrow c=1 \Rightarrow$ bruto P = efektivnom oticanju
- Na prvi pogled $\Rightarrow$ prethodni izrazi jednostavni
- Određivanje vremena sabiranja sliva i određivanje "c" nije tako lagano

- Najjednostavniji postupak određivanja vremena sabiranja sliva ($t_c - h$)

$\downarrow$
polazište jednostavna pretpostavka

$$t_c = \frac{10 L}{36 v} \quad (4)$$

65

$$t_c = \frac{10 L}{36 v} \quad (4)$$

L – dužina glavnog vodotoka od vododjelnice do izlaznog profila (km)

v – srednja brzina vode u vodotoku (m/s)

v : određuje se proračunom $\Rightarrow$ f-ja hrapavosti, geometrije poprečnog profila, pada korita

- Izraz (4) $\Rightarrow$ najgrublji postupak za određivanje t_c

$\downarrow$
kada nema mogućnosti primjene drugih postupaka

- U literaturi: niz empirijskih izraza za proračun vremena sabiranja sliva

$\downarrow$
svaki izraz za neku analizirano područje (regiju) $\Rightarrow$ ne može se preslikati (koristiti) za neko drugo područje

66

- Znači: prvo definisanje vremena sabiranja (t_c) $\Rightarrow$ mjerodavno vrijeme trajanja P (t_o)

$\downarrow$
odrediti

mjerodavna jačina P (i) $\Rightarrow$ u f-ji t_o i P_R

$\downarrow$
dobijanje zavisnosti intenziteta P – trajanje P – povratno razdoblje

$\downarrow$
odnosno ITP kriva

- Racionalna metoda: možemo odrediti samo vršnu vrijednost hidrograma
- Racionalna metoda: ne možemo odrediti kompletan hidrogram $\Rightarrow$ ograničenje metode
- Racionala metoda: neupotreblija kod dimenz HG $\Rightarrow$ treba cijeli hidrogram
- Cijeli (kompletan) hidrogram $\Rightarrow$ odrediti V vode i trajanje **poplavnog talasa**

67

- Metode kojima definišemo kompletan hidrogram $\Rightarrow$ prednost nad racionalnom

- Metode određivanja kompletnog hidrograma:

metoda izohrona

jedinični hidrogram

$\downarrow$
 $\downarrow$
danas najpoznatiji postupci

68