



**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

# **ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ**

**Ενότητα 7: Υδρομετρία – Μέτρηση Απορροών**

**Καθ. Αθανάσιος Λουκάς**

**Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων**

**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών**

**Πολυτεχνική Σχολή**

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Η παροχή των υδατορευμάτων που προκύπτει από την υδρομετρία είναι η κύρια συνιστώσα του υδρολογικού κύκλου και αποτελεί το κύριο αντικείμενο του υδραυλικού μηχανικού
- Η υδρομετρία, σε αντίθεση με τη βροχομετρία, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και πολυδάπανη διαδικασία, και απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό τόσο για τις διαδικασίες υπαίθρου όσο και για τις εργασίες γραφείου
- Κύριος στόχος της υδρομετρίας είναι η παραγωγή αδιάλειπτων χρονοσειρών παροχής σε διάφορες χρονικές κλίμακες και απαιτείται η εκτέλεση μετρήσεων παροχής ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. εβδομάδας ή δεκαπενθημέρου). Όμως, ποτέ η χρονική πυκνότητα των μετρήσεων παροχής δεν είναι η απαιτούμενη (λόγω των ιδιαίτερων δυσκολιών και του σημαντικού κόστους τους) και έτσι για την πύκνωση των χρονοσειρών παροχής στο επιθυμητό χρονικό βήμα (π.χ. ημερήσιο, ωριαίο ή και ακόμη μικρότερο) μετριέται η στάθμη του υδατορεύματος της οποίας η μέτρηση είναι απλούστερη
- Η υδρομετρία αποτελεί σήμερα ολόκληρη εφαρμοσμένη επιστήμη που απασχολεί σημαντικές βιομηχανικές μονάδες με ενσωματωμένα ερευνητικά κέντρα, αλλά και υδρολογικές υπηρεσίες. Προδιαγραφές για την υδρομετρία έχουν εκδώσει τόσο ο World Meteorological Organization (1981) όσο και ο International Standards Organization (1983)



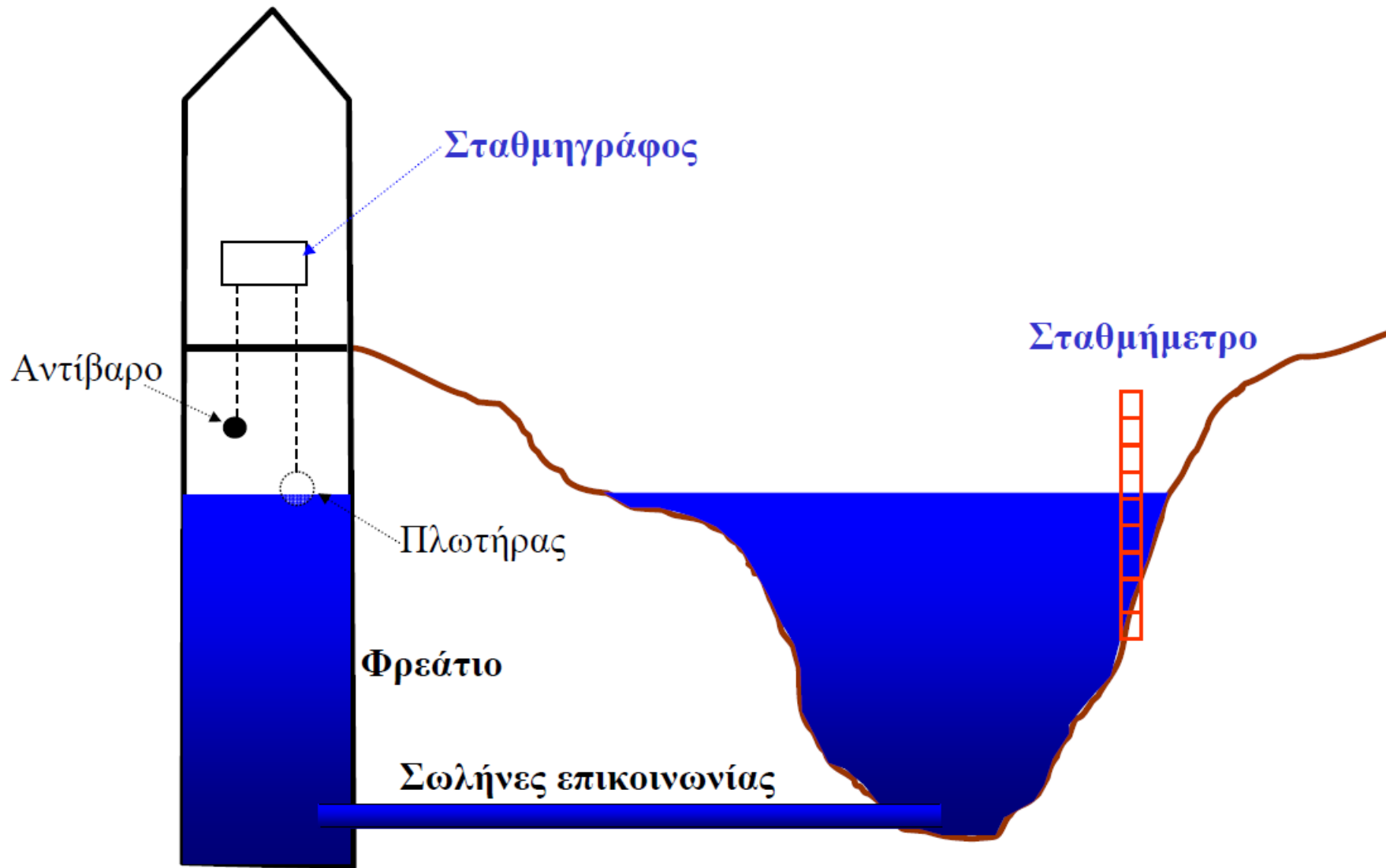
# ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

- Συνεχής μέτρηση στάθμης (σταθμήμετρο, σταθμηγράφος)
- Περιστασιακή μέτρηση παροχής
- Κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής
- Επέκταση καμπύλης στάθμης-παροχής
- Εκτίμηση παροχών
- Διόρθωση παροχών (Stout)
- Επέκταση καμπύλης στάθμης-παροχής
- Εκτίμηση αιχμής πλημμύρας



# ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ

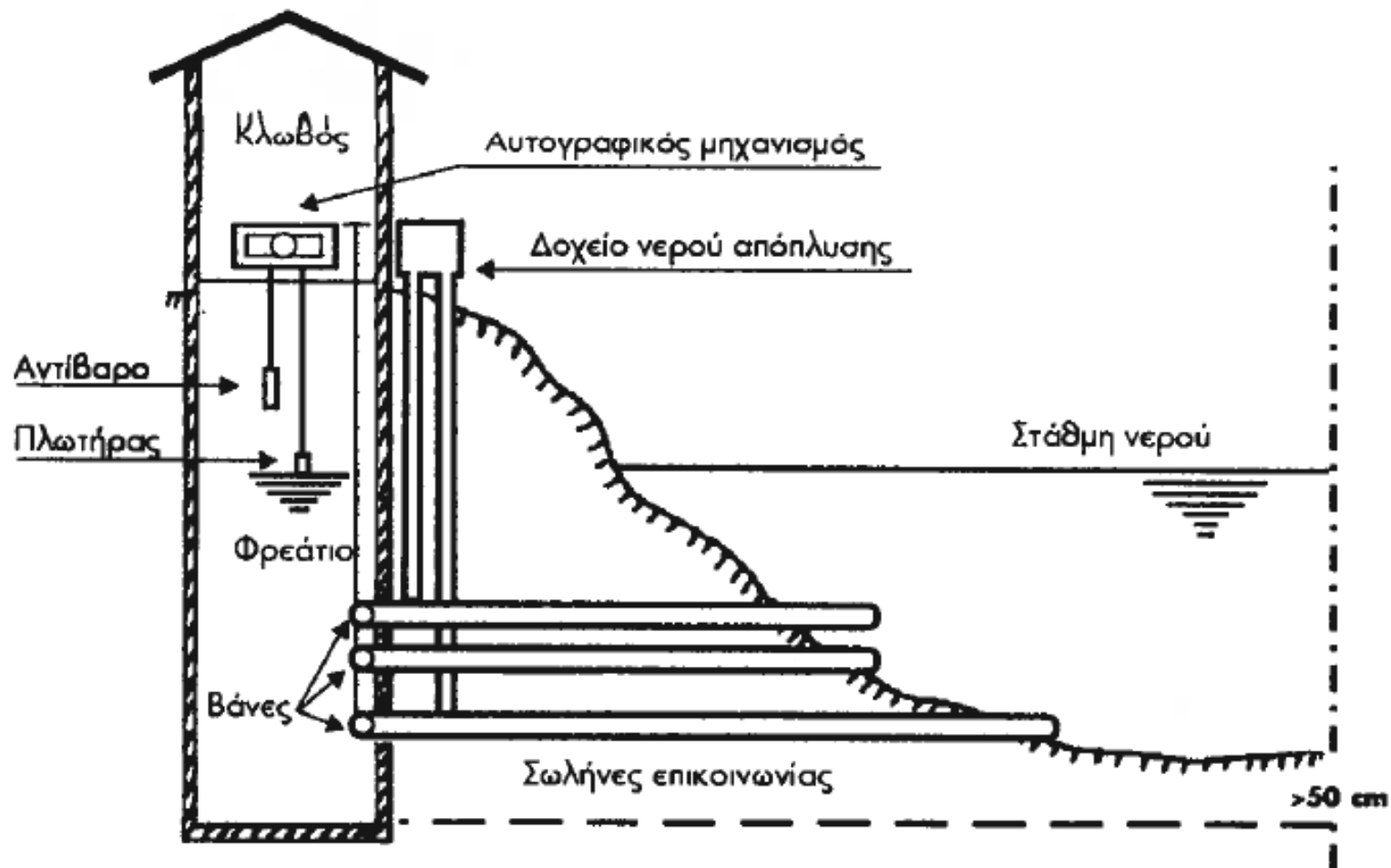
## Τυπική εγκατάσταση σταθμηγράφου



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009. Υδρομετρία  
[http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro\\_ydrom10.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro_ydrom10.pdf))



# Τυπικός Σταθμηγράφος



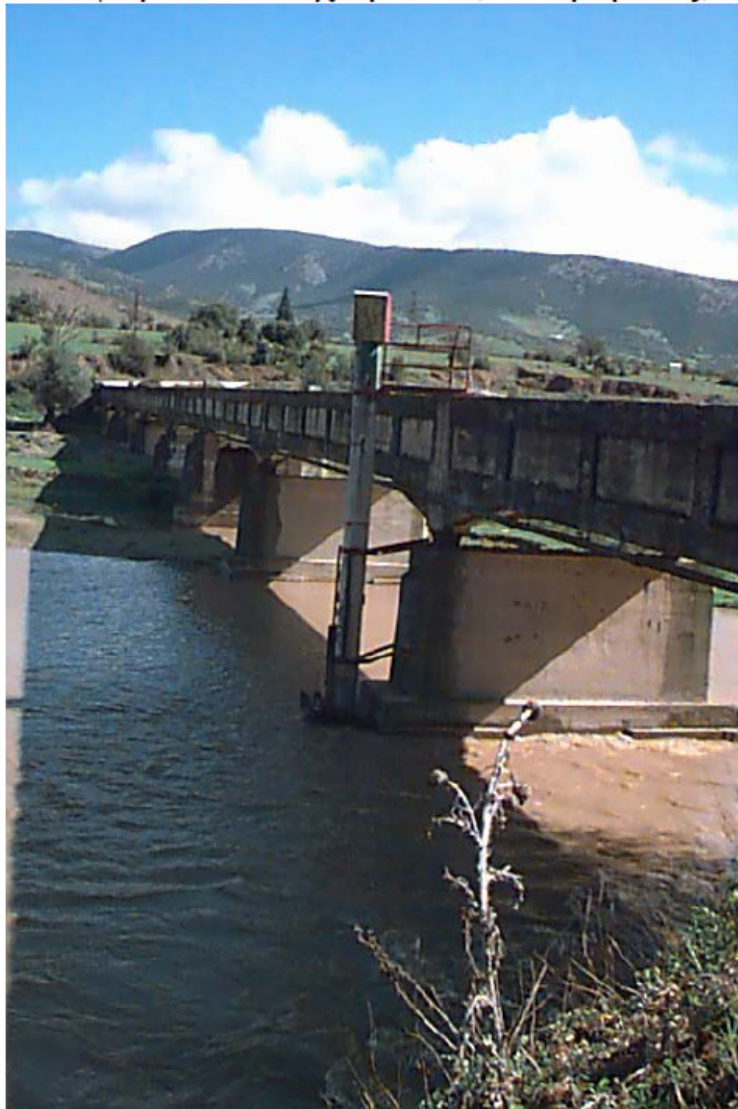
(Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012)



# ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

## Παραδείγματα

Γεφυρα Μεσοχωρίου (Τιταρήσιος)



Θέση Αμυγδαλιά (Πηνειός)



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009. Υδρομετρία [http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro\\_ydrom10.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro_ydrom10.pdf))



# ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009. Υδρομετρία  
[http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro\\_ydrom10.pdf](http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/ydro_ydrom10.pdf))



# ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

- **Μέτρηση με παρεμβολή μετρητών παροχής**

Παρεμβάλλονται στη ροή ειδικά τμήματα όπως υπερχειλιστές και στενώσεις και η παροχή εκτιμάται με υδραυλικές σχέσεις

- **Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων**

Η παροχή εκτιμάται με βάση το πεδίο ταχυτήτων και το εμβαδόν της υγρής διατομής

- **Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων**

Διαχέεται ένας δείκτης εύκολα ανιχνεύσιμος και αναλύεται δείγμα σε μια πιο κατάντη διατομή

- **Εκτίμηση με πλωτήρες**

Χονδροειδής μέθοδος που στηρίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου που επιπλέει

- **Εκτίμηση με υδραυλικές σχέσεις ροής**

Η παροχή εκτιμάται προσεγγιστικά με τη χρήση ημιεμπειρικών σχέσεων της υδραυλικής

- **Σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης**

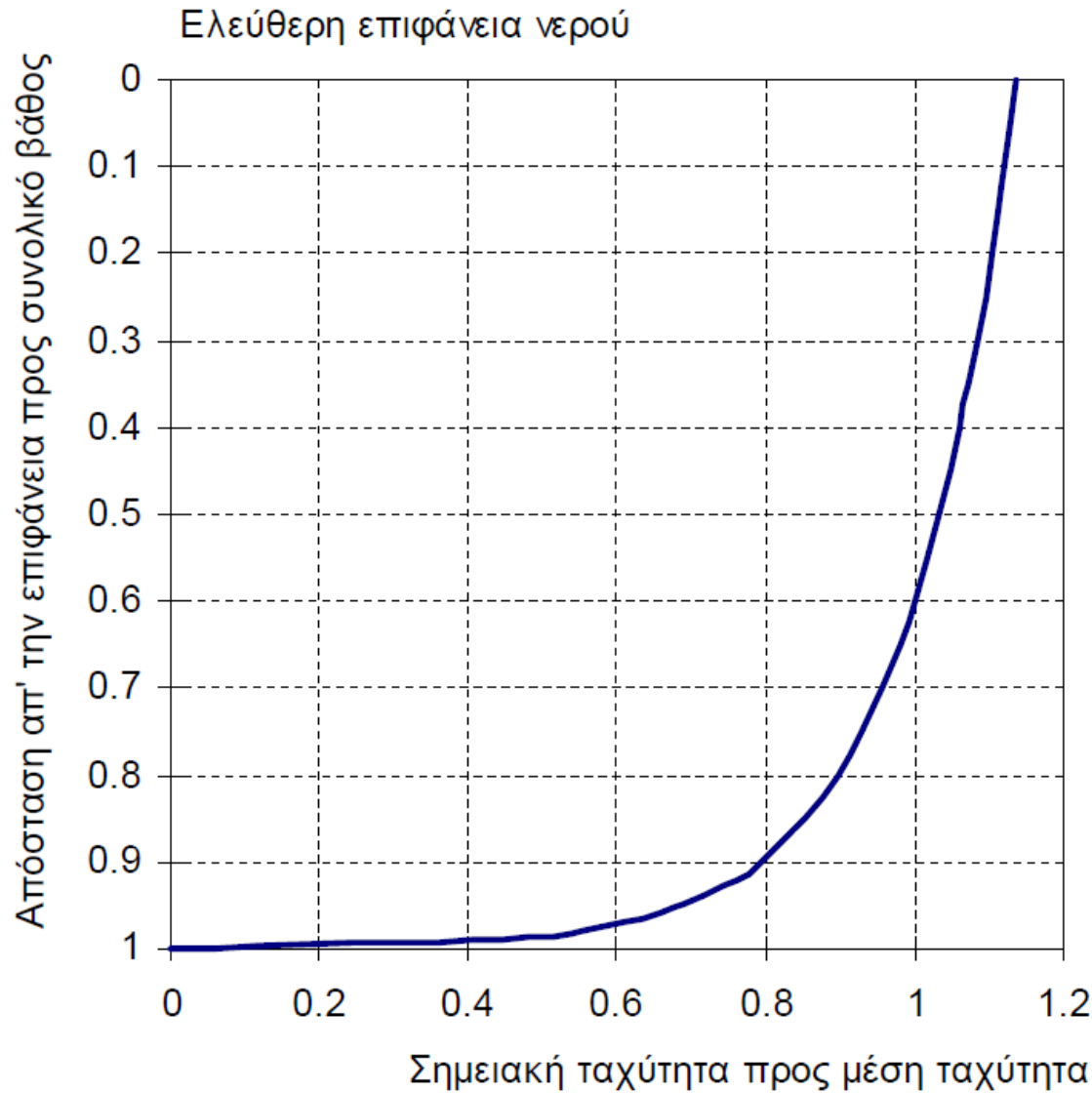
Μέθοδος υπερήχων, ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, μέθοδος φουσαλίδων





# ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

## Τυπική κατανομή ταχυτήτων σε κατακόρυφη διατομή υδατορεύματος



$$\bar{u} = \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{2}$$

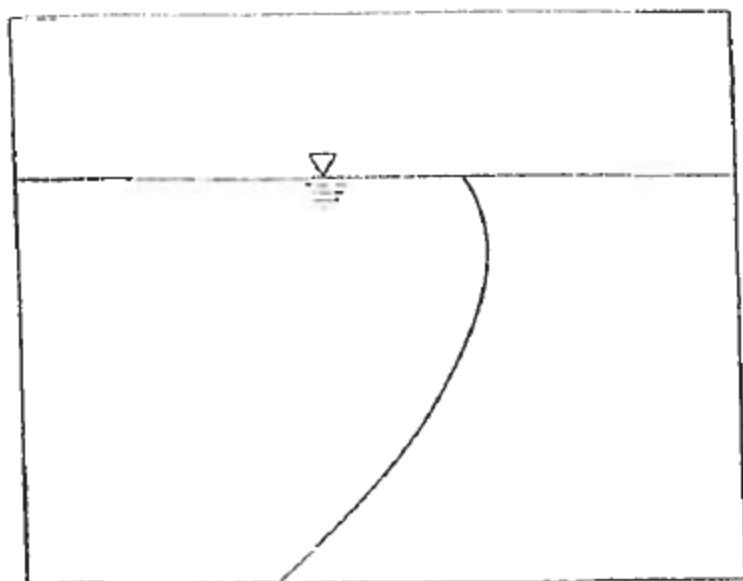
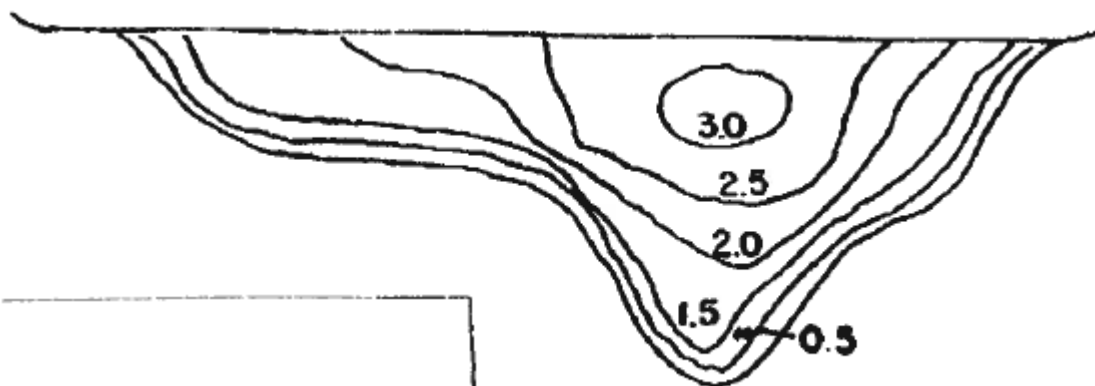
$$\bar{u} = \frac{u_{0.6}}{2} + \frac{u_{0.2} + u_{0.8}}{4}$$

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων

Κατανομή ταχύτητας σε ένα ποτάμι



**ταχύτητα**

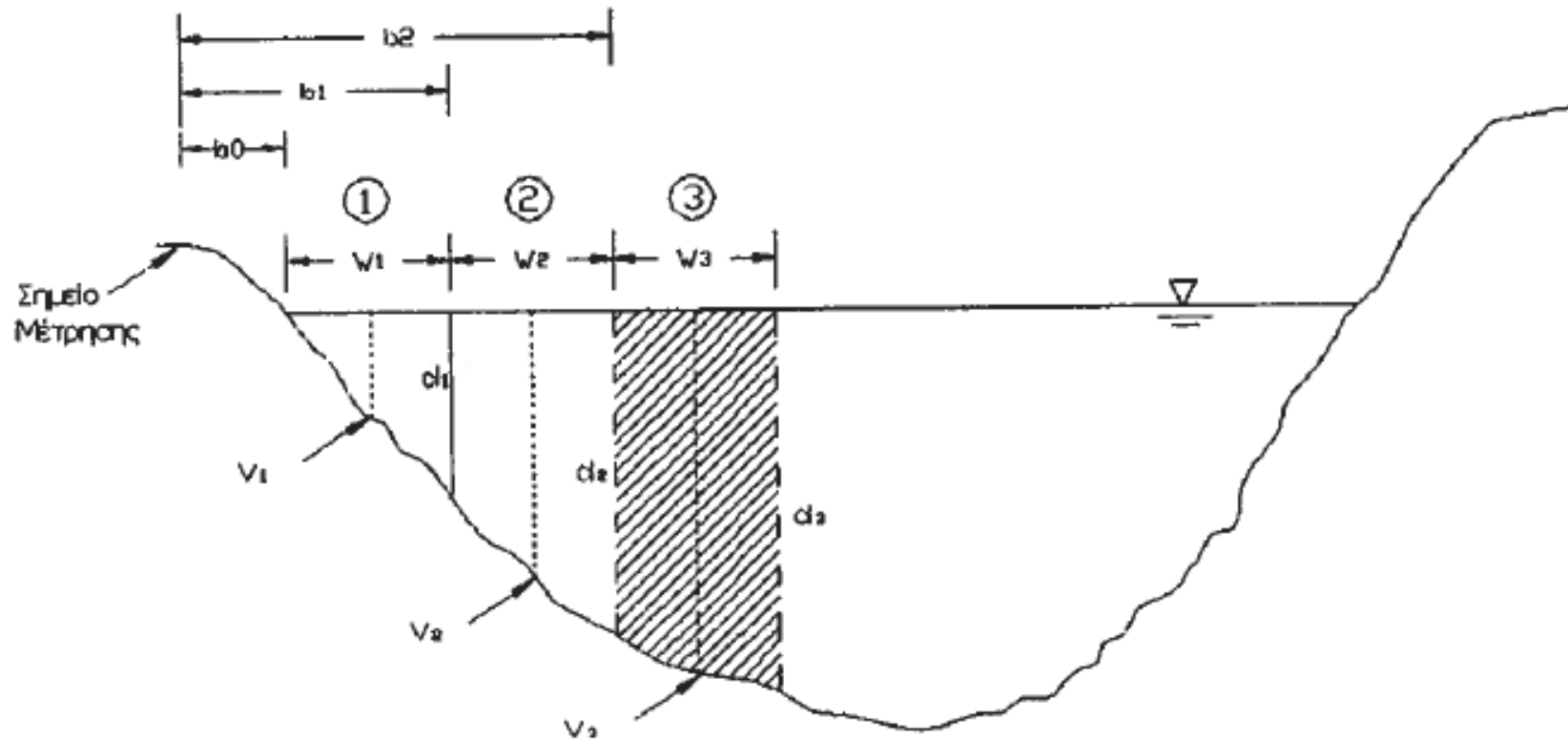
**Κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας στο μέγιστο βάθος της εγκάρσιας διατομής**

(Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012)



# Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων

## Διατομή υδατορεύματος



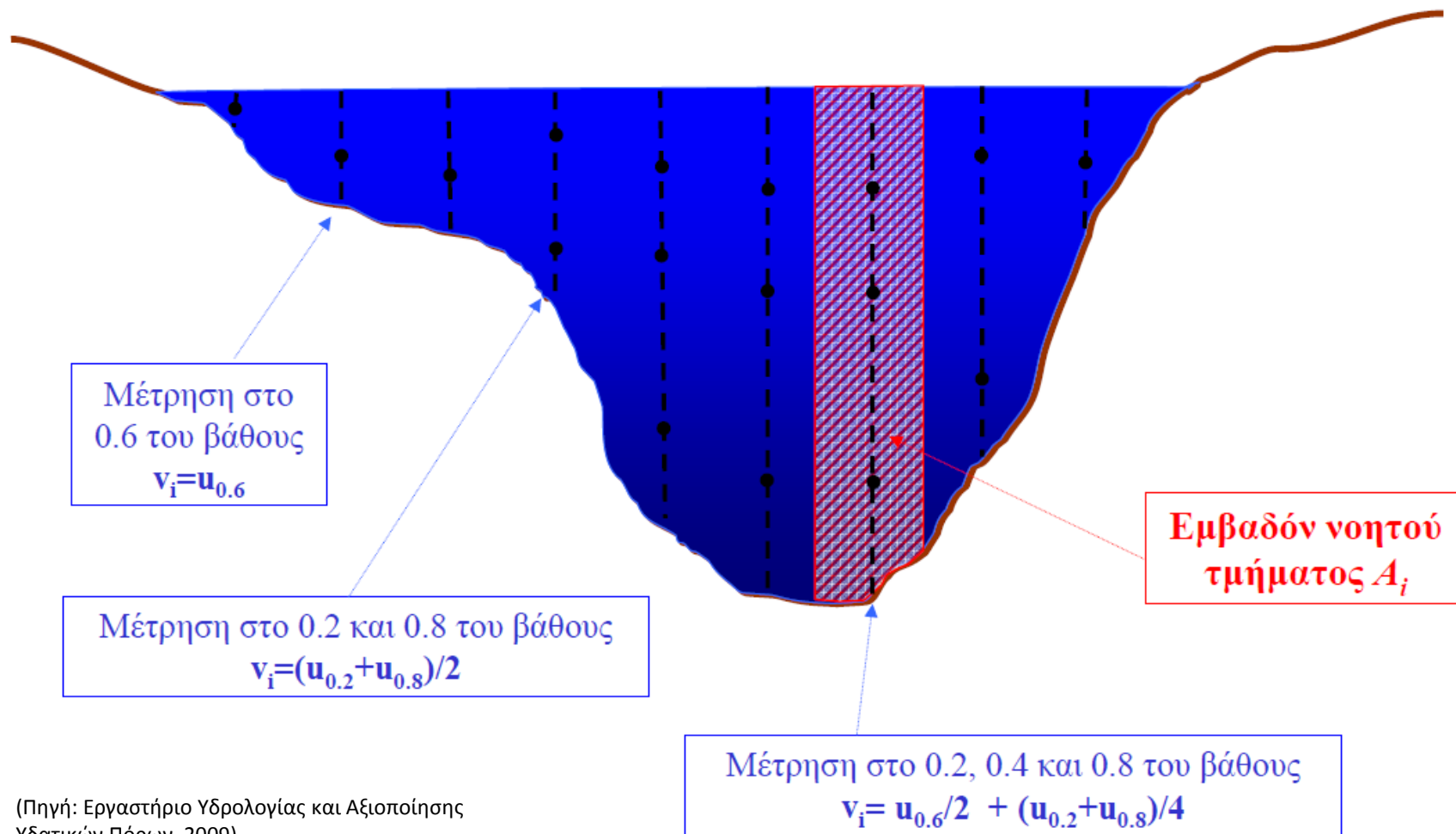
(Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012)



# ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ

Συνολική παροχή:  $Q = \sum_{i=1}^{i=N} q_i$

Παροχή νοητού τμήματος:  $q_i = v_i * A_i$

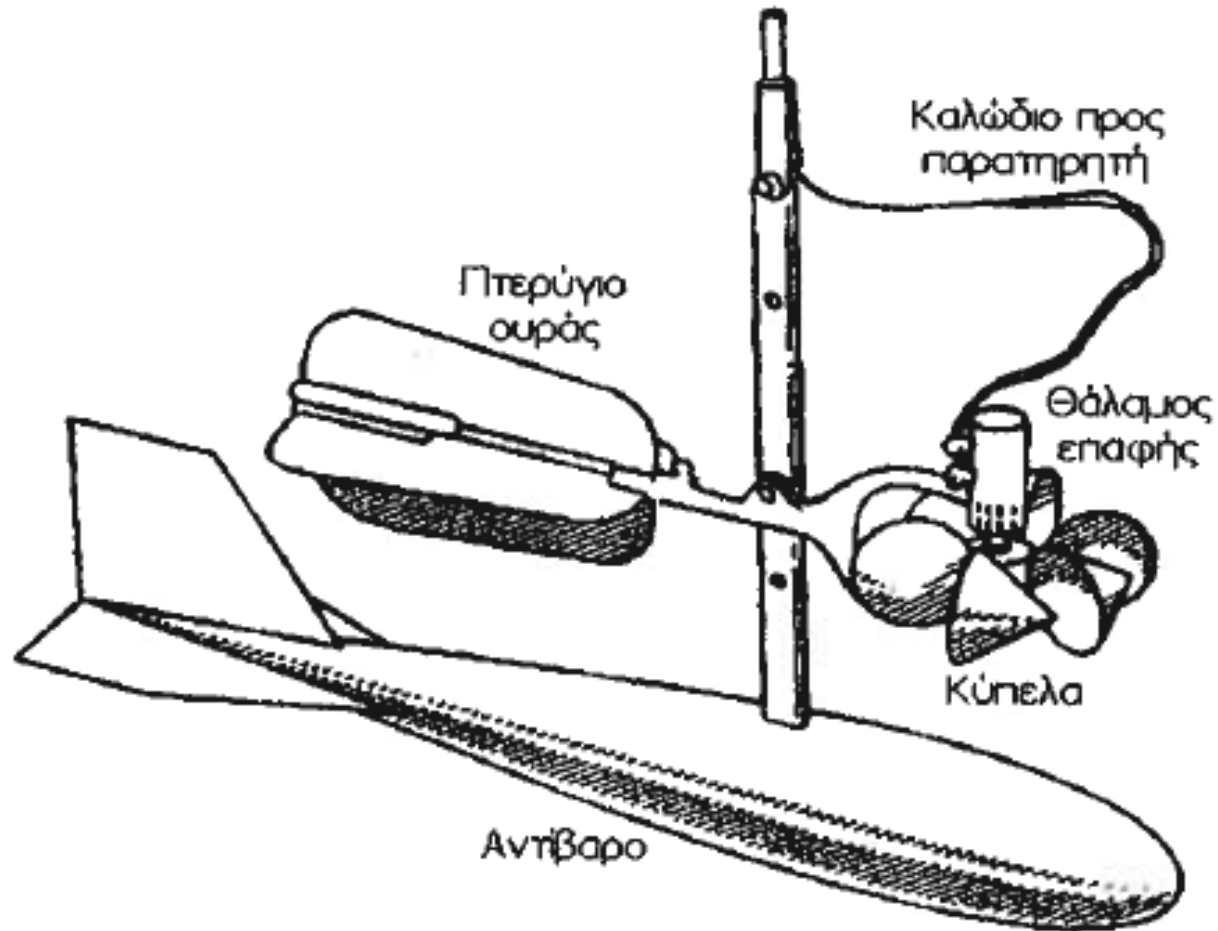


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων

## Τυπική διάταξη μυλίσκου



(Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012)



## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

### Μυλίσκος και σύστημα ανάρτησης



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης  
Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Από γέφυρα



Υδροβασία

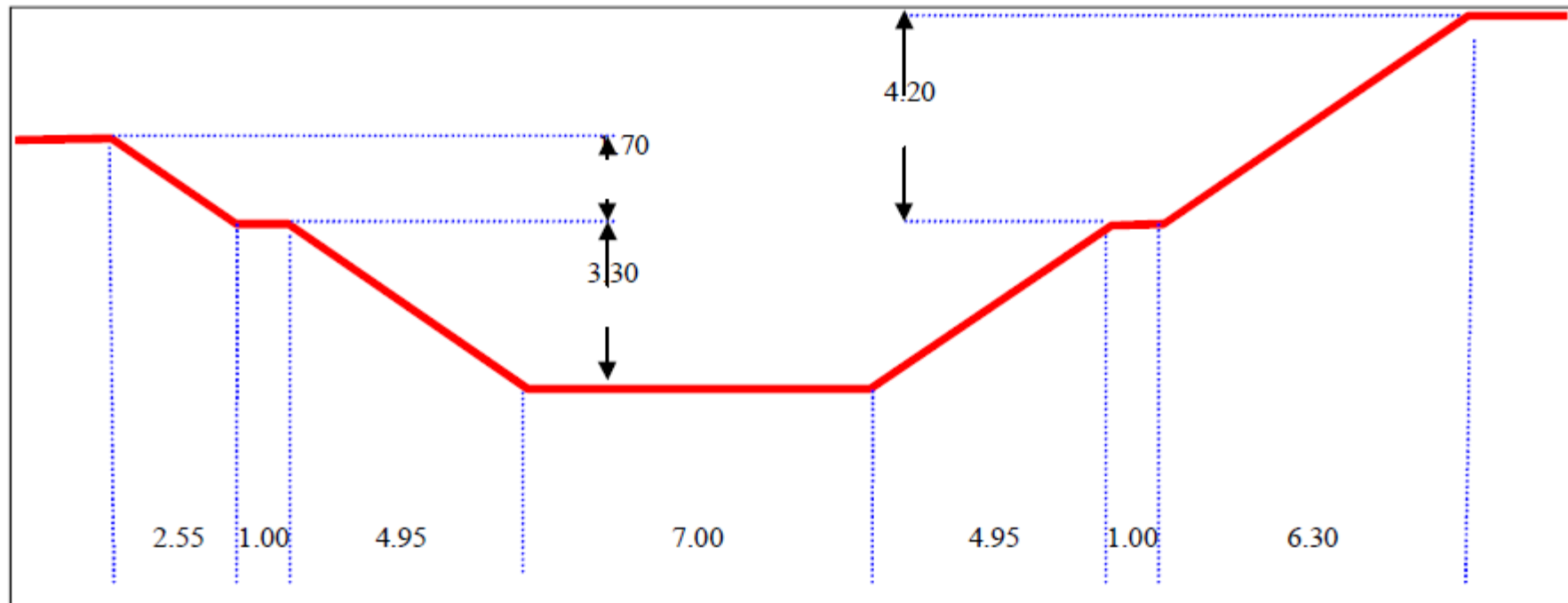


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΘΕΣΕΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ ΕΥΔΑΠ

## Διατομή Διώρυγας Καρδίτσας

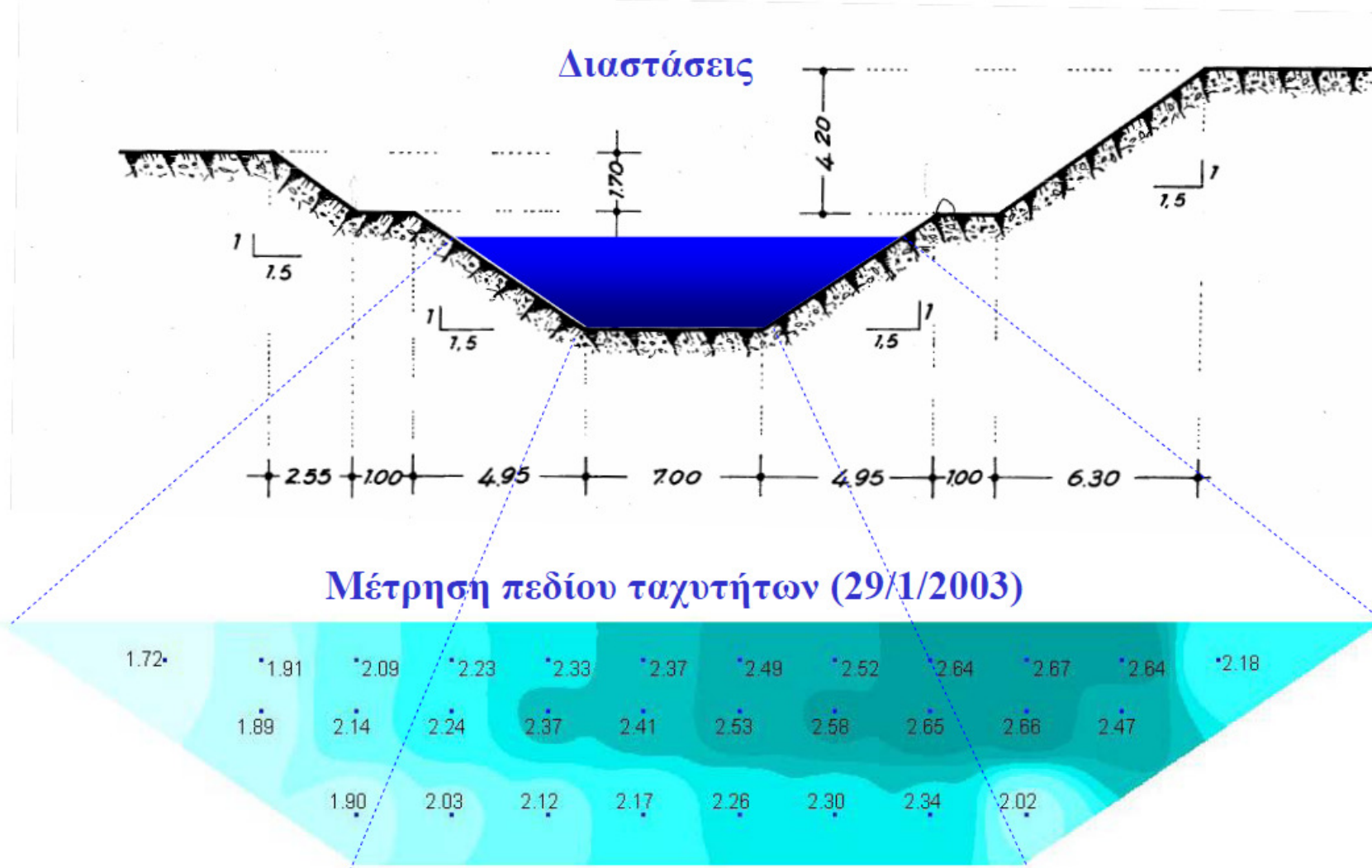


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)





# ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ



Στάθμη: 2.55 m

Εμβαδόν: 27.81m<sup>2</sup>

Βρεχόμενη περίμετρος: 16.27 m

Υδραυλική ακτίνα: 1.709 m

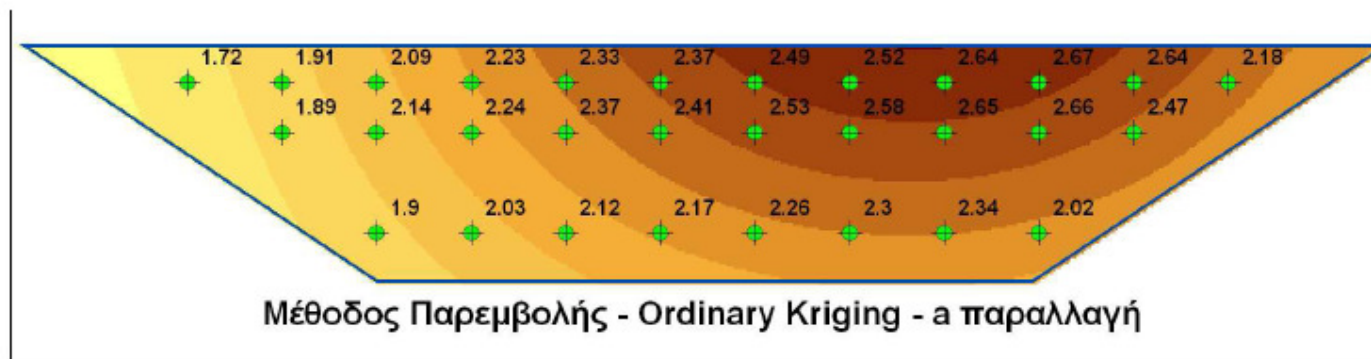
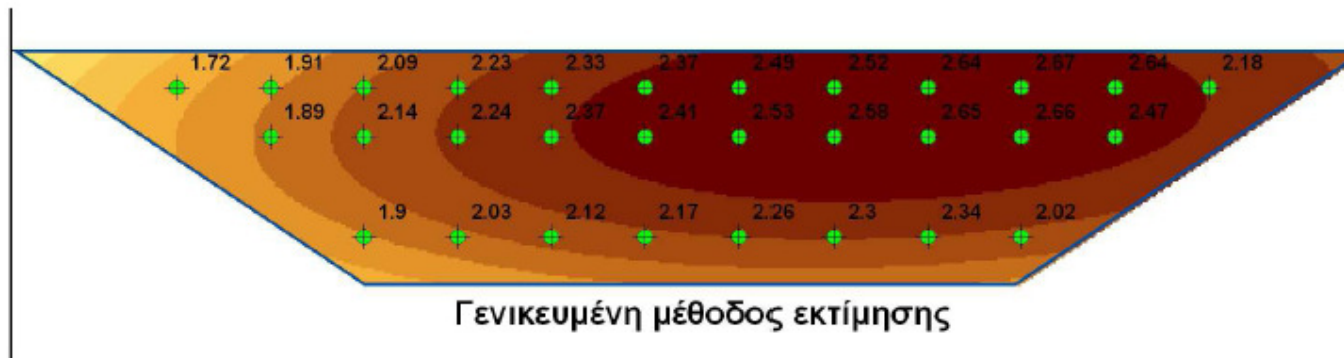
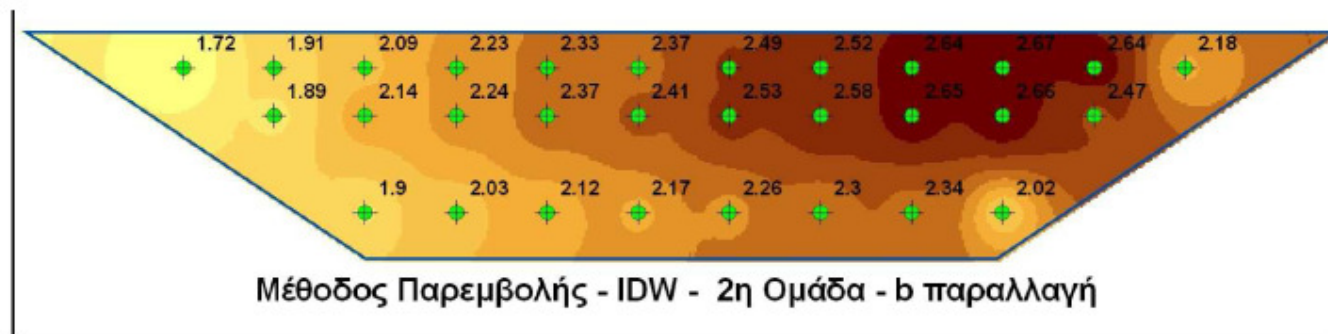
Μετρημένη παροχή: 61.59 m<sup>3</sup>/s

Συντελεστής τραχύτητας:  $n=0.0171$  ή  $K=59$

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων

- Η μέθοδος της μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων είναι πρακτικά ανεφάρμοστη σε σχετικά μικρά υδατορεύματα με ακανόνιστη κοίτη και έντονα τυρβώδη ροή, συνθήκες που απαντούν ιδίως σε ορεινές λεκάνες απορροής
- Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ως πλέον αξιόπιστη η μέθοδος των διαλυμάτων. Στηρίζεται στη διάχυση ενός δείκτη, εύκολα ανιχνεύσιμου, στην κατερχόμενη υδάτινη μάζα του υδατορεύματος, και τη λήψη και ανάλυση δείγματος σε μια πιο κατάντη διατομή του.
- Η απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το σημείο έγχυσης του δείκτη πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης ανάμιξη του δείκτη με το νερό, χωρίς όμως να φτάνει σε μήκη όπου οι πλευρικές συμβολές γίνονται σημαντικές. Οι μεγάλες ταχύτητες ροής ευνοούν τη γρήγορη η ανάμιξη του δείκτη και κατά συνέπεια συμβάλλουν στη μεγαλύτερη αξιοπιστία της μεθόδου.
- Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι προφανή, αφού δεν χρειάζεται ούτε η γνώση τοπογραφικών στοιχείων της διατομής του υδατορεύματος, ούτε σοβαρές εγκαταστάσεις στην όχθη.



# Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων

- Ο δείκτης που χρησιμοποιείται πρέπει να εξασφαλίζει ορισμένες προϋποθέσεις όπως
  - (α) μεγάλη διαλυτότητα στο νερό,
  - (β) αμελητέα φυσική συγκέντρωση στο υδατόρευμα,
  - (γ) ευκολία ανίχνευσης,
  - (δ) χημική αδράνεια τουλάχιστον στη διαδρομή μέχρι τη δειγματοληψία και
  - (ε) οικονομικότητα
- Παράλληλα θα πρέπει να είναι αβλαβής για τη ζωή στο υδατόρευμα και να μη δημιουργεί κανένα κίνδυνο για τις χρήσεις του νερού.
- Συνήθως χρησιμοποιείται κοινό αλάτι (NaCl), του οποίου η συγκέντρωση μετριέται εύκολα με ηλεκτρική μέθοδο, δεδομένου ότι επηρεάζει την αγωγιμότητα του νερού



# Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων

- Ακολουθείται μια από τις ακόλουθες δύο τυπικές τεχνικές εφαρμογής:

1. Βαθμιαία έγχυση σταθερής παροχής

- Από κατάλληλο δοχείο διοχετεύεται στο υδατόρευμα διάλυμα του δείκτη συγκέντρωσης  $C_0$ , με σταθερή παροχή  $q$ , για ένα χρονικό διάστημα αρκετό ώστε στο σημείο υδροληψίας η συγκέντρωση να φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας  $C_e$  (δηλαδή να μην αυξάνεται περαιτέρω). Στην περίπτωση αυτή η παροχή του υδατορεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = q \frac{C_0 - C_e}{C_e - C_b}$$

όπου:  $C_b$  είναι η φυσική συγκέντρωση του δείκτη στο νερό του υδατορεύματος (πριν την έγχυση του δείκτη).



# Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων

- Ακολουθείται μια από τις ακόλουθες δύο τυπικές τεχνικές εφαρμογής:

## 2. Απότομη έγχυση

- Ένα δοχείο που περιέχει διάλυμα του δείκτη συγκέντρωσης  $C_0$  και όγκου  $V$  αδειάζεται απότομα στο υδατόρευμα, ενώ στο κατάντη σημείο παρακολουθείται συνεχώς η συγκέντρωση του δείκτη  $C$  συναρτήσει του χρόνου  $t$ , μέχρι που να φτάσει στο επίπεδο της φυσικής συγκέντρωσης  $C_b$ . Αν αυτό γίνει στο χρόνο  $\tau$ , τότε η παροχή του υδατορεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$Q = V \frac{C_0 - C_b}{\int_0^{\tau} [C(t) - C_b] dt}$$

όπου το ολοκλήρωμα υπολογίζεται αριθμητικά ή γραφικά ως η επιφάνεια του διαγράμματος  $C(t)$  συναρτήσει του χρόνου (αφού αφαιρεθεί η τιμή βάσης  $C_b$ ).



# ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

## Όργανα και εγκαταστάσεις

Ο υδρομετρικός σταθμός περιλαμβάνει διάφορα όργανα και εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν τη μέτρηση τόσο της στάθμης όσο και της παροχής του υδατορεύματος. Ειδικότερα:

- Ο σταθμός περιλαμβάνει υποχρεωτικά *σταθμήμετρο* για τη μέτρηση της στάθμης του υδατορεύματος
- Είναι επιθυμητό (χωρίς όμως να μπορεί να επιτευχθεί πάντα, κυρίως για οικονομικούς λόγους) ο σταθμός να περιλαμβάνει και *σταθμηγράφο*, ο οποίος καταγράφει συνεχώς τη στάθμη, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για λεπτομερέστερη χρονική αποτύπωση της εξέλιξης της στάθμης του υδατορεύματος, απαραίτητη ιδίως για τη μελέτη πλημμυρικών υδρογραφημάτων
- Στη θέση του σταθμού θα πρέπει να διατίθενται όργανα μέτρησης της ταχύτητας. Τα όργανα αυτά δεν απαιτείται να λειτουργούν συνεχώς και έτσι είναι δυνατό, για λόγους οικονομίας, περισσότεροι του ενός σταθμοί μιας περιοχής να εξυπηρετούνται από τα ίδια όργανα
- Γενικά θα πρέπει να υπάρχει τρόπος γεφύρωσης του υδατορεύματος ώστε να είναι δυνατό να γίνει μέτρηση σε οποιοδήποτε σημείο της διατομής του. Συχνά για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται υπαρκτές οδικές ή σιδηροδρομικές γέφυρες, οι οποίες καθορίζουν και τη θέση του σταθμού. Ωστόσο, είναι προτιμότερο να γίνεται εγκατάσταση ειδικής εναέριας καλωδίωσης, η οποία εξυπηρετεί αποκλειστικά το σκοπό της υδρομετρίας



# ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

## Υδραυλική-Υδρολογική Καταλληλότητα

- Η θέση εγκατάστασης του υδρομετρικού σταθμού πρέπει να εξασφαλίζει στον καλύτερο δυνατό βαθμό την πλήρωση των ακόλουθων κριτηρίων:
  - συγκέντρωση της ροής σε μια μοναδική κοίτη (αποφυγή διάσπαρτης ροής σε πολλούς κλάδους)
  - απλότητα και ομοιομορφία της γεωμετρίας τόσο της διατομής (αποφυγή διατομών με γεωμετρικά σύνθετες διατομές, αποφυγή εμποδίων ανάντη ή κατάντη της διατομής) όσο και της οριζοντιογραφίας του ποταμού (προτίμηση των ευθύγραμμων έναντι των καμπύλων)
  - μη επηρεασμό της στάθμης από κατάντη συνθήκες ανεξάρτητες της παροχής (π.χ. Από στάθμη λίμνης, επίδραση παλιρροιών, επίδραση συμβολής άλλου υδατορεύματος κτλ.)
  - περιορισμένη δραστηριότητα διάβρωσης και απόθεσης φερτών
  - σταθερότητα στη σχέση στάθμης - παροχής





# ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

## Καταλληλότητα Θέσης Εγκατάστασης

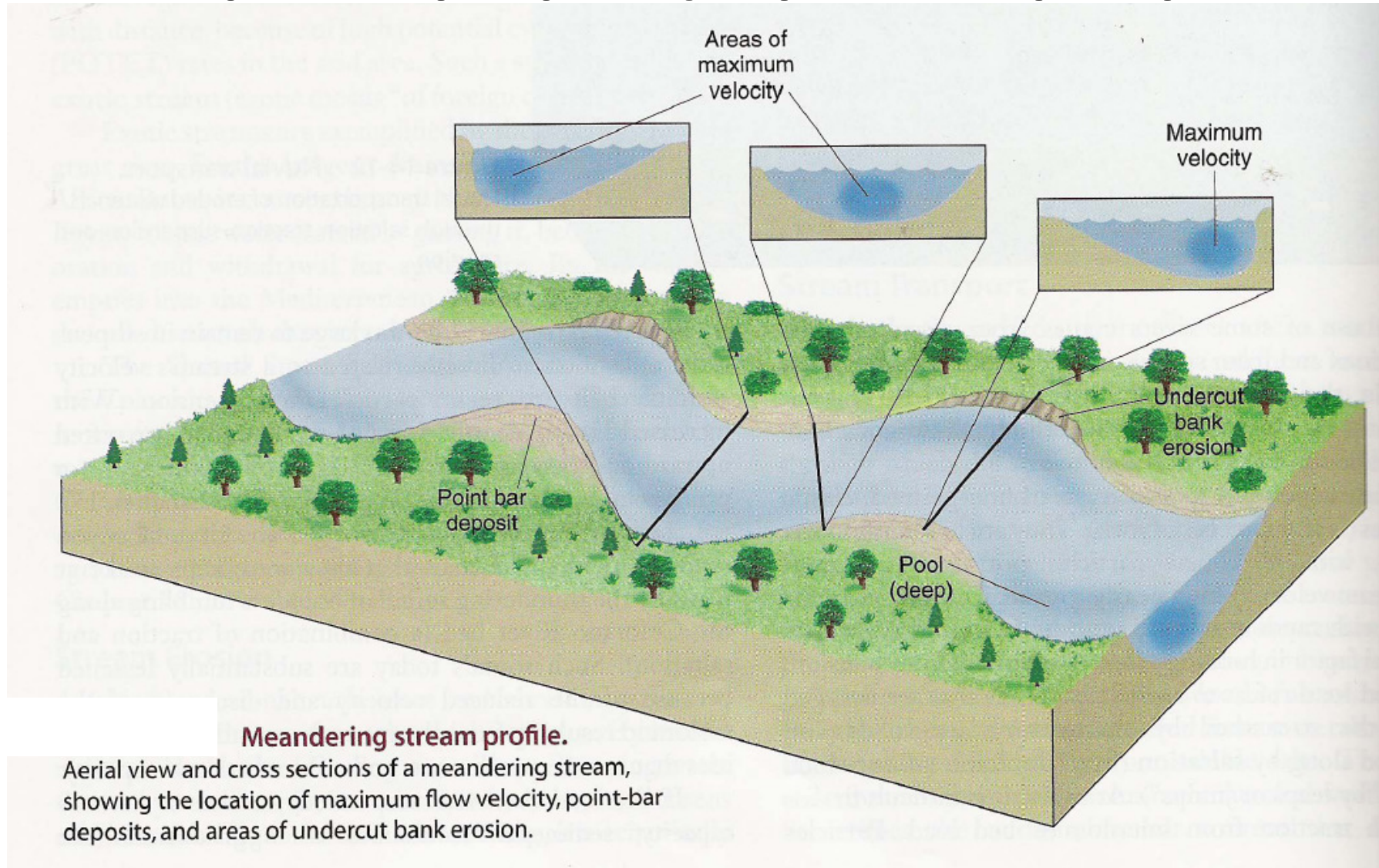
Η θέση εγκατάστασης του υδρομετρικού σταθμού πρέπει να εξασφαλίζει στον καλύτερο δυνατό βαθμό την πλήρωση των ακόλουθων κριτηρίων:

- ευαισθησία στη μεταβολή της παροχής για όλο το πεδίο μεταβολής της στάθμης
- αντιπροσωπευτικότητα της θέσης για τους τυχόν ειδικότερους σκοπούς που εξυπηρετεί ο υδρομετρικός σταθμός (π.χ. γεινίαση με τη θέση φράγματος, σε περίπτωση που τα δεδομένα του σταθμού θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη φράγματος)
- εύκολη πρόσβαση των συνεργείων εγκατάστασης και συντήρησης, και ιδίως των συνεργείων μέτρησης ακόμη και σε περιπτώσεις έντονων πλημμυρών
- οικονομικότητα (συγκριτικά με άλλες θέσεις) εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης



# ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

## Υδραυλική-Υδρολογική Καταλληλότητα

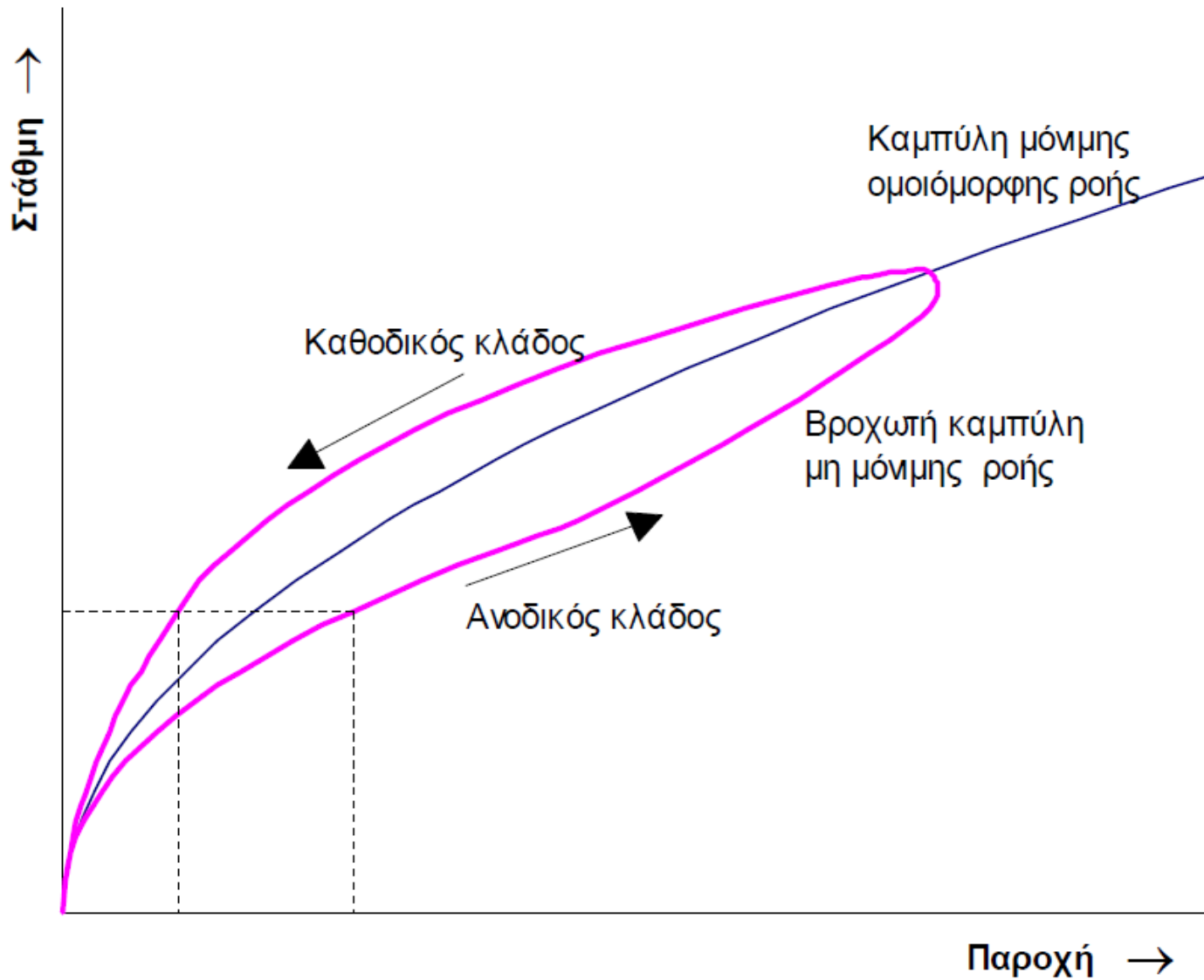


### Meandering stream profile.

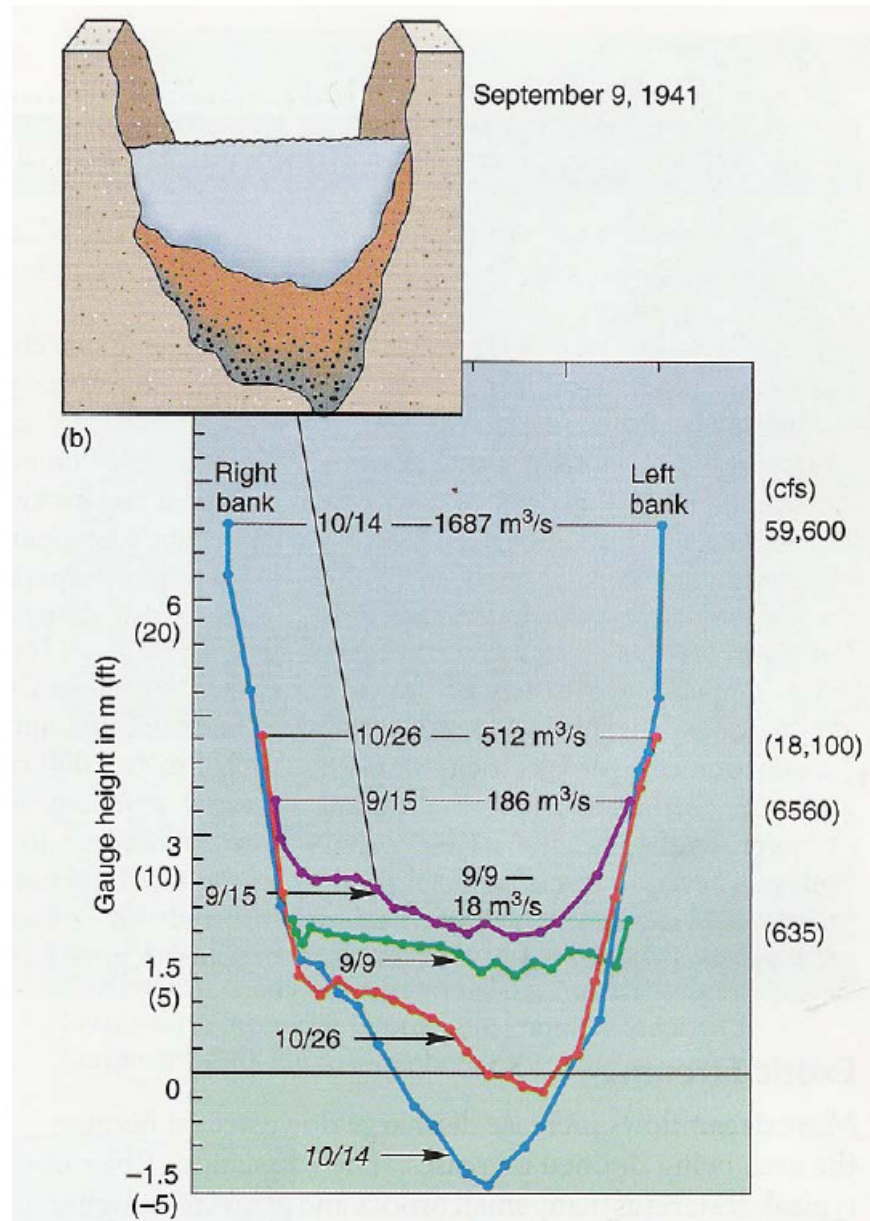
Aerial view and cross sections of a meandering stream, showing the location of maximum flow velocity, point-bar deposits, and areas of undercut bank erosion.



# ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ



# ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ



# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

## Σχέση του Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} i^{1/2}$$

όπου:

**A** το εμβαδόν της διατομής

**R** η υδραυλική ακτίνα (=  $A/P$ , όπου **P** η βρεχόμενη περίμετρος)

**i** η κλίση τριβών, που για μόνιμη ροή είναι ίση με την κλίση ενέργειας, και

**n** ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning (0.025 -0.100 για φυσικά υδατορεύματα)

*Η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας **n** γίνεται από κατάλληλους πίνακες συναρτήσεων των χαρακτηριστικών του υδατορεύματος*



# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

## Σχέση του Chézy

$$Q=c*A*R^{1/2}*i^{1/2}$$

όπου:

**A** το εμβαδόν της διατομής

**R** η υδραυλική ακτίνα (=  $A/P$ , όπου **P** η βρεχόμενη περίμετρος)

**i** η κλίση τριβών, που για μόνιμη ροή είναι ίση με την κλίση ενέργειας, και

**c** ο συντελεστής τραχύτητας (15-30 για φυσικά υδατορεύματα)



# Καμπύλες στάθμης - παροχής

- Η αξιόπιστη εκτίμηση των παροχών  $Q$  από τις στάθμες  $h$  προϋποθέτει τον ακριβή εμπειρικό προσδιορισμό της σχέσης που συνδέει αμφιμονοσήμαντα στάθμες και παροχές, για όλες τις συνηθισμένες δίαιτες ροής, στις οποίες περιλαμβάνονται τόσο οι ξηρασίες, όσο και οι πλημμύρες.
- Αφού επιλεγεί η κατάλληλη θέση του υδρομετρικού σταθμού και γίνει η εγκατάστασή του, αρχίζει μια συστηματική σειρά μετρήσεων παροχής (συνήθως με μυλίσκους) για όλες τις δίαιτες ροής, η οποία δεν σταματά ποτέ στη διάρκεια που λειτουργεί ο σταθμός.
- Βρίσκονται έτσι οι αντιστοιχίες  $(Q, h)$ , είτε γραφικά, είτε με κάποια αναλυτική μέθοδο βέλτιστης προσαρμογής (π.χ. ελάχιστα τετράγωνα).
- Η συνάρτηση  $Q = f(h)$  είναι γνωστή ως *σχέση (ή καμπύλη) στάθμης - παροχής* (stage-discharge curve, rating curve). Συχνά αυτή μπορεί να έχει μια απλή μαθηματική έκφραση όπως

$$Q = C (h - a)^N \quad (1)$$

όπου

$a$  η στάθμη  $h$  για την οποία η παροχή είναι μηδέν, και  $C$  και  $N$  σταθερές.



# Καμπύλες στάθμης - παροχής

- Η παραπάνω σχέση δικαιολογείται με εφαρμογή των τύπων της υδραυλικής.
- Για παράδειγμα, σε περίπτωση ομοιόμορφης ροής σε ορθογωνική διατομή μεγάλου πλάτους ( $> 20 (h - a)$ ), η εφαρμογή του τύπου του Manning οδηγεί στην (1) με εκθέτη  $N = 1.67$ , ενώ η εφαρμογή του τύπου του Chézy οδηγεί πάλι στην ίδια σχέση αλλά με εκθέτη  $N = 1.50$
- Ανάλογα, η εφαρμογή του τύπου του Manning για ομοιόμορφη ροή σε παραβολική ή τριγωνική διατομή, οδηγεί και πάλι στην (1) με εκθέτη  $N = 2.17$  ή  $2.67$ , αντίστοιχα.
- Αν πρόκειται για ορθογωνική διατομή κρίσιμης ροής, τότε και πάλι προκύπτει η (1) με εκθέτη  $N = 1.50$ .
- Κατά συνέπεια σε σχετικά απλές από γεωμετρική άποψη διατομές περιμένουμε ότι θα ισχύει η σχέση δύναμης (1) με τιμές του εκθέτη  $N$  από 1.5 έως 3.
- Σε πιο σύνθετες διατομές, όπου η γεωμετρία της κοίτης μεταβάλλεται με τη στάθμη, η καμπύλη μπορεί να αποτελείται από τμήματα, καθένα από τα οποία προσεγγίζεται από μια συνάρτηση τύπου (1).

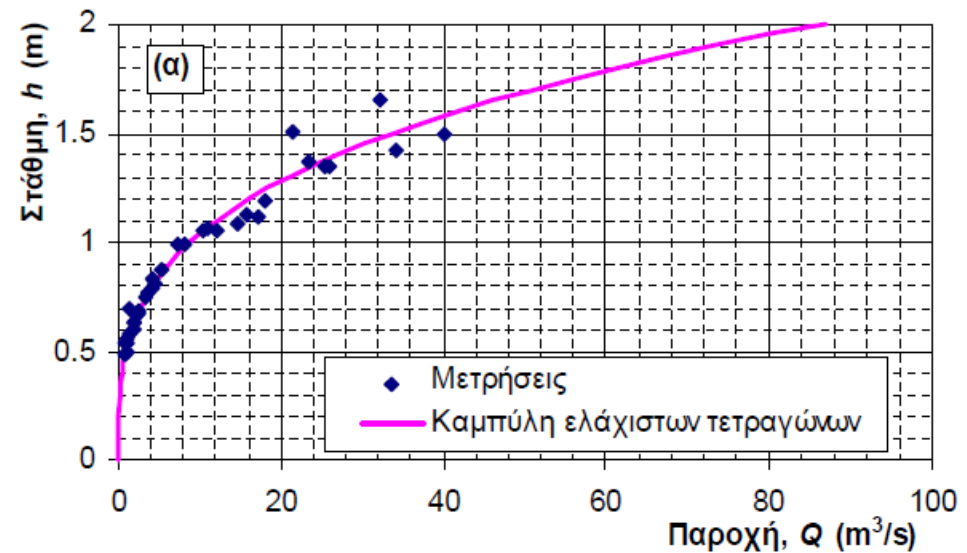




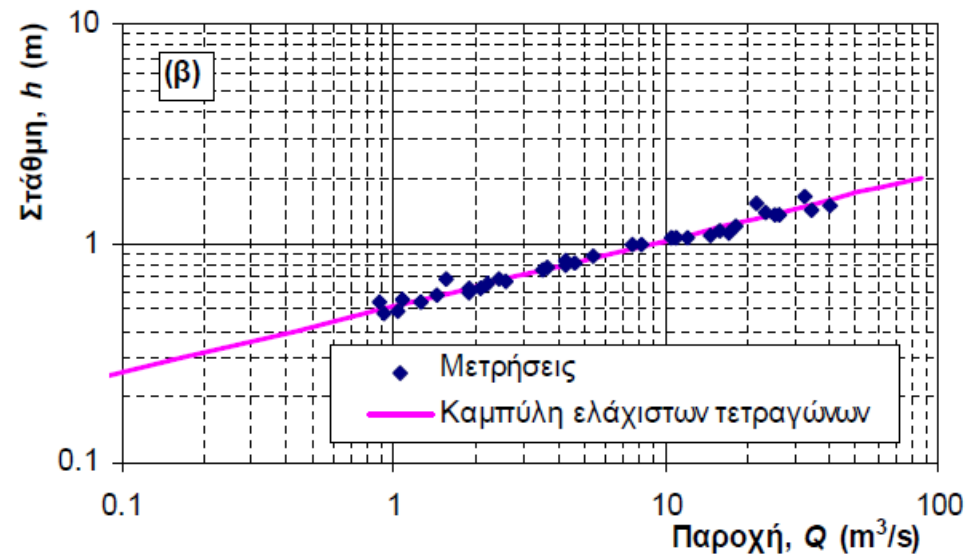
# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

## Καμπύλες στάθμης-παροχής(θέση Αχλαδόκαστρο-ποταμός Εύηνος)

$$Q = C(h - a)^N$$



$$\log Q = \log C + N \log (h - a)$$

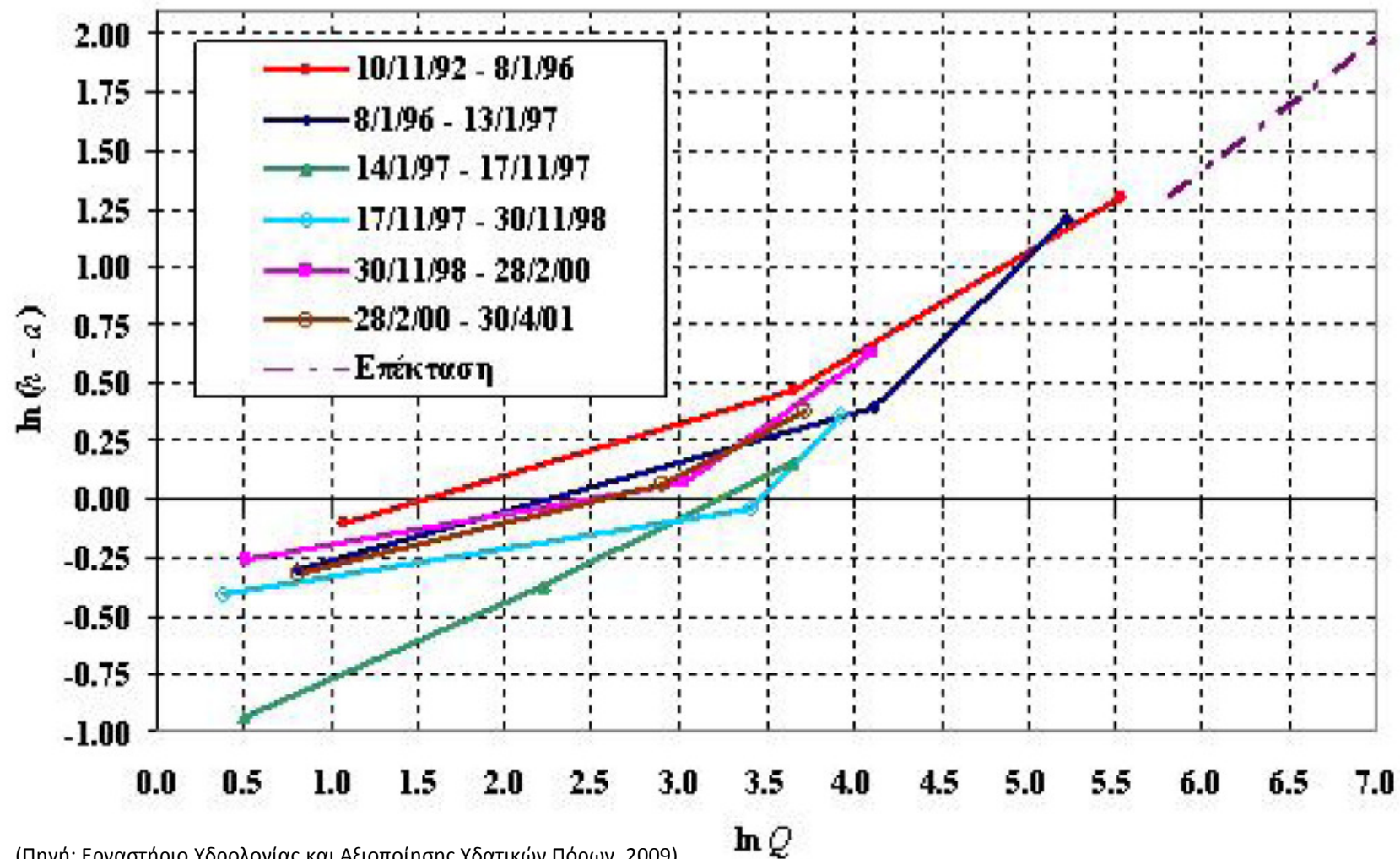


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Καμπύλες στάθμης-παροχής στη θέση Πόρος Ρηγανίου

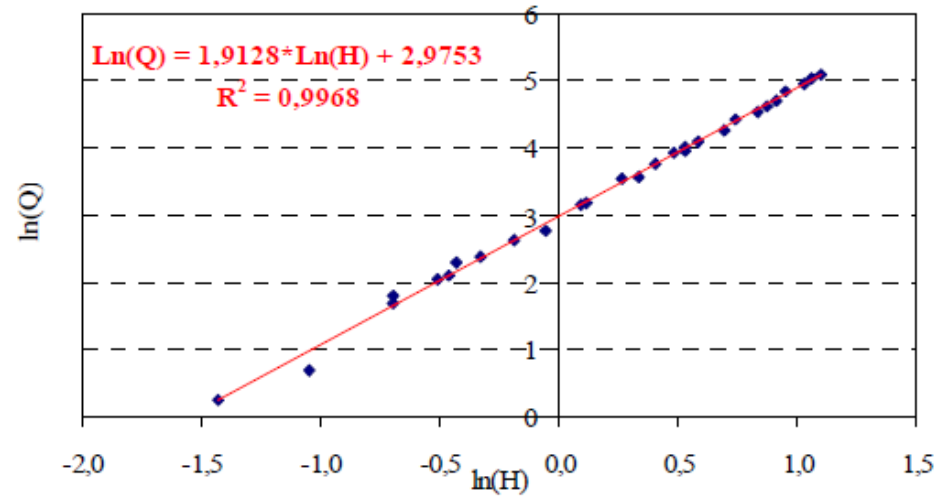


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)

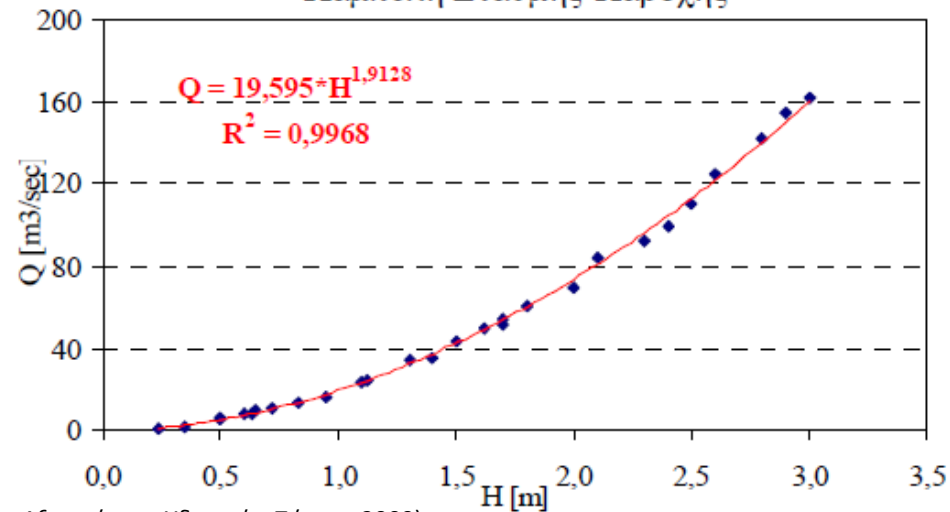


# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Καμπύλη Στάθμης-Παροχής



Καμπύλη Στάθμης-Παροχής



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout

- **Σταθμήμετρο:** λιγότερες μετρήσεις, **αλλά** πιο απλό όργανο (σφάλμα ανάγνωσης της στάθμης στη σταδία).
- **Σταθμηγράφος:** περισσότερες μετρήσεις **αλλά** σφάλματα λόγω δυσλειτουργίας αισθητήρα, καταγραφικού μηχανισμού, κακή τοποθέτηση μετροταινίας κ.α.
- Θεωρείται **ορθή η στάθμη του σταθμημέτρου**, ενώ η χρονοσειρά του σταθμηγράφου διορθώνεται βάσει των ορθών τιμών.



# ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout

- Έστω ότι για δεδομένες ημερομηνία έχω καμπύλη στάθμης-παροχής (στάθμη σταθμημέτρου,  $h$ ) και στάθμη σταθμηγράφου ( $h'$ ). Χρειάζονται διόρθωση οι στάθμες του σταθμηγράφου.
- Για τις ημερομηνίες που έχω μετρήσεις θα υπολογιστεί το αντίστοιχο  $h_{\text{εκτ.}}$  βάσει του  $Q$ , με εφαρμογή της  $Q$ - $h$  ( $h' \neq h_{\text{εκτ.}}$ ).
- Βρίσκω  $\Delta h$  για τις ημερομηνίες που έχω  $Q$  και  $h'$ , και από βήμα γραμμικής μεταβολής του  $\Delta h$  συμπληρώνω την υπόλοιπη στήλη του. Το  $h_{\text{διορθ.}}$  θα είναι  $h' - \Delta h$ .
- Εφαρμόζοντας πάλι τη σχέση  $Q$ - $h$  υπολογίζεται το  $Q_{\text{εκτ.}}$ .
- Στόχος είναι η  $Q_{\text{μετρ.}}$  να είναι ίδια με την  $Q_{\text{διορθ.}}$ .



## ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout

$H_{\deltaιορθ} = H_1 - \Delta H$

$H = e^{\frac{\ln Q - a}{b}}$

$Q = e^a * H^b$

Α/Α	Δεδομένα		Υδρομέτρηση				ΔΗ	Ηδιορθ	Qδιορθ
	Ημερομηνία	Στάθμη	Στάθμη	Παροχή	Qεκτ	Ηεκτ			
1	27/2/2003	9,42	9,29	118,18	116,84	9,48	-0,06	9,48	118,18
2	28/2/2003	9,47			117,96		-0,12	9,59	120,66
3	1/3/2003	9,53			119,31		-0,18	9,71	123,40
4	2/3/2003	9,59			120,67		-0,24	9,83	126,16
5	3/3/2003	9,67			122,49		-0,30	9,97	129,41
6	4/3/2003	9,71	9,66	131,76	123,40	10,07	-0,36	10,07	131,76
7	5/3/2003	9,79			125,24		-0,46	10,25	136,00
8	6/3/2003	9,88			127,32		-0,56	10,44	140,53
9	7/3/2003	9,95			128,95		-0,65	10,60	144,65
10	8/3/2003	9,98			129,65		-0,75	10,73	147,82
11	9/3/2003	10,06			131,53		-0,85	10,91	152,28
12	10/3/2003	10,09	10,16	155,52	132,24	11,04	-0,95	11,04	155,52

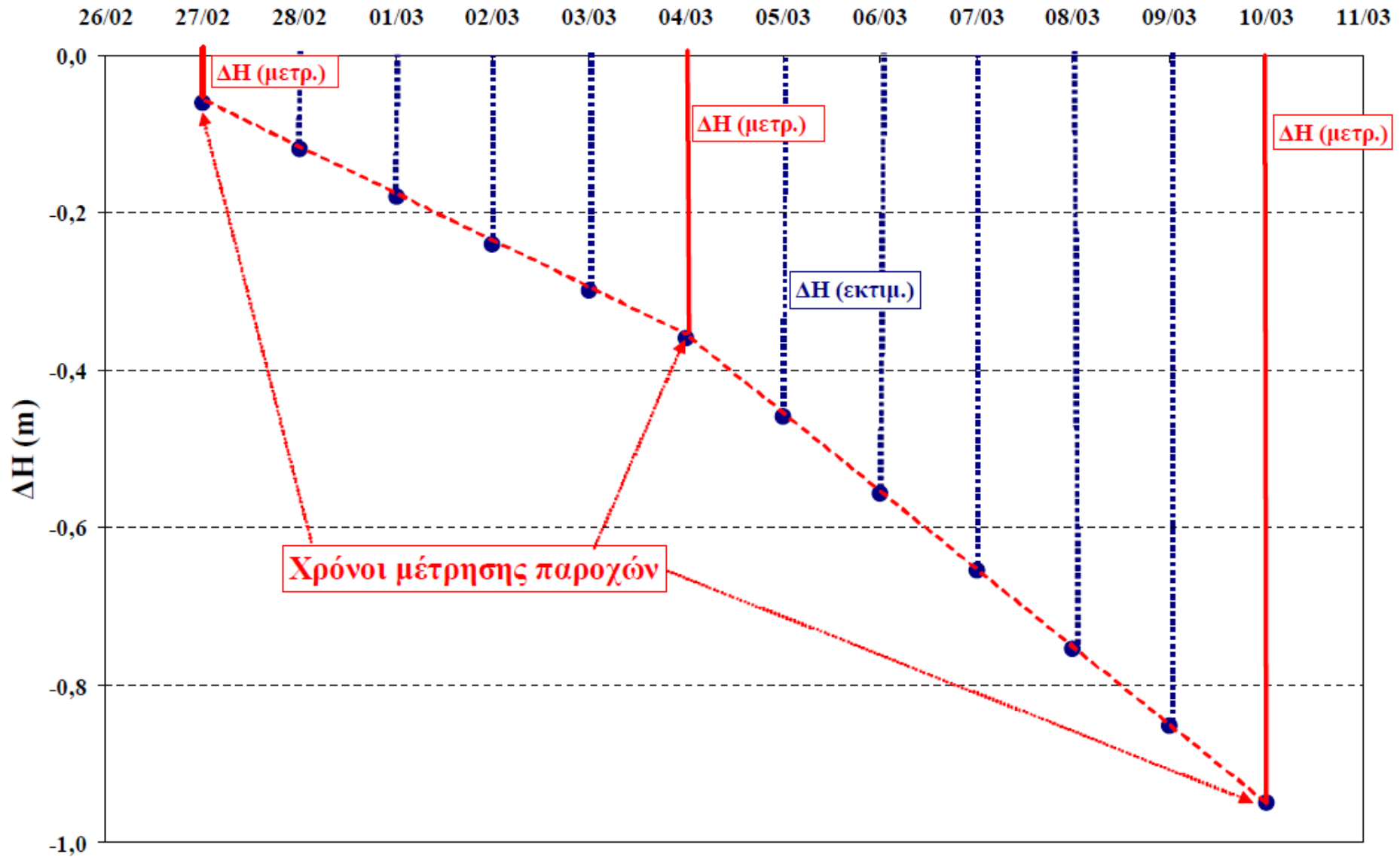
$Q = e^a * H^b$

$\Delta H = H_1 - H_{εκτ}$

(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



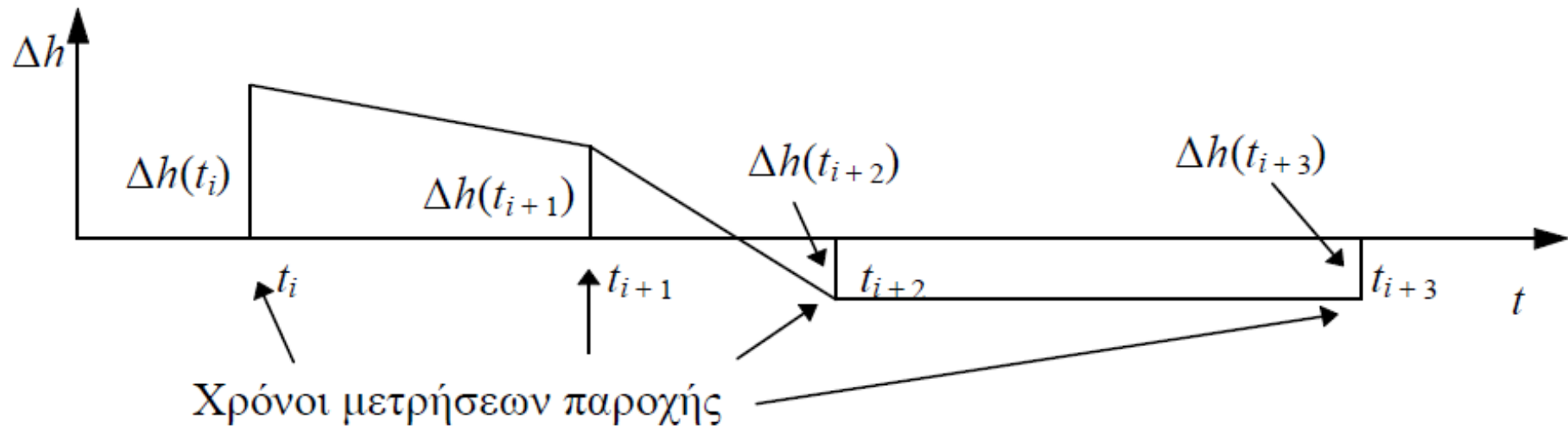
# ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout

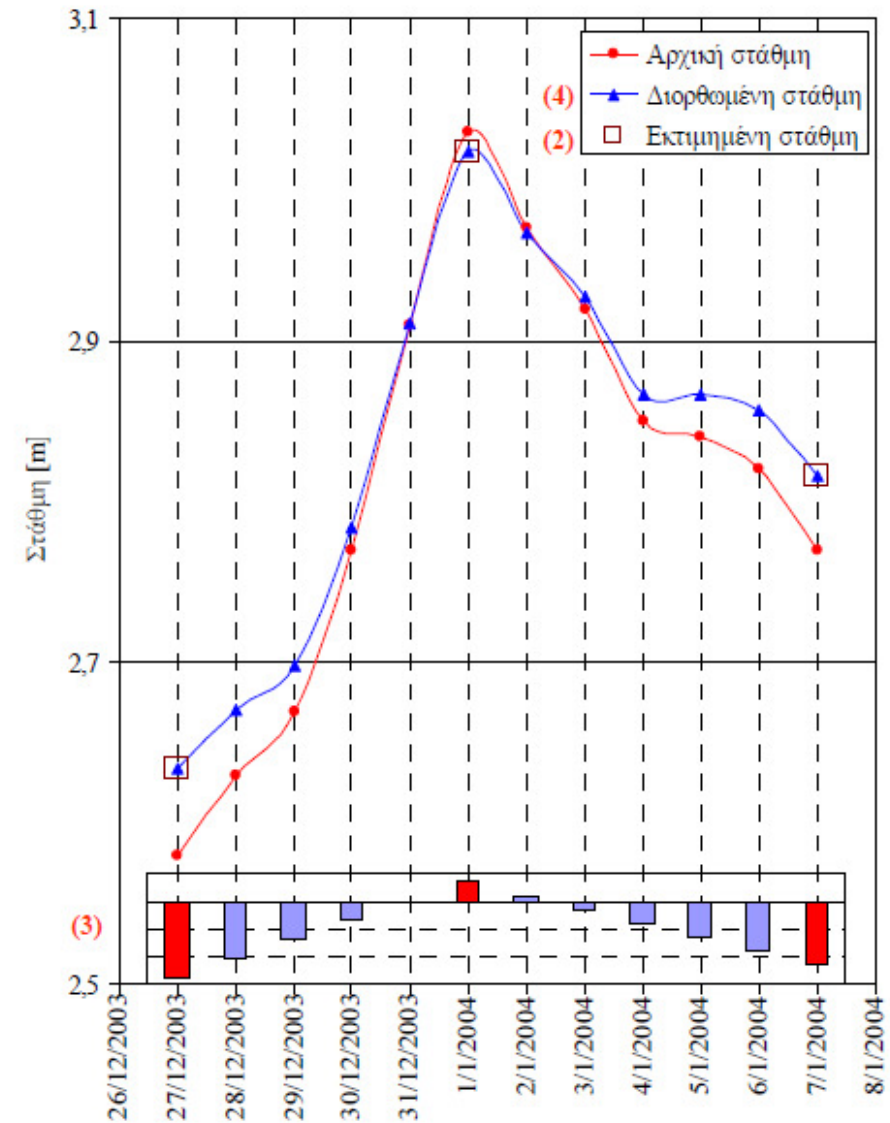
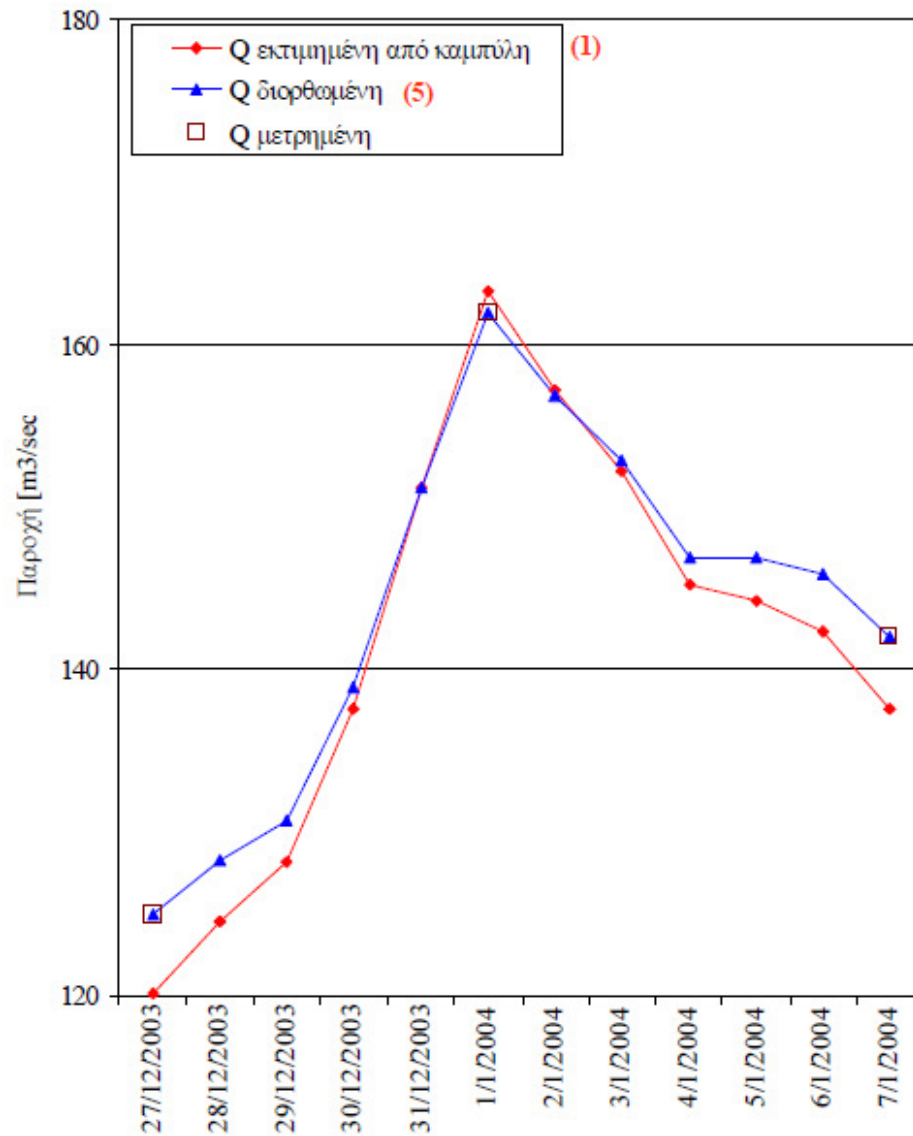


(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)





# ΔΙΟΡΘΩΣΗ Stout



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009)



# Στάδια εκτίμησης μέσης παροχής υδατορεύματος (σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα)

1. Συνεχής μέτρηση στάθμης (σταθμήμετρο, σταθμηγράφος)

2. Περιστασιακή μέτρηση παροχής

3. Κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής

(με στόχο να καταλήξω σε σχέση  $Q=a \cdot h^b$ )

4. Εφαρμογή καμπύλης στάθμης-παροχής

5. Εκτίμηση παροχών

- Χρησιμοποιώ τη χρονοσειρά των  $h$  και βρίσκω τις  $Q$  βάσει της σχέσης  $Q-h$ . Οι καμπύλες ισχύουν μέχρι κάποιο ύψος, για μεγαλύτερο  $h$  χρειάζονται επέκταση (Manning, Chézy)

6. Διόρθωση παροχών (Stout)



# ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

Συχνά οι μετρήσεις στάθμης-παροχής γίνονται σε συνήθεις συνθήκες. Πολλές φορές δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχής (υδρομετρήσεις) για υψηλές παροχές (πλημμύρες). Για το λόγο αυτό, η καμπύλη στάθμης-παροχής που αναπτύσσεται για μια συγκεκριμένη διατομή έχει εφαρμογή μόνο στο εύρος των τιμών των μετρήσεων. Για υψηλές στάθμες, η υπάρχουσα καμπύλη στάθμης-παροχής θα πρέπει να επεκταθεί. Δύο μεθοδολογίες ακολουθούνται:

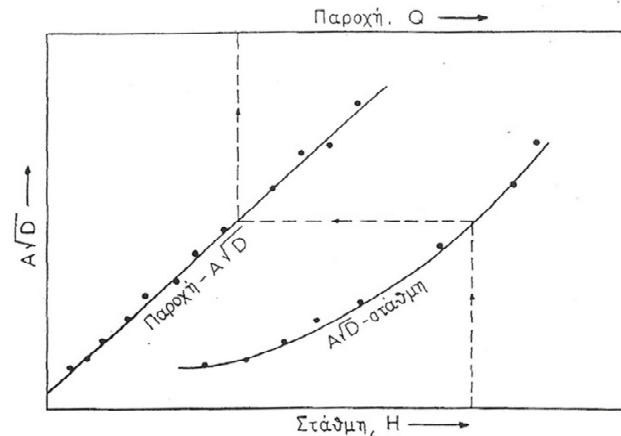
- 1. Λογαριθμική μέθοδος επέκτασης.** Η καμπύλη στάθμης παροχής επεκτείνεται στην γραμμικοποιημένης μορφή για υψηλότερες στάθμες. Η ακρίβεια της μεθόδου είναι επισφαλής σε πολύ υψηλές στάθμες λόγω μεταβολής της διατομής.
- 2. Μέθοδος επέκτασης του Stevens.** Η μέθοδος βασίζεται στην εξίσωση του Chezy:  $Q = ACR^{0,5}i^{0,5}$ .
  - Σε πλατιά και αβαθή ποτάμια η υδραυλική ακτίνα R δεν διαφέρει πολύ από το μέσο βάθος D. Με αντικατάσταση στην εξίσωση του Chezy προκύπτει:  $Q = Ci^{0,5}AD^{0,5}$ .



# ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

## Μέθοδος επέκτασης του Stevens (συν.)

- Υποθέτοντας ότι σε υψηλές στάθμες ο όρος  $Ci^{0,5}$  είναι σταθερός τότε η σχέση  $Q$  και  $AD^{0,5}$  είναι γραμμική.
- Το  $A$  και το  $D$  είναι συναρτήσεις της στάθμης του νερού και οι τιμές του  $AD^{0,5}$  μπορούν να ληφθούν και να σχεδιαστούν σε σχέση με τη στάθμη του ποταμού.
- Σχεδιάζοντας στο ίδιο σχήμα τις μετρηθείσες παροχές σε σχέση με το  $AD^{0,5}$  λαμβάνεται μια ευθεία γραμμή ( $Ci^{0,5}$  είναι σταθερό)
- Ο υπολογισμός της παροχής μπορεί να γίνει από την καμπύλη ( $AD^{0,5}$ -στάθμη) και την ευθεία ( $Q$ - $AD^{0,5}$ ) με αντιστοίχιση τιμών (παρακάτω σχήμα).



# Εκτίμηση Αιχμής Πλημμύρας

Πολλές φορές είναι απαραίτητο να γίνει η εκτίμηση αιχμής πλημμύρας, η οποία έχει περάσει από μια διατομή χωρίς να μετρηθεί. Οι μέθοδοι εκτίμησης αιχμής πλημμύρας βασίζονται στην χρησιμοποίηση των ιχνών πλημμύρας σε μια, όσο το δυνατό, ομοιόμορφη διατομή (post-flood analysis). Χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες:

## 1. Χρήση της εξίσωσης του Manning

- Χρησιμοποιείται η εξίσωση του **Manning**:  $Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} i_f^{\frac{1}{2}}$
- Μετά την πλημμύρα γίνεται τοπογράφηση της διατομής και προκύπτουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής (A, R) για την αιχμή της πλημμύρας εφόσον τα ίχνη της πλημμύρας είναι διακριτά.
- Γίνεται η υπόθεση ότι  $i_f = i_0$  δηλαδή, η κλίση της γραμμής ενέργειας είναι ίση με τη κλίση του πυθμένα του υδατορεύματος, και μετριέται η κλίση του πυθμένα στη διατομή με τοπογραφικά όργανα
- Γίνεται εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning, n.
- Υπολογίζεται η παροχή από την εξίσωση του **Manning**



# Εκτίμηση Αιχμής Πλημμύρας

## 2. Μέθοδος κλίσης επιφάνειας

- Χρησιμοποιείται η εξίσωση του **Manning**:  $Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} i_f^{\frac{1}{2}}$
- Το μήκος του υδατορεύματος θα πρέπει να είναι ευθύγραμμο, ομοιόμορφο και κατά προτίμηση η κατάντη διατομή να είναι μικρότερη ή ίση με την ανάντη διατομή ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες του κινητικού φορτίου.
- Η εξίσωση του **Manning** μπορεί να γραφεί:  $K = \frac{AR^{\frac{2}{3}}}{n} = \frac{Q}{i^{0,5}}$ . Ο παράγοντας K βασίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής.
- Η εξίσωση της ενέργειας για τις δύο διαδοχικές διατομές 1 και 2 μπορεί να γραφεί:  $h_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f$
- Μετά την πλημμύρα γίνεται τοπογράφηση της διατομής και προκύπτουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής (A, R) για την αιχμή της πλημμύρας εφόσον τα ίχνη της πλημμύρας είναι διακριτά και εκτιμούνται ο συντελεστής τραχύτητας του Manning, n, και οι συντελεστές  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$
- Λαμβάνεται  $K = (K_1 K_2)^{0,5}$



# Εκτίμηση Αιχμής Πλημμύρας

## 2. Μέθοδος κλίσης επιφάνειας

- Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα υπολογισμού:

1. Υπολογίζονται  $A$ ,  $R$ ,  $K$  για τις δύο διατομές 1 και 2, και η οριζόντια απόσταση  $L$  μεταξύ των δύο διατομών

2. Υπολογίζεται το  $K = (K_1 K_2)^{0,5}$

3. Υπολογίζεται η πρώτη προσέγγιση της κλίσης της γραμμής ενέργειας:

$$i_f = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

4. Γίνεται η πρώτη προσέγγιση της παροχής:

$$Q = K \sqrt{i_f}$$

5. Υπολογίζονται τα ύψη του κινητικού φορτίου,  $a = \frac{V^2}{2g}$ , για τις δύο διατομές

6. Υπολογίζονται οι απώλειες φορτίου από την εξίσωση:

$$h_f = (h_1 - h_2) + \beta \left[ a_1 \frac{V_1^2}{2g} - a_2 \frac{V_2^2}{2g} \right]$$

Όπου  $\beta=1$  για  $A_1 > A_2$  και  $\beta=0,5$  για  $A_1 < A_2$

7. Προσδιορίζεται η κλίση της γραμμής ενέργειας  $i_f = \frac{h_f}{L}$  και υπολογίζεται η δεύτερη προσέγγιση της παροχής,  $Q' = K \sqrt{i_f}$ . Αν  $Q \neq Q'$  επαναλαμβάνονται τα βήματα 5-7, διαφορετικά η διαδικασία σταματά (όταν  $Q=Q'$ )



# Βιβλιογραφία

- Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 2012. «Υδρομετρία», Διαφάνειες του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία» <http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/>
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Μιμίκου, Μ.Α. και Ε.Α. Μπαλτάς. «Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 5<sup>η</sup> Έκδοση, 2012.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, 2001.
- Τσακίρης, Γ. «Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

