



Ε.Υ.Δ.Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα - Επιχειρηματικότητα - Καινοτομία

Πράξη: «Ελληνικό Ολοκληρωμένο Σύστημα Παρακολούθησης, Πρόγνωσης και Τεχνολογίας των Θαλασσών και των Επιφανειακών Υδάτων»

## **Υποέργο (15) HYDRO-NET –**

**«Υδρο-Τηλεμετρικά Δίκτυα Επιφανειακών Υδάτων:**

**οργανομετρία, έξυπνες τεχνολογίες, εγκατάσταση και λειτουργία»**

**(Open Hydrosystem Information Network, OpenHi.net)**

**Πακέτο Εργασίας 2**

**Βέλτιστες Πρακτικές Υδρομετρίας**

**Παραδοτέο 2.1**

**Έκθεση – Οδηγός για τον βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία των υδρο-τηλεμετρικών δικτύων**



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σε αυτό το τεύχος γίνεται η διατύπωση των κανόνων και προδιαγραφών για την σωστή διαμόρφωση και λειτουργία των δικτύων υδρομετρίας, γίνεται αποτύπωση και κριτική αξιολόγηση των κλασικών (μυλίσκος, σταδία, κλπ.) και νέων τεχνολογιών στην υδρομετρία (ακουστικό radar, υπέρηχοι, οπτικές απεικονίσεις με επεξεργασία εικόνας, τηλεπισκόπηση, Lidar, κλπ.) και παρέχεται μια εκτίμηση των οικονομικών παραμέτρων της εφαρμογής αυτών των μεθόδων.

## **ABSTRACT**

This document includes the guidelines and specifications for the configuration and operation of hydrometric stations, the evaluation of the established (current meter, staff gauge, etc.) and the new technologies (acoustic radar, ultrasonic, image processing, remote sensing, Lidar, etc.). An indicative cost is provided for each one of these solutions.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>6</b>
1.1	Αντικείμενο του τεύχους – Ιστορικό .....	6
1.2	Διάρθρωση του τεύχους .....	6
<b>2</b>	<b>Επιλογή θέσης</b>	<b>7</b>
2.1	Γενικά .....	7
2.2	Μακροσκοπικός εντοπισμός θέσης .....	7
2.3	Σχεδιασμός δικτύου .....	8
2.3.1	Μελέτη συχνότητας πλημμυρών .....	8
2.3.2	Μελέτη συχνότητας χαμηλών παροχών .....	9
2.4	Επιλογή διατομής εγκατάστασης οργάνων μέτρησης .....	9
<b>3</b>	<b>Μετρήσεις στάθμης</b>	<b>12</b>
3.1	Απαιτήσεις ακρίβειας μέτρησης .....	12
3.2	Πηγές σφαλμάτων μέτρησης .....	12
3.3	Υλικοτεχνική υποδομή για υδρομέτρηση .....	13
3.3.1	Γενικά .....	13
3.3.2	Σταδία .....	14
3.3.3	Ηλεκτρική ταινία .....	15
3.3.4	Ανάρτηση βάρους από αλυσίδα .....	15
3.3.5	Πλωτήρες αναρτημένοι από ταινία .....	16
3.3.6	Καταγραφείς μέγιστης στάθμης .....	17
3.3.7	Πιεζόμετρα φυσαλίδων .....	18
3.3.8	Εμβαπτιζόμενα πιεζόμετρα .....	18
3.3.9	Αισθητήρας υπερήχων .....	18
3.3.10	Ηλεκτρομαγνητικά ραντάρ .....	19
3.3.11	Οπτική μέθοδος (λέιζερ) .....	20
3.3.12	Καταγραφικό δεδομένων .....	20
<b>4</b>	<b>Μέτρηση παροχής</b>	<b>22</b>
4.1	Γενικά .....	22
4.2	Διαδικασία μέτρησης και υπολογισμοί .....	22
4.2.1	Υπολογισμός παροχής .....	22
4.2.2	Αντιστοίχιση στάθμης-παροχής .....	24
4.2.3	Μέτρηση ταχύτητας σε διατομές με πλάγιες ροές .....	24
4.2.4	Μέτρηση ταχύτητας από γέφυρες .....	24
4.3	Μηχανικοί μυλίσκοι .....	25

4.3.1	Κατακόρυφου άξονα .....	26
4.3.2	Οριζοντίου άξονα .....	26
4.3.3	Καταγραφή ρυθμού περιστροφής έλικας μιλίσκου .....	27
4.3.4	Ράβδος στήριξης.....	28
4.3.5	Επιθεώρηση και συντήρηση μιλίσκων .....	28
4.4	Ηλεκτρομαγνητική μέτρηση ταχύτητας (EMV).....	29
4.5	Μετρητές ακουστικής μεθόδου Doppler (ADV) .....	30
4.6	Ραντάρ μέτρησης επιφανειακής ταχύτητας (SVR) .....	31
4.7	Οπτικές μέθοδοι .....	34
4.8	Πλωτήρες .....	36
4.9	Δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο σύνολο διατομής.....	37
4.10	Διατομές ελέγχου .....	37
4.11	Διάλυση ουσίας .....	39
<b>5</b>	<b>Προχωρημένες – “έξυπνες” μέθοδοι</b>	<b>42</b>
5.1	Γενικά .....	42
5.2	Μέτρηση ταχύτητας με οπτική μέθοδο (PIV, LSPIV) .....	42
5.3	Απεικόνιση με laser (LiDAR, Light Detection And Ranging).....	43
5.4	Ακουστική μέθοδος Doppler καταγραφής προφίλ ταχυτήτων (ADCP).....	44
5.5	Τηλεπισκόπηση .....	46
<b>6</b>	<b>Αβεβαιότητες σφάλματα</b>	<b>48</b>
6.1	Ακρίβεια μηχανικών μιλίσκων .....	48
6.1.1	Γενικά .....	48
6.1.2	Αβεβαιότητες μέτρησης ταχυτήτων .....	48
6.1.3	Αβεβαιότητες μέτρησης μηκών.....	50
6.1.4	Αβεβαιότητες οργάνων .....	50
6.1.5	Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας μέτρησης παροχής.....	51
6.2	Αβεβαιότητες ακουστικής μεθόδου Doppler καταγραφής προφίλ ταχυτήτων (ADCP).....	52
<b>7</b>	<b>Τηλεμετρία</b>	<b>53</b>
7.1	Γενικά .....	53
7.2	Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας .....	54
7.3	Ραδιοζεύξη.....	54
7.4	Ασύρματη τηλεφωνία .....	56
7.5	Ενσύρματη τηλεφωνία .....	57
7.6	Δορυφορική επικοινωνία .....	57
<b>8</b>	<b>Αναφορές</b>	<b>59</b>





# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο του τεύχους – Ιστορικό

Το «Δίκτυο Ανοιχτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων» (Open Hydrosystem Information Network, OpenHi.net) είναι μια ολοκληρωμένη πληροφοριακή υποδομή για τη συλλογή, διαχείριση και ελεύθερη διάχυση της υδρολογικής και περιβαλλοντικής πληροφορίας που αφορά στους επιφανειακούς υδατικούς πόρους της χώρας. Κύριοι στόχοι του είναι: (α) η καταγραφή και αξιολόγηση των υφιστάμενων υποδομών της χώρας (μετρητικά δίκτυα, βάσεις δεδομένων) στην κατεύθυνση ανάπτυξης ενός εθνικού δικτύου παρακολούθησης των υδρο-περιβαλλοντικών πληροφοριών για τα επιφανειακά υδροσυστήματα, (β) η οργάνωση των σχετιζόμενων γεωγραφικών και διαχειριστικών δεδομένων, (γ) η υλοποίηση του πληροφοριακού συστήματος, (δ) η ανάπτυξη έξυπνων τεχνολογιών χαμηλού κόστους για τη μέτρηση και τηλεμετάδοση των δεδομένων πραγματικού χρόνου, και (ε) η ένταξη στο σύστημα ώριμων μετρητικών υποδομών που διαχειρίζονται οι συνεργαζόμενοι φορείς.

Στην παρούσα έκθεση δίνονται οδηγίες για τον βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία των υδρο-τηλεμετρικών δικτύων, οι οποίες βασίζονται κυρίως σε τεύχη της WMO.

Η ομάδα εκπόνησης του παρόντος τεύχους είναι:

- Ευάγγελος Ρόζος, Εντεταλμένος Ερευνητής, ΙΕΠΒΑ ΕΑΑ
- Αικατερίνη Μάζη, Ειδικός Λειτουργικός Επιστήμονας Β, ΙΕΠΒΑ ΕΑΑ
- Αντώνης Κούσης, Ομότιμος Ερευνητής, ΙΕΠΒΑ ΕΑΑ

Επιστημονικός υπεύθυνος του έργου είναι η Αικατερίνη Μάζη.

## 1.2 Διάρθρωση του τεύχους

Το τεύχος διαρθρώνεται, μαζί με την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), σε 7 κεφάλαια. Ειδικότερα:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρατίθενται τα κριτήρια για την ορθή επιλογή θέσης ενός υδρομετρικού σταθμού.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφονται οι μέθοδοι μέτρησης της στάθμης ενός υδατορέματος.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται οι μέθοδοι μέτρησης της παροχής ενός υδατορέματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** αναφέρονται οι σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης παροχής.

Στο **Κεφάλαιο 6** δίνεται η μεθοδολογία εκτίμησης της αβεβαιότητας μετρήσεων παροχής.

Στο **Κεφάλαιο 7** δίνονται η διάφορες τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας (τηλεμετρία).



## 2 Επιλογή θέσης

---

### 2.1 Γενικά

Η επιλογή των σημείων μέτρησης υπαγορεύεται καταρχάς από τις ειδικές ανάγκες και τον σκοπό που θα εξυπηρετήσουν οι μετρήσεις. Για παράδειγμα, εάν απαιτείται η καταγραφή ροής για το σχεδιασμό ενός φράγματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή η θέση ενός σταθμού μέτρησης παροχής είναι άμεσα καθορισμένη. Εντούτοις, για τη διαμόρφωση ενός σχεδίου διαχείρισης μεγάλης κλίμακας απαιτείται ένα δίκτυο καταγραφής των υδατικών πόρων για τη μελέτη της γενικής υδρολογίας της περιοχής. Ο σχεδιασμός του δικτύου απαιτεί κριτική σκέψη στην επιλογή των θέσεων των σταθμών μέτρησης για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη συγκέντρωση πληροφορίας για τα χρήματα που δαπανώνται.

Οι τύποι των μετρητικών σταθμών που απαρτίζουν ένα δίκτυο μέτρησης ροών είναι οι ακόλουθοι.

Οι **κύριοι σταθμοί** προορίζονται να λειτουργούν μόνιμα και καταγράφουν τις μακροχρόνιες τάσεις, παρέχουν δε δεδομένα σημαντικά για τις υδρολογικές μελέτες ευρύτερης κλίμακας.

Οι **δευτερεύοντες σταθμοί** προορίζονται να λειτουργήσουν μόνο για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά ροής των λεκανών απορροής τους σε σχέση με εκείνα μιας υδρολογικής λεκάνης που μετράται από έναν κύριο σταθμό. Το χρονικό διάστημα που λειτουργεί ένας δευτερεύων υδρολογικός σταθμός εξαρτάται από το πόσο καλά συσχετίζονται οι μετρήσεις του με αυτές ενός κύριου σταθμού. Όσο καλύτερη είναι η συσχέτιση, τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη περίοδος λειτουργίας.

Οι **ειδικού σκοπού σταθμοί** απσκοπούν στην παροχή ειδικών πληροφοριών σε μια τοποθεσία για έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους λόγους: καταγραφή της απορροής από μια λεκάνη για να εκτιμηθεί η ποσότητα ύδατος που είναι δυνητικά διαθέσιμη για μεταγενέστερη ανάπτυξη, διαχείριση και λειτουργία υφιστάμενου έργου, τήρηση νομικών απαιτήσεων, κ.α.

### 2.2 Μακροσκοπικός εντοπισμός θέσης

Η ελάχιστη πυκνότητα του δικτύου πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον έναν κύριο σταθμό σε κάθε κλιματική περιοχή, επειδή τα χαρακτηριστικά της απορροής σχετίζονται με τα κλιματικά, τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, τα οποία ενδέχεται να παρουσιάζουν σημαντική χωρική μεταβλητότητα. Ο ετήσιος όγκος απορροής προέρχεται κυρίως από όμβρια ύδατα ή από τήξη χιονιού. Η ημερήσια απορροή μπορεί να έχει μεγάλη διακύμανση ή να είναι σχετικά σταθερή. Η ροή του υδατορρέυματος μπορεί να είναι εφήμερη, διαλείπουσα ή συνεχής και, εάν είναι συνεχής, η βασική αποροή μπορεί να είναι σημαντική ή ανεπαρκής. Η ροή σε ένα ποτάμι που διασχίζει περισσότερες από μία ομογενείς περιοχές πρέπει να μετριέται στα μεταξύ τους όρια. Ένα προφανές παράδειγμα είναι ένα ποτάμι που διασχίζει μια ορεινή περιοχή και εισέρχεται σε μια προσχωσιγενή κοιλάδα.

Είναι επιθυμητό να υπάρχει επαρκής αριθμός κύριων σταθμών σε μια λεκάνη. Ο συνολικός αριθμός των σταθμών εξαρτάται από το μέγεθος της λεκάνης απορροής, τον αριθμό των

σημαντικών υπολεκανών και το ενδεχόμενο μελλοντικής αλλαγής της χρήσης γης. Το μέγεθος της λεκάνης είναι σημαντικός παράγοντας, επειδή είναι αναγκαίο να μπορούν να συσχετίζονται οι κύριοι σταθμοί με τους δευτερεύοντες και κατά έναν εμπειρικό κανόνα, δεν συσχετίζονται ικανοποιητικά οι καταγραφές παροχής δύο σταθμών, όταν ο ένας έχει περισσότερο από δέκα φορές την παροχή του άλλου. Κατά συνέπεια, εάν για παράδειγμα ένα υδρογραφικό δίκτυο είναι τέτοιο που οι κλάδοι του αποστραγγίζουν εκτάσεις με εμβαδόν, π.χ. 50 km<sup>2</sup>, θα πρέπει να εγκατασταθούν ορισμένοι κύριοι υδρολογικοί σταθμοί με περιοχές αποστράγγισης μικρότερες από 50 km<sup>2</sup>.

Οι δευτερεύοντες σταθμοί πρέπει να λειτουργούν αρκετό χρονικό διάστημα για να δημιουργηθεί μια ικανοποιητική συσχέτιση με τους κύριους υδρολογικούς σταθμούς. Μετά, τα όργανα μπορούν να μεταφερθούν σε νέες τοποθεσίες. Με αυτόν τον τρόπο μεγάλες περιοχές μπορούν τελικά να καλυφθούν με ένα πυκνό δίκτυο βασισμένο στους κύριους υδρολογικούς σταθμούς που πρόκειται να λειτουργούν μόνιμα.

Επίσης, ο σχεδιασμός του δικτύου σταθμών μέτρησης πρέπει να είναι προσαρμοσμένος στα χαρακτηριστικά αποστράγγισης της περιοχής ή των υποπεριοχών της. Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός απαιτεί κάποια ιδιαίτερη αντιμετώπιση μιας περιοχής ή υποπεριοχής όπου όλα τα ρέματα είναι σχετικά μικρά και δεν συμβάλουν για να σχηματίσουν μεγάλους ποταμούς. Ένα υδρογραφικό δίκτυο αυτού του τύπου διαμορφώνεται, για παράδειγμα, όπου πολλά, σχετικά μικρά ρέματα στραγγίζουν την προς θάλασσα πλαγιά ενός παράκτιου βουνού. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εγκατασταθούν κύριοι σταθμοί σε ρέματα που είναι αντιπροσωπευτικά και να προστεθούν δευτερεύοντες σταθμοί για να δοθεί ευρεία γεωγραφική κάλυψη σε κάθε μία από τις υδρολογικές περιοχές. Είναι επίσης σημαντικό να μην παραβλέπονται λεκάνες που έχουν χαμηλή απορροή· αν εγκατασταθούν σταθμοί μόνο όπου υπάρχουν υψηλές ροές, μπορεί να δοθεί μια ψευδής εικόνα για το δυναμικό των υδατικών πόρων της περιοχής. Για τον λόγο αυτό, πριν αποφασιστεί η κατανομή των σταθμών, είναι σκόπιμο να γίνει αναγνώριση της περιοχής με βάση εκτιμήσεις παροχών, βροχομετρικούς, γεωμορφολογικούς και γεωλογικούς χάρτες, τηλεπισκοπικές μεθόδους κ.α. για τον ορισμό των υδρολογικών ορίων στην λεκάνη απορροής και για τον χαρακτηρισμό των ρεμάτων ως προς την τάξη μεγέθους της απορροής.

## **2.3 Σχεδιασμός δικτύου**

### **2.3.1 Μελέτη συχνότητας πλημμυρών**

Οι μελέτες συχνότητας πλημμυρών χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό υπερχειλιστών, γεφυρών, οχετών, και για την οριοθέτηση των πεδινών εκτάσεων κατάκλυσης από πλημμύρες. Τα βασικά στοιχεία για μια τέτοια μελέτη είναι οι καταγραφές των ετήσιων παροχών αιχμής σε ολόκληρη την περιοχή. Αυτές είναι ασφαλώς διαθέσιμες στις θέσεις που υπάρχουν σταθμοί συνεχούς καταγραφής. Όμως, αυτά τα δεδομένα είναι συνήθως διαθέσιμα για έναν μικρό αριθμό κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Εντούτοις, μια πληθώρα μικρών ρεμάτων βρίσκεται συνήθως σε μια περιοχή, εκ των οποίων συνήθως ένα μικρό ποσοστό είναι οικονομικά εφικτό να μετρηθεί. Συνεπώς, το δίκτυο των κλασικών σταθμών συνεχούς μέτρησης θα πρέπει να συμπληρωθεί από ένα δίκτυο καταγραφών μέγιστης στάθμης (Crest-Stage Gage), που είναι σχετικά φθηνοί, για την εξασφάλιση επαρκούς κάλυψης (βλ. παράγραφο 3.3.6).

Κατά την ανάλυση των συλλεγμένων δεδομένων, οι μέγιστες παροχές συσχετίζονται με τα κλιματικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής. Οι προκύπτουσες

σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της παροχής αιχμής σε τοποθεσίες χωρίς μετρήσεις. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή των θέσεων των καταγραφέντων μέγιστης στάθμης, ώστε να εξασφαλιστεί επαρκής κάλυψη των πολλών δυνατών συνδυασμών κλιματικών συνθηκών και χαρακτηριστικών των λεκανών.

### **2.3.2 Μελέτη συχνότητας χαμηλών παροχών**

Οι μελέτες συχνότητας χαμηλών παροχών είναι χρήσιμες στον σχεδιασμό και στην λειτουργία υποδομών ύδρευσης και άρδευσης. Τα δεδομένα χαμηλής ροής που παρέχονται από το δίκτυο συνεχών καταγραφικών μετρήσεων σε μια περιοχή μπορούν να συμπληρωθούν με την καθιέρωση ενός πιο πυκνού δικτύου περιστασιακών μετρήσεων χαμηλής ροής (δηλαδή θέσεις με πολύ λίγες μετρήσεις παροχής υπό συνθήκες χαμηλής ροής). Ένα δίκτυο θέσεων περιστασιακών μετρήσεων χαμηλής ροής μπορεί να σχεδιαστεί με παρόμοιο τρόπο με ένα δίκτυο καταγραφέντων μέγιστης στάθμης, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα.

Απαιτούνται για κάθε θέση τουλάχιστον 8 έως 10 περιστασιακές μετρήσεις χαμηλής ροής που εκτείνονται σε διάστημα 3 έως 4 ετών. Για κάθε μια, εντοπίζεται η αντίστοιχη (ίδια ημερομηνία και ώρα) παροχή σε κοντινό σταθμό συνεχούς καταγραφής με σκοπό να καταρτιστεί γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών που μετρούνται στους δύο σταθμούς. Αφού ληφθούν επαρκείς μετρήσεις χαμηλής ροής για να προσδιοριστεί η σχέση, η θέση λήψης περιστασιακών μετρήσεων μπορεί να αλλάξει και να μεταφερθούν τα όργανα μέτρησης σε άλλη περιοχή. Με αυτόν τον τρόπο, το μέγεθος και η συχνότητα χαμηλής ροής μπορούν να οριστούν για μια λεκάνη με πολύ μειωμένο κόστος.

## **2.4 Επιλογή διατομής εγκατάστασης οργάνων μέτρησης**

Αφού προσδιοριστεί η γενική θέση ενός σταθμού μέτρησης, πρέπει να επιλεγεί η διατομή που θα γίνει η εγκατάστασή του. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι πρέπει να μετρηθεί η εκροή από έναν ταμιευτήρα, η διατομή που θα γίνονται οι μετρήσεις θα είναι κατά μήκος της ροής μεταξύ του φράγματος και της πρώτης συμβολής κλάδου ποταμού σημαντικού μεγέθους κατόπιν του φράγματος. Διευκολύνει ο σταθμός να εγκατασταθεί κοντά στο φράγμα, αλλά θα πρέπει να είναι αρκετά μακριά από την εκροή και την έξοδο του υπερχειλιστή έτσι ώστε η ροή να είναι αρκετά ομοιόμορφη καθ' όλο το πλάτος της διατομής. Από την άλλη πλευρά, ο σταθμός δεν πρέπει να βρίσκεται τόσο μακριά ώστε οι πλευρικές εισροές να είναι σημαντικές.

Εάν ο προτεινόμενος σταθμός μέτρησης πρόκειται να εγκατασταθεί για καθαρά υδρολογικούς σκοπούς, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό ή τη λειτουργία ενός έργου, η γενική θέση του μετρητή θα είναι στο τμήμα μεταξύ των δύο μεγάλων παραποτάμων ή συμβαλλόντων κλάδων. Η θέση θα πρέπει να είναι αρκετά μακριά κατόπιν από τον άνω παραπόταμο, έτσι ώστε να έχει αποκατασταθεί η ομοιόμορφη ροή σε όλο το πλάτος του υδατορρέυματος, και αρκετά μακριά από την κατώτερη συμβολή, για να αποφευχθούν φαινόμενα ανάδρομης ροής. Αυτοί οι περιορισμοί συχνά δίνουν ένα μήκος κοίτης πολλών χιλιομέτρων, του οποίου τα υδραυλικά χαρακτηριστικά πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή μιας συγκεκριμένης θέσης για την εγκατάσταση του σταθμού.

Η ιδανική διατομή για την εγκατάσταση σταθμημέτρου πληροί τα παρακάτω κριτήρια:

- Η κοίτη του ποταμού είναι ευθύγραμμη για μήκος δεκαπλάσιο του πλάτους της διατομής πριν και μετά την υποψήφια θέση.

- Το σύνολο της ροής περνάει μέσα από τη διατομή, δεν μετατρέπεται μέρος της σε υποδερμική/υπόγεια ροή όταν η στάθμη είναι υψηλή.
- Η κοίτη δεν υφίσταται εκσκαφές και αποθέσεις από τη ροή.
- Η κοίτη δεν έχει σημαντική βλάστηση και λίθους/κροκάλες σχετικά μεγάλου μεγέθους.
- Οι όχθες είναι καλά διαμορφωμένες, σταθερές και αρκετά ψηλές για να κρατήσουν μεγάλες παροχές.
- Στις χαμηλές ροές σχηματίζεται λιμνούλα ανάντη, η οποία επιτρέπει τη μέτρηση στάθμης σε αυτές τις συνθήκες και περιορίζει τις υψηλές ταχύτητες όταν οι παροχές είναι μεγάλες.
- Δεν εμφανίζονται δίνες ή τμήματα με πολύ χαμηλές ροές.
- Η διατομή είναι μακριά από οποιαδήποτε κατάντη συμβολή.
- Υπάρχει εύκολη πρόσβαση και κάλυψη από δίκτυο τηλεφωνίας.
- Παρέχει προστασία (από κλοπή, βανδαλισμό και από την πλημμύρα) των ηλεκτρονικών συσκευών.

Σε επιτόπια επίσκεψη στην υποψήφια διατομή, αναζητούνται σημάδια στάθμης νερού από μεγάλες πλημμύρες του παρελθόντος, καθώς και μαρτυρίες τοπικών κατοίκων σχετικά με τα ιστορικά ύψη. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται κατά τη λήψη απόφασης σχετικά με το ύψος στο οποίο πρέπει να τοποθετηθεί ο κλωβός με τα ηλεκτρονικά όργανα (καταγραφέας, συστήματα επικοινωνίας, κλπ.), έτσι ώστε να βρίσκεται πάνω από οποιοσδήποτε υψηλές στάθμες ενδέχεται να παρατηρηθούν στο μέλλον. Αναζητούνται επίσης ενδείξεις σχετικές με τη σταθερότητα της διατομής, συμπεριλαμβανομένων εκσκαφών και αποθέσεων που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια αξιοσημείων συμβάντων του παρελθόντος.

Θα πρέπει επίσης να διερευνηθεί η διαθεσιμότητα κατάλληλων διατομών για τη μέτρηση της παροχής. Στην ιδανική περίπτωση, η διατομή μέτρησης θα πρέπει να έχει αρκετά ομοιόμορφο πυθμένα και οι γραμμές ροής θα πρέπει να είναι παράλληλες και αρκετά ομοιόμορφες σε όλη την διατομή. Η διατομή πρέπει να είναι απαλλαγμένη από μεγάλους όγκους, όπως ογκόλιθοι και αμμόλοφοι. Η μέτρηση στάθμης θα πρέπει να βρίσκεται σε λογικά μικρή απόσταση από την μέτρηση παροχής, για να αποφευχθεί η ανάγκη ρύθμισης της μετρούμενης παροχής εάν η στάθμη αλλάξει γρήγορα κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Εντούτοις, είναι αποδεκτή μια απόσταση μέχρι ένα χιλιόμετρο. Όλες οι μετρήσεις χαμηλής απορροής, εκτός από τα πολύ μεγάλα ποτάμια, πραγματοποιούνται με στάσεις του διεξάγοντα τη μέτρηση μέσα στην κοίτη. Για τις ροές που δεν μπορεί ο διεξάγων να περπατήσει με ασφάλεια, η μέτρηση γίνεται από γέφυρα, με συρματόσχοινο και τροχαλία, ή βάρκα. Είναι οικονομικότερο να χρησιμοποιείται μια υπάρχουσα γέφυρα για τον σκοπό αυτό, αλλά αν δεν υπάρχει ή εάν το τμήμα μέτρησης σε μια θέση γεφύρωσης είναι κακό, θα πρέπει να επιλέγεται κατάλληλος χώρος για το στήσιμο συρματόσχοινο εγκάρσια στη ροή. Εάν η στερέωση συρματόσχοινο δεν είναι εφικτή λόγω του υπερβολικού πλάτους του ποταμού, οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με βάρκα. Η διατομή που επιλέγεται για την μέτρηση των μεγάλων παροχών μπορεί να μην είναι κατάλληλη και για την μέτρηση των χαμηλών, και συνεπώς οι μετρήσεις μπορεί να χρειαστεί να γίνουν με περπάτημα στη διατομή.

