(1)

Flood Routing استتباع الفيضان

Flood Routing: is a technique of determining the flood hydrograph a section of a river by utilizing the data of flood flow at one or more upstream section

هو تقنية حساب الهيدروغراف عند مقطع ما في النهر باستخدام بيانات التصريف للفيضان عند مقطع أو اكثر في أعالي النهر .

type of Routing

1. Reservoir Routing
2. River Routing

فائدة الاستتباع

فائدة الاستتباع تكمن في تحليل الهيدروغراف للتكهن بالفيضان لدرء أخطاره وتصميم المسيل المائي للسد من خلال نتائج الاستتباع في الخزان .

Basic equation المعادلات الأساسية للاستتباع

هناك نوعين من الاستتباع حسب نوع الطريقة

1. الاستتباع الهيدروليكي والذي يشمل معادلات الاتصال والزخم (سانت- فينانت Saint venant) والتي تصف حركة الجريانات غير الثابت unsteady
2. الاستتباع الهيدرولوجي ، والذي سندرسه بالتفصيل .

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \qquad (1)$$

approximate the above equation by differency form as:

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

$$I\Delta t - Q\Delta t = \Delta S$$

لاحظ أن ΔS هو التغير في الخزين خلال الفترة الزمنية (Δt) والتساؤل المطروح أي من قيم I و Q ستؤخذ بنظر الاعتبار في بداية الفترة أم في نهايتها والجواب الأمثل هو معدل القراءات خلال هذه الوحدة الزمنية وعليه يكون:

$$\boxed{\bar{I}\Delta t - \bar{Q}\Delta t = \Delta S} \qquad (2)$$

هذه هي المعادلة الأساسية للاستتباع الهيدرولوجي

Storage Routing استنباط الخزان الهيدرولوجي

يجب توفر المعلومات حول

① موجة فيضان داخلة للخزان معرفة بالهيدروغراف $I(t)$
مع وجود مخرج أو مسيل مائي لهذه البحيرة أسفل الخزان.

② التصاريف الخارجة من المسيل المائي هي دالة للمنسوب:
$Q = f(h)$

③ الخزين وتغير الخزين هو دالة للمنسوب أيضاً
$S = f(h)$

عندها فقط يمكن ايجاد الآتي:

① علاقة الخزين بالزمن $S = f(t)$

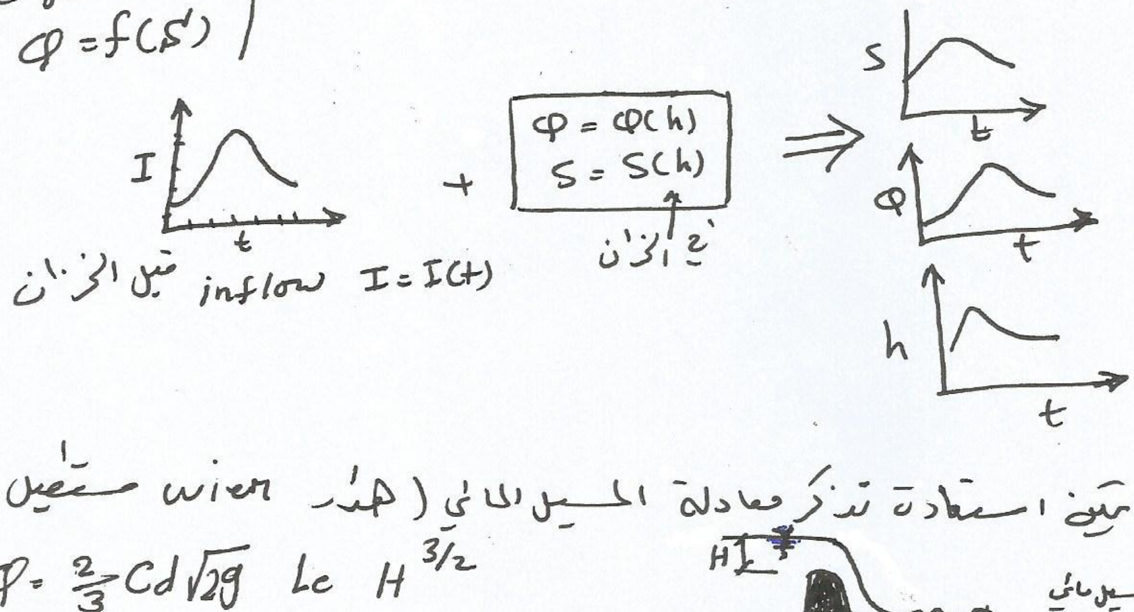
② علاقة المنسوب بالزمن $h = f(t)$

③ وأخيراً علاقة التصريف الخارج بالزمن $Q = f(t)$ وهو الهيدروغراف الخارج وبذلك أمكن استنباط تغير الموجة الداخلة والموجة الخارجة من الخزان.

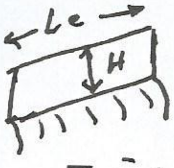
ملخص

$$\left.\begin{aligned} \rightarrow I &= I(t) \\ Q &= Q(h) \\ S &= S(h) \end{aligned}\right\} \text{given} \Rightarrow \begin{aligned} S &= f(t) \\ * Q &= f(t) \leftarrow \\ h &= f(t) \end{aligned}$$

may be given as $Q = f(S)$

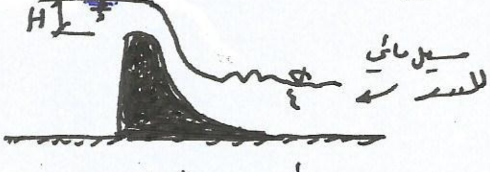


يمكن استعادة تذكر معادلة المسيل المائي (هدار weir مستطيل)



$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \; L_c \; H^{3/2}$$

Note that $Q = f(H)$



أي أن Q = دالة للمنسوب باعتبار أن H يمثل العمق فوق القمة لكن يمكن إضافة منسوب القمة الى H ليصبح منسوباً كاملاً

③ (Pul)

هناك عدة طرق للاستنباع منها طريقة بُل المحورة وطريقة كودرج Goodrich

الذي في صياغة المعادلة الاساسية ليس إلا وكلاهما يعطي نفس النتائج في

الأخير سنكتب الصياغة للطريقتين باعتماد المعادلة الاساسية وسنركز

على دراسة بُل المحورة .

لا ننسى المعادلة الاساسية هي :

$$\bar{I}\Delta t - \bar{\Phi}\Delta t = \Delta S$$

حيث أن الخزين Δt الفترة الزمنية Φ التصريف الخارج وفي ترميز آخر

ربما يكون O على فرض أنه outflow و I هو التصريف الداخل Inflow

والاشارة " ‾ " تدل على المتوسط لذا ممكن كتابة المعادلة كالآتي :

$$\left(\frac{I_1+I_2}{2}\right)\Delta t - \left(\frac{\Phi_1+\Phi_2}{2}\right)\Delta t = S_2 - S_1 \quad \text{—③}$$

الارقام 2،1 بداية الفترة ونهايتها .

* صياغة بُل المحورة : Modified Pul's method

نعيد تنظيم المعادلة (3) بحيث يكون المجاهيل في الجهة اليمنى والمعاليم في

الجهة اليسرى ، أي أن

$$\left(\frac{I_1+I_2}{2}\right)\Delta t + \underbrace{\left(S_1 - \frac{\Phi_1\Delta t}{2}\right)}_{\text{معاليم}} = \underbrace{\left(S_2 + \frac{\Phi_2\Delta t}{2}\right)}_{\text{مجاهيل}} \quad \text{—④}$$

لاحظ في أي من الطريقتين يجب توفر المدخلات الذي تم التطرق إليه

سابقاً فضلاً عن معرفة القيم الابتدائية لـ S و I و Φ عند $t=0$.

* صياغة كودرج

$$\overbrace{(I_1+I_2) + \left(\frac{2S_1}{\Delta t} - \Phi_1\right)}^{\text{معاليم}} = \overbrace{\left(\frac{2S_2}{\Delta t} + \Phi_2\right)}^{\text{مجاهيل}} \quad \text{—⑤}$$

نلاحظ الفرق جوهري هنا أن الطريقة الثانية ستكون أرقامها كبيرة

ولذا فان الخطأ سيكون مقارنة صغير في قيمة الارقام أو طريقة بُل المحورة

صغيره فوجب الانتباه الى الارقام بعد الفارزة والكسور .

الآن نبدأ بطريقة بُل المحورة Modified Pul

باعتماد المعادلة (4) والخطوات التالية يمكن معرفة آلية

الحل بالطريقة المشار إليها : -

For practical use in hand calculation, the following method is very convenient :-

1. From known storage-elevation data, prepare the curve $(S+\frac{Q\Delta t}{2})$ vs. elevation, Δt was chosen to be (20–40)% of the time of rise of Inflow hydrograph
2. On the same plot, prepare curve of outflow discharge vs. elevation.
3. S, h and Q at starting of routing is known, thus;
   $(S_1 - \frac{Q_1\Delta t}{2})$, $(\frac{I_1+I_2}{2})\Delta t$, Δt
   are known and hence by eq (4) :-
   $(S_2 + \frac{Q_2\Delta t}{2})$ is determind.
4. The water elevation corresponding to $(S_2+\frac{Q_2\Delta t}{2})$ is found using plot of step (1).
5. Subtract $Q_2\Delta t$ from $(S_2+\frac{Q_2\Delta t}{2})$ to get $(S_2 - \frac{Q\Delta t}{2})$ from
   Set it as $(S_1 - \frac{Q_1\Delta t}{2})$ for the begining of the next step (Δt).
6. The procedure is repeated until the entire Inflow hydrograph is routed.

① من معرفة علاقة الخزين - المنسوب وبيانات التصريف مقابل المنسوب ($S+\frac{Q\Delta t}{2}$) ترسم
مقابل المنسوب

② على نفس الرسم يتم اعداد منحني التصريف الخارج Q مقابل المنسوب

③ من معرفة الخزين والمنسوب والتصريف الخارج Q في بداية الاستنباع فإن كل المقادير التالية هي معلومة ($S_1-\frac{Q_1\Delta t}{2}$) ، $\frac{I_1+I_2}{2}$ ، Δt وبناءً عليه يمكن حساب ($S_2+\frac{Q_2\Delta t}{2}$) من المعادلة (4)

④ يحسب منها منسوب الماء المقابل لهذه القيمة من الرسم في الفقرة (1) أما التصريف الخارج Q فيحسب من الرسم البياني تم اعداده في الفقرة (2).

⑤ يطرح $Q_2\Delta t$ من المقدار ($S_2+\frac{Q_2\Delta t}{2}$) للحصول على ($S_2-\frac{Q_2\Delta t}{2}$) والمساوي ($S_1-\frac{Q_1\Delta t}{2}$) للخطوة الزمنية اللاحقة.

⑥ تكرار العملية لغاية اكمال استنباع الجريان الداخل كاملاً.

Example: [8.1 in the textbook]

A reservoir has the following elevation-discharge and storage relationship

El. (m)	Storage $10^6\ m^3$	outflow m^3/s
100	3.35	0
→ 100.5	3.472	10
101	3.88	26
101.5	4.383	46
102	4.882	72
102.5	5.370	100
102.75	5.527	116
103	5.856	130

* هذه خصائص الخزان ومميزات المسيل المائي ولم يحدث بعد الاستيعاب [illegible] لعدم ورود I .

* ممكن أن تعطى هذه المعلومات كمعادلات فتسهل عملية الحل.

when the reservoir level at 100.5 m, the following flood hydrograph entered the reservoir.

Time:	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
$I\ m^3/s$:	10	20	55	80	73	58	46	36	55	20	15	13	11

Raut the flood and get (1) outflow-hydrograph (Q vs. time)
(2) reservoir elevation vs. time during the passage of flood wave.

Solution:

(1) select $\Delta t \approx (20-40)\%\ (18) = 3.6 - 7.2$ hr; say $\Delta t = 6$ hrs compatible with Δt of inflow hydrograph.

$$\Delta t = 6 \times 60 \times 60 = 0.0216 \times 10^6 \text{ sec}$$

(2) prepare the following table to use it in establishing a graph of Q vs. El and $(\frac{Q\Delta t}{2}+S)$ vs. El.

(الجدول المساعد)

Ele (m):	100	100.5	101	101.5	102	102.5	102.75	103
$Q\ (m^3/s)$:	0	10	26	46	72	100	116	130
$(\frac{Q\Delta t}{2}+S)$: Mm^3	3.35	3.58	4.16	4.88	5.66	6.45	6.78	7.26

من الجدول الأول → $3.472 + \frac{10(0.0216)}{2} = 3.58\ Mm^3$

سيتم رسم الشكلين من هذا الجدول

Start the Routing

El. at $t=0$ is 100.5 where Q from table $= 10\ m^3/s$

$$\left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)_1 = \left(3.472 - \frac{10\,(0.0216)}{2}\right) = 3.364\ Mm^3$$

أو الخزن + التسريب
$3.58 - Q\Delta t = 3.364$

من المعادلة (4)

$$\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)_2 = \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)\cdot \Delta t + \left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)_1$$

$$= \frac{10+20}{2}(0.0216) + 3.364 = 3.688\ Mm^3$$

* يمكن استخدام الجدول المعلوم مباشرة دون الحاجة الى رسمه لو كانت القيم المستعملة موجودة في الجدول ولا تحتاج الى استكمال وإلا وجب استخدام المنحنى أو اذا أعطيت معادلة يكون الأفضل. بما أن القيم ليست ظاهرة في الجدول المساعد بل هي بين القيمتين (3.58 - 4.16) لذا سيتوجب الذهاب الى الرسم لايجاد قيمة المنسوب المقابل لـ $3.688 = \left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ وسيكون $h = 100.62\ m$ وبنفس الرسم سيكون (أو الجدول المساعد سيكون) $Q = 13\ m^3/sec$

$$\left.S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)_{new} = \left.S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)_{old} - Q\Delta t \qquad *$$

$$= 3.688 - 13(0.0216)$$

$$= 3.407\ Mm^3$$

من المعادلة (4) :-

$$3.407 + \left(\frac{20+55}{2}\right)0.0216 = 4.217\ Mm^3 \qquad *$$

$El. = 101.04\ m$ من الجدول المساعد أو الرسم

$Q = 27\ m^3/s$

* نعيد الخطوات من جديد :

$$\left.S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)_{new} = 4.217 - 27(0.0217)$$

$$= 3.633\ Mm^3$$

وهكذا ستكون الآلية مجدولة حسب الآتي

time	$I\ m^3/s$	$\bar{I}\ m^3/s$	$\bar{I}\cdot\Delta t\ (Mm^3)$	$S - \frac{Q\Delta t}{2}$	$S + \frac{Q\Delta t}{2}$	El. (m)	$Q\ m^3/s$	time
0	10				(3.58)	100.5	10	0
		15	0.324	3.364				
6	20				3.688	100.62	13	6
		37.5	0.81	3.407				
12	55				4.217	101.04	27	12
		67.5	1.458	3.633				
18	80				5.091	101.64	53	18
⋮								

وهكذا يستمر الحل

Example [8-2 in text book]

Route the following Flood Hydrograph through reservoir having properties as mentioned in example [8-1].

Time (h) :	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
I (m^3/h) :	10	30	85	140	125	96	75	60	46	35	25	20

Route using Goodrich method with initial level 100.6 m.

Solution

1. as mentioned previously $\Delta t = \left[\frac{20}{100} \to \frac{40}{100}\right](18h) \simeq 6h.$

2. establish the $(\frac{2S}{\Delta t}+\varphi)$ table:

الجدول السابق

El. (m). :	100	100.5	101	101.5	102	102.5	102.75	103
outflow φ m^3/s :	0	10	26	46	72	100	116	130
$(\frac{2S}{\Delta t}+\varphi)$ m^3/sec :	310.2	331.5	385.5	451.8	524	597.2	627.8	672.2

how to construct above table:
First and second row is given in example 8.1
the third one is calculated as;

$$\left.\frac{2S}{\Delta t}+\varphi\right)_1 = \frac{2(3.35)}{0.0216}+0 = 310.185 \simeq 310.2\ m^3/sec$$

$$\left.\frac{2S}{\Delta t}+\varphi\right)_2 = \frac{2(3.478)}{0.0216}+10 = 331.48 \simeq 331.5$$

$$\left.\frac{2S}{\Delta t}+\varphi\right)_3 = \frac{2(3.89)}{0.0216}+26 = 385.26 \simeq 385.6$$

and so on.

في المثال السابق كانت الابتداء عند 100.5 m وهو موجود في الجدول السابق
في هذا المثال الابتداء سيكون عند 100.6 m وهو ليس موجوداً في الجدول.
وعلينا اعتماد مبدأ الاستكمال أو الرسم لإيجاد القيمة المقابلة للقيمة
عند $EL = 100.6 \Leftarrow \varphi = 12\ m^3/s \Leftarrow \frac{2S}{\Delta t}+\varphi = 340\ m^3/s$

معنى ذلك أن الخزين كان $S = 3.542$ وهذا يمكن استكماله مباشرة
من جدول المعطيات للمثال 8.1 ثم إيجاد $\frac{2S}{\Delta t}+\varphi = 340$ ونحصل
على نفس الجواب.

إذن سنبدأ $El = 100.6$ و $\varphi = 12\ m^3/s$ و $\frac{2S}{\Delta t}+\varphi = 340$

الآن نجدول الاجابات كالآتي :-

t	I	I_1+I_2	$\frac{2S}{\Delta t}-\varphi$	$\frac{2S}{\Delta t}+\varphi$ (340)	El.	φ outflow
0	10			-2φ (340)	100.6	12
		40	316	356		
6	30		-2φ		100.74	17
		115	322	437		
12	85				101.38	40
		225	357	582		
18	140				102.45	95

وهكذا نستمر بالجدول كما في الحل السابق بدءاً
باستخدام المعادلة الثانية وهي رقم (5)

$$\left(\frac{2S}{\Delta t}+\varphi\right)_2=\left(\frac{2S}{\Delta t}-\varphi\right)_1+(I_1+I_2)$$

هنا نعطي علاقات الخزن والتصريف الخارج بدلالة H
كمعادلات ويمكن ايجاد القيم التكاملية لـ (H, S, φ)

Example:

problem (8.5)

A small reservoir has spillway elevation 200m. Above this elevation the storage and outflow are given as:

$S' = 36\,000 + 18\,000\, y$ (m³)

$\varphi = 10\, y$ m³/sec

where y height of reservoir above spillway crest.

Route the inflow hydrograph which can approximated by a triangle as;

$I = 0$ at $t = 0$ h (start of inflow)

$I = 30$ m³/sec at $t = 6$ h (peak flow)

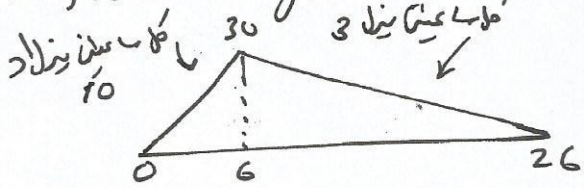
$I = 0$ at $t = 26$ h (end of inflow)

Assume reservoir elevation at $t=0$ is being 200 m.

use time step = 2 hr [1.2 – 2.4] o.k.

Solution

Inflow diagram is:



t (h)	I m³/s
0	0
2	10
4	20
6	30
8	27
10	24
12	21
14	18

t (h)	I m³/s
16	15
18	12
20	9
22	6
24	3
26	0

$\Delta t = 2\,hrs = 2 \times 60 \times 60 = 7.2 \times 10^3\ sec$

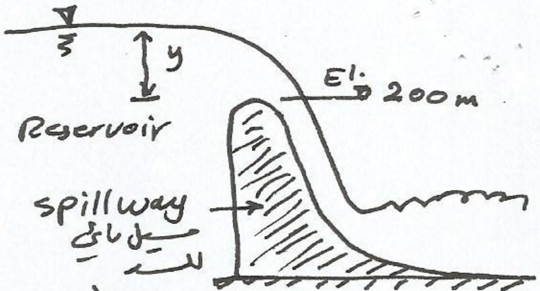
$El. = y + 200$

$S = (36 + 18y)\,10^3\ m^3$

$Q = 10y\ m^3/sec$

$\therefore\ S + \frac{Q\Delta t}{2} = \left(36 + 18y + \frac{10y\,(7.2)}{2}\right) \times 10^3$

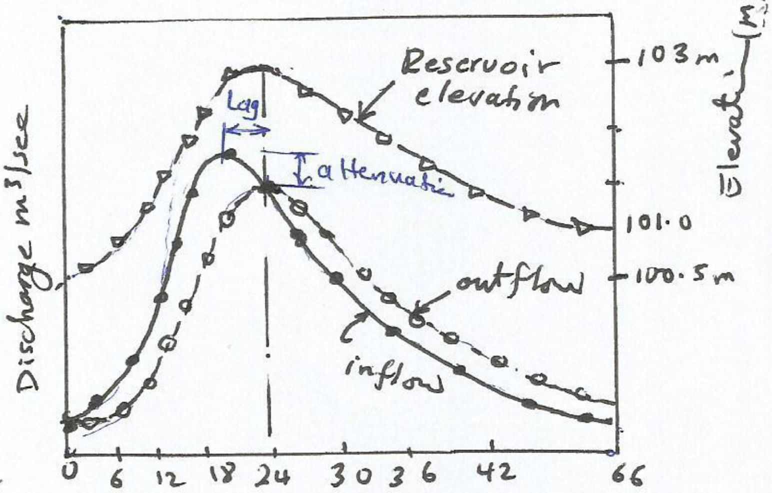
$= (36 + 54y) \times 10^3 \Rightarrow y = \left(\frac{S + \frac{Q\Delta t}{2}}{1000} - 36\right) \times \frac{1}{54}$



at $t=0$, $y=0$, $El.=200$, $Q=0$, $S=36\times10^3\ m^3$

Time(hr)	$I\ m^3/s$	$\bar{I}\ m^3/sec$	$\bar{I}\cdot\Delta t\ m^3\times10^3$	$S-\Delta Q/\Delta t\ \times10^3$	$S+\frac{\Delta Q}{2}\ m^3\times10^3$	$y\ m$	$Q\ m^3/s$
						0	0
0	0						
		5	36	36	72		
2	10					0.67	6.67
		15	108	24	132		
4	20					1.77	17.70
		25	180	4	184		
6	30					2.74	27.4
		28.5	205.2	−13.28	191.92		
8	27					2.88	28.8
		25.5	183.6	−15.44	168.16		
10	24					2.45	24.5
		22.5	162	−8.24	153.76		
12	21					2.18	21.8
		19.5	140.4	−3.2	137.2		
14	18					1.87	18.7
		16.5	118.8	2.266	121.06		
16	15					1.58	15.8
		13.5	97.2	7.3	104.5		
18	12					1.26	12.68
		10.5	75.6	13.204	88.8		
20	9					0.98	9.80
		7.5	54	18.456	72.456		
22	6					0.67	6.75
		4.5	32.4	23.856	56.256		
24	3					0.38	3.75
		1.5	10.8	29.25	40.05		
26	0					0.075	0.75

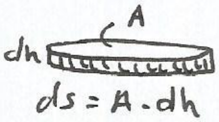
Attenuation خافت الفاقد



Owing to the storage effect, the peak of outflow hydrograph will be smaller than the inflow Hydrograph. The reduction in peak value is called Attenuation. Further the peak of the outflow occurs after the peak of inflow, as shown in Figure. The time difference between two peaks called Lag. Note that the max level of reservoir Routing Peak occurs when the two hydrographs inflow and outflow intersect. and it really intersect at the peak of outflow hydrograph.

prof

$S = f(h)$ say $ds = A\,dh$ and $\frac{ds}{dt} = A\frac{dh}{dt}$ —(i)



$\varphi = f(h)$ --(ii)

at peak of outflow $\frac{d\varphi}{dt} = 0$

$\Rightarrow \frac{dh}{dt} = 0$

and hence according to (i)

$\frac{ds}{dt} = 0$

but $\frac{ds}{dt} = I - \varphi$

thus $I - \varphi = 0$

$\Rightarrow I = \varphi$ (the point of intersection

نحصل أعلى تعريف خ.ج وذلك منسوب في الخزان أعلى خزن
عند تقاطع I مع φ .

HYDROLOGIC RESERVOIR ROUTING

A flood wave $I(t)$ enters a reservoir provided with an outlet such as a spillway. The outflow is a function of the reservoir elevation only, i.e. $Q = Q(h)$. The storage in the reservoir is a function of the reservoir elevation, $S = S(h)$. Further, due to the passage of the flood wave through the reservoir, the water level in the reservoir changes with time, $h = h(t)$ and hence the storage and discharge change with time (Fig. 8.1). It is required to find the variation of S, h and Q with time, i.e. find $S = S(t)$, $Q = Q(t)$ and $h = h(t)$ given $I = I(t)$.

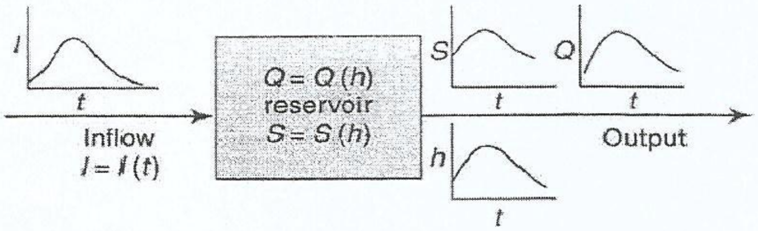


Fig. 8.1 Storage routing (Schematic)

If an uncontrolled spillway is provided in a reservoir, typically

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L_e H^{3/2} = Q(h)$$

where H = head over the spillway, L_e = effective length of the spillway crest and C_d = coefficient of discharge. Similarly, for other forms of outlets, such as gated spillways, sluice gates, etc. other relations for $Q(h)$ will be available.

For reservoir routing, the following data have to be known:

- Storage volume *vs* elevation for the reservoir;
- Water-surface elevation *vs* outflow and hence storage *vs* outflow discharge;
- Inflow hydrograph, $I = I(t)$; and
- Initial values of S, I and Q at time $t = 0$.

There are a variety of methods available for routing of floods through a reservoir. All of them use Eq. (8.2) but in various rearranged manners. As the horizontal water surface is assumed in the reservoir, the storage routing is also known as *Level Pool Routing*.

Two commonly used semi-graphical methods and a numerical method are described below.

MODIFIED PUL'S METHOD

Equation (8.3) is rearranged as

$$\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)\Delta t + \left(S_1 - \frac{Q_1 \Delta t}{2}\right) = \left(S_2 + \frac{Q_2 \Delta t}{2}\right) \tag{8.6}$$

At the starting of flood routing, the initial storage and outflow discharges are known. In Eq. (8.6) all the terms in the left-hand side are known at the beginning of a time step Δt. Hence the value of the function $\left(S_2 + \frac{Q_2 \Delta t}{2}\right)$ at the end of the time step is calculated by Eq. (8.6). Since the relation $S = S(h)$ and $Q = Q(h)$ are known, $\left(S + \frac{Q \Delta t}{2}\right)_2$ will enable one to determine the reservoir elevation and hence the discharge at the end of the time step. The procedure is repeated to cover the full inflow hydrograph.

For practical use in hand computation, the following semigraphical method is very convenient.

1. From the known storage-elevation and discharge-elevation data, prepare a curve of $\left(S + \frac{Q \Delta t}{2}\right)$ *vs* elevation (Fig. 8.2). Here Δt is any chosen interval, approximately 20 to 40% of the time of rise of the inflow hydrograph.
2. On the same plot prepare a curve of outflow discharge *vs* elevation (Fig. 8.2).
3. The storage, elevation and outflow discharge at the starting of routing are known.

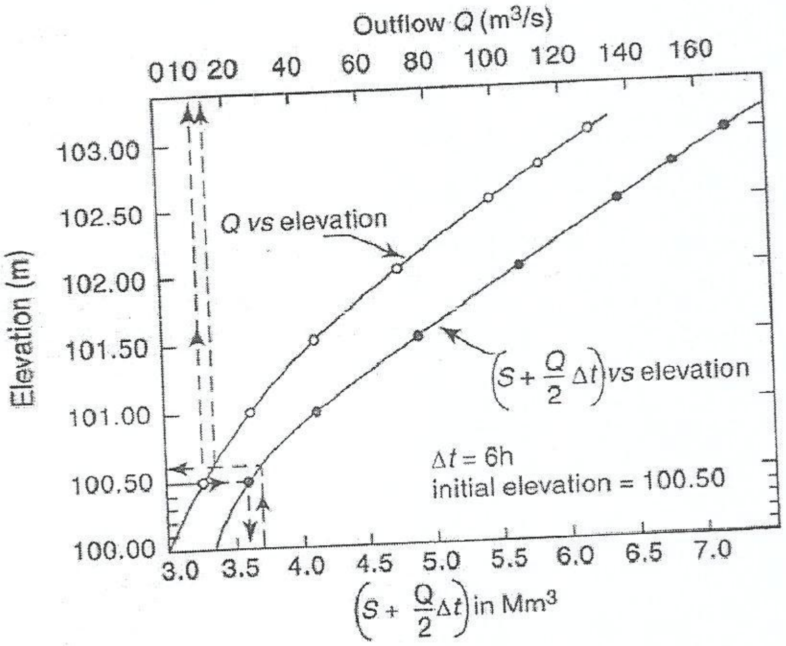


Fig. 8.2 Modified Pul's method of storage routing

For the first time interval Δt, $\left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)\Delta t$ and $\left(S_1 + \frac{Q_1 \Delta t}{2}\right)$ are known and hence by Eq. (8.6) the term $\left(S_2 + \frac{Q_2 \Delta t}{2}\right)$ is determined.

4. The water-surface elevation corresponding to $\left(S_2 + \frac{Q_2 \Delta t}{2}\right)$ is found by using the plot of step (1). The outflow discharge Q_2 at the end of the time step Δt is found from plot of step (2).
5. Deducting $Q_2 \Delta t$ from $\left(S_2 + \frac{Q_2 \Delta t}{2}\right)$ gives $\left(S - \frac{Q \Delta t}{2}\right)_1$ for the beginning of the next time step.
6. The procedure is repeated till the entire inflow hydrograph is routed.

EXAMPLE 8.1 *A reservoir has the following elevation, discharge and storage relationships:*

Elevation (m)	Storage (10^6 m^3)	Outflow discharge (m^3/s)
100.00	3.350	0
100.50	3.472	10
101.00	3.88	26
101.50	4.383	46
102.00	4.882	72
102.50	5.370	100
102.75	5.527	116
103.00	5.856	130

When the reservoir level was at 100.50 m, the following flood hydrograph entered the reservoir.

Time (h)	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
Discharge (m^3/s)	10	20	55	80	73	58	46	36	55	20	15	13	11

Route the flood and obtain (i) the outflow hydrograph and (ii) the reservoir elevation vs. time curve during the passage of the flood wave.

SOLUTION:- A time interval $\Delta t = 6$ h is chosen. From the available data the elevation-discharge $-\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ table is prepared.

$$\Delta t = 6 \times 60 \times 60 = 0.0216 \times 10^6 \ s$$

Elevation (m)	100.00	100.50	101.00	101.50	102.00	102.50	102.75	103.00
Dischange Q (m^3/s)	0	10	26	46	72	100	116	130
$\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ (Mm^3)	3.35	3.58	4.16	4.88	5.66	6.45	6.78	7.26

A graph of Q *vs* elevation and $\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ *vs* elevation is prepared (Fig. 8.2). At the start of routing, elevation = 100.50 m, Q = 10.0 m^3/s, and $\left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right) = 3.364\ Mm^3$. Starting from this value of $\left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)$, Eq. (8.6) is used to get $\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ at the end of first time step of 6 h as

$$\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)_2 = (I_1 + I_2)\frac{\Delta t}{2} + \left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)_1 = (10 + 20) \times \frac{0.0216}{2} + (3.364) = 3.688\ Mm^3.$$

Looking up in Fig. 8.2, the water-surface elevation corresponding to $\left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right) =$ 3.686 Mm^3 is 100.62 m and the corresponding outflow discharge Q is 13 m^3/s. For the next step, initial value of $\left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right) = \left(S + \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ of the previous step $- Q\,\Delta t$

$$= (3.688 - 13 \times 0.0216) = 3.407\ Mm^3$$

The process is repeated for the entire duration of the inflow hydrograph in a tabular form as shown in Table 8.1.

Using the data in columns 1, 3 and 7, the outflow hydrograph (Fig. 8.3) and a graph showing the variation of reservoir elevation with time (Fig. 8.4) are prepared.

Sometimes a graph of $\left(S - \frac{Q\Delta t}{2}\right)$ *vs* elevation prepared from known data is plotted in Fig. 8.2 to aid in calculating the items in column 5. Note that the calculations are sequential in nature and any error at any stage is carried forward. The accuracy of the method depends upon the value of Δt, smaller values of Δt give greater accuracy.

Table 8.1 Flood Routing through a Reservoir—Modified Pul's method—Example 8.1

$\Delta t = 6\text{ h} = 0.0216\text{ Ms},\ \bar{I} = (I_1 + I_2)/2$

Time (h)	Inflow I (m³/s)	$\bar{I}$ (m³/s)	$\bar{I}\cdot\Delta t$ (Mm³)	$S - \frac{\Delta t Q}{2}$ (Mm³)	$S + \frac{\Delta t Q}{2}$ (Mm³)	Elevation (m)	Q (m³/s)
1	2	3	4	5	6	7	8
0	10					100.50	10
		15.00	0.324	3.364	3.688		
6	20					100.62	13
		37.50	0.810	3.407	4.217		
12	55					101.04	27
		67.50	1.458	3.633	5.091		
18	80					101.64	53
		76.50	1.652	3.946	5.598		
24	73					101.96	69
		65.50	1.415	4.107	5.522		
30	58					101.91	66
		52.00	1.123	4.096	5.219		
36	46					101.72	57
		41.00	0.886	3.988	4.874		
42	36					101.48	48
		31.75	0.686	3.902	4.588		
48	27.5					101.30	37
		23.75	0.513	3.789	4.302		
54	20					100.10	25
		17.50	0.378	3.676	4.054		
60	15					100.93	23
		14.00	0.302	3.557	3.859		
66	13					100.77	18
		12.00	0.259	3.470	3.729		
72	11			3.427		100.65	14

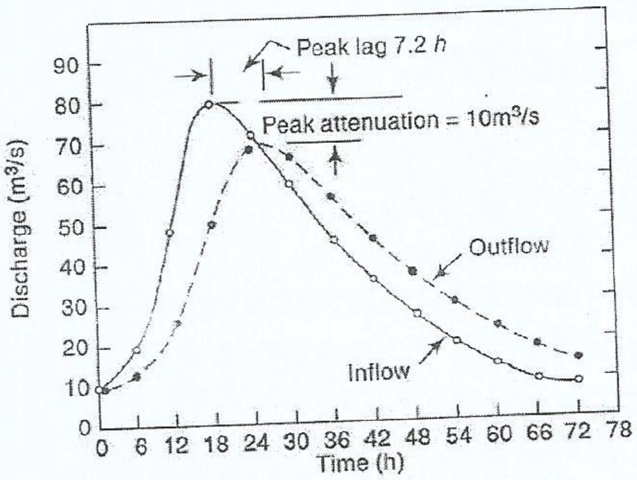


Fig. 8.3 Variation of inflow and outflow discharges—Ex. 8.1

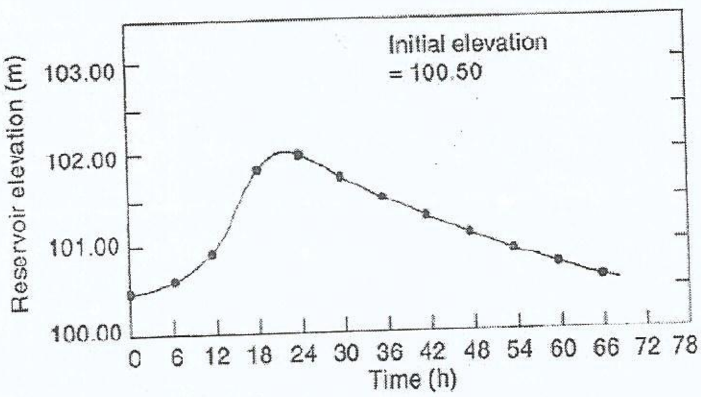


Fig. 8.4 Variation of reservoir elevation with time—Ex. 8.1

GOODRICH METHOD

Another popular method of hydrologic reservoir routing, known as Goodrich method utilizes Eq. (8.3) rearranged as

$$I_1 + I_2 - Q_1 - Q_2 = \frac{2S_2}{\Delta t} - \frac{2S_1}{\Delta t}$$

where suffixes 1 and 2 stand for the values at the beginning and end of a time step Δt respectively. Collecting the known and initial values together,

$$(I_1 + I_2) + \left(\frac{2S_1}{\Delta t} - Q_1\right) = \left(\frac{2S_2}{\Delta t} + Q_2\right) \tag{8.7}$$

For a given time step, the left-hand side of Eq. 8.7 is known and the term $\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)_2$ is determined by using Eq. (8.7). From the known storage-elevation-discharge data, the function $\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)_2$ is established as a function of elevation. Hence, the discharge, elevation and storage at the end of the time step are obtained. For the next time step,

$$\left[\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)_2 - 2Q_2\right] \text{ of the previous time step}$$

$$= \left(\frac{2S}{\Delta t} - Q\right)_1 \text{ for use as the initial values}$$

The procedure is illustrated in Example 8.2.

EXAMPLE 8.2 *Route the following flood hydrograph through the reservoir of Example 8.1 by the Goodrich method:*

Time (h)	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
Inflow (m^3/s)	10	30	85	140	125	96	75	60	46	35	25	20

The initial conditions are: when $t = 0$, the reservoir elevation is 100.60 m.

SOLUTION: A time increment $\Delta t = 6$ h $= 0.0216$ Ms is chosen. Using the known storage-elevation-discharge data, the following table is prepared. A graph depicting Q *vs* elevation and $\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)$ *vs* elevation is prepared from this data (Fig. 8.5).

Elevation (m)	100.00	100.50	100.6	101.00	101.50	102.00	102.50	102.75	103.00
Outflow Q (m^3/s)	0	10	12	26	46	72	100	116	130
$\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)$ (m^3/s)	310.2	331.5	340	385.3	451.8	524.0	597.2	627.8	672.2

At $t = 0$, Elevation = 100.60 m, from Fig. 8.5, $Q = 12$ m^3/s and

$$\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right) = 340 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\left(\frac{2S}{\Delta t} - Q\right)_1 = 340 - 24 = 316 \text{ m}^3/\text{s}$$

For the first time interval of 6 h,

$$I_1 = 10,\ I_2 = 30,\ Q_1 = 12, \text{ and}$$

$$\left(\frac{2S}{\Delta t} + Q\right)_2 = (10 + 30) + 316 = 356 \text{ m}^3/\text{s}$$

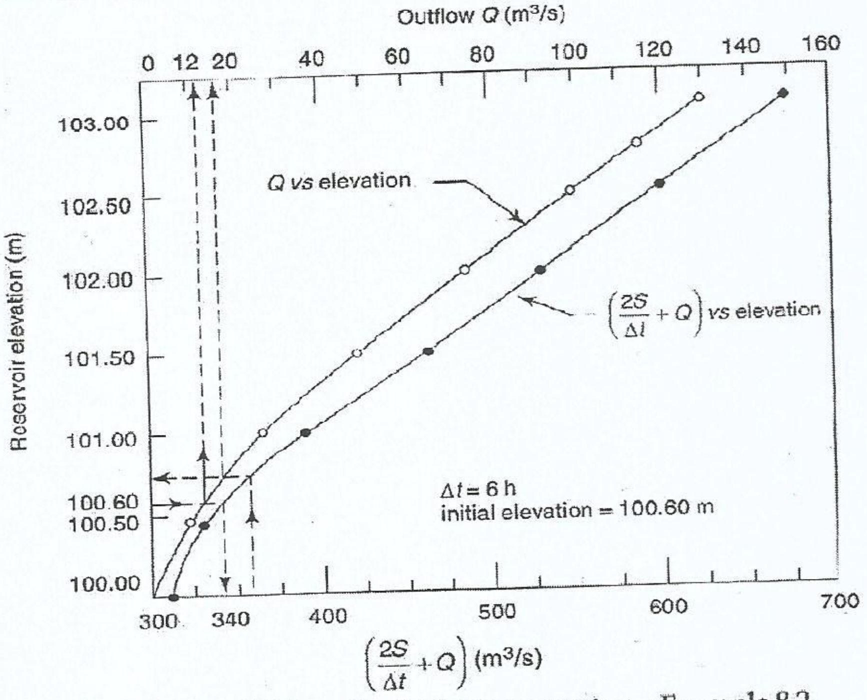


Fig. 8.5 Goodrich method of storage routing—Example 8.2

From Fig. 8.5 the reservoir elevation for this $\left(\frac{2S}{\Delta t}+Q\right)_2$ is 100.74 m

For the next time increment

$$\left(\frac{2S}{\Delta t}-Q\right)_1 = 356 - 2\times 17 = 322 \text{ m}^3\text{/s}$$

The procedure is repeated in a tabular form (Table 8.2) till the entire flood is routed.

In this method also, the accuracy depends upon the value of Δt chosen.

Table 8.2 Reservoir Routing—Goodrich Method—Ex. 8.2 $\Delta t = 6.0$ h $= 0.0216$ Ms

Time (h)	I (m³/s)	(I_1+I_2)	$\left(\frac{2S}{\Delta t}-Q\right)$ (m³/s)	$\left(\frac{2S}{\Delta t}+Q\right)$ (m³/s)	Elevation (m)	Discharge Q (m³/s)
1	2	3	4	5	6	7
0	10			(340)	100.6	12
		40	316	356	100.74	17
6	30					
		115	322	437	101.38	40
12	85					
		225	357	582	102.50	95
18	140					
		265	392	657	102.92	127
24	125					
		221	403	624	102.70	112
30	96					
		171	400	571	102.32	90
36	75					
		135	391	526	102.02	73
42	60					
		106	380	486	101.74	57
48	46					
		81	372	453	101.51	46
54	35					
		60	361	421	101.28	37
60	25					
		45	347	392	101.02	27
66	20		338			

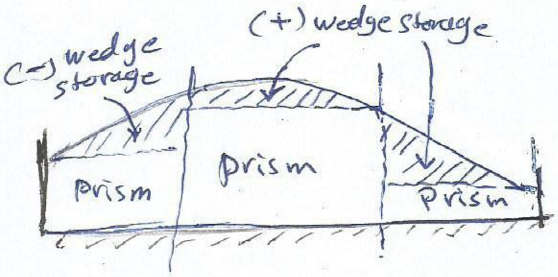
Channel Routing استتباع القناة
((انا))

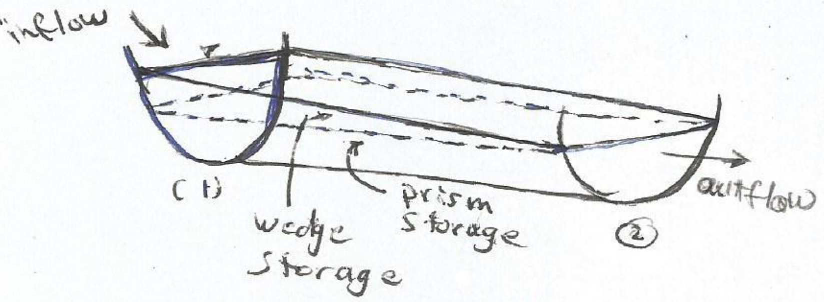
In the reservoir Routing the storage in a function of outflow i.e,

$$\left.\begin{array}{l} \Phi = f(h) \\ S = f(h) \end{array}\right\} \Rightarrow S = f(\Phi)$$

For Channel the storage is a function of both inflow "I" and outflow "Φ". The Storage in the channel can be considered as;

1. Prism storage الخزن المنشوري   2. Wedge storage الخزن الإسفيني





Prism storage: The volume that would exist if the flow is uniform at D/S depth. (The volume formed by imaginary plane parallel to the channel bottom drawn at outflow section.

Wedge storage: Volume formed between the actual water surface profile and the upper surface of prism storage.

At a fixed depth at D/S section of a river reach, the prism storage is constant while the wedge storage change from (+) values at an advancing flood to (−) values during receding flood. Thus; the prism storage $S_p = f(\Phi)$ while wedge storage $S_w = f(I)$; Hence, the total storage can be written in general form as;

$$S = K\left[x I^m + (1-x)\Phi^m\right] \qquad (1)$$

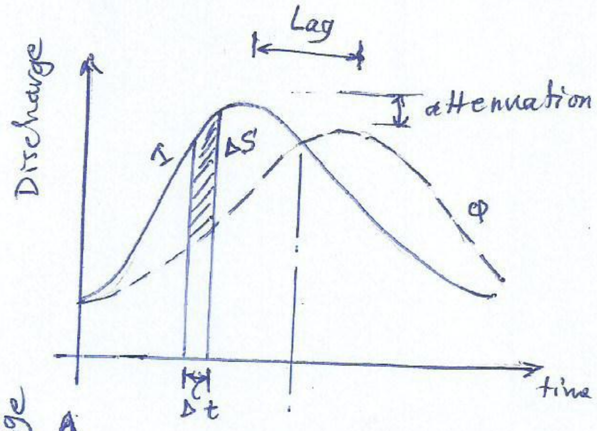
K = coefficient , x = weight factor and m = constant exponent
For rectangular channel $m = 0.6$, for natural channel $m = 1.0$.

Muskingum Equation :

Set $m = 1.0$ in equation ① (for natural channel and river)

$$\Rightarrow S = K\left[xI + (1-x)Q\right] \quad ---②$$

x varied from 0 to 0.5.



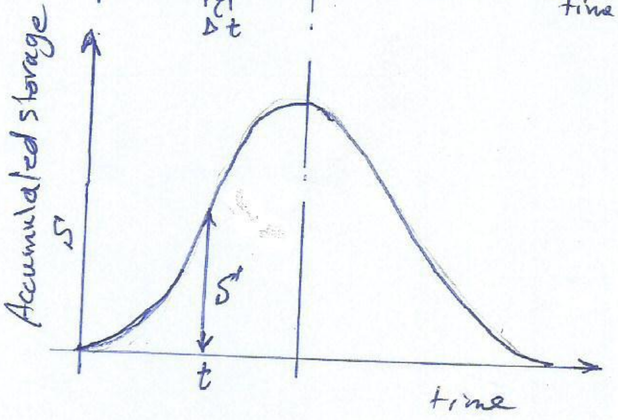
Computation of weighting factor "x" and Storage-time Coefficient "K"

لاحظ أن ذروة التصريف الخارج لا تحدث عند تقاطع هيدروكراف I وهيدروكراف Q كما يحدث في احتباس الخزان عند الحديث عن فاقد الطاقة ؛ attenuation .

From Continuity equation

$$\frac{I_1 + I_2}{2}\Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2}\Delta t = \Delta S \quad -③$$

م. (راجع طرق احتباس الخزانات)



من هذه المعادلة يمكن حساب مقدار الخزن في أي وقت "t" في القناة من حساب مجموع الشرائح الموضحة بالرسم المرفق ، بشرط أن تكون معلومات عن التصاريف الخارجة والداخلة لقناة معلومة ولمختلف الفترات الزمنية لها . أخذ مجموع التصاريف الخارجة والداخلة . يحسب لكل من معادلة الاتصال أعلاه ، ولكي يمكن أن نرسم هذه العلاقة يجب أن نأخذ ثم يتم رسم S لكل مقابل $[xI + (1-x)Q]$ "x" سلفاً . فإذا كانت قيمة x المختارة صحيحة فإن القيم ستكون خطاً مستقيماً ، إذا ما كانت القيمة المختارة غير صحيحة فستكون منحنياً مغلقاً (دائرياً) وعليه استخدام طريقة المحاولة والخطأ لمعرفة الجواب الصحيح الذي ينتج رسماً يشكل خطاً مستقيماً أو قريباً منه . أما "K" فإنه يمثل مقلوب ميل الرسم . $K = \frac{1}{slope}$.

Example

مثال (حول تحديد K و x) من معطيات I و Q لقناة :

The following inflow and outflow hydrographs were recorded in a river reach. Estimate the value of K and x, in order to use them in Muskingum method.

Time (h) :	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
I (m³/sec) :	5	20	50	50	32	22	15	10	7	5	5	5
Q (m³/sec) :	5	6	12	29	38	35	29	23	17	13	9	7

Solution:

1. set $\Delta t = 6$ hrs
2. assume $x = 0.3$ (x between 0 and 0.5)
3. Construct the table as follows:

Time (hr)	I m^3/s	φ m^3/sec	$(I-\varphi)$ m^3/sec	$\overline{(I-\varphi)}$	$\Delta S = \overline{(I-\varphi)} \times \Delta t$ $(m^3/s \cdot hr)$	$S = \sum \Delta S$	$[xI + (1-x)\varphi]$ $x=0.35$	$x=0.3$	$x=0.25$
0	5	5	0			0	5	5	5
				7	42				
6	20	6	14			42	10.9	10.2	9.5
				26	156				
12	50	12	38			198	25.3	23.4	21.5
				29.5	177				
18	50	29	21			375	36.4	35.3	34.3
				7.5	45				
24	32	38	-6			420	35.9	36.2	36.5
				-9.5	-57				
30	22	35	-13			363	30.5	31.1	31.8
				-13.5	-81				
36	15	29	-14			282	24.1	24.8	25.5
				-13.5	-81				
42	10	23	-13			201	18.5	19.1	19.8
				-11.5	-69				
48	7	17	-10			132	13.5	14	14.5
				-9	-54				
54	5	13	-8			78	10.2	10.6	11
				-6	-36				
60	5	9	-4			42	7.6	7.8	8
				-3	-18				
66	5	7	-2			24	6.3	6.4	6.5

الآن يتم رسم منحنى بين الأعمدة الثلاثة الأخيرة مع عمود الخزن $S = \sum \Delta S$:

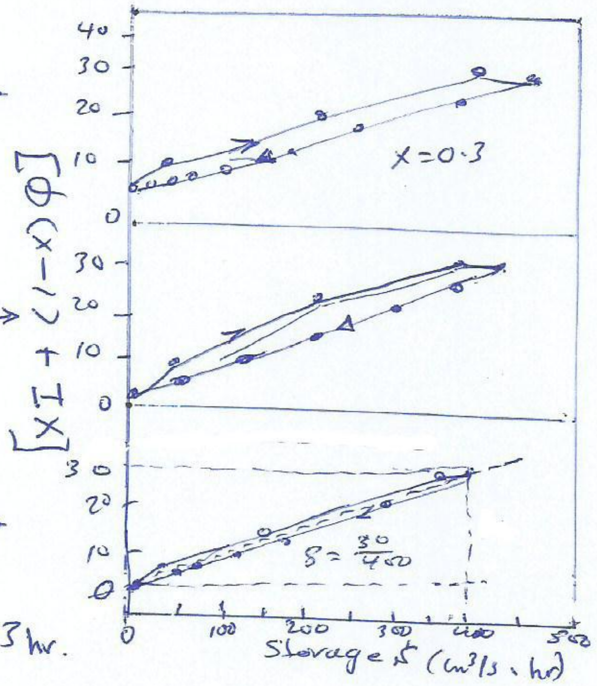
كما موضح بالآتي :-

$x = 0.3$

غير صحيح لانه المنحنى دائري ←

غير صحيح لانه المنحنى دائري لشدة ضيق
فيجرب قيمة اقل ←

صحيحة الحد لانه المنحنى قريب من
الخط المستقيم ←



$\therefore S = \frac{30}{400} \Rightarrow K = \frac{400}{30} = 13.3\ hr.$

$$\boxed{\begin{array}{c} K = 13.3\ hr \\ x = 0.25 \end{array}}$$

وتكون ثوابتها لمقطع النهر هي

ويمكن استخدام القيم هذه في استنباط فيضانات النهر الرئيسية
بماسكنكام التي سيتم توضيحها الآن.

Muskingum Method of Routing

1. for certain reach of a river K - is known also x
2. Select Δt in accordance that: $2xK < \Delta t < K$
   because it has been found that the best result of Routing when interval Δt fall in this range.

نعيد كتابة معادلة الاتصال (معادلة رقم ③)

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \bar{I} \cdot \Delta t - \bar{Q} \cdot \Delta t \quad \text{------} \quad (3)$$

وتكتب معادلة ماسكنكام (معادلة ②):

$$S_1 = K[xI_1 + (1-x)Q_1] \quad , \quad S_2 = K[xI_2 + (1-x)Q_2]$$

$$\Rightarrow S_2 - S_1 = K[(I_2 - I_1)x + (Q_2 - Q_1)(1-x)] \quad \text{——} \quad (4)$$

بالتعويض المعادلة (4) بالمعادلة ③ بدلالة Q_2 نحصل على :-

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1 \quad \text{——} \quad (5)$$

where:

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad , \quad C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad , \quad C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

[كشف صحة حلالا مسبقاً] <u>check</u>: $C_1 + C_2 + C_3 = 1.0$

Example

الطريقة

① أفرض Δt صحيحة بين K و $2Kx$

② أحسب C_0 ، C_1 و C_2

③ ابدأ مع القيم الابتدائية لـ I_1 ، Q_1 ومعرفة I_2 أيضاً نحسب Q_2.

④ نعتبر أن Q_2 هو Q_1 للفترة الزمنية القادمة وهكذا الأمر استكمال الاستنتاج إلى نهاية الفترة الزمنية المحددة بالهيدروغراف الداخل.

Route the following flood Hydrograph through river reach ($K = 12.0$ h) ($x = 0.2$). At the start of inflow Hydrograph, outflow discharge is 20 m^3/sec.

Time (h)	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54
Inflow m^3/s	10	20	50	60	55	45	35	27	20	15

solution: $K = 12$, $x = 0.2$ $\qquad 4.8 < \Delta t < 12$

choose $\Delta t = 6$ hr. to suit the given inflow hydrograph ordinate interval.

$$C_0 = \frac{-12*0.2+0.5*6}{12-12*0.2+0.5*6} = \frac{0.6}{12.6} = 0.048$$

$$C_1 = \frac{12*0.2+0.5*6}{12-12*0.2+0.5*6} = 0.429$$

$$C_2 = \frac{12-12*0.2-0.5*6}{12-12*0.2+0.5*6} = 0.523$$

$\underline{\sum C_i = 1.0}$

$0.048 + 0.429 + 0.523 = 1.0$

$$Q_2 = 0.048(20) + 0.429(10) + 0.523(10) = 10.48 \ m^3/sec$$

next time step set $Q_1 = Q_2$ and repeat the above procedure.

Time	I	$0.048 I_2$	$0.429 I_1$	$0.523 Q_1$	Q m^3/sec
0	10				10
		0.96	4.29	5.23	
6	20				10.48
		2.4	8.58	5.48	
12	50				16.46
		2.88	21.45	8.61	
18	60				32.94
		2.64	25.74	17.23	
24	55				45.61
		2.16	23.6	23.85	
30	45				49.61
		1.68	19.30	25.95	
36	35				46.93
		1.3	15.02	24.55	
42	27				40.87
		0.96	11.58	21.38	
48	20				33.92
		0.72	8.58	17.74	
54	15				27.04

يمكن إجراء حساب Q دون الحاجة إلى الجدول يدوياً وبالحاسبة اليدوية ولكن للسهولة يمكن اعتماد الجدول بهذه الصيغة.

بعض المصادر تشير إلى إمكانية ربط المعادلة رقم (3) والمعادلة رقم (4) بالصيغة التالية لعملية التوقيف

$$Q_2 = Q_1 + \alpha_1 (I_1 - Q_1) + \alpha_2 (I_2 - I_1)$$

$\alpha_1 = \Delta t / (K - Kx + 0.5\Delta t)$

$\alpha_2 = (0.5\Delta t + Kx) / (K - Kx + 0.5\Delta t)$

وتعطي نفس النتائج السابقة.