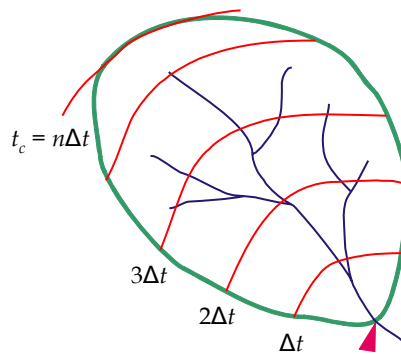


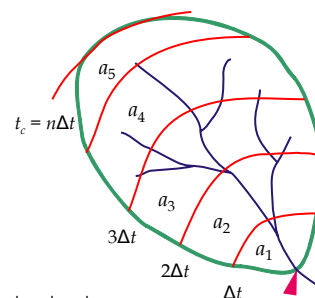
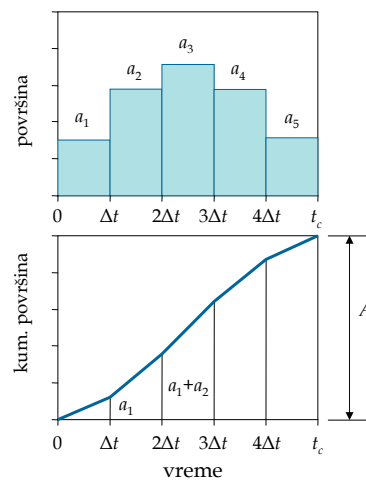
## Modeliranje direktnog oticaja

- Transformacija efektivne kiše u oticaj
  - “propagacija” efektivne kiše do izlaznog profila sliva
- Vreme putovanja i vreme koncentracije
  - izohrone: linije istog vremena putovanja vode do izlaznog profila sliva



## Modeliranje direktnog oticaja

- Dijagram vreme-površina
  - može se shvatiti kao dotok u hipotetički rezervoar na izlaznom profilu sliva



## Metoda izohrona

### Metoda izohrona

- čista translacija efektivne kiše
- kiša pada ravnomerno po površini sliva

$$t = \Delta t: V_{ol} = i_{e1} \cdot \Delta t \cdot a_1 \rightarrow Q_1 = i_{e1} \cdot a_1$$

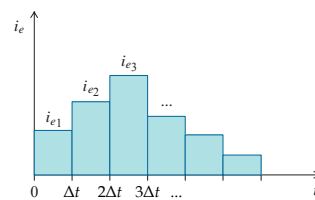
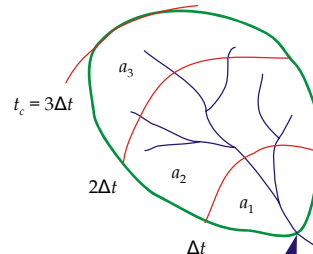
$$t = 2\Delta t: Q_2 = i_{e2} \cdot a_1 + i_{e1} \cdot a_2$$

$$t = 3\Delta t: Q_3 = i_{e3} \cdot a_1 + i_{e2} \cdot a_2 + i_{e1} \cdot a_3$$

$$t = 4\Delta t: Q_4 = i_{e4} \cdot a_1 + i_{e3} \cdot a_2 + i_{e2} \cdot a_3$$

$$t = 5\Delta t: Q_5 = i_{e5} \cdot a_1 + i_{e4} \cdot a_2 + i_{e3} \cdot a_3$$

...



## Metoda izohrona

### Metoda izohrona – specijalni slučajevi

- kiša pada ravnomerno po površini sliva,  $i_e = \text{const}$
- $a_i = a$
- $t_k \rightarrow \infty$

$$t = \Delta t: Q_1 = i_{e1} \cdot a_1 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

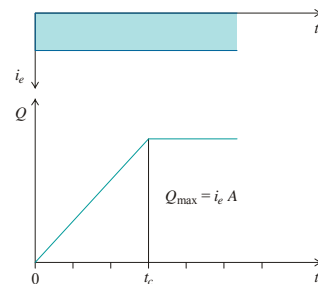
$$t = 2\Delta t: Q_2 = i_{e2} \cdot a_1 + i_{e1} \cdot a_2 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 3\Delta t: Q_3 = i_{e3} \cdot a_1 + i_{e2} \cdot a_2 + i_{e1} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

$$t = 4\Delta t: Q_4 = i_{e4} \cdot a_1 + i_{e3} \cdot a_2 + i_{e2} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

$$t = 5\Delta t: Q_5 = i_{e5} \cdot a_1 + i_{e4} \cdot a_2 + i_{e3} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

...



## Metoda izohrona

### Metoda izohrona – specijalni slučajevi

- kiša pada ravnomerno po površini sliva,  $i_e = \text{const}$
- $a_i = a$
- $t_k = t_c$

$$t = \Delta t: Q_1 = i_{e1} \cdot a_1 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

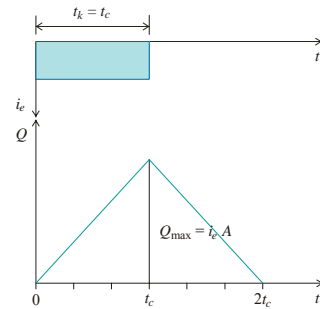
$$t = 2\Delta t: Q_2 = i_{e2} \cdot a_1 + i_{e1} \cdot a_2 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 3\Delta t: Q_3 = i_{e3} \cdot a_1 + i_{e2} \cdot a_2 + i_{e1} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

$$t = 4\Delta t: Q_4 = 0 \cdot a_1 + i_{e3} \cdot a_2 + i_{e2} \cdot a_3 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 5\Delta t: Q_5 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + i_{e3} \cdot a_3 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

$$t = 6\Delta t: Q_6 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + 0 \cdot a_3 = 0$$