Εάν είναι απαραίτητο να επιλεγεί μια τοποθεσία όπου εμφανίζεται ανάδρομη ροή, υπάρχουν δύο δυνατότητες για τον υπολογισμό της παροχής. Η πρώτη είναι εκτός από τη μέτρηση της στάθμης να χρησιμοποιηθεί και μέτρηση της κλίσης της επιφάνειας του νερού, και η δεύτερη είναι να χρησιμοποιηθεί μέτρηση της ταχύτητας ροής μαζί με τη στάθμη. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται σε μια σχέση πολλαπλών μεταβλητών για τον υπολογισμό της παροχής. Η κλίση χρησιμοποιείται όταν η ανάδρομη ροή είναι σπάνια ή επηρεάζει τους υπολογισμούς παροχής μόνο σε υψηλές στάθμες. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να αναζητηθεί ένα ομοιόμορφο τμήμα για την μέτρηση της κλίσης, καθώς και μια θέση για την εγκατάσταση του βοηθητικού μετρητή. Η θέση του βοηθητικού μετρητή θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι κατάντη του κύριου μετρητή και θα πρέπει να είναι αρκετά μακριά, ώστε να υπάρχει πτώση στάθμης τουλάχιστον 10 cm. Για περιοχές με μετρήσεις που έχουν συχνή ή σταθερή ανάδρομη ροή, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μέτρηση της ταχύτητας αντί της κλίσης της επιφάνειας του νερού. Τα όργανα μέτρησης της ταχύτητας, όπως ηλεκτρομαγνητικά ή ακουστικά, μπορούν συνήθως να εγκατασταθούν στην ίδια θέση με τον μετρητή στάθμης.

Οι μετρητές στάθμης θα πρέπει να τοποθετούνται ανάντη από τα σημεία ελέγχου χαμηλών παροχών σε απόσταση ίση τουλάχιστον με το τριπλάσιο του μέγιστου βάθους ροής. Αν εγκατασταθούν πλησιέστερα, μπορεί να βρίσκονται σε μια περιοχή όπου οι γραμμές ροής έχουν κατακόρυφη καμπυλότητα. Ο προσδιορισμός της στάθμης του νερού στην περιοχή αυτή είναι υδραυλικά ανεπιθύμητος. Εάν απαιτείται ένας βοηθητικός μετρητής, όπως ένας μετρητής στάθμης κατάντη ή ένας μετρητής ταχύτητας, τότε θα πρέπει να σημειώνονται και να αναφέρονται στις αντίστοιχες πληροφορίες πεδίου. Εάν υπάρχει διατομή έλεγχου τότε θα πρέπει να αποτυπωθεί τοπογραφικά.

Σχετικά με την κατάλληλη θέση εγκατάστασης καταγραφέα μέγιστης στάθμης, αυτή πρέπει να είναι σε ευθύγραμμο τμήμα του ποταμού, για το οποίο να μπορεί να καταρτιστεί μια σχέση στάθμης-παροχής, η οποία να παραμένει αμετάβλητη.

## 3 Μετρήσεις στάθμης

---

### 3.1 Απαιτήσεις ακρίβειας μέτρησης

Οι ακόλουθες παράγραφοι σχετικά με τις απαιτήσεις ακριβείας και το σφάλμα μέτρησης στάθμης αφορούν στιγμιαίες τιμές μέτρησης.

Υπάρχει ένα πλήθος από παράγοντες που εμπλέκονται στον προσδιορισμό των απαιτήσεων ακριβείας. Για παράδειγμα, η συγκεκριμένη χρήση για την οποία συλλέγονται τα δεδομένα είναι καθοριστικός παράγοντας. Μετρήσεις στάθμης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παροχών πρέπει να είναι σημαντικά πιο ακριβείς από τις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σχεδιασμού ή ορισμένες εφαρμογές διαχείρισης. Η ακρίβεια των μετρήσεων όταν προορίζονται για υπολογισμό παροχών είναι 3 mm ή 0.2% του βάθους ροής, όποιο είναι μεγαλύτερο. Για παράδειγμα, η απαιτούμενη ακρίβεια θα ήταν 2 cm σε βάθος ροής 10 m, 6 mm σε βάθος ροής 3 m, και 3 mm σε όλα τα βάθη ροής μικρότερα από 1,75 m.

### 3.2 Πηγές σφαλμάτων μέτρησης

**Σφάλμα επιπέδου αναφοράς.** Η μετακίνηση ενός μετρητή στάθμης που προκαλείται από την ανύψωση ή την καθίζηση της υποστηρικτικής κατασκευής μπορεί να προκαλέσει σφάλματα επιπέδου αναφοράς. Το σημείο αναφοράς του μετρητή αναφοράς θα πρέπει να διατηρείται με ακρίβεια 3 mm, το οποίο μπορεί συνήθως να επιτευχθεί με χωροστάμηση των μαρτύρων κάθε 2 ή 3 χρόνια.

**Σφάλμα ανάγνωσης.** Σφάλματα μπορεί να προκύψουν από ανακριβείς αναγνώσεις των μετρητών σε περιπτώσεις που είναι δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός της γραμμής ύδατος στην σταδία, είτε λόγω κακού φωτισμού, είτε λόγω πολύ διαυγούς νερού. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολο να γίνει ακριβής ανάγνωση μετρήσεων λόγω κυματισμών του νερού. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με προσεκτική παρατήρηση και στην περίπτωση κυματισμών με τον μέσο όρο αρκετών παρατηρήσεων. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, οι μετρητές πρέπει να διαβάζονται με ακρίβεια 3 mm. Αν οι μετρητές δεν μπορούν να διαβαστούν με αυτή την ακρίβεια, πρέπει να κρατηθούν σημειώσεις που να αναφέρουν το εκτιμώμενο μέγεθος του σφάλματος.

**Σφάλμα αισθητήρων – πλωτήρες.** Οι αισθητήρες στάθμης, όπως οι πλωτήρες, οι αισθητήρες πίεσης και άλλες συσκευές ανίχνευσης, μπορούν να εισάγουν σφάλματα ύψους μετρητή. Για παράδειγμα, ο πλωτήρας μπορεί να βάζει νερά, ο σφιγκτήρας που τον ασφαλίζει μπορεί να χαλαρώσει, ακόμα και μικρά ζώα μπορεί να καταφύγουν πάνω στον πλωτήρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα προβλήματα με τον πλωτήρα θα τον αναγκάσουν να πέσει κάτω από την αρχική του τοποθέτηση, προκαλώντας πολύ χαμηλές αναγνώσεις μέτρησης.

**Σφάλμα αισθητήρων – πιεζόμετρα.** Τα πιεζόμετρα μπορεί να έχουν ή να εμφανίζουν σφάλματα βαθμονόμησης. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα θετικές ή αρνητικές αποκλίσεις από το πραγματικό ύψος. Διάφορες μάρκες και μοντέλα πιεζομέτρων έχουν δοκιμαστεί από το τμήμα Υδρολογικών Οργάνων της United States Geological Survey

(USGS) για να διαπιστωθεί αν πληρούν αυτά τα πρότυπα ακρίβειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αντίστοιχες δοκιμές πρέπει να γίνονται πριν από τη χρήση τέτοιων αισθητήρων για να καθοριστεί η ακρίβεια τους.

**Σφάλμα ανέπαφων αισθητήρων στάθμης.** Στην κατηγορία αυτή ανήκουν αισθητήρες που χρησιμοποιούν ακουστικά κύματα (υπερήχους), ή μετάδοση ραδιοκυμάτων (radar) καθώς και τα συστήματα με λέιζερ. Τα υπερηχητικά συστήματα και τα ραντάρ, αν και σχετικά νέα, χρησιμοποιούνται ευρέως και επιτυχώς στην Ευρώπη. Οι μέθοδοι υπερήχων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν εμβαπτισμένοι, στοχεύοντας προς τα πάνω για να ανιχνεύσουν τη στάθμη του νερού. Υπό πολύ ελεγχόμενες συνθήκες, ορισμένες από αυτές τις συσκευές έχουν ακρίβεια της τάξης 3 mm. Οι πηγές σφαλμάτων περιλαμβάνουν μεταβολές της θερμοκρασίας, μεταβολές πυκνότητας και μεταβολές της σύνθεσης στη στήλη μετάδοσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εμπόδια όπως το χιόνι, η βροχή ή η σκόνη μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια. Τα ηλεκτρονικά συστήματα αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι πολύ ευαίσθητα και επίσης να επηρεάζουν την ακρίβεια.

**Σφάλματα μηχανισμών.** Στους μηχανικούς καταγραφείς μπορούν να προκύψουν σφάλματα που προκαλούνται από την αλλαγή θέσης του μάντα που στηρίζει τον πλωτήρα, που οφείλονται στην υστέρηση απόκρισης κατά την μεταβολή της στάθμης στην έλευση ή αποδρομή πλημμύρας, στη μεταβολή του βάρους του αντίβαρου όταν αυτό εμβαπτίζεται, κλπ.

**Σφάλματα λόγω υδραυλικών φαινομένων.** Αν η μέτρηση γίνεται μέσα σε προστατευτικό φρεάτιο, η υψηλή ταχύτητα στο υδατόρεμα μπορεί να προκαλέσει την πτώση ή μερικές φορές ανύψωση της επιφάνειας του νερού μέσα στο φρεάτιο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μεταβολή μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, της τάξεως των 15 cm ή περισσότερο. Αυτή η κατάσταση πρέπει να διερευνηθεί με ταυτόχρονες αναγνώσεις εξωτερικών και εσωτερικών βοηθητικών μετρητών κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλών ροών.

**Σφάλματα στην καταγραφή.** Τα ηλεκτρονικά καταγραφικά δεδομένων ενδέχεται να καταγράψουν λανθασμένες αναγνώσεις στάθμης λόγω σφαλμάτων ή ασυνεπειών σε εξισώσεις και αλγόριθμους που μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε τιμές στάθμης. Αυτό είναι συνήθως ένα πρόβλημα προγραμματισμού που μπορεί να διορθωθεί. Οι ακραίες θερμοκρασίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν σφάλματα, ωστόσο οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί καταγραφείς δεδομένων βαθμονομούνται για να καταγράψουν με ακρίβεια από περίπου -40 ° έως +60 °C. Οι δοκιμές δείχνουν ότι σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις τα καταγραφικά δεδομένων καταχωρούν σωστά τις ακραίες θερμοκρασίες.

### **3.3 Υλικοτεχνική υποδομή για υδρομέτρηση**

#### **3.3.1 Γενικά**

Η συλλογή δεδομένων στάθμης, είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα, απαιτεί την τοποθέτηση διαφόρων οργάνων σε ένα σημείο μέτρησης. Προκειμένου οι μετρήσεις στάθμης να είναι χρήσιμες για τους επιδιωκόμενους σκοπούς, είναι σημαντικό η διατήρηση ενός σταθερού επιπέδου αναφοράς και η τήρηση συγκεκριμένων ορίων ακρίβειας.

Ο μετρητής αναφοράς για έναν σταθμό αυτόματης καταγραφής στάθμης είναι μία σταδία τις οποίας οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για να ρυθμιστούν σωστά τα αυτόματα συστήματα καταγραφής στάθμης.

Το καταγραφικό στάθμης είναι μια ηλεκτρονική ή μηχανική συσκευή που καταγράφει και αποθηκεύει αυτόματα τις μετρήσεις ύψους στάθμης που ανιχνεύονται από τον αισθητήρα. Τα μηχανικά (αναλογικά) καταγραφικά παράγουν διαγράμματα στα οποία είναι σχεδιασμένη η εξέλιξη του ύψους της στάθμης. Τα ψηφιακά και ηλεκτρονικά καταγραφικά αποθηκεύουν γενικά τα ύψη των μετρήσεων ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, όπως κάθε 5 λεπτά, 15 λεπτά ή 1 ώρα. Μη ομοιόμορφα χρονικά διαστήματα βασισμένα σε προγραμματισμένες χρονικές στιγμές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

Η ανάκτηση της μέτρησης είναι ο τρόπος με τον οποίο εξάγονται τα δεδομένα από το καταγραφικό δεδομένων. Για τα μηχανικά καταγραφικά αυτό γίνεται αφαιρώντας χειροκίνητα το χαρτί σχεδίασης της εξέλιξης της στάθμης. Για τα ψηφιακά αυτό γίνεται κατεβάζοντας τα δεδομένα από το καταγραφικό σε έναν υπολογιστή ή αφαιρώντας τη μονάδα μνήμης από τη συσκευή.

Το σύστημα τηλεμετρίας είναι το μέσο με το οποίο τα δεδομένα μεταδίδονται αυτόματα από το καταγραφικό δεδομένων σε μια άλλη θέση. Σταθερή γραμμή τηλεφώνου, κινητό τηλέφωνο, ραδιοζεύξη ή δορυφορική επικοινωνία μπορούν να εκτελέσουν αυτή τη λειτουργία.

### 3.3.2 Σταδία

Οι σταδίες μπορεί να είναι κάθετες ή κεκλιμένες. Η τυπική κατακόρυφη σταδία στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτελείται από πορσελάνινα σμαλτωμένα τμήματα σιδήρου πλάτους 150 mm, μήκους 1 m με διαγράμμιση ανά 10 mm. Στην Ευρώπη οι σταδίες κατασκευάζονται από υαλοϋφασμα (fiberglass).

Η κεκλιμένη σταδία είναι συνήθως βαριά και ξύλινη και στερεωμένη με ασφάλεια σε ένα μόνιμο θεμέλιο. Η κεκλιμένες σταδίες που είναι προσαρμοσμένες σε όχθη είναι λιγότερο πιθανό να υποστούν βλάβη από πλημμύρες, πάγο ή να παρασυρθούν.



**Σχήμα:** Σταδία στην έξοδο σήραγγας Λυσιμαχίας.



### 3.3.3 Ηλεκτρική ταινία

Ο μετρητής ηλεκτρικής ταινίας αποτελείται από μια διαγραμμισμένη χαλύβδινη ταινία στην οποία στερεώνεται ένα κυλινδρικό βάρος, ένα έλικτρο σε πλαίσιο για την ταινία και ένα βολτόμετρο. Ένας ακροδέκτης (ο θετικός) ξεκινάει από το βολτόμετρο για να μπορεί να συνδεθεί με μια μπαταρία. Ο αρνητικός ακροδέκτης της μπαταρίας συνδέεται σε μια γείωση και ο θετικός ακροδέκτης στον ακροδέκτη του βολτόμετρου. Για να καθοριστεί το ύψος της στάθμης του νερού, το βάρος χαμηλώνει μέχρι να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του νερού. Αυτή η επαφή κλείνει το ηλεκτρικό κύκλωμα και παράγει ένα σήμα στο βολτόμετρο. Με το βάρος να διατηρείται στη θέση της πρώτης επαφής, γίνεται η ανάγνωση της διαγράμμισης της ταινίας.



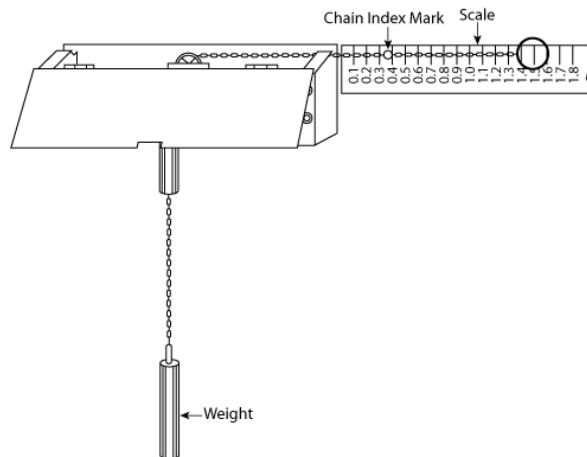
Σχήμα: Μέτρηση στάθμης με χρήση ταινίας (WMO, 2010)

### 3.3.4 Ανάρτηση βάρους από αλυσίδα

Χρησιμοποιείται μετρητής αλυσίδας όπου τα εξωτερικά όργανα μέτρησης είναι δύσκολο να συντηρηθούν και όπου δεν υπάρχει γέφυρα, αποβάθρα ή άλλη κατασκευή πάνω από το νερό. Η ανάρτηση βάρους από αλυσίδα μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα βραχίονα-πρόβολο που εκτείνεται πάνω από το υδατόρεμα ή που κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να στραφεί για να βρεθεί πάνω από το υδατόρεμα.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τον βραχίονα που είναι σταθερά τοποθετημένος στη θέση του, την σταδία που είναι τοποθετημένα οριζόντια πάνω στον πρόβολο και μία βαριά αλυσίδα, η οποία περνάει από μια τροχαλία στο άκρο του προβόλου. Ένα βάρος προσαρτάται στην άκρη της αλυσίδας πάνω από τη ροή και ένας δείκτης συνδέεται στο άλλο άκρο της αλυσίδας.

Η στάθμη καθορίζεται με τη κάθοδο του βάρους έως ότου το κάτω μέρος του αγγίξει την επιφάνεια του νερού. Το ύψος του μετρητή διαβάζεται στη συνέχεια από τη θέση του δείκτη πάνω στην οριζόντια σταδία.



**Σχήμα:** Μέτρηση στάθμης με ανάρτηση βάρους από πρόβολο (WMO, 2010)

### 3.3.5 Πλωτήρες αναρτημένοι από ταινία

Ο μετρητής αυτός αποτελείται από ένα πλωτήρα, μια διαγραμμισμένη ταινία χάλυβα, ένα αντίβαρο από ανοξείδωτο χάλυβα και μια τροχαλία, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η τροχαλία είναι συνήθως 15 cm σε διάμετρο, αυλακωτή στην περιφέρεια για την προσαρμογή της ταινίας, και τοποθετείται σε βάση. Ένας βραχίονας εκτείνεται από τη βάση σε ένα σημείο ελαφρώς πέρα από την ταινία για να φέρει τον (ρυθμιζόμενο) δείκτη. Η ταινία συνδέεται με το πλωτήρα με έναν σφιγκτήρα, ο οποίος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση προσαρμογών στην ένδειξη ταινίας εάν οι απαραίτητες ρυθμίσεις είναι πολύ μεγάλες για να προσαρμοστούν από τον ρυθμιζόμενο δείκτη. Οι πλωτήρες, κυμαίνονται από 5 cm έως 30 cm σε διάμετρο, είναι συνήθως κατασκευασμένοι από πλαστικό.



**Σχήμα:** Μέτρηση στάθμης με χρήση πλωτήρων (WMO, 2010)

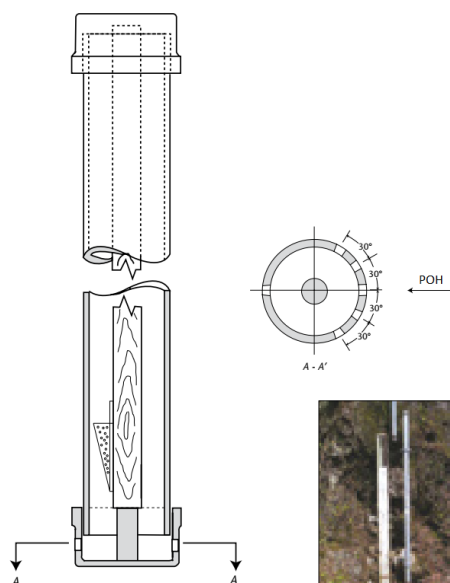
Το πλεονέκτημα αυτού του μετρητή είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην ταινία ανάρτησης δείκτες μέγιστης και ελάχιστης τιμής, έτσι ώστε να μπορεί να καθοριστεί η μέγιστη και η ελάχιστη στάθμη για την περίοδο μεταξύ των επισκέψεων. Οι δείκτες είναι μαγνήτες που είναι προσαρτημένοι στην ταινία κάτω από τη βάση του οργάνου. Καθώς η στάθμη ανεβαίνει, ο μαγνήτης θα έρθει σε επαφή με τη βάση και θα ολισθήσει κατά μήκος

της ταινίας έως ότου η στάθμη φτάσει στο ανώτατο ύψος και αρχίσει να υποχωρεί. Στην συνέχεια, ο μαγνήτης θα διατηρήσει τη θέση του πάνω στην ταινία. Ο υδρογράφος, κατά τη διάρκεια της επίσκεψης επιθεώρησης στον μετρητή, μπορεί στη συνέχεια να ανυψώσει τον πλωτήρα έως ότου ο μαγνήτης ακουμπήσει ξανά στη βάση και να διαβάσει την ένδειξη ταινίας για να καθορίσει το στάδιο αιχμής. Ένας μαγνήτης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην πλευρά αντίβαρου της ταινίας για να προσδιοριστεί η ελάχιστη στάθμη που συνέβη από την τελευταία επίσκεψη στο σταθμό μέτρησης. Αφού ληφθούν οι αναγνώσεις των δεικτών μέγιστης και ελάχιστης στάθμης, θα πρέπει να αρχικοποιηθεί η θέση των μαγνητών.

### 3.3.6 Καταγραφείς μέγιστης στάθμης

Ο καταγραφέας μέγιστου είναι μια απλή, οικονομική, αξιόπιστη και εύκολα εγκαταστάσιμη συσκευή για την απόκτηση της μέγιστης ανύψωσης της στάθμης. Ο πιο ικανοποιητικός είναι αυτός που περιλαμβάνει ένα κατακόρυφο τεμάχιο γαλβανισμένου σωλήνα 50 mm που περιέχει μια σταδία ξύλου ή αλουμινίου που διατηρείται σε μια σταθερή θέση σε σχέση με ένα επίπεδο αναφοράς, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το κάτω κάλυμμα έχει έξι οπές εισαγωγής που βρίσκονται γύρω από την περιφέρεια του πώματος, έτσι ώστε η πτώση ή η ανύψωση της πιεζομετρίας λόγω ταχύτητας να διατηρείται στο ελάχιστο. Πέντε από τις οπές βρίσκονται στην προς τα ανάντη πλευρά του καπακιού και μία οπή στην προς τα κατάντη πλευρά. Οι δοκιμές έδειξαν ότι αυτή η διάταξη και ο προσανατολισμός των οπών εισαγωγής είναι αποτελεσματικές για ταχύτητες μέχρι 3 m/s. Το άνω κάλυμμα περιέχει μια μικρή οπή εξαερισμού. Για περισσότερες πληροφορίες, βλ. Friday (1965) και Carter and Gamble (1963).

Το καπάκι περιέχει θρυμματισμένο φελλό. Καθώς το νερό ανεβαίνει στο σωλήνα, ο φελλός επιπλέει στην επιφάνεια του. Όταν το νερό φτάσει στο ανώτατο σημείο του και αρχίσει να υποχωρεί, ο φελλός προσκολλάται στη σταδία μέσα στο σωλήνα, διατηρώντας έτσι το επίπεδο της αιχμής της ροής.



**Σχήμα:** Τομή και κάτοψη καταγραφέα μέγιστης στάθμης (WMO, 2010)

### 3.3.7 Πιεζόμετρα φυσαλίδων

Ένα αέριο όπως το άζωτο διοχετεύεται μέσω ενός σωλήνα που βρίσκεται τοποθετημένος στη ροή και η πίεση του νερού στο στόμιο μεταδίδεται μέσω του σωλήνα αερίου σε έναν αισθητήρα πίεσης που βρίσκεται στον μετρητή όπου και μετατρέπεται σε βάθος ροής.

Δύο είναι τα βασικά εξαρτήματα ενός συστήματος μετρητών φυσαλίδων, πέραν των αισθητήρων πίεσης, (α) ένα σύστημα παροχής αερίων και (β) ένα στόμιο εξαγωγής φυσαλίδων. Το σύστημα παροχής αερίων είναι σχεδιασμένο να τροφοδοτεί με ένα αέριο, (συνήθως άζωτο, μέσω ενός συστήματος βαλβίδων, ρυθμιστών και σωληνώσεων) ένα στόμιο που βρίσκεται σε σταθερή θέση εμβαπτισμένο στη ροή. Ο συνεχής σχηματισμός φυσαλίδων στο στόμιο μεταδίδει την πίεση (βάθος νερού πάνω από το στόμιο) στον αισθητήρα πίεσης που βρίσκεται στον κλωβό των οργάνων. Ο αισθητήρας πίεσης αερίζεται στην ατμόσφαιρα για να αντισταθμίσει τις αλλαγές της βαρομετρικής πίεσης.

### 3.3.8 Εμβαπτιζόμενα πιεζόμετρα

Τα εμβαπτιζόμενα πιεζόμετρα είναι συνήθως αυτόνομες μονάδες, με τον μετατροπέα πίεσης σε ηλεκτρικό σήμα και τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Συνήθως περιλαμβάνουν καταγραφικό δεδομένων και μια μπαταρία. Αυτές οι μονάδες μπορούν να τοποθετηθούν απευθείας στο ρεύμα ή την δεξαμενή. Η στάθμη του νερού προσδιορίζεται από την διαφορά μεταξύ της υδροστατικής πίεσης και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι σχετικοί αισθητήρες υποβρύχιων πιέσεων έχουν ενσωματωμένο αεραγωγό στην ατμόσφαιρα για την μέτρηση και την αντιστάθμιση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι απόλυτοι αισθητήρες υποβρύχιων πιέσεων μετρούν μόνο την υδροστατική πίεση και η ατμοσφαιρική πίεση μετράται με πρόσθετο αισθητήρα πίεσης. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης της πίεσης και οι παραδοσιακές μονάδες δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ακρίβειας για κύριους σταθμούς μέτρησης στάθμης. Επί του παρόντος υπάρχουν μονάδες στην αγορά που διαθέτουν ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας. Η επίδραση των μεταβολών της θερμοκρασίας διορθώνεται με μαθηματικούς υπολογισμούς στο ηλεκτρονικό κύκλωμα του αισθητήρα και η ακρίβεια της μέτρησης είναι ουσιαστικά καλύτερη. Οι υποβρύχιες μονάδες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν θερμοκρασίες κατάψυξης, επομένως δεν πρέπει να τοποθετούνται σε υδατορρεύματα ή δεξαμενές που παγώνουν γύρω από τον αισθητήρα. Το τυπικό σφάλμα αυτής της μεθόδου είναι  $\pm 0.5$  cm (ONSET, 2018).

### 3.3.9 Αισθητήρας υπερήχων

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν ακουστικό μορφοτροπέα (transducer) υψηλής συχνότητας που μεταδίδει ένα ηχητικό κύμα μέσω του αέρα στην επιφάνεια του νερού. Ο μορφοτροπέας δέχεται το ανακλώμενο ακουστικό κύμα, που μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και μεταποιείται σε στάθμη επιφάνειας νερού. Σημειώνεται ότι το όργανο μετρά το υψηλότερο σημείο της υδάτινης επιφάνειας εντός του κύκλου (κώνου) μετρήσεως. Τα μεταδιδόμενα και ανακλώμενα σήματα επηρεάζονται από την θερμοκρασία και την πυκνότητα του αέρα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την ακρίβεια, ειδικά όταν η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του μορφοτροπέα και της επιφάνειας του νερού είναι μεγάλη (δηλαδή μεγαλύτερη από περίπου 3 m). Μερικοί κατασκευαστές έχουν ενσωματώσει στις συσκευές τους αντιστάθμιση θερμοκρασίας. Υπάρχουν και εμβαπτιζόμενοι υπερηχητικοί αισθητήρες που μπορούν να εγκατασταθούν κάτω από την

στάθμη του νερού, κατευθύνοντας την δέσμη προς τα πάνω, προς την επιφάνεια του νερού, για να καθορίσουν το βάθος του νερού.



**Σχήμα:** Σταθμήμετρο με αισθητήρα υπερήχων σε γέφυρα (Tekle, 2014)

Σύμφωνα με την εργασία του Tekle (2014), περισσότερα από τρία χρόνια δεδομένων στάθμης νερού που συλλέχθηκαν από αισθητήρες δείχνουν ότι υπήρχαν εσφαλμένες διακυμάνσεις της στάθμης του νερού της τάξης των  $\pm 7$  cm κατά μέσο όρο στους περισσότερους αισθητήρες. Η φασματική ανάλυση που έγινε στα δεδομένα έδειξε ότι οι διακυμάνσεις έχουν συχνότητα που ταυτίζεται με τον ημερήσιο κύκλο. Ο κύκλος ήταν ισχυρότερος στους αισθητήρες με νότιο προσανατολισμό. Η πηγή του σφάλματος εντοπίστηκε στην θέρμανση του κλωβού του αισθητήρα, με αποτέλεσμα το εσωτερικό θερμόμετρο να μην καταγράφει την πραγματική θερμοκρασία ατμόσφαιρας και άρα να μη γίνεται σωστά η απαιτούμενη διόρθωση. Για την μείωση του σφάλματος αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι αντιστάθμισης. Η πρώτη μέθοδος αντισταθμίζει το σφάλμα χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία του αέρα από τον κοντινό μετεωρολογικό σταθμό. Αυτή η μέθοδος μείωσε τις διακυμάνσεις στα 2 cm, στις περισσότερες περιπτώσεις. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί την τοπική θερμοκρασία αέρα του καναλιού ροής με βάση την ενεργειακή ισορροπία. Ένα μοντέλο υπολογίζει τη θερμοκρασία του αέρα στο κανάλι, που είναι ελαφρώς μικρότερη από την θερμοκρασία του αέρα από αυτήν σε κοντινό μετεωρολογικό σταθμό, με αποτέλεσμα την μείωση των εσφαλμένων διακυμάνσεων στο 1 cm.

### **3.3.10 Ηλεκτρομαγνητικά ραντάρ**

Το ραντάρ είναι μια μέθοδος μέτρησης απόστασης που έχει χρησιμοποιηθεί από πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Ραδιοκύματα είναι η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και επομένως πραγματοποιείται με την ταχύτητα του φωτός. Τα πλεονεκτήματα του ραντάρ είναι ότι το σήμα είναι γενικά ανεπηρέαστο από τις καιρικές συνθήκες και τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εφαρμογή είναι αβλαβή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Το εύρος λειτουργίας είναι τυπικά από σχεδόν μηδέν έως περίπου 35 m.

Η συσκευή ραντάρ στέλνει βραχείας διάρκειας παλμούς κάθετα στην επιφάνεια του νερού (για να μπορεί να μετρήσει την απόσταση, ένα ραντάρ χρειάζεται οπωσδήποτε να στέλνει



την ακτινοβολία σε παλμούς, αυτό ανεβάζει την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών διατάξεων του και άρα το κόστος). Για να εκτιμηθεί η απόσταση από την επιφάνεια του νερού και συνεπώς η στάθμη του νερού, μετράται ο χρόνος μεταξύ μετάδοσης και λήψης αυτών των παλμών.

Σύμφωνα με τη SOMMER (2018) η ακρίβεια ενός συστήματος που λειτουργεί στα 26 GHz μπορεί να φτάσει τα  $\pm 2$  mm.



**Σχήμα:** Ραντάρ SOMMER RQ-30 εγκατεστημένο σε γέφυρα (SOMMER, 2018)

### **3.3.11 Οπτική μέθοδος (λείζερ)**

Οι οπτικές μέθοδοι μέτρησης της απόστασης βασίζονται στη χρήση της τεχνολογίας λείζερ. Αυτή η τεχνική είναι αρκετά υποσχόμενη. Ένας προβληματισμός είναι η ασφάλεια των οφθαλμών, διότι η άμεση έκθεση των ματιών σε μια ακτίνα λείζερ μπορεί να είναι επικίνδυνη. Για τις μετρήσεις της στάθμης του νερού, αυτό δεν θα είναι γενικά πρόβλημα, επειδή τα επίπεδα ισχύος της δέσμης είναι κάτω από τα όρια ασφαλείας.

Ένας μετρητής απόστασης λείζερ στέλνει έναν λεπτής δέσμης παλμό φωτός στον στόχο και ανιχνεύει την αντανάκλαση. Ο μετρητής μετράει το χρόνο μεταξύ αυτών των δύο συμβάντων και τον μετατρέπει σε απόσταση. Η ακρίβεια της μέτρησης για αποστάσεις μέχρι 30 m είναι  $\pm 3$  mm (Cordex, 2018).

### **3.3.12 Καταγραφικό δεδομένων**

Καταγραφικό στάθμης νερού είναι ένα όργανο που καταγράφει αυτόματα μια συνεχή μέτρηση της στάθμης επιφάνειας του νερού σε σχέση με τον χρόνο. Τα καταγραφικά

στάθμης νερού μπορούν να είναι αναλογικά (σε χαρτί), αναλογικά-ψηφιακά, και πλήρως ηλεκτρονικά ψηφιακά. Οι βασικές απαιτήσεις για ένα καταγραφικό είναι να τηρείται συστηματικά και με ακρίβεια η καταγραφή σε σχέση με τον χρόνο, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί ορθά το υδρογράφημα για περαιτέρω ανάλυση. Στην πράξη σήμερα χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρονικά καταγραφικά δεδομένων (ΗΚΔ).

Τα ΗΚΔ είναι συσκευές που μπορούν να προγραμματιστούν για να καταγράφουν δεδομένα στάθμης σε συγκεκριμένο κανονικό χρονικό βήμα ή σε ένα χρονικό πρόγραμμα καθορισμένο από τον χρήστη, το οποίο μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την στάθμη ή άλλη μεταβλητή. Τα ΗΚΔ συνήθως συνδυάζονται με πλατφόρμες συλλογής δεδομένων.

Τα ΗΚΔ τροφοδοτούνται συνήθως από μίαν εξωτερική μπαταρία, που μπορεί να είναι επαναφορτιζόμενη. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μπαταρίες φορτίζονται με την χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Όταν είναι διαθέσιμο, μπορεί να τροφοδοτείται με ρεύμα από πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα περισσότερα ΗΚΔ έχουν επίσης εσωτερικές μπαταρίες για να διατηρούν προγραμματισμό και δεδομένα σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.

Τα ΗΚΔ αποθηκεύουν τα δεδομένα είτε εσωτερικά σε μια μονάδα μνήμης, είτε σε μια αφαιρούμενη κάρτα μνήμης. Τα περισσότερα ΗΚΔ επιτρέπουν και τις δύο μεθόδους αποθήκευσης δεδομένων. Τα δεδομένα ανακτώνται είτε με λήψη δεδομένων απευθείας σε έναν υπολογιστή (σύνδεση με USB), είτε με την αφαίρεση της κάρτας μνήμης και την μεταφορά των δεδομένων από την κάρτα σε υπολογιστή. Τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν και με τη μετάδοση δεδομένων μέσω τηλεφώνου, ραδιοζεύξης ή δορυφόρου.

Τα πλεονεκτήματα ενός ΗΚΔ είναι ότι μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλο αριθμό δεδομένων χωρίς συχνή συντήρηση και μπορούν να προγραμματιστούν για την συλλογή δεδομένων σύμφωνα με τις διάφορες ειδικές ανάγκες. Μπορούν να συνδεθούν εύκολα σε συσκευές εκπομπής, όπως ραδιοζεύξη, τηλέφωνα ή δορυφορικά συστήματα, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να ανακτηθούν σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Τα εσωτερικά ηλεκτρονικά ρολόγια των ΗΚΔ είναι γενικά πολύ ακριβή και η ακρίβεια μπορεί να αυξηθεί αν το ΗΚΔ έχει ενσωματωμένο δέκτη GPS. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η τρέχουσα στάθμη δεν μπορεί να προβληθεί στο πεδίο χωρίς να μεταφορτωθούν τα δεδομένα σε έναν φορητό υπολογιστή πεδίου, ο οποίος να έχει και κάποιο λογισμικό σχεδίασης (π.χ. λογιστικό φύλλο).

## 4 Μέτρηση παροχής

---

### 4.1 Γενικά

Παροχή υδατορέματος ορίζεται ως ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του ύδατος σε ανοικτό αγωγό, συμπεριλαμβανομένων οποιωνδήποτε ιζημάτων ή άλλων στερεών που μπορούν να διαλυθούν ή να αναμειχθούν με αυτό. Η παροχή εκφράζεται συνήθως σε διαστάσεις κυβικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο ( $m^3/s$ ). Η παροχή δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αλλά πρέπει να υπολογιστεί από μεταβλητές που μπορούν να μετρηθούν απευθείας, όπως το πλάτος ροής, το βάθος ροής και το πεδίο ταχύτητας ροής. Αν και η παροχή υπολογίζεται από μετρήσεις άλλων μεταβλητών, ο όρος “μέτρηση παροχής” χρησιμοποιείται ενίοτε για να εκφράσει το αποτέλεσμα των υπολογισμών.

Μετρήσεις παροχής εκτελούνται σε κάθε σταθμό μέτρησης στάθμης για να προσδιορισθεί η σχέση στάθμης-παροχής. Η σχέση αυτή μπορεί να είναι μια απλή συσχέτιση ή μια πιο σύνθετη σχέση στην οποία υπεισέρχονται η κλίση, ο ρυθμός αλλαγής της στάθμης και άλλοι παράγοντες. Αρχικά, οι μετρήσεις παροχής πραγματοποιούνται σε διάφορες στάθμες για να ρυθμισθεί η σχέση. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται μετρήσεις σε περιοδικά διαστήματα, συνήθως μηνιαία, αλλά και σε ακραίες περιπτώσεις, όπως πλημμύρες ή ξηρασίες, για να επαληθευθεί η ρύθμιση, να επεκταθεί η σχέση ή να καθοριστούν τυχόν αλλαγές που προκαλούνται από αλλαγές στις συνθήκες ροής.

Το βασικό όργανο που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις ταχύτητας είναι ο μιλίσκος. Η παροχή υπολογίζεται από την κατανομή των ταχυτήτων και των βαθών στην διατομή ενός αγωγού. Οι παρατηρήσεις της ταχύτητας του ύδατος και του βάθους συνήθως γίνονται από έναν υδρογράφο ενώ στέκεται σε διάφορα σημεία παρατήρησης στην διατομή ενός υδατορέματος. Αυτή αναφέρεται ως η συμβατική μέθοδος. Για ασφάλεια, οι μετρήσεις δεν πρέπει να εκτελούνται με τον υδρογράφο εντός της διατομής όταν (βάθος [m] × ταχύτητα [m/s])  $\geq 1$ . Πιο σύγχρονες αυτοματοποιημένες μέθοδοι είναι η του κινούμενου σκαφιδίου, η ακουστική μέθοδος Doppler και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Επίσης η παροχή μπορεί να μετρηθεί με κατασκευή διατομών ελέγχου, και τέλος με έμμεσες μεθόδους.

### 4.2 Διαδικασία μέτρησης και υπολογισμοί

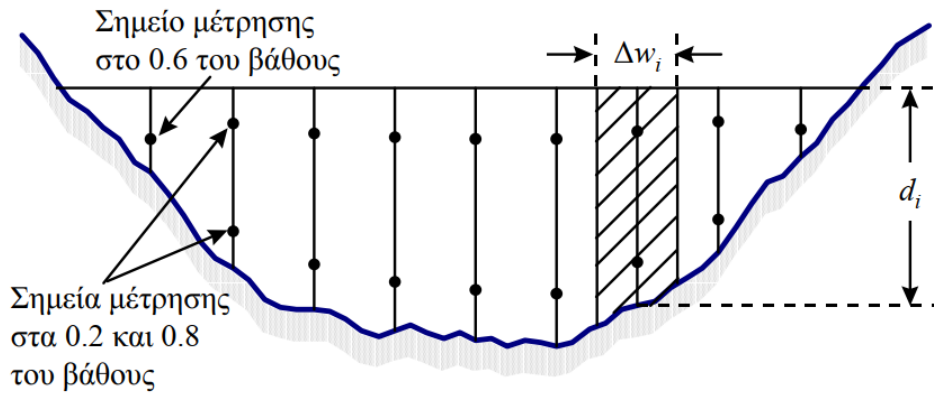
#### 4.2.1 Υπολογισμός παροχής

Η μέτρηση παροχής γίνεται με διαμέριση μίας διατομής σε τμήματα και μέτρηση του βάθους και της ταχύτητας σε μία κατακόρυφο μέσα σε κάθε τμήμα. Η ολική παροχή είναι η άθροιση των γινομένων των επιφανειών της κάθε διαμέρισης με την αντίστοιχη μέση ταχύτητα τους:

$$Q = \sum_{i=1}^n \bar{u}_i d_i \Delta w_i$$

όπου  $\bar{u}_i$  είναι η μέση ταχύτητα της διαμέρισης  $i$  (είτε η ταχύτητα στο 60% του βάθους ροής, είτε ο μέσος όρος των ταχυτήτων στο 20% και 80% του βάθους ροής),  $n$  είναι ο αριθμός των διαμερίσεων της διατομής, και  $\Delta w_i$ ,  $d_i$  όπως επεξηγούνται στο παρακάτω σχήμα.





**Σχήμα:** Σκαριφηματική απεικόνιση μεθόδου μετρήσεων ταχυτήτων διατομής και υπολογισμού παροχής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Εκτός από τη μέθοδο που περιγράφει το προηγούμενο σχήμα, υπάρχει και η μέθοδος των μέσων τιμών διαμέρισης. Σε αυτή τη μέθοδο, η κάθε διαμέριση θεωρείται ότι ορίζεται από δυο διαδοχικές κατακορύφους στις οποίες γίνεται μέτρηση ταχύτητας. Η επιφάνεια υπολογίζεται σαν τραπέζιο και η μέση ταχύτητα προκύπτει και από τις τέσσερις μετρήσεις που έγιναν στα όρια της εν λόγω διαμέρισης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούνταν από τη USGS μέχρι το 1950 αλλά εγκαταλείφθηκε μετά από τη μελέτη του Young (1950), που απεφάνθη ότι η μέθοδος αυτή αν και πιο πολύπλοκη δεν προσφέρει αυξημένη ακρίβεια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατακόρυφη κατανομή των ταχυτήτων σε μια θέση της διατομής θα αποκλίνει από την λογαριθμική μορφή αν υπάρχει βλάστηση σε επαφή με το νερό ή βυθισμένα αντικείμενα σε άμεση γειτνίαση. Όπου συμβαίνει αυτό, η μέθοδος των δύο σημείων δεν θα δώσει μια αξιόπιστη τιμή μέσης ταχύτητας και θα πρέπει να γίνει μια επιπρόσθετη παρατήρηση ταχύτητας στο 0.6 του βάθους. Οι τρεις παρατηρούμενες ταχύτητες πρέπει στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο των τριών σημείων (βάρη στάθμισης 25% για τις παρατηρήσεις 0.2 και 0.8, και 50% για την 0.6). Ένας εμπειρικός κανόνας για το εάν οι ταχύτητες στα βάθη 0.2 και 0.8 είναι επαρκείς είναι η ταχύτητα βάθους 0.2 να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα 0.8 αλλά λιγότερο από δύο φορές μεγαλύτερη.

Για την εκτέλεση των υδρομετρήσεων, βοηθάει η χρήση ενός συρματόσχοινου τεντωμένου πάνω από τη διατομή στο οποίο θα σημειωθούν οι θέσεις των κατακορύφων στις οποίες θα μετρηθεί η ταχύτητα ροής. Ο αριθμός των κατακορύφων πρέπει να είναι περίπου 25 έως 30 για υδατορέματα που είναι μεγαλύτερα από 10 μέτρα πλάτος, ενώ για μικρότερα πλάτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν λιγότερες. Επίσης, στην περίπτωση που η διατομή είναι ομαλή και με ομοιόμορφη κατανομή ταχύτητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν λιγότερες κατακορύφες. Ο ελάχιστος αριθμός των κατακορύφων πρέπει να είναι τέτοιος που να εξασφαλίζει ότι από κανένα τμήματα της διατομής δεν περνάει πάνω από 10% της συνολικής παροχής (ιδανικά 5%). Αν η ροή είναι σχετικά ομοιόμορφη μπορούν χρησιμοποιηθούν ίσες αποστάσεις μεταξύ των κατακορύφων, διαφορετικά πρέπει να πυκνώνονται όπου τα βάθη και οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερα. Πρόσθετες οδηγίες σχετικά με τη διαδικασία μέτρησης παροχής μπορούν να βρεθούν στο ISO 748 - 2007.

Σε περίπτωση που η μέτρηση ταχύτητας γίνεται με στάσεις μέσα στην κοίτη είναι σημαντικό να τηρούνται κανόνες ασφαλείας. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι να μην επιχειρείται στάση μέσα σε ροή της οποίας το γινόμενο του βάθους επί ταχύτητα ξεπερνάει το  $1 \text{ m}^2/\text{s}$ .

#### 4.2.2 Αντιστοίχιση στάθμης-παροχής

Η ακριβής εκτίμηση της μέσης στάθμης διατομής είναι προϋπόθεση για την κατάρτιση σωστής σχέσης στάθμης-παροχής. Η εκτίμηση αυτή είναι απλή (χρήση μέσου όρου) όταν η στάθμη δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 5 εκατοστά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ταχύτητας. Αν η μεταβολή είναι μεγαλύτερη πρέπει να χρησιμοποιηθεί το σταθμισμένο άθροισμα των μετρημένων υψών όπου βάρη θα είναι η χρονική διάρκεια μεταξύ των μετρήσεων στάθμης.

Αν η θέση μέτρησης παροχής είναι σε μεγάλη απόσταση από την θέση συνεχούς μέτρησης στάθμης τότε σε συνθήκες μη μόνιμης ροής η παροχή που περνάει από τις δύο διατομές δεν θα είναι η ίδια, λόγω αποθήκευσης νερού κατά μήκος του υδατορέματος. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να γίνει διόρθωση της παροχής από τον τύπο:

$$Q_G = Q_m + WL \Delta h / \Delta t$$

όπου  $Q_G$  είναι η παροχή στο σημείο μέτρησης στάθμης,  $Q_m$  είναι η μετρούμενη παροχή,  $WL$  είναι η επιφάνεια του υδατορέματος μεταξύ σημείου μέτρησης στάθμης και μέτρησης παροχής,  $\Delta h$  είναι η μεταβολή της στάθμης κατά τη διάρκεια της μέτρησης,  $\Delta t$  είναι η διάρκεια της μέτρησης.

#### 4.2.3 Μέτρηση ταχύτητας σε διατομές με πλάγιες ροές

Σε ορισμένες διατομές υπάρχει περίπτωση η ταχύτητα ροής να μην είναι κάθετη σε όλα τα σημεία της διατομής αλλά να υπάρχει απόκλιση. Για μυλίσκους οριζοντίου άξονα η έλικα θα πρέπει να είναι στραμμένη προς τα ανάντη κάθετα στη διατομή, αλλά μόνο εάν η γωνία ροής – κάθετης διατομής είναι μικρότερη από 45 μοίρες. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφεται η συνιστώσα της ταχύτητας κάθετη στη διατομή. Η ίδια διαδικασία θα πρέπει να χρησιμοποιείται για μετρητή ταχύτητας με ηλεκτρομαγνητική μέθοδο. Εάν η γωνία είναι μεγαλύτερη από 45 μοίρες, ο μυλίσκος θα πρέπει να στοχεύει πάνω στη ροή και να γίνεται διόρθωση της τιμής εκ των υστέρων.

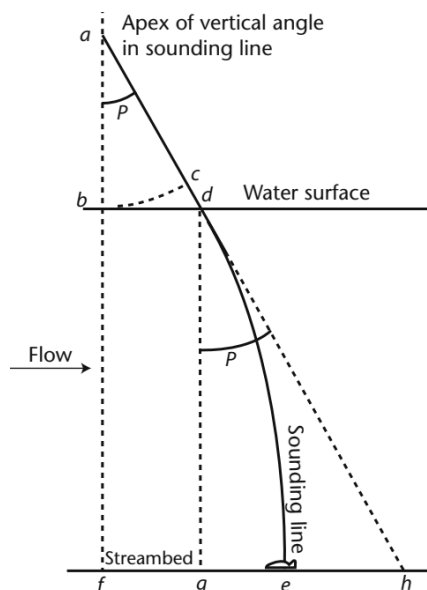
Αν ο μυλίσκος είναι αναρτημένος, δείχνει αυτόματα πάνω στη ροή λόγω του προσανατολισμού που του δίνουν τα πτερύγια. Γι' αυτό τον λόγο, όταν ο μυλίσκος δείχνει να βρίσκεται σε λοξή ροή, η μετρημένη ταχύτητα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συνημίτονο της γωνίας απόκλισης.

#### 4.2.4 Μέτρηση ταχύτητας από γέφυρες

Δεν υπάρχει κανόνας που να ορίζει αν η μέτρηση πρέπει να γίνεται προς τα ανάντη ή προς τα κατόντη μιας γέφυρας. Τα πλεονεκτήματα της μέτρησης προς τα ανάντη είναι ότι η ροή είναι πιο ομαλή και ότι ένα επικίνδυνο αντικείμενο που πλέει γίνεται αντιληπτό πιο έγκαιρα. Τα πλεονεκτήματα της μέτρησης προς τα κατόντη είναι ότι μετρούνται ευκολότερα οι γωνίες του καλωδίου ανάρτησης και ότι οι γραμμές ροής συνήθως γίνονται παράλληλες περνώντας μέσα από τα ανοίγματα της γέφυρας.

Για την μέτρηση βάθους και για την σωστή τοποθέτηση του μυλίσκου αναρτημένου από γέφυρα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η συρτική τάση πάνω στον μυλίσκο θα έχει ως

αποτέλεσμα την μετακίνηση από την κατακόρυφο. Αυτό δημιουργεί ένα επιπλέον μήκος  $cd$  (βλ. επόμενο σχήμα), το οποίο θα πρέπει να αφαιρεθεί από το μετρούμενο μήκος για τη σωστή τοποθέτηση του μιλίσκου στα σκοπούμενα βάθη μέτρησης ταχύτητας.



**Σχήμα:** Μετατόπιση αναρτημένου μιλίσκου λόγω συρτικής τάσης (WMO, 2010).

Το μήκος  $cd$  που πρέπει να αφαιρεθεί υπολογίζεται από τον τύπο:  $cd = ab ( 1/\cos P - 1 )$

### 4.3 Μηχανικοί μιλίσκοι

Οι μιλίσκοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα. Τα πλεονεκτήματα των κατακόρυφου άξονα είναι:

- Λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες.
- Τα ρουλεμάν προστατεύονται καλύτερα από την άμμο.
- Τα πτερύγια του στροφείου μπορούν να επισκευαστούν στο πεδίο χωρίς να επηρεάσει την βαθμονόμηση του μιλίσκου.
- Ένα μοναδικό στροφείο χρησιμοποιείται για όλα τα εύρη των ταχυτήτων.

Τα πλεονεκτήματα των οριζοντίου άξονα είναι:

- Το στροφείο διαταράσσει λιγότερο το πεδίο ροής.
- Είναι λιγότερο συχνό να τυλίγονται στο στροφείο ίνες.
- Η τριβή στα ρουλεμάν είναι μικρότερη.
- Μετρούν μόνο τη συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλη με τη διεύθυνση του άξονα.

Συγκριτικές δοκιμές της ακρίβειας των δύο τύπων μιλίσκων το 1958 από Lake Survey, Corps of Engineers, υπό ευνοϊκές συνθήκες μέτρησης, δείχνουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα. Επίσης από το 1958 ως το 1960, η USGS πραγματοποίησε 19 ταυτόχρονες μετρήσεις παροχής στον ποταμό Μισισσιπή με τη χρήση των μιλίσκων Price και Ott. Η μέση διαφορά στην μετρημένη παροχή μεταξύ των αποτελεσμάτων ήταν 0.15%. Οι μέγιστες διαφορές που μετρήθηκαν ήταν -2.76 και +1.53%.

#### 4.3.1 Κατακόρυφου άξονα

Η USGS χρησιμοποιεί τον κατακόρυφου άξονα μιλίσκο Price. Το πρωτότυπο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το 1882 από τον W.G. Price, ενώ συνεργάστηκε με την Επιτροπή Ποταμών του Μισισσιπή. Ο μιλίσκος τύπου Price έχει εξελιχθεί με διάφορα μοντέλα και βελτιώσεις από το 1882, αλλά η βασική θεωρία και οι αρχές παραμένουν οι ίδιες. Ο Price AA χρησιμοποιείται για τις περισσότερες μετρήσεις παροχής που πραγματοποιούνται από τη USGS (ελάχιστο βάθος ροής 46 cm, εύρος μέτρησης ταχυτήτων 3 cm/s – 3.7 m/s), ωστόσο υπάρχει και ο Price Pygmy (ελάχιστο βάθος ροής 9 cm, εύρος μέτρησης ταχυτήτων 6 cm/s – 1.2 m/s). Η ακρίβεια αυτών σύμφωνα με Kimball (2015) είναι  $\pm 2\%$ .

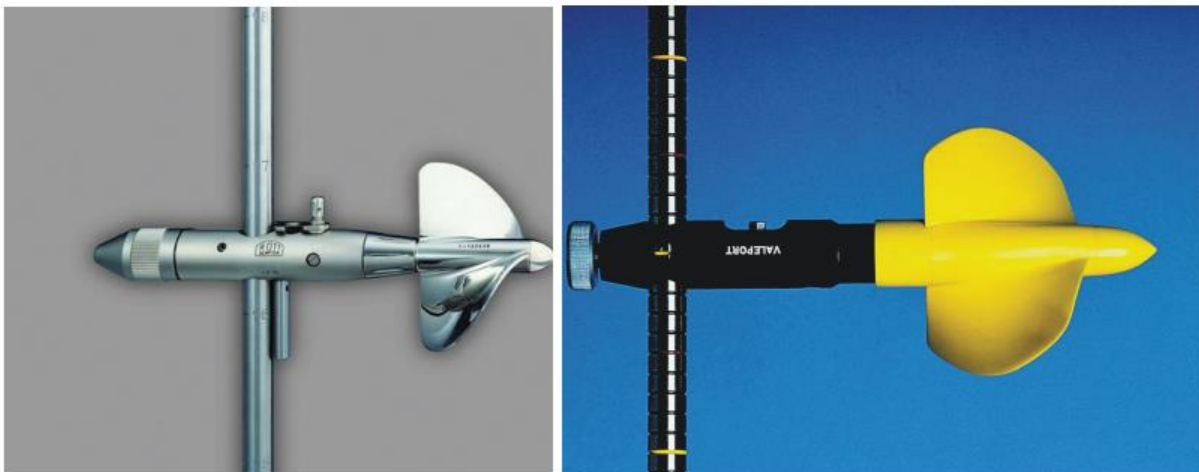


**Σχήμα:** Αριστερά: Price Pygmy. Δεξιά: Price AA (WMO, 2010)

Ο Price pygmy έχει το πλεονέκτημα ότι μετράει σε πολύ μικρά βάθη ροής, αλλά έχει περιορισμό ως προς τη μέγιστη ταχύτητα. Παρόλα αυτά υπάρχουν βελτιώσεις αυτού του μιλίσκου που επεκτείνουν το άνω όριο των μετρούμενων ταχυτήτων. Η εταιρία HYQUESTSOLUTIONS διαθέτει τον μιλίσκο RB1, ο οποίος λειτουργεί σε βάθη ροής αντίστοιχα με αυτά του Price pygmy και καλύπτει ταχύτητες από 3 cm/s μέχρι 8 m/s. Η ακρίβεια είναι  $\pm 1\%$ , σύμφωνα με την HYQUESTSOLUTIONS (2018).

#### 4.3.2 Οριζοντίου άξονα

Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται κυρίως μιλίσκοι οριζοντίου άξονα. Γνωστοί οίκοι είναι η OTT, η Valeport, και η Seba. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι μιλίσκοι της OTT και Valeport.



**Σχήμα:** Αριστερά: Μιλίσκος OTT. Δεξιά: Valeport (WMO, 2010)

Η ΟΤΤ έχει αναπτύξει μια έλικα η οποία σε λοξά ρεύματα (γωνίες έως 45°) και ταχύτητες έως και 3 m/s, καταγράφει αυτόματα την προβολή της ταχύτητας στην ευθεία κάθετη στη διατομή. Ο μιλίσκος ΟΤΤ C2 έχει ακρίβεια  $\pm 2\%$  και μπορεί να μετρήσει από βάθη 4 cm και ταχύτητες από 2.5 cm/s έως 5 m/s (ΟΤΤ, 2018). Ο μιλίσκος Valerport 002 έχει ακρίβεια  $\pm 2.5\%$  (για ταχύτητες πάνω από 0.5 m/s, 1 cm/s για χαμηλότερες ταχύτητες) και έχει διάμετρο έλικας 5 cm (Valerport, 2018).

Το κόστος των μιλίσκων οριζοντίου άξονα είναι της τάξης των 4000 €, ενώ το κόστος των μιλίσκων κατακορύφου άξονα είναι 3000 € (τιμές του έτους 2018).

### 4.3.3 Καταγραφή ρυθμού περιστροφής έλικας μιλίσκου

Η μετατροπή της περιστροφής της έλικας του μιλίσκου σε μέτρηση γίνεται σε δύο στάδια. Πρώτα η περιστροφή μετατρέπεται σε ηλεκτρικούς παλμούς είτε με συρμάτινη ψύκτρα είτε με μαγνητικό διακόπτη. Οι παλμοί αυτοί μεταδίδονται στη μονάδα μέτρησης με καλώδιο. Μια πιο πρόσφατη προσέγγιση είναι η μετατροπή της περιστροφής σε οπτικούς παλμούς που μεταδίδονται με οπτική ίνα στη μονάδα μέτρησης. Σε δεύτερο στάδιο στη μονάδα μέτρησης γίνεται η μετατροπή των παλμών σε ένδειξη του ρυθμού περιστροφής της έλικας ή ταχύτητας ροής (η μέτρηση πρέπει να έχει διάρκεια από 40 έως 70 λεπτά). Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η μονάδα μέτρησης της HYQUESTSOLUTIONS που μετράει το βάθος ροής, το βάθος μέτρησης, και την ταχύτητα.



**Σχήμα:** HYQUESTSOLUTIONS μιλίσκος RB1 και MagnaRod Model MAG/CMC (HYQUESTSOLUTIONS, 2018b)

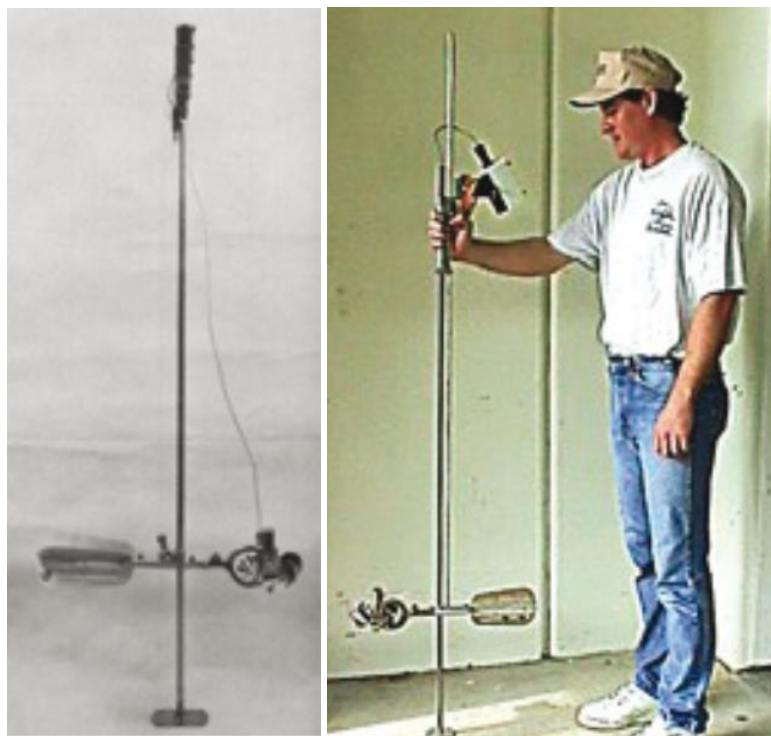
Ένας παράγοντας που ενδιαφέρει σχετικά με την μονάδα μέτρησης είναι η υδατοστεγανότητά της. Η ελάχιστη αποδεκτή είναι αυτή που ορίζεται ως IP64 στο διεθνές στάνταρντ EN 60529 (British BS EN 60529:1992, European IEC 60509:1989). Οι κωδικοί αυτού του στάνταρντ φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας:** Ταξινόμηση υδατοστεγανότητας κατά διεθνές στάνταρντ EN 60529 (British BS EN 60529:1992, European IEC 60509:1989)

IP64	Προστασία από ψεκασμό νερού από οποιαδήποτε κατεύθυνση
IP65	Προστασία από πίδακες νερού χαμηλής πίεσης από οποιαδήποτε κατεύθυνση
IP66	Προστασία από πίδακες νερού υψηλής πίεσης από οποιαδήποτε κατεύθυνση
IP67	Προστασία από εμβάπτιση σε βάθος μεταξύ 15 εκατοστών και 1 μέτρου
IP68	Προστασία από βύθιση μέχρι καθορισμένη πίεση, περιορισμένη

#### 4.3.4 Ράβδος στήριξης

Η ράβδος στήριξης του μιλίσκου εκτελεί πολλαπλούς ρόλους. Ο πρώτος είναι ο καθορισμός του βάθους ροής, ο δεύτερος είναι η τοποθέτηση του μιλίσκου στο επιθυμητό βάθος και ο τρίτος είναι η στήριξη του υδρομετρητή. Υπάρχουν δύο τύποι ράβδων. Η μονή ράβδος και η δίδυμη. Η δεύτερη διευκολύνει πολύ τη μέτρηση γιατί απλουστεύει τη διαδικασία τοποθέτησης του μιλίσκου στο ζητούμενο βάθος μέτρησης. Το ένα σκέλος της δίδυμης ράβδου μένει σταθερά στον πυθμένα ενώ το δεύτερο σκέλος φέρει τον μιλίσκο στο σκοπούμενο βάθος μέτρησης.



**Σχήμα:** Αριστερά: μονή ράβδος στήριξης. Δεξιά: και δίδυμη ράβδος στήριξης (WMO, 2010)

#### 4.3.5 Επιθεώρηση και συντήρηση μιλίσκων

Πριν και μετά από κάθε μέτρηση παροχής, τα κύπελλα (κατακόρυφου άξονα) ή η έλικα (οριζόντιου άξονα), τα ημιαξόνια (κατακόρυφου άξονα) ή ο άξονας (οριζοντίου άξονα), και το έδρανο πρέπει να εξετασθούν για ζημιά, φθορά ή λανθασμένη ευθυγράμμιση. Σε περίπτωση ανάρτησης του από καλώδιο, πριν από τη χρήση του μιλίσκου, θα πρέπει να



ελεγχθεί η ισορροπία του, καθώς και η ευθυγράμμιση του στροφείου. Όταν ο μιλίσκος αναρτηθεί, το καλώδιο του σήματος πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να μην επηρεάζει την ισορροπία του μετρητή και κυρίως το περιστρεφόμενο τμήμα. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ο μιλίσκος θα πρέπει να επιθεωρείται περιοδικά όταν είναι έξω από το νερό, για να βεβαιωθεί ότι περιστρέφεται ελεύθερα.

Ο μιλίσκος θα πρέπει να καθαρίζεται και να λιπαίνεται καθημερινά κατά τη χρήση (εκτός από αυτούς που λιπαίνονται με νερό). Εάν οι μετρήσεις γίνονται σε νερό με ιζήματα, ο μιλίσκος θα πρέπει να καθαριστεί αμέσως μετά από κάθε μέτρηση.

Μετά από την λίπανση, το στροφείο πρέπει να περιστραφεί για να βεβαιωθεί ότι λειτουργεί ελεύθερα. Εάν σταματήσει απότομα, πρέπει να αναζητηθεί και να διορθωθεί η αιτία του προβλήματος πριν από οποιαδήποτε χρήση. Η διάρκεια της περιστροφής πρέπει να καταγράφεται στις σημειώσεις πεδίου για τη μέτρηση της παροχής. Μια σημαντική μείωση της διάρκειας περιστροφής δείχνει ότι τα ρουλεμάν απαιτούν έλεγχο (π.χ. για τον Price rpgmy είναι κατ'ελάχιστο 45 δευτερόλεπτα). Στους μιλίσκους κατακόρυφου άξονα, το κάτω ημιαξόνιο απαιτεί αντικατάσταση πιο συχνά από τα άλλα μέρη του οργάνου και συνεπώς πρέπει να εξεταστεί μετά από κάθε μέτρηση. Το κάτω ημιαξόνιο και το ρουλεμάν του θα πρέπει να αποθηκεύονται χωριστά.

Για τους μιλίσκους οριζόντιου άξονα, πριν την αποθήκευση, η έλικα πρέπει να αφαιρεθεί και το λάδι να στραγγίσει από το σώμα του μιλίσκου. Εάν τα ρουλεμάν πρέπει να καθαριστούν, πρέπει να ξεπλυθούν με αλκοόλη ή βενζίνη. Τα ανταλλακτικά ρουλεμάν έχουν προστατευτική επίστρωση γράσου, το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί πριν τη χρήση τους. Πριν από τη χρήση του μιλίσκου πρέπει να προστεθεί καθαρό λάδι στο σώμα του. Η έλικα πρέπει να περιστραφεί για περίπου ένα λεπτό για να ελεγχθεί η κατάσταση των ρουλεμάν και για να κυκλοφορήσει σωστά το λάδι παντού.

#### **4.4 Ηλεκτρομαγνητική μέτρηση ταχύτητας (EMV)**

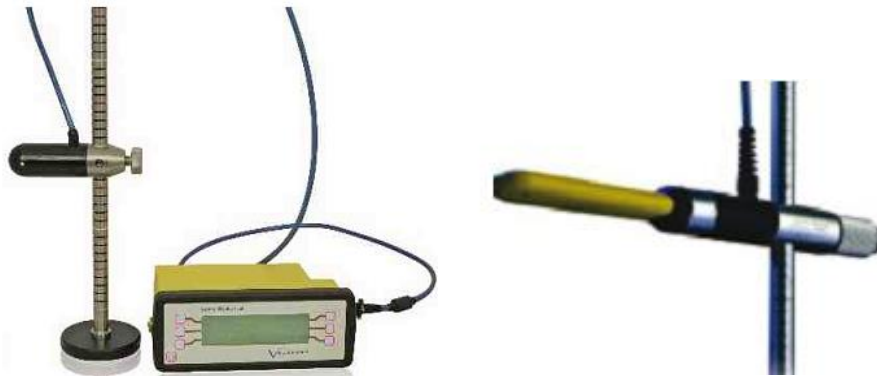
Οι ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές ροής δεν έχουν κινούμενα μέρη. Αυτοί οι μετρητές βασίζονται στην αρχή ότι ένας αγωγός (σε αυτή την περίπτωση το νερό) που κινείται εντός ενός μαγνητικού πεδίου θα παραγάγει ηλεκτρικό ρεύμα, και άρα ένα νέο μαγνητικό πεδίο που παραμορφώνει το αρχικό. Η ταχύτητα του νερού εκτιμάται από αυτήν την παραμόρφωση.

Δοκιμές έχουν δείξει ότι οι ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές έχουν μεγαλύτερη διακύμανση από τους κλασικούς μιλίσκους σε χαμηλές ταχύτητες. Ένας σημαντικός περιορισμός των ηλεκτρομαγνητικών μετρητών είναι ότι είναι ευαίσθητοι σε ηλεκτρικές παρεμβολές και απαιτούν δοκιμές καθορισμού της ευστάθειας σε μηδενικές ροές. Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρομαγνητικών μετρητών ταχύτητας ροής είναι τα ακόλουθα:

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη (άρα μικρότερη ανάγκη για συντήρηση).
- Μετρούν μόνο την συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλη με τον άξονα του αισθητήρα.
- Μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές ταχύτητες ροής (αλλά με χαμηλή ακρίβεια).

Σύμφωνα με Valerort (2018b), η ακρίβεια μέτρησης που επιτυγχάνει το μοντέλο 801 είναι  $\pm 0.5\%$  και η μεροληψία 5 mm/s, μετράει σε ελάχιστο βάθος 5 cm και ελάχιστες ταχύτητες της τάξης μερικά πολλαπλάσια της μεροληψίας.

Γενικά, οι ηλεκτρομαγνητικοί μετρητές υπερτερούν των μηχανικών, αλλά το βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι η τιμή τους είναι υπερδιπλάσια της τιμής των κλασικών μυλίσκων.



**Σχήμα:** Αριστερά: Valeport Model 801 (Valeport, 2018b). Δεξιά Ott nautilus C 2000 (WMO, 2010)

#### 4.5 Μετρητές ακουστικής μεθόδου Doppler (ADV)

Οι μετρητές αυτοί βασίζονται στο φαινόμενο Doppler (φαινόμενη μετατόπιση της συχνότητας ανάλογη με την ταχύτητα της πηγής ως προς τον παρατηρητή). Ο αισθητήρας είναι εμβαπτισμένος και εκπέμπει ακουστικά σήματα, τα οποία ανακλώνται σε διάφορα σωματίδια που υπάρχουν εντός του ρέοντος νερού, και μέσω της μετατόπισης της συχνότητας του ανακλώμενου κύματος υπολογίζεται η ταχύτητα. Ο υπολογισμός της ταχύτητας γίνεται βάσει της σχέσης:

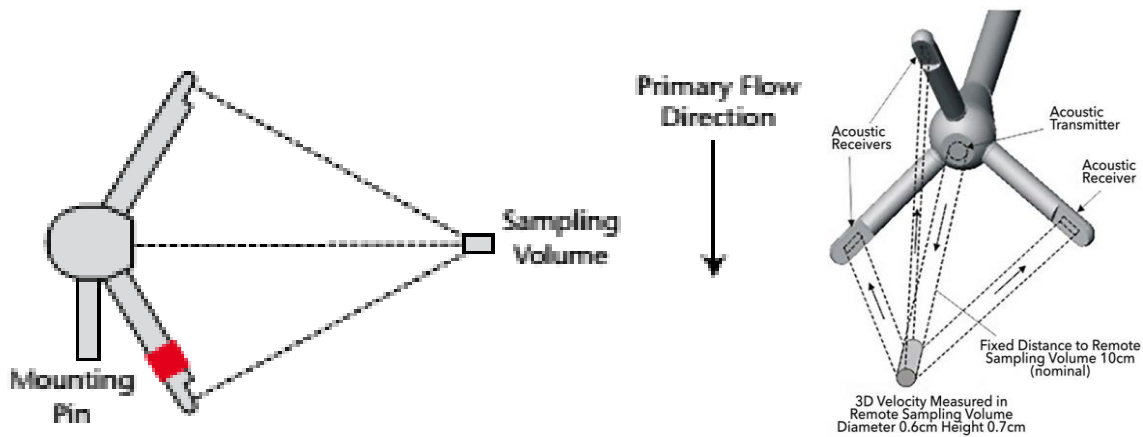
$$V = \Delta F / (2F) C$$

όπου,  $\Delta F$  είναι η διαφορά συχνότητας (λόγω φαινομένου Doppler) του ανακλώμενου κύματος ως προς αυτήν του εκπεμπόμενου,  $F$  η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος,  $C$  είναι η ταχύτητα του ήχου στο νερό (1400 – 1500 m/s), και  $V$  η ταχύτητα ροής.

Τα πλεονεκτήματα των μετρητών Doppler είναι:

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη.
- Διαταράσσουν ελάχιστα το πεδίο ροής.
- Οι ελάχιστες ταχύτητες μέτρησης φτάνουν τα 1.5 mm/s.
- Ελάχιστο βάθος ροής είναι έως και 3 cm.





**Σχήμα:** Αριστερά: μετρητής Doppler με δύο αισθητήρες (WMO, 2010). Δεξιά: Doppler με τρεις αισθητήρες (SonTek, 2018).

Υπάρχουν και μετρητές Doppler με 3 αισθητήρες που επιτρέπουν την πλήρη καταγραφή του διανύσματος της ταχύτητας ροής. Σύμφωνα με την SonTek (2018), η ακρίβεια ενός τέτοιου οργάνου είναι  $\pm 1\%$  και  $\pm 1 \text{ mm/s}$ , ενώ η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να μετρήσει είναι  $4.5 \text{ m/s}$ .

Ένα ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στις μετρήσεις με μετρητές Doppler είναι ότι οι ακουστικές δέσμες συγκλίνουν σε απόσταση  $10 \text{ cm}$  από τους αισθητήρες, από όπου και το ανακλώμενο ηχητικό κύμα λαμβάνεται υπόψη στη μέτρηση. Αν εντός αυτών των  $10 \text{ cm}$  υπάρχει κάποιος σταθερός όγκος, τότε η ταχύτητα που δίνει το όργανο μπορεί να επηρεαστεί. Ένα ακόμα μειονέκτημα των μετρητών Doppler είναι το κόστος τους που είναι ακόμα μεγαλύτερο από αυτό των ηλεκτρομαγνητικών.

#### 4.6 Ραντάρ μέτρησης επιφανειακής ταχύτητας (SVR)

Η επιφανειακή ταχύτητα μπορεί να μετρηθεί με την χρήση ραντάρ ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της σκέδασης Bragg, σύμφωνα με το οποίο κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού, με μήκος κύματος ίσο με το μισό αυτού ενός προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος, προκαλούν σκέδαση του δεύτερου. Κατά συνέπεια, το μήκος κύματος κυματισμού που προκαλεί την σκέδαση εξαρτάται από την συχνότητα του ραντάρ και είναι περίπου  $15 \text{ cm}$  για ραντάρ δέσμης φάσματος X ( $10 \text{ GHz}$ ) και  $6 \text{ cm}$  για ραντάρ δέσμης φάσματος K ( $24 \text{ GHz}$ ). Η ακριβής σχέση μεταξύ μήκους κύματος προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $\lambda$ , γωνίας ζενίθ  $\theta_0$  (η γωνία που σχηματίζει η στόχευση του ραντάρ με την κατακόρυφο), και μήκους κύματος κυματισμού  $\lambda_b$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\lambda_b = \lambda / (2 \sin \theta_0)$$

Ο υπολογισμός της ταχύτητας γίνεται εξετάζοντας τη μεταβολή της συχνότητας του κύματος που επιστρέφει στο ραντάρ από την σκέδαση Bragg (βλέπε σχετικά με φαινόμενο Doppler πιο πάνω).

Οι Costa et al. (2006) συνέκριναν τρία ραντάρ: ένα συνεχόμενου κύματος μικροκυματικό ραντάρ δέσμης φάσματος B (RiverScat), ένα παλμικό μικροκυματικό ραντάρ δέσμης φάσματος X (RiverRad), και ένα ραντάρ UHF (RiverSonde).



**Σχήμα:** Αριστερά RiverScat (Costa et al., 2006) και GPR αναρτημένα από καλώδιο, κέντρο RiverRad (AIRS, 2018), δεξιά RiverSonde (RiverSonde, 2008)

Για να αξιολογήσουν τα τρία αυτά όργανα ως προς την ακρίβεια τους, οι Costa et al. (2006) υπολόγισαν τον συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων παροχών από τα ραντάρ και των παροχών όπως προκύπτουν από καμπύλη στάθμης παροχής. Οι συντελεστές συσχέτισης για τα RiverScat (σταθερό σε γέφυρα), RiverRad, και RiverSonde ήταν 0.883, 0.969 και 0.992 αντίστοιχα.

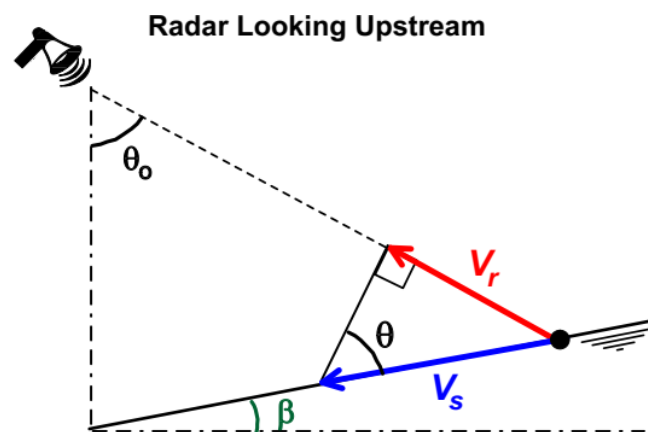
Η περαιτέρω διερεύνηση που έκαναν οι Costa et al. (2006) αφορά το κατά πόσον μπορεί να επιτευχθεί μέτρηση παροχής χωρίς καμία επαφή με το νερό. Η μέτρηση της ταχύτητας και της στάθμης γίνεται με τα τρία ραντάρ που περιγράφηκαν πριν. Η αποτύπωση της διατομής γίνεται με ραντάρ GPR το οποίο λειτουργεί στα 100 MHz και έχει βάρος 30 κιλά. Ως εκ τούτου απαιτείται ανάρτηση του από καλώδια, για να μπορεί να σαρώσει όλο το μήκος της διατομής. Η μεγάλη δυσκολία που αντιμετώπισαν οι Costa et al. (2006) ήταν ερμηνεία των καταγραφών του GPR εξαιτίας της διακύμανσης της αγωγιμότητας του νερού (από 300 έως 600 mS/cm για τον ποταμό San Joaquin στην Καλιφόρνια). Παρόλα αυτά, η ακρίβεια που πέτυχαν για την ταυτόχρονη ανάρτηση RiverScat και GPR από καλώδιο (βλέπε πιο πάνω σχήμα) ήταν 1.4% σε σχέση με εκτίμηση παροχής από καμπύλη στάθμης-παροχής.

Πέρα από τα ραντάρ που απαιτούν μόνιμη εγκατάσταση είτε στην όχθη, είτε σε κάποια γέφυρα είτε σε καλώδιο, υπάρχουν και ραντάρ χειρός που βασίζονται στη σκέδαση ηλεκτρομαγνητικού κύματος Bragg. Ένα τέτοιο φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το ραντάρ αυτό είναι συνεχούς κύματος, μικροκυματικό Κ φάσματος. Η επιλογή αυτή έχει απλούστερα ηλεκτρονικά και με αυτόν τον τρόπο επιφέρει μείωση του κόστους, δεν προσφέρει όμως την δυνατότητα να μετράει την απόσταση του ραντάρ από τον στόχο. Το κόστος ενός τέτοιου ραντάρ είναι της τάξης μεγέθους ενός μηχανικού μυλίσκου.



**Σχήμα:** Ραντάρ SVR χειρός (Tamari et al., 2013).

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, ο υπολογισμός της ταχύτητας γίνεται βάσει του φαινομένου Doppler που παρατηρείται στην επιστρεφόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω σκέδασης στους μικροκυματισμούς της επιφάνειας. Η ταχύτητα που υπολογίζεται από το φαινόμενο πρέπει να διορθωθεί για να ληφθεί υπόψη η γωνία ζενίθ του οργάνου  $\theta_0$ . Γι' αυτόν τον λόγο, τα ραντάρ χειρός ενσωματώνουν 3D αισθητήρα επιτάχυνσης για να μπορούν να καθορίζουν την κλίση στόχευσης του οργάνου. Επίσης αν η κλίση  $\beta$  της επιφάνειας του νερού είναι σημαντική, πρέπει και αυτή να ληφθεί υπόψη. Η γεωμετρία που σχετίζεται με αυτές τις διορθώσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, σύμφωνα με το οποίο  $\theta = \theta_0 - \beta$  και  $V_s = V_r / \sin \theta$ .

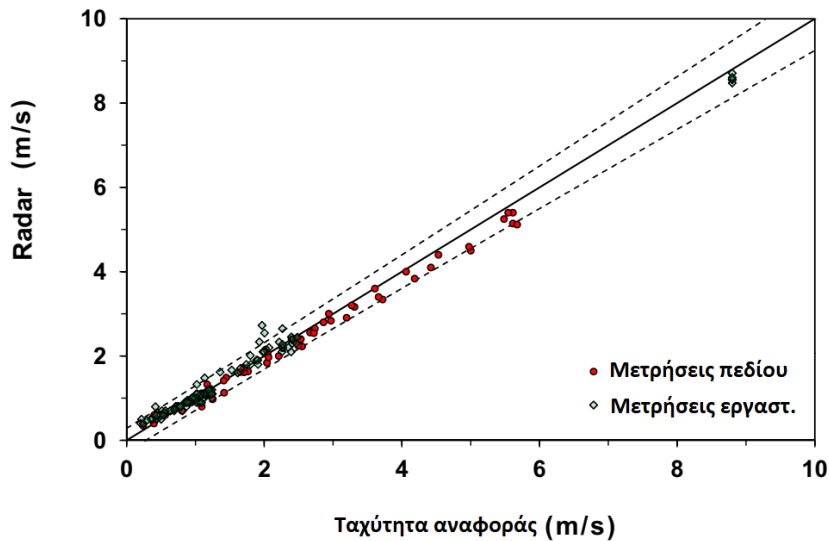


**Σχήμα:** Γεωμετρία γωνιών που υπεισέρχονται στη χρήση ραντάρ χειρός SVR (Tamari et al., 2013)

Οι Tamari et al. (2013) διεξήγαγαν σειρά μετρήσεων με σκοπό να αξιολογήσουν ένα εμπορικό ραντάρ χειρός. Οι δοκιμές τους κάλυψαν ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων (από 0.3 έως τουλάχιστον 6 m/s) και τύπους καναλιών/υδατορεμάτων. Το ραντάρ ήταν σε θέση να εκτιμήσει την ταχύτητα του νερού με ακρίβεια  $\pm 0.3$  m/s στις μέσες ταχύτητες (από 0.3 έως 3 m/s) και  $\pm 10\%$  σε μεγάλες ταχύτητες (διάστημα εμπιστοσύνης 95%). Παρόλο που αυτό

δεν είναι πολύ ακριβές, η ευκολία χρήσης καθιστά τα ραντάρ χειρός ελκυστικά για την ταχεία εκτίμηση της παροχής, ειδικά σε θέσεις με δύσκολη πρόσβαση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι, υπό ορισμένες συνθήκες, οι Tamari et al. (2013) διαπίστωσαν ότι το ραντάρ χειρός εισάγει συστηματικά σφάλματα. Το πιο χαρακτηριστικό είναι ότι η χρήση του ραντάρ σε πολύ χαμηλές γωνίες ζενίθ υποεκτιμά την ταχύτητα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο αρκετά μεγάλο πλάτος δέσμης του ραντάρ. Επίσης το ραντάρ έτεινε να υποεκτιμά την ταχύτητα όταν η στόχευση γίνονταν προς τα κατάντη. Τα σφάλματα που μετρήθηκαν για διάφορες συνθήκες χρήσης του ραντάρ φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα:** Ακρίβεια μετρήσεων ταχύτητας με ραντάρ χειρός (Tamari et al., 2013)

#### 4.7 Οπτικές μέθοδοι

Ένας οπτικός μετρητής είναι μια συσκευή σχεδιασμένη για την μέτρηση των επιφανειακών ταχυτήτων σε ανοικτά κανάλια χωρίς να βυθίζεται εξοπλισμός στην ροή. Ωστόσο, επειδή μετρά μόνο την επιφανειακή ταχύτητα, δεν θεωρείται υποκατάστατο του συμβατικού εξοπλισμού σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου μπορούν να γίνουν καλές μετρήσεις με τις κλασικές τεχνικές. Πρόκειται για μια λύση που έχει επεκτείνει τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων παροχής σε μια σειρά συνθηκών στις οποίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένες τεχνικές, όπως για παράδειγμα ταχύτητες ροής που είναι εκτός ορίων μέτρησης της συμβατικής μεθόδου ή που παρουσιάζουν τέτοια στερεοπαροχή που καθιστά επικίνδυνη την βύθιση ενός μολίσκου (ακόμα και στις περιπτώσεις που αυτός αