

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Διόδευση πλημμύρας

Δρ Μ.Γ.Σπηλιώτης

Διόδευση Πλημμύρας

Βασικές έννοιες

Διόδευση Πλημμύρας ονομάζεται η τεχνική που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα. Γενικότερα η διόδευση αναφέρεται στην επίδραση των χαρακτηριστικών ενός υδρογραφικού συστήματος στο σχήμα και στη χρονική εξέλιξη μιας πλημμύρας. Επίσης διόδευση πλημμύρας ονομάζεται αυτή καθαυτή η διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα.

Η τεχνική της διόδευσης μπορεί να χρησιμοποιείται στην πρόγνωση και τον έλεγχο της πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο. Αποτελεί επίσης σημαντικό τμήμα των μοντέλων μετασχηματισμού των βροχοπτώσεων σε απορροές στην περίπτωση έλλειψης στοιχείων απορροής. Χρησιμοποιείται ακόμη για τη μεταφορά πληροφοριών απορροής από τη θέση ενός υδρομετρικού σταθμού στη θέση που μας ενδιαφέρει.

Με τη διέλευση μιας πλημμύρας διαμέσου ενός επιφανειακού υδροφορέα παρατηρείται μείωση της αιχμής της πλημμύρας και καθυστέρηση εμφάνισής της. Αυτό υποδηλώνει ότι στα φυσικά υδατορεύματα υπάρχει αποθηκευτικότητα που δημιουργεί αυτή την πτώση στην αιχμή του υδρογραφήματος εκροής.

Διόδευση Πλημμύρας

Βασικές έννοιες (2)

Γενικά με την έκφραση **διόδευση πλημμύρας** εννοείται η μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε έναν ανοιχτό αγωγό δηλαδή σε ένα αγωγό στον οποίο το νερό κινείται με ελεύθερη επιφάνεια. Ειδικότερα ως διόδευση εννοείται ο υπολογισμός των υδραυλικών στοιχείων της ροής, ήτοι **μέση ταχύτητα, η παροχή, το βάθος ροής** σε όλο το υπό μελέτη μήκος του αγωγού συναρτήσει του χρόνου. Ο υπολογισμός αυτών των στοιχείων προϋποθέτει πλήρη ανάλυση της ροής και επιτεύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες χάρη στη δυνατότητα αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων της ασταθούς ροής σε ανοιχτούς αγωγούς.

Ο κλασσικός ορισμός της **διόδευσης πλημμύρας** είναι «ο υπολογισμός του υδρογράφηματος πλημμύρας σε μια διατομή ενός υδατορρεύματος όταν το υδρογράφημα της πλημμύρας είναι γνωστό σε μία διατομή ανάντη της πρώτης».

Ο υπολογισμός των υδραυλικών στοιχείων της πλημμυρικής ροής χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό έργων αντιπλημμυρικής προστασίας. Σε πρώτο στάδιο ελέγχεται η διοχετευτική ικανότητα της υπάρχουσας κοίτης για την **πλημμύρα μελέτης** της διατομής δηλαδή την πλημμύρα μιας δεδομένης περιόδου επαναφοράς και σε δεύτερο στάδιο προτείνονται, αν είναι απαραίτητο, οι επεμβάσεις που απαιτούνται ώστε η κοίτη του υδατορρεύματος να μην υπερχειλίζει κατά τη διάρκεια της πλημμύρας αυτής.

Αντιπλημμυρικά Έργα

Διόδευση πλημμύρας:

Προσδιορισμός του πλημμυρικού υδρογραφήματος σε μια διατομή ενός ποταμού όταν είναι γνωστό το πλημμυρικό υδρογράφημα σε μίαν άλλη διατομή ανάντη της πρώτης.

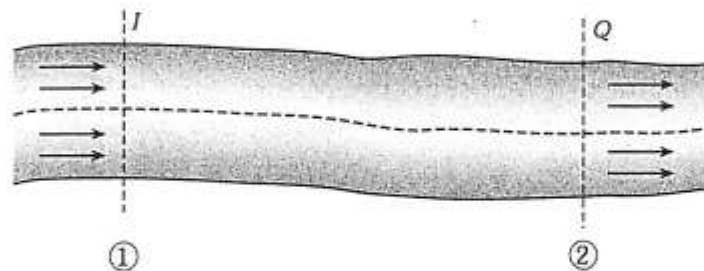
Αντιπλημμυρικά έργα:

- Διευθέτηση της κοίτης των ποταμών
- Προστατευτικά αναχώματα ή τοίχοι
- Ταμειυτήρες αποθήκευσης του νερού (των αιχμών των πλημμυρών)

12.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ

Με την διέλευση μιας πλημμύρας διαμέσου ενός επιφανειακού υδροφορέα (ενός τμήματος ποταμού ή ενός ταμιευτήρα) παρατηρείται μια μείωση της αιχμής της πλημμύρας που συνοδεύεται από μια καθυστέρηση. Αν για παράδειγμα διόδευθεί μια πλημμύρα μέσω ενός τμήματος φυσικού υδατορεύματος (Σχ. 12.1) με υδρογράφημα εισροής που φαίνεται στο Σχ. 12.2 στο υδρογράφημα εκροής, στη θέση 2 παρατηρείται μια μείωση της αιχμής και μια χρονική επιβράδυνση εμφάνισής της.

Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι στα φυσικά υδατορεύματα υπάρ-

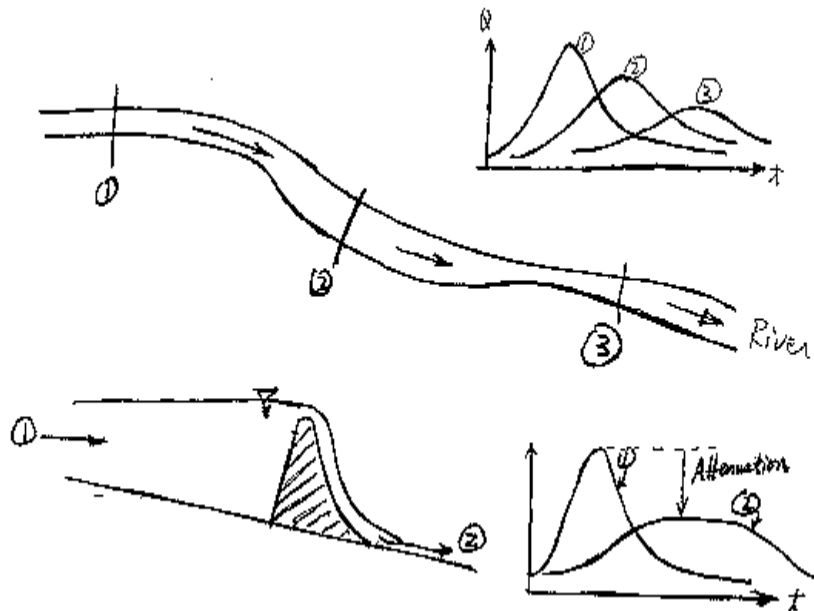


Σχ. 12.1: Διόδευση διαμέσου του τμήματος ποταμού από τη θέση 1 στη θέση 2.

- * Σύμφωνα με τον Nash (1960) το πρόβλημα της διόδευσης έχει τρεις όψεις:
- Με γνωστά το υδρογράφημα εκροής και την κωρητικότητα του υδροφορέα να υπολογιστεί το υδρογράφημα εισροής. Περίπτωση που συναντάται όταν ο υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται κατάντι του φράγματος και πρέπει να βρεθεί το υδρογράφημα της φυσικής λεκάνης ανάντη του φράγματος.
 - Με γνωστά το υδρογράφημα εισροής και εκροής να υπολογισθεί η αποθήκευση. Περίπτωση που συναντάται όταν μελετάται η κωρητικότητα ενός τμήματος υδατορεύματος με υδρομετρικούς σταθμούς και στα δύο του άκρα.
 - Με γνωστό το υδρογράφημα εισροής και γνωστά τα χαρακτηριστικά κωρητικότητας/αποθήκευσης να υπολογισθεί το υδρογράφημα εκροής. Η τελευταία αυτή περίπτωση είναι η συνηθέστερη στα προβλήματα διόδευσης πλημμύρας.

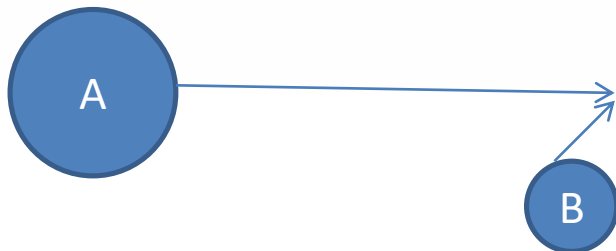
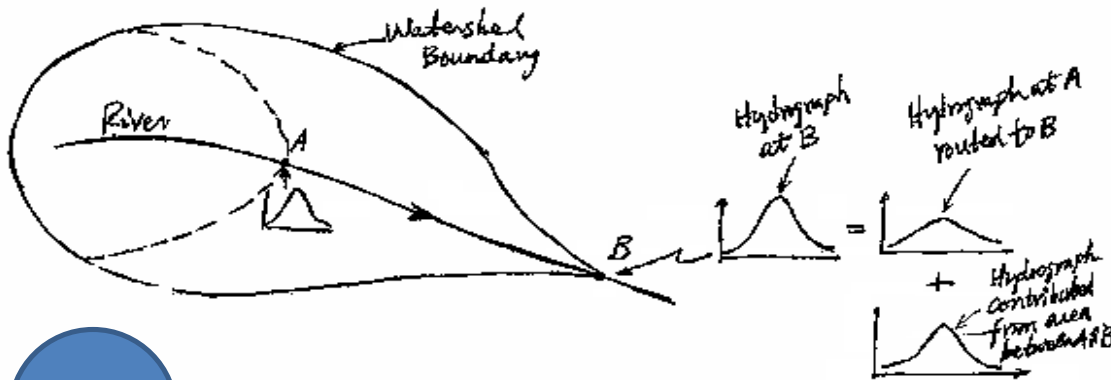
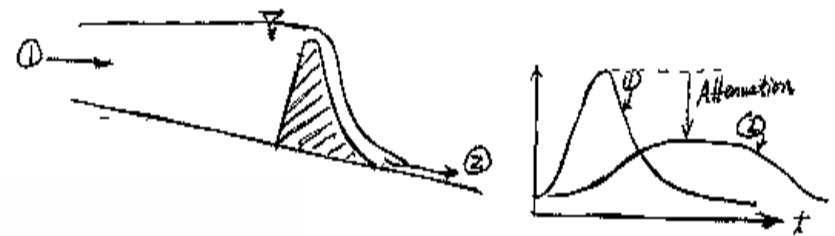
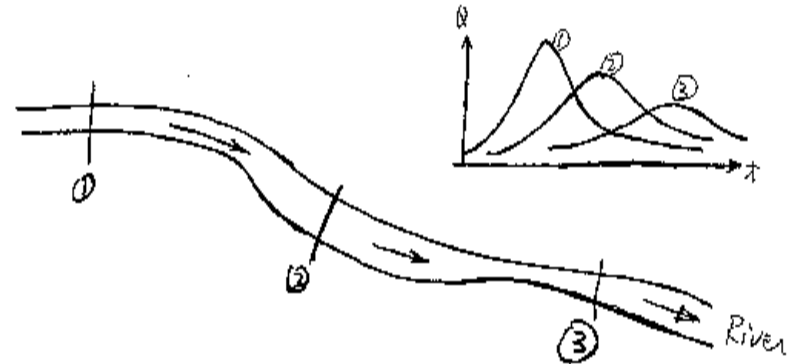
Αποτελέσματα της διόδευσης

- Ανακούφιση αιχμής
- Χρονική επιβράδυνση αιχμής



Σκοπός της διόδευσης

- (a) Πρόβλεψη πλημμύρας, προειδοποίηση
- (b) Σχεδιασμός ταμιευτήρα
- (c) Οριοθέτηση πλημμυρικής κοίτης
- (d) Προσομοίωση λεκάνης απορροής



Routing

- Πλημμύρα: αβραθής ροή (συνήθως βαθμιαίως μεταβαλλομένη)

- Εξίσωση διατηρήσεως της μάζας (συνεχείας)
- Εξίσωση διατηρήσεως ενέργειας
- Εξίσωση διατηρήσεως ποσότητας κινήσεως


Λόγω πολυπλοκότητας του φαινομένου συνήθως στηρίζομαστε σε προσεγγιστικές υδρολογικές μεθόδους (στηρίζονται κύρια στη διατήρηση της μάζας και σε μία υπόθεση για την αποθηκευτικότητα)

Μεθοδολογίες Επίλυσης

Οι χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες διόδευσης είναι δύο:

α) *Υδρολογική*. Η πρόβλεψη της εξέλιξης της πλημμύρας βασίζεται στην εξίσωση της συνέχειας και σε μια συνάρτηση της χωρητικότητας του συστήματος. Αν ο φορέας διαμέσου του οποίου γίνεται η διόδευση είναι ταμιευτήρας απαιτείται επιπλέον και μια συνάρτηση που συνδέει την παροχή εκροής με την αποθήκευση του φορέα. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν δεδομένα πλημμύρας εισόδου και προβλέπουν τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας εξόδου. Οι μέθοδοι αυτές δεν οινούν πληροφορίες για την πλήρη χωροχρονική εξέλιξη της πλημμύρας και δεν απαιτούν γνώσεις των χαρακτηριστικών του φορέα.

β) *Υδραυλική*. Η μαθηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της πλημμύρας βασίζεται στη χρησιμοποίηση των εξισώσεων ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς (Εξισώσεις Saint Venant). Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας δίνουν όλες τις πληροφορίες κατά τη διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιούν όμως στοιχεία που σπάνια είναι γνωστά και οι παραδοχές που γίνονται για την απλοποίηση και την επίλυση των εξισώσεων ανατρέπουν σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μεθόδων αυτών.



Διατήρηση της μάζας

Μέθοδοι διόδευσης πλημμυρών:

Υδραυλικές:

Εξίσωση συνέχειας }
Εξίσωση ποσότητας } Εξισώσεις Saint Venant
κίνησης }

- Σύστημα δύο μερικών διαφορικών εξισώσεων υπερβολικού τύπου
- Αριθμητική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων
- Απαιτούν πολλά δεδομένα (γεωμετρικά, υδραυλικά)
- Απαιτούν πολλούς υπολογισμούς
- Δεν χρειάζονται ρύθμιση
- Τυχόν μεταβολές του ποταμού λόγω τεχνικών έργων μπορούν να ληφθούν υπόψη.

Υδρολογικές:

Εξίσωση συνέχειας }
Σχέση "αποθήκευσης" (εμπειρική) } $V=f(Q)$

- Απλούστερες των υδραυλικών
- Παρέχουν λιγότερο ακριβή αποτελέσματα (σε σχέση προς τις υδραυλικές)
- Χρειάζονται ρύθμιση
- Μελλοντικές μεταβολές του ποταμού λόγω τεχνικών έργων δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη.

Σημερινό μάθημα

- Υδρολογικές μέθοδοι διόδευσης που στηρίζονται πρωτίστως στη διατήρηση της μάζας:
 - Υδρολογική μέθοδος διόδευσης πλημμυρικού κύματος σε τμήμα ποταμού, Muskingum.
 - Υδρολογική μέθοδος διόδευσης σε ταμιευτήρα

Διόδευση σε τμήμα ποταμού

Διόδευση σε τμήμα ποταμού

Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται το υδρογράφημα πλημμύρας σε μια διατομή ενός ποταμού όταν είναι γνωστό το υδρογράφημα σε μία διατομή ανάντη. Σε αντίθεση με τη διόδευση μέσω ταμιευτήρα, η σχέση αποθήκευσης εκροής δεν είναι μονοσήμαντη και η μέγιστη εκροή δεν συμπίπτει εν γένει με τη μέγιστη αποθήκευση (Σχ. 6.2).

A

Διατήρηση της μάζας ...

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{dV}{dt} = I - Q$$

(για το τμήμα ενός ποταμού ή ενός ταμειωτήρα μεταξύ δύο διατομών)

V : όγκος νερού σε αποθήκευση στο θεωρούμενο τμήμα

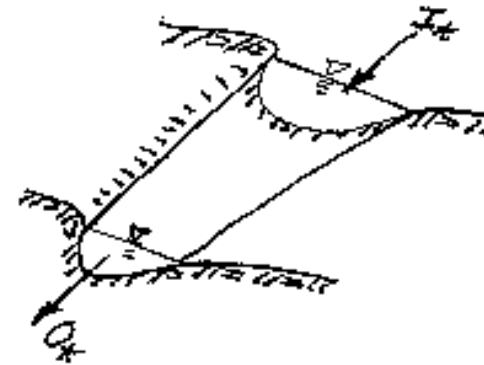
I : εισροή

Q : εκροή

t : χρόνος

Βοηθητικές σχέσεις:

- Καμπύλη μεταξύ στάθμης και αποθήκευσης
(εξαρτάται από τη γεωμετρία του θεωρουμένου τμήματος)
- Καμπύλη μεταξύ εκροής και αποθήκευσης
(ευρίσκεται από την προηγούμενη καμπύλη με τη βοήθεια μιας καμπύλης στάθμης-παροχής)



Χρυσάνθου, 2013

B

Υπόθεση...

Μετά από απλοποίηση, η σχέση αποθήκευσης με την εισροή και την εκροή είναι:

$$S = K [xI + (1 - x)Q] \quad (7.2)$$

όπου: x το βάρος συμμετοχής της εισροής στην αποθήκευση του τμήματος του ποταμού. Το x λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και είναι αδιάστατο.

K σταθερά που προσεγγίζεται από το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του τμήματος του ποταμού, σε μονάδες χρόνου.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων x και K χρησιμοποιούνται υδρογραφήματα εισροής και εκροής όπως εξηγείται παρακάτω. Με γνωστές τις τιμές x και K η υπολογιστική διαδικασία της διόδευσης ακολουθεί τις πιο πάνω εξισώσεις μετασχηματισμένες σε πεπερασμένες διαφορές για το διάστημα Δt (μεταξύ t_1 και t_2).

Συμβολισμοί, το S (μπέλλος τσακίρης είναι ταυτόσημο με το V , αποθήκευση (όγκος νερού) (Σακκας)

Υδρολογική διοδευση (Μέθοδος Muskingum)

Σφήνα αποθήκευσης σε
κοίτη ποταμού

$$S_{\text{πρίσματος}} = KQ$$

$$S_{\text{σφήνας}} = KX(I - Q)$$

K = χρόνος ροής αιχμής δια μέσο του ποταμού

X = βάρος της εισροής σε αντιδιαστολή με την εκροή ($0 \leq X \leq 0.5$)

$X = 0 \rightarrow$ σε ταμιευτήρα η αποθήκευση εξαρτάται

αποκλειστικά από την εκροή, μη σφήνα

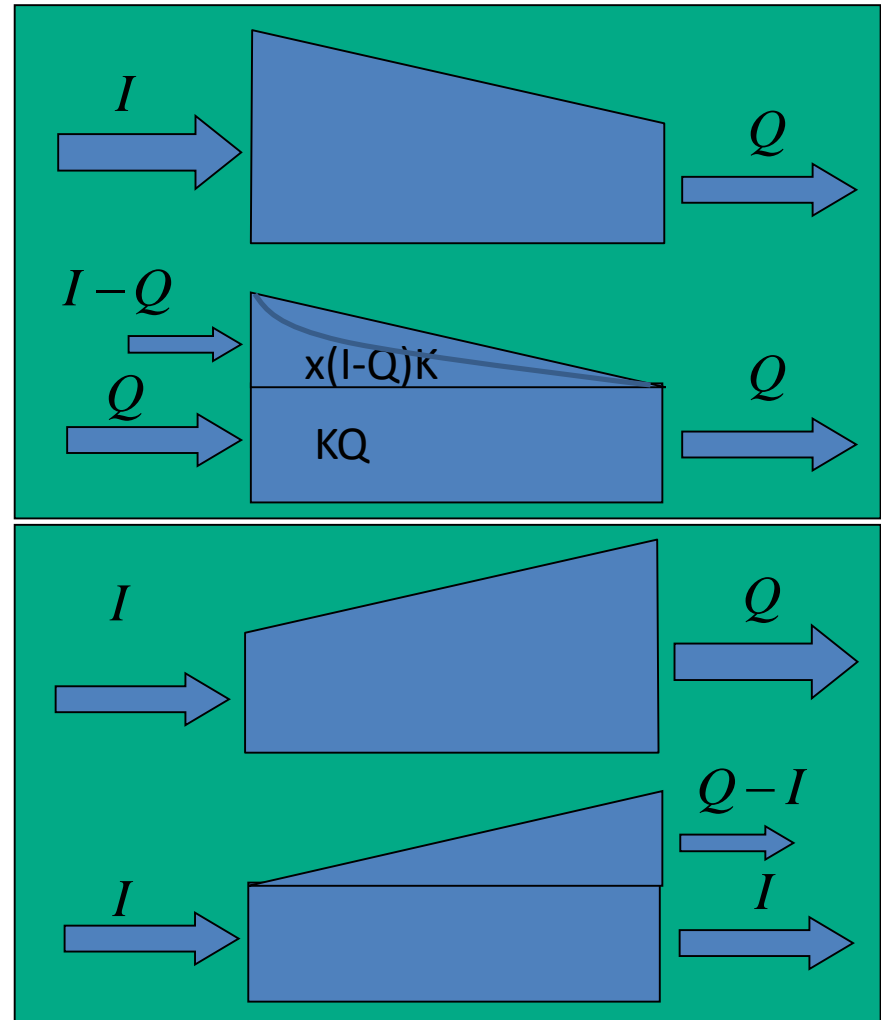
$X = 0.0 - 0.3 \rightarrow$ φυσικό ποτάμι

$$S = KQ + KX(I - Q)$$

$$S = K[XI + (1 - X)Q]$$

Προώθηση
Πλημμυρικού
κύματος
 $I > Q$

Υποχώρηση
Πλημμυρικού
κύματος $Q > I$



σφήνα

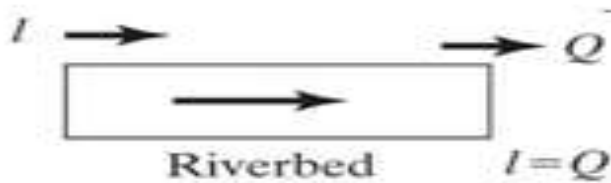
$$I - Q = \frac{ds}{dt}$$

River reach

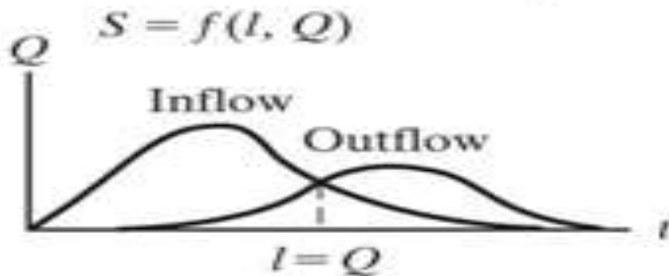
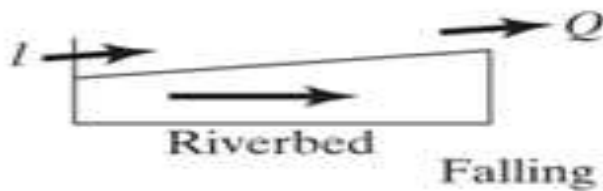
Flood arrives at reach



Entire reach flooded



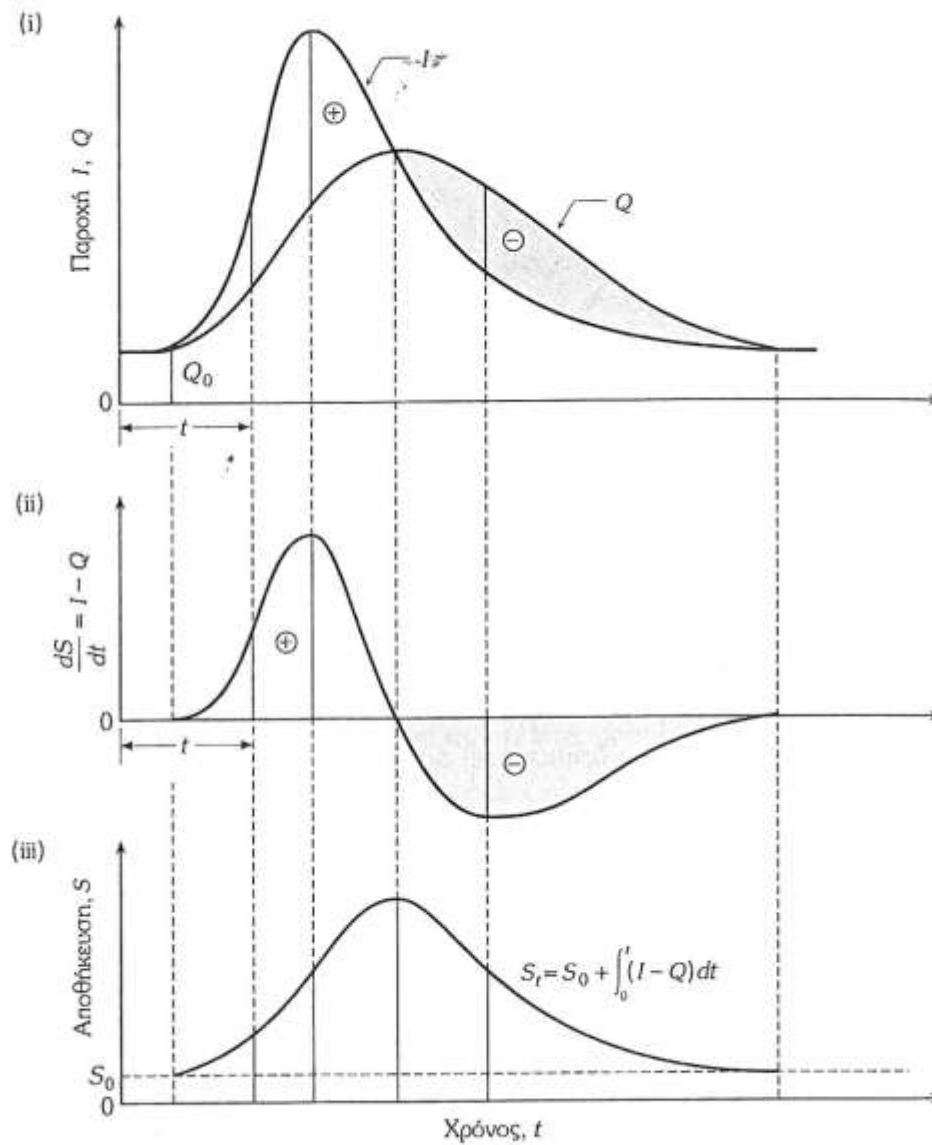
Storm over, inflow slows, higher water in lower reach



When Inflow is greater upstream than in the lower watershed, then inflow > outflow, here $I > Q$, and the water storage will be a **wedge** with higher water upstream.

The elevated (deeper) reach of water during the flood crest is called **prism (=rectangular) storage**, it occurs when $I = Q$,

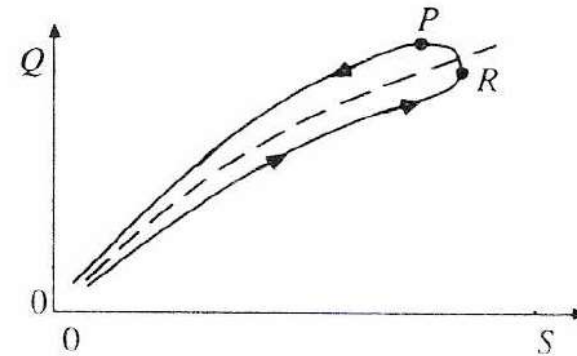
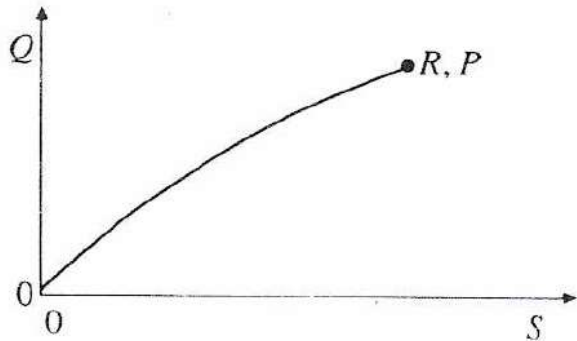
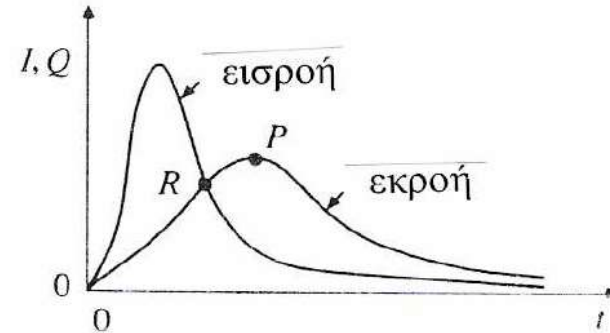
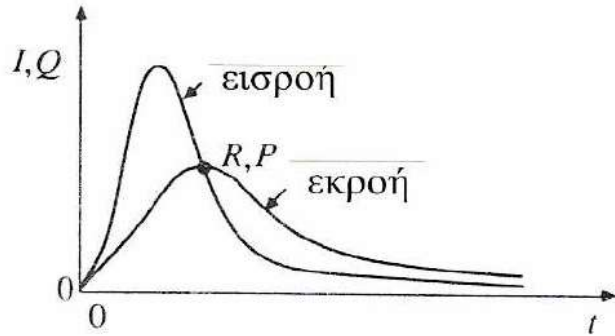
and finally as the inflow falls, there's again **wedge storage** while the outflow is greater than the inflow $Q > I$, with the higher water level close to the outlet.



Σχ. 12.3: Η μεταβολή της αποθήκευσης σε υδροφόρα κατά τη διέλευση μιας πλημμύρας.

- Διοδευση σε ποτάμι
- όταν η εισροή είναι ίση με την εκροή έχω τη μέγιστη αποθήκευση
 $dS/dt = I - Q = 0$ (διατήρηση της μάζας)
(ισχύει για διόδευση σε κοίτη ποταμού και ταμιευτήρα)
- Για διόδευση σε κοίτη ποταμού ο χρόνος που έχω τη μέγιστη αποθήκευση δεν συμπίπτει υποχρεωτικά με το χρόνο που λαμβάνει χώρα η μέγιστη εκροή
- (ενώ σε ταμιευτήρα συμπίπτει, ίδε παρακάτω)

Μη μονοσήμαντη σχέση



(a) μονοσήμαντη σχέση αποθήκευσης-εκροής

(b) μη μονοσήμαντη σχέση αποθήκευσης-εκροής

Απόδειξη εξισώσεων για τη
διόδευση σε κοίτη ποταμού

Από τη διατήρηση της μάζας ισχύει:

Εξισώσεις συνέχειας:

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

ή γενικότερα

(12.3)

$$S_{i+1} - S_i = \Delta t \left[\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right]$$

Από την υπόθεση για την αποθήκευση

και Εξισώσεις αποθήκευσης:

$$S_2 - S_1 = K[x(I_2 - I_1) + (1 - x)(Q_2 - Q_1)]$$

ή γενικότερα

(12.4)

$$S_{i+1} - S_i = K[x(I_{i+1} - I_i) + (1 - x)(Q_{i+1} - Q_i)]$$

Διόδευση, επιτέλους, εξισώσεις

από τις οποίες προκύπτει η εξίσωση που δίνει την εκροή στο επόμενο χρονικό βήμα:

$$Q_{i+1} = C_0 I_{i+1} + C_1 I_i + C_2 Q_i \quad (12.5)$$

όπου:

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

(12.6)

και

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1$$

Τσακίρης και Μπέλλος, 2014

Παρατήρηση: Για τη χρησιμοποίηση της μεθόδου θεωρείται ότι η ροή στο υδατόρευμα είναι μόνιμη και ομοιόμορφη πριν την εκδήλωση της πλημμύρας εισόδου. Η εφαρμογή της μεθόδου δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για αριθμούς Froude μικρότερους από 0.5.

Τέλος, η βήμα προς βήμα εφαρμογή της Εξ. 12.5 δίνει το υδρογράφημα εκροής. Το βήμα χρόνου Δt πρέπει να είναι μικρότερο από $2K(1-x)$ για να υπάρχει ευστάθεια.

Διδασκαλίστικο σχόλιο

- Προσοχή στους συμβολισμούς.
- (συνήθες «αλλαούμ» στην υδρολογία)
- Μπέλλος και Τσακίρης με Σακκά, έχουν άλλους συμβολισμούς αλλά με ίδιο προφανώς περιεχόμενο

Αντίστροφο πρόβλημα (θα εξηγηθεί τη Δευτέρα)

Αριθμητικός Προσδιορισμός των K και x :

Η διαδικασία προσδιορισμού των K και x της εξίσωσης Muskingum είναι η εξής με βάση τις Εξ. 12.3 και 12.4:

$$K = \frac{\Delta t \left[\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \right]}{x(I_{i+1} - I_i) + (1-x)(Q_{i+1} - Q_i)} \quad (12.7)$$

Παράδειγμα εφαρμογής μεθόδου Muskingum

- Υδρογράφημα πλημμύρας στη θέση υδρομετρήσεων Α ενός ποταμού : στήλες 2, 3, Πιν. 8.3
- Να γίνει διόδευση της θεωρούμενης πλημμύρας από τη θέση Α σε μια χειτονική κατάντη διατομή Β του ποταμού.
- $K = 16$ hr, $x = 0.25$, για $t = 0$ $Q = 120$ m³/s
- Να σχεδιασθούν τα υδρογραφήματα πλημμύρας στις δύο διατομές Α και Β

Χρυσάνθου.
2013



Λύση

$$Q_{i+1} = C_1 I_i + C_2 I_{i+1} + C_3 Q_i$$

$$\Delta t = 6 \text{ hr}$$

$$D = 0.5 \Delta t + (1-x)K = 15$$

$$C_1 = (0.5 \Delta t + xK) / D = 0.4667$$

$$C_2 = (0.5 \Delta t - xK) / D = -0.0667$$

$$C_3 = [-0.5 \Delta t + (1-x)K] / D = 0.60$$

$$Q_{i+1} = C_0 I_{i+1} + C_1 I_i + C_2 Q_i$$

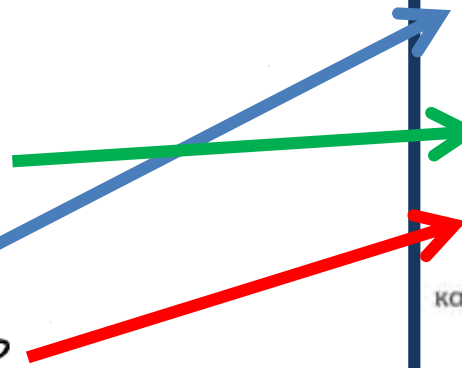
όπου:

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t}$$

και

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1$$


Λύση:

Προσδιορίζω τους συντελεστές και την εξίσωση προσδιορισμού της εκροής

$$Q_{i+1} = 0.4667I_i - 0.0667I_{i+1} + 0.60Q_i$$

Ξεκινώ για $t = 0$, $Q_0 = 120 \text{ m}^3/\text{s}$

Η εκροή για $t = 0$ θα είναι δοσμένη από την εκφώνηση (δεν εξαρτάται από το πλημμυρικό κύμα) (π.χ. $i=1$)

Το χρονικό βήμα, ασκησιολογικά, προκύπτει από τα δεδομένα $\Delta t = 6$

Αμέσως μετά (π.χ. $i+1$)

$$Q_{i+1} = 0.4667I_i - 0.0667I_{i+1} + 0.60Q_i$$

$$Q_6 = 0.4667I_0 - 0.0667I_6 + 0.60Q_0$$

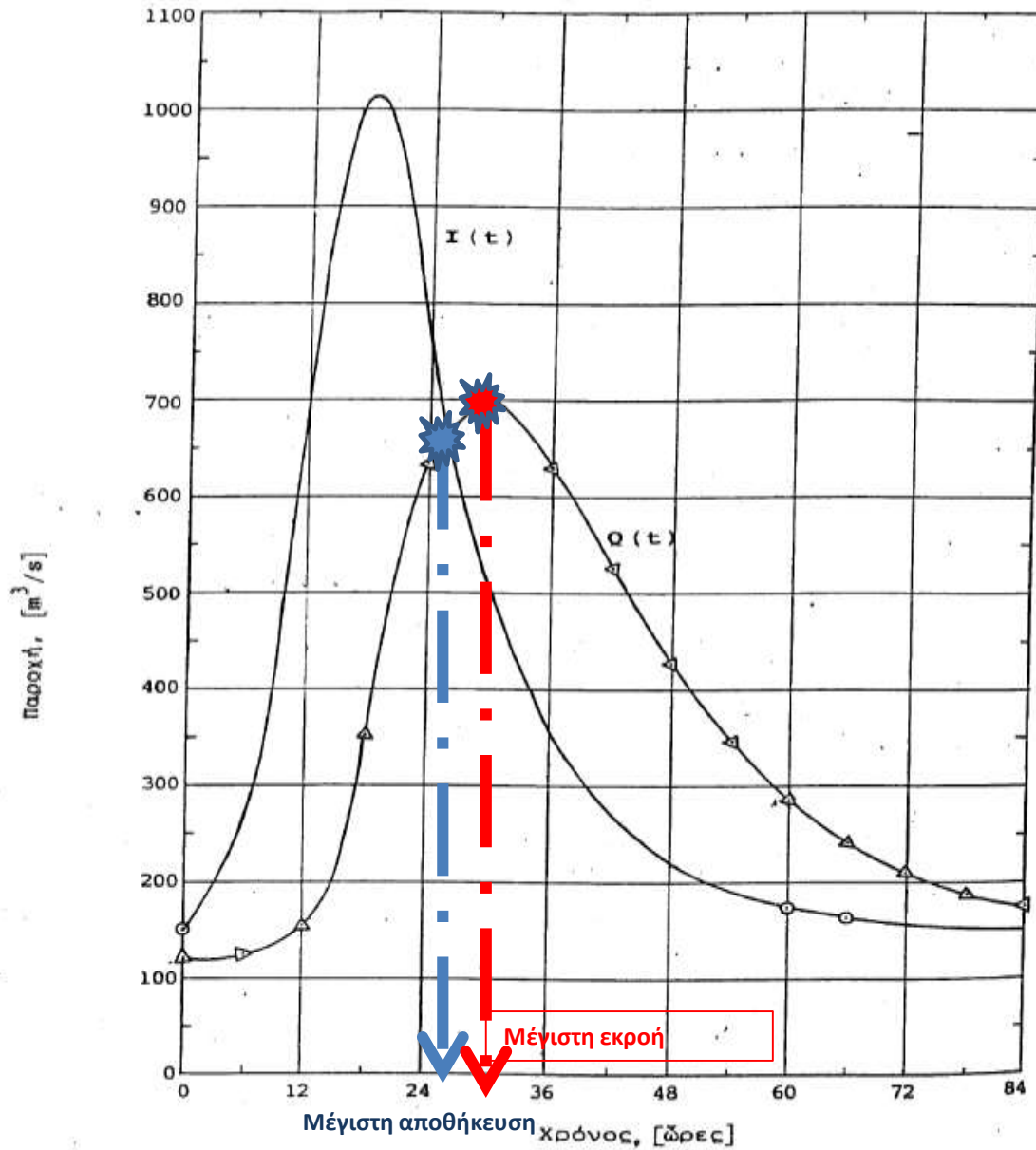
$$= 0.4667 \cdot 150 - 0.0667 \cdot 270 + 0.60 \cdot 120 = 124$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με βήμα 6 h

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.3

ΔΙΟΔΕΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΔΙΑ ΜΕΣΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΠΟΤΑΜΟΥ

α/α i	Χρόνος t [hr]	Εξοροή I [m ³ /s]	$C_1 I_i$ [m ³ /s]	$C_2 I_{i+1}$ [m ³ /s]	$C_3 Q_i$ [m ³ /s]	Έκροή Q [m ³ /s]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0	0	150	—	—	—	120.0
1	6	270	70.0	-18.0	72.0	124.0
2	12	700	126.0	-46.7	74.4	153.7
3	18	1012	326.7	-67.5	92.2	351.4
4	24	750	472.3	-50.0	210.9	633.1
5	30	502	350.0	-33.5	379.9	696.4
6	36	356	234.3	-23.7	417.8	628.4
7	42	272	166.1	-18.1	377.0	525.0
8	48	220	126.9	-14.7	315.0	427.3
9	54	190	102.7	-12.7	256.4	346.4
10	60	174	88.7	-11.6	207.8	284.9
11	66	163	81.2	-10.9	170.9	241.3
12	72	156	76.1	-10.4	144.8	210.4
13	78	152	72.8	-10.1	126.3	188.9
14	84	150	70.9	-10.0	113.4	174.3



Σακκάς, τεχν.
υδρολογία

Σχ. 8.4 Υδρογραφήματα πλημμύρας σε δύο διαδοχικές διατομές ενός ποταμού (διόδευση πλημμύρας)