## Metoda izohrona

### Metoda izohrona – specijalni slučajevi

- kiša pada ravnomerno po površini sliva,  $i_e = \text{const}$
- $a_i = a$
- $t_k > t_c$

$$t_c = 3\Delta t, \quad t_k = 4\Delta t$$

$$t = \Delta t: Q_1 = i_{e1} \cdot a_1 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

$$t = 2\Delta t: Q_2 = i_{e2} \cdot a_1 + i_{e1} \cdot a_2 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

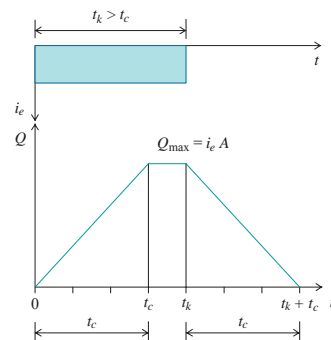
$$t = 3\Delta t: Q_3 = i_{e3} \cdot a_1 + i_{e2} \cdot a_2 + i_{e1} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

$$t = 4\Delta t: Q_4 = i_{e4} \cdot a_1 + i_{e3} \cdot a_2 + i_{e2} \cdot a_3 = 3i_e a = i_e A$$

$$t = 5\Delta t: Q_5 = 0 \cdot a_1 + i_{e4} \cdot a_2 + i_{e3} \cdot a_3 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 6\Delta t: Q_6 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + i_{e4} \cdot a_3 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

$$t = 7\Delta t: Q_7 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + 0 \cdot a_3 = 0$$



## Metoda izohrona

### Metoda izohrona – specijalni slučajevi

- kiša pada ravnomerno po površini sliva,  $i_e = \text{const}$
- $a_i = a$
- $t_k < t_c$

$$t_c = 3\Delta t, \quad t_k = 2\Delta t$$

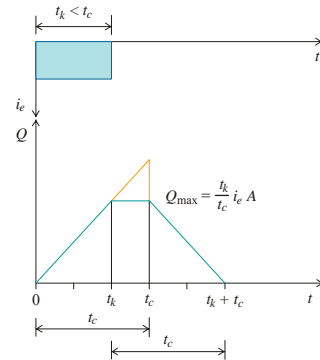
$$t = \Delta t: \quad Q_1 = i_{e1} \cdot a_1 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

$$t = 2\Delta t: \quad Q_2 = i_{e2} \cdot a_1 + i_{e1} \cdot a_2 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 3\Delta t: \quad Q_3 = 0 \cdot a_1 + i_{e2} \cdot a_2 + i_{e1} \cdot a_3 = 2i_e a = \frac{2}{3} i_e A$$

$$t = 4\Delta t: \quad Q_4 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + i_{e2} \cdot a_3 = i_e a = \frac{1}{3} i_e A$$

$$t = 5\Delta t: \quad Q_5 = 0 \cdot a_1 + 0 \cdot a_2 + 0 \cdot a_3 = 0$$



## Racionalna metoda

### Racionalna metoda

- Mulvaney, 1850

$$Q = \eta \cdot i \cdot A$$

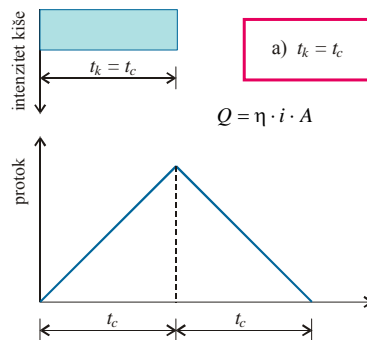
$\eta$  – koeficijent oticaja

$i$  – intenzitet kiše trajanja  $t_k = t_c$

$A$  – površina sliva

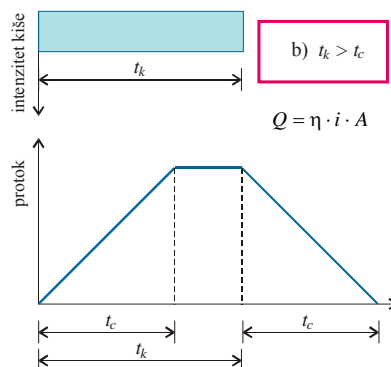
## Racionalna metoda

- Tri osnovna slučaja



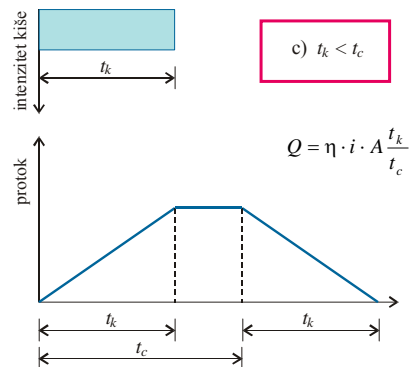
## Racionalna metoda

- Tri osnovna slučaja



## Racionalna metoda

- Tri osnovna slučaja

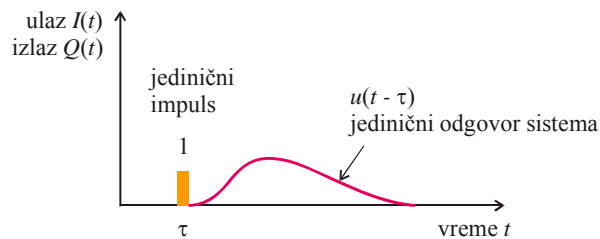


## Jedinični hidrogram

- Pretpostavka: za kiše sličnih karakteristika očekuje se sličan oblik hidrograma oticaja
- Jedinični hidrogram – tipičan hidrogram za dati sliv jedinične zapremine otekle vode
- Definicija: jedinični hidrogram = hidrogram direktnog oticaja usled jedinične efektivne kiše (1 mm) konstantnog intenziteta koja je ravnomerno raspoređena po površini sliva

## Jedinični hidrogram

- Sliv se tretira kao linearni sistem
- Definisan odgovor sistema (izlaz) na jedinični impuls (ulaz)



- jedinični impuls = efekt. kiša kratkog trajanja  $\Delta t \rightarrow 0$ , takva da je  $i \cdot \Delta t = 1 \text{ mm}$
- interval  $\Delta t$  treba da bude dovoljno mali tako da se može uzeti da je  $i \approx \text{const.}$

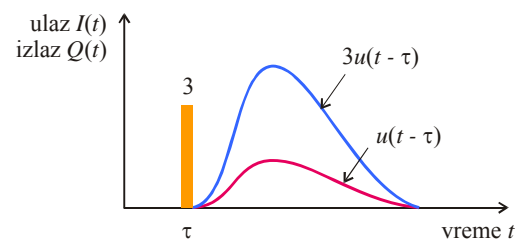
## Jedinični hidrogram

- Jedinični hidrogram kao model oticaja - osnovne pretpostavke:
  - intenzitet efektivne kiše konstantan tokom trajanja kiše
  - efektivna kiša ravnomerno raspoređena na slivu
  - za efektivnu kišu zadatog trajanja baza hidrograma oticaja je uvek ista, a ordinate su proporcionalne ukupnom sloju oticaja (ukupnoj efektivnoj kiši)
  - jedinični hidrogram je jedinstven za dati sliv i nepromenljiv u vremenu

## Jedinični hidrogram

### ■ Teorija linearnih sistema:

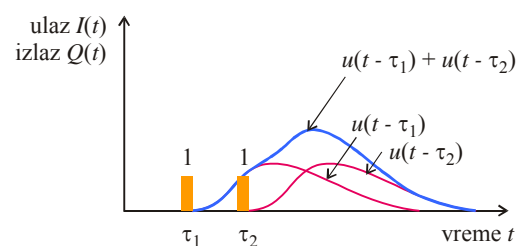
- princip proporcionalnosti: odgovor sistema na impuls veličine  $c$  jednak je odgovoru sistema na jedinični impuls pomnoženom sa  $c$



## Jedinični hidrogram

### ■ Teorija linearnih sistema:

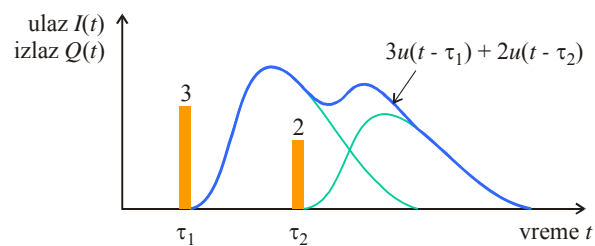
- princip superpozicije: odgovor sistema na dva jedinična impulsa jednak je zbiru odgovora na svaki od dva impulsa





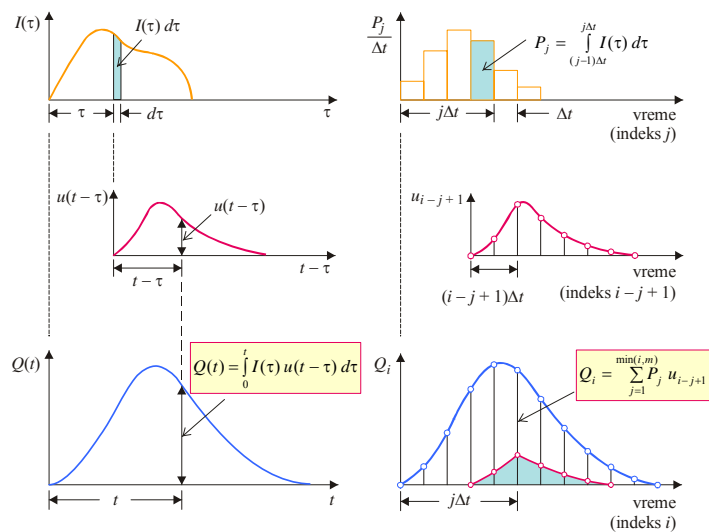
## Jedinični hidrogram

- Teorija linearnih sistema:
  - princip superpozicije i princip proporcionalnosti zajedno



## Jedinični hidrogram

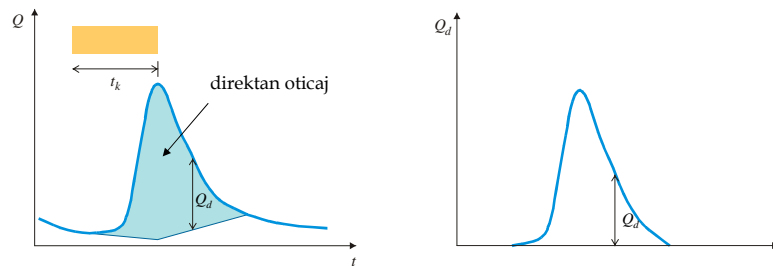
- Odgovor (izlaz) linearnog sistema  $Q(t)$  na ulaz  $I(t)$  opisuje se integralom ili zbirom **konvolucije**



## Jedinični hidrogram

### ■ Određivanje na osnovu osmotrenih podataka (identifikacija)

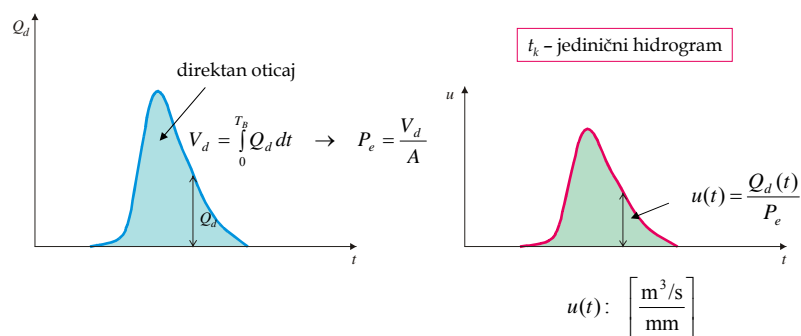
1. odvajanje direktnog i baznog oticaja



## Jedinični hidrogram

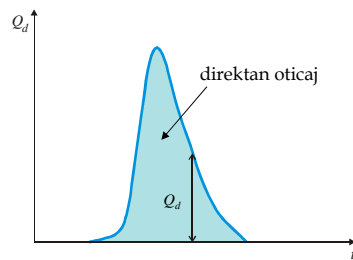
### ■ Određivanje na osnovu osmotrenih podataka (identifikacija)

2. određivanje efektivne kiše i proračun JH

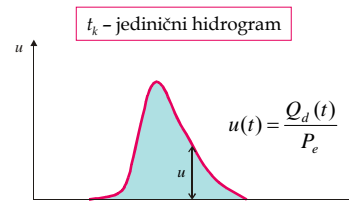


## Jedinični hidrogram

### ■ Važna karakteristika JH



$$\int_0^{T_B} Q_d(t) dt = V_d = P_e \cdot A$$



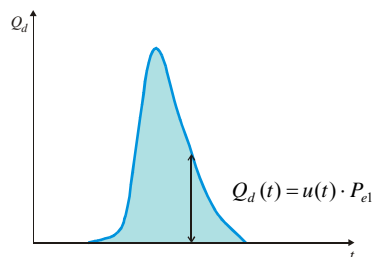
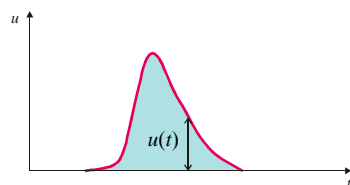
$$\int_0^{T_B} u(t) dt = \int_0^{T_B} \frac{Q_d(t)}{P_e} dt = \frac{1}{P_e} \int_0^{T_B} Q_d(t) dt = \frac{1}{P_e} \cdot V_d = A$$

## Jedinični hidrogram

### ■ Primena

- za kišu trajanja  $t_k$  sa efektivnom visinom  $P_{e1}$ :

$t_k$  - jedinični hidrogram

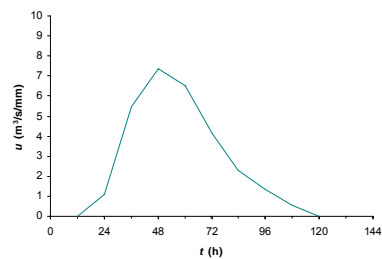


## Jedinični hidrogram

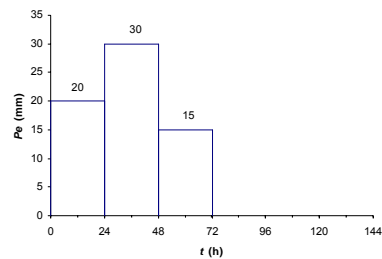
### ■ Primena

- za složenu kišu trajanja  $nt_k$ : superpozicija  $n$  elementarnih hidrograma

$t_k$  – jedinični hidrogram



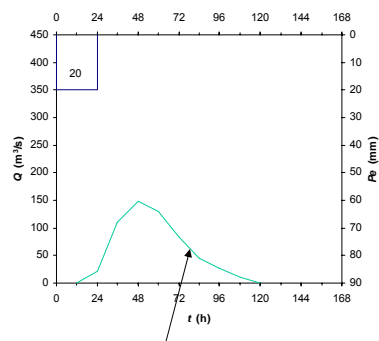
kiša trajanja 3 x 24h



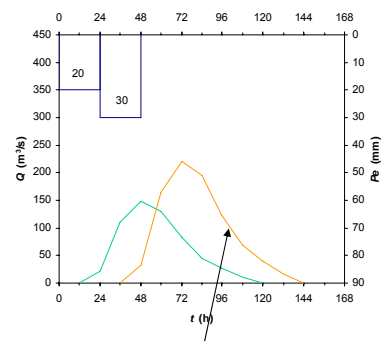
## Jedinični hidrogram

### ■ Primena

- za složenu kišu trajanja  $nt_k$ : superpozicija  $n$  elementarnih hidrograma



$$Q_{d1}(t) = u(t) \cdot P_{e1}$$

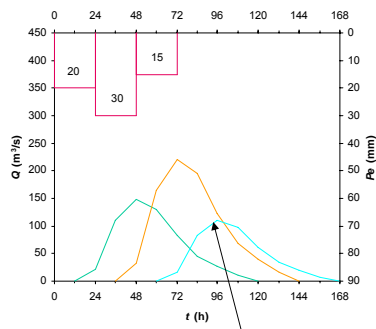


$$Q_{d2}(t) = u(t - 24) \cdot P_{e2}$$

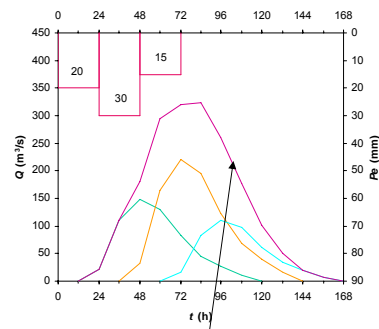
## Jedinični hidrogram

### ■ Primena

- za složenu kišu trajanja  $nt_k$ : superpozicija  $n$  elementarnih hidrograma



$$Q_{d3}(t) = u(t - 48) \cdot P_{e3}$$



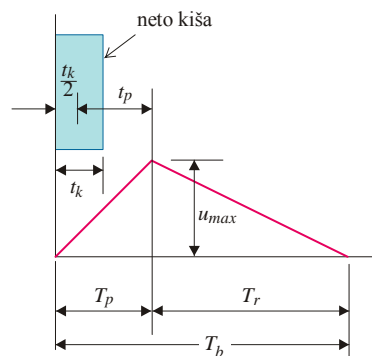
$$Q_d(t) = Q_{d1}(t) + Q_{d2}(t) + Q_{d3}(t)$$

## Sintetički jedinični hidrogrami

- Za neizučene slivove
- Konstruišu se na osnovu karakteristika:

- vreme podizanja  $T_p$
- vreme opadanja  $T_r$
- maksimalna ordinata  $u_{max}$
- vreme kašnjenja  $t_p$ :  
rastojanje između težišta  
hijetograma efektivne kiše i  
maksimalne ordinate  
jediničnog hidrograma

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2}$$



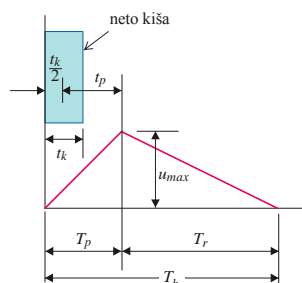
## Sintetički jedinični hidrogrami

- regionalne veze između karakteristika sliva i karakteristika jediničnog hidrograma
  - npr.  $u_m(A)$ ,  $t_p(L, L_c, I_{sl})$
- karakteristike nisu nezavisne, jer je potrebno ispuniti uslov:

$$\int_0^{T_B} u(t) dt = A$$

## Sintetički jedinični hidrogrami

- Sintetički jedinični hidrogram po SCS



$$T_r = 1.67T_p \rightarrow T_B = 2.67T_p$$

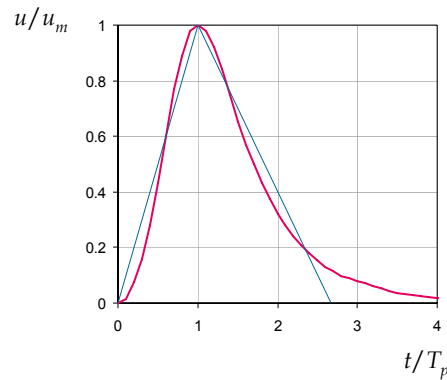
$$\int_0^{T_B} u(t) dt = \frac{u_m \cdot T_B}{2} = A \rightarrow u_m = 0.75 \frac{A}{T_p}$$

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2}$$

$$t_p \approx 0.6t_c$$

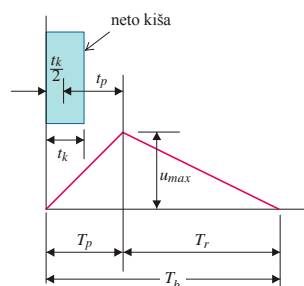
## Sintetički jedinični hidrogrami

- Sintetički jedinični hidrogram po SCS
  - bezdimenzionalni krivolinijski JH



## Sintetički jedinični hidrogrami

- Sintetički jedinični hidrogram po Jovanoviću i Brajkoviću
  - modificovani sintetički JH po SCS



$$T_r = rT_p \rightarrow T_b = (1 + r)T_p$$

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2}, \quad t_p = at_k + t_0$$

$$t_0 = 0.4L^{0.67} \left( \frac{L \cdot L_c}{\sqrt{J_u}} \right)^{0.086}$$

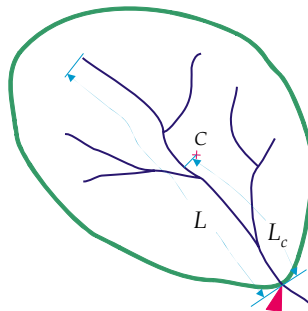
$$L, L_c \text{ [km]}, \quad J_u \text{ [%]}, \quad t_0 \text{ [h]}$$

$$a = f(A) = 0.3 \div 0.7$$

## Sintetički jedinični hidrogrami

### ■ Neke fizičke karakteristike sliva

- $L$  – dužina glavnog toka, meri se od izlaznog profila sliva po glavnom toku do izvora
- $L_c$  – dužina glavnog toka do težišta sliva, meri se od izlaznog profila sliva do tačke na glavnom toku koja je najbliža težištu sliva

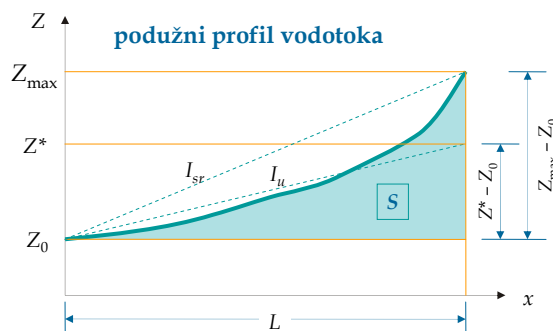


## Sintetički jedinični hidrogrami

### ■ Neke fizičke karakteristike sliva

- $I_{sr}$  – srednji nagib glavnog toka
- $I_u$  – uravnati nagib glavnog toka, računa se pomoću uravnate kote  $Z^*$  koja se određuje iz uslova

$$S = \int (Z - Z_0) dx = \frac{1}{2} (Z^* - Z_0) L$$



$$I_{sr} = \frac{Z_{\max} - Z_0}{L}$$

$$I_u = \frac{Z^* - Z_0}{L}$$



## Sintetički jedinični hidrogrami

### ■ Preporuke za koeficijent $r$

Vrsta površine / metoda	Koeficijent $r$
racionalna teorija	1
urbano, veliki nagib	1.25
SCS	1.67
urbano/ruralno	2.25
ruralno, brdovito	3.33
ruralno, blagi nagib	5.5
ruralno, ravno	12.0

## Sintetički jedinični hidrogrami

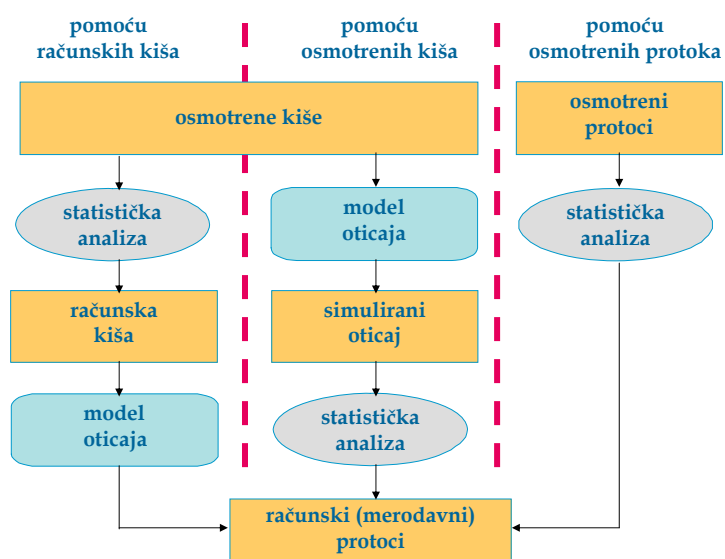
### ■ Procena vremena koncentracije – formule iz prakse

Metod/autor	Formula za $t_c$ (min)	Napomena
Kirpich (1940)	$t_c = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385}$ $L$ = dužina toka od izvora do izlaza (m) $S$ = prosečan nagib sliva (m/m)	za ruralne slivove sa jasno izraženim rečnim tokovima i strimim nagibima; za asfaltirane površine ili betonske kanale preporučuje se da se $t_c$ pomnoži sa 0.4
FAA (1970)	$t_c = 0.7 (1.1 - c) L^{0.5} S^{-0.333}$ $c$ = koeficijent oticaja u racionalnoj metodi $L$ = dužina površinskog tečenja (m) $S$ = nagib površine (m/m)	formula razvijena za odvodnjavanje aerodroma, a može se koristiti za urbane slivove
Kinematski talas	$t_c = 1.36 L^{0.6} n^{0.6} i^{-0.4} S^{-0.3}$ $L$ = dužina površinskog tečenja (m) $n$ = Maningov koeficijent hrapavosti $i$ = intenzitet ef. kiše (mm/min) $S$ = prosečan nagib površine (m/m)	za površinsko tečenje na razvijenim površinama; formula se rešava iterativno pošto sadrži intenzitet efektivne kiše koji zavisi od vremena koncentracije (uz korišćenje zavisnosti intenzitet kiše – trajanje – povratni period)
SCS metoda kašnjenja	$t_c = 0.0136 L^{0.8} S^{-0.5} (1000/CN - 9)^{0.7}$ $L$ = najduži put tečenja na slivu (m) $CN$ = SCS broj krive $S$ = prosečan nagib sliva (m/m)	za male ruralne slivove; smatra se dobrom za potpuno pokrivene površine, dok za mešovite površine daje prececnjeno $t_c$ ; nastala od pretpostavke da je $t_c = 1.67 t_p$
SCS metoda brzina	$t_c = 1/60 \Sigma (L_i / v_i)$ $L_i$ = dužina putanje tečenja (m) $v_i$ = prosečna brzina tečenja (m/s)	podrazumeva određivanje brzina površinskog tečenja

## ANALIZA VELIKIH VODA

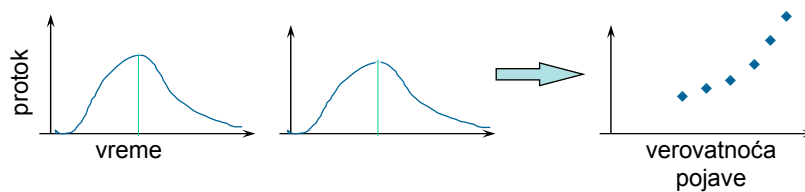
- Objekti/sistemi za zaštitu od velikih voda projektuju se tako da obezbede određeni stepen zaštite (tj. postoji dozvoljeni rizik)
- Merodavna velika voda – najveći talas velike vode koji objekat/sistem može da bezbedno primi
- Merodavne (računske, projektne) veličine
  - maksimalni protok
  - maksimalni nivo
  - zapremina
- Merodavna VV vezuje se za određeni **rizik** (verovatnoću pojave još veće VV)
  - verovatnoća prevazilaženja tokom jedne godine
  - verovatnoća prevazilaženja tokom veka objekta
  - verovatno maksimalna velika voda

## Analiza velikih voda



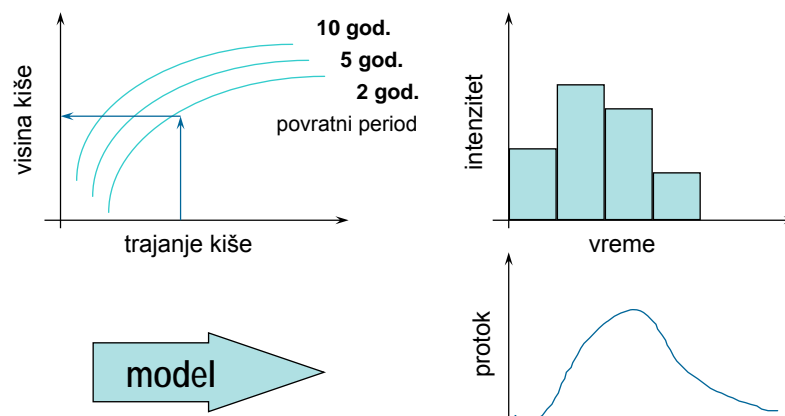
## Analiza velikih voda na osnovu osmotrenih protoka

- osmotreni protoci - statistička analiza - merodavni protok



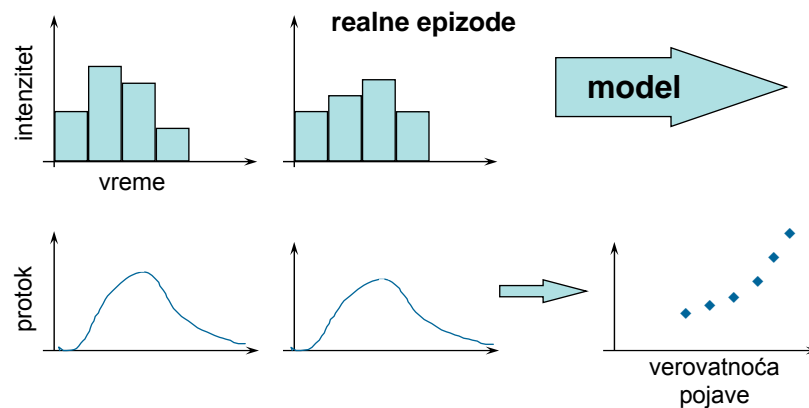
## Analiza velikih voda na osnovu računskih kiša

- osmotrene padavine - računaska kiša - simulacija oticaja - merodavni protok



## Analiza velikih voda na osnovu osmotrenih kiša

- osmotrene padavine - simulacija oticaja - statistička analiza - merodavni protok



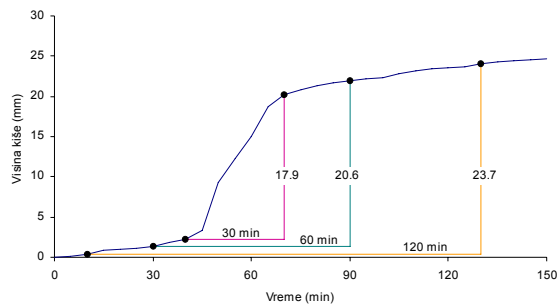
## Računske kiše

- Računska visina kiše:
  - visina kiše zadatog trajanja i verovatnoće pojave (povratnog perioda)
- Postupak
  - izdvajanje maksimalnih visina kiša u zadatim vremenskim intervalima (na osnovu pluviografskih traka)
  - formiranje nizova godišnjih maksimalnih visina kiša zadatog trajanja
  - statistička analiza za sva trajanja
  - formiranje zavisnosti HTP (visina kiše, trajanje kiše i povratni period)

## Računske kiše

### ■ Računske visine kiša

- izdvajanje maksimalnih visina kiša u zadatim vremenskim intervalima (na osnovu pluviografskih traka)



t (min)	P (mm)	Priraštaji na		
		30 min	60 min	120 min
0	0.0			
5	0.1			
10	0.3			
15	0.9			
20	1.0			
25	1.2			
30	1.4	1.4		
35	1.9	1.8		
40	2.3	1.9		
45	3.4	2.5		
50	9.3	8.4		
55	12.3	11.1		
60	15.0	13.6	15.0	
65	18.7	16.8	18.5	
70	20.2	17.9	19.8	
75	20.8	17.5	20.0	
80	21.4	12.0	20.4	
85	21.7	9.4	20.5	
90	22.0	7.0	20.6	
95	22.2	3.5	20.3	
100	22.4	2.2	20.1	
105	22.8	1.9	19.4	
110	23.2	1.8	13.8	
115	23.4	1.7	11.1	
120	23.6	1.6	8.6	23.6
125	23.7	1.5	5.0	23.5
130	24.1	1.7	3.9	23.7
135	24.2	1.5	3.4	23.4
140	24.5	1.3	3.1	23.5
145	24.6	1.2	2.9	23.4
150	24.7	1.1	2.8	23.3
Maks. priraštaj (mm):		17.9	20.6	23.7

## Računske kiše

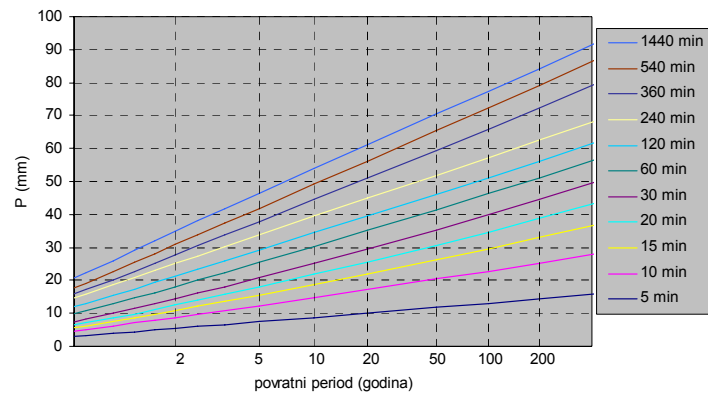
### ■ Računske visine kiša

- formiranje nizova godišnjih maksimalnih visina kiša zadatog trajanja

Trajanje (min)	Godišnji maksimumi visine kiše (mm)					
	1959	1960	1961	...	1985	1986
5	8.2	4.0	7.7		4.0	4.8
10	15.5	7.8	10.6		6.3	7.5
15	20.5	11.1	12.0		6.4	9.3
20	23.6	14.5	12.9		6.9	9.8
30	29.8	18.7	13.4		8.0	10.1
45	39.3	20.3	15.2		9.0	11.1
60	41.3	20.7	16.7		10.4	14.5
90	42.7	21.8	19.2		11.0	16.2
120	43.5	22.1	21.9		12.4	18.3
150	45.1	22.1	23.3		13.8	22.6
180	46.4	22.5	24.3		14.6	25.1
240	48.0	23.9	25.8		16.6	30.7
360	48.3	25.1	29.2		20.9	36.0
540	48.3	25.3	31.4		25.3	36.0
720	48.4	25.8	35.0		28.4	36.0
1080	48.4	27.3	38.8		29.6	36.0
1440	49.8	27.3	44.7		29.6	36.0

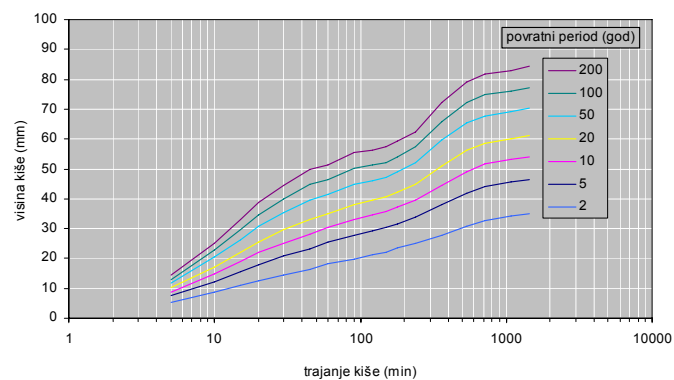
## Računske kiše

- Računske visine kiša
  - statistička analiza za sva trajanja



## Računske kiše

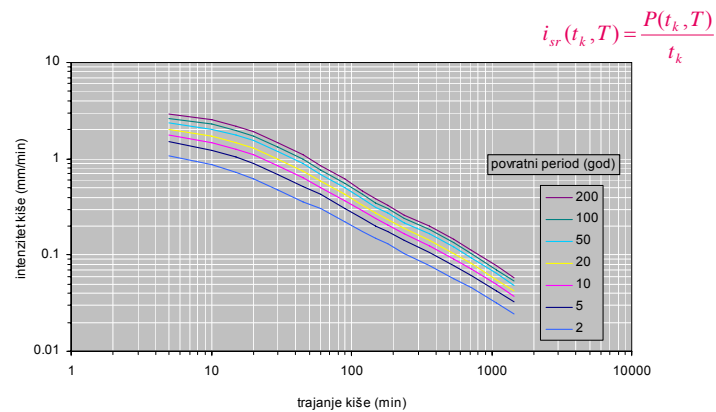
- Računske visine kiša
  - formiranje zavisnosti HTP (visina kiše, trajanje kiše i povratni period)



## Računske kiše

### ■ Računski intenziteti kiša

- formiranje zavisnosti ITP (intenzitet kiše, trajanje kiše i povratni period)
  - intenzitet = prosečni intenzitet kiše tokom trajanja



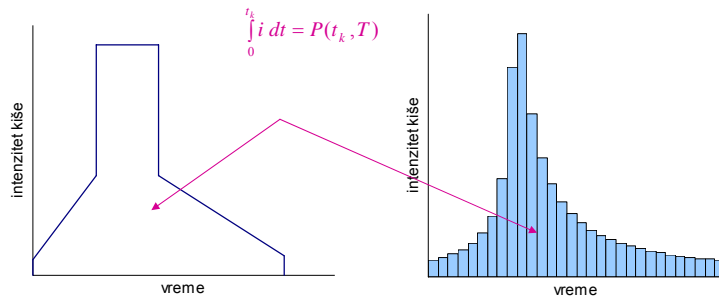
## Računske kiše

### ■ Računski hijetogrami (računski oblici kiša)

- formiranje oblika kiše za zadatu visinu, trajanje i povratni period kiše
- sintetički oblici kiša
- statistički oblici kiša

## Računske kiše

- Računski hijetogrami (računski oblici kiša)
  - sintetički oblici kiša



## Računske kiše

- Računski hijetogrami (računski oblici kiša)
  - statistički oblici kiša
  - posmatraju se izmerene kišne epizode za jedno trajanje kiše
  - formiraju se bezdimenzionalne sumarne linije kiše  $P(t) / P(t_k)$
  - za fiksirane vremenske trenutke  $t^* < t_k$  (npr.  $t^* = 0.1t_k, 0.2t_k, \dots$ ) formiraju se nizovi bezdimenzionalnih visina kiša  $P(t^*) / P(t_k)$  i statistički se analiziraju
  - formira se bezdimenzionalna sumarna linija za jednu verovatnoću prevazilaženja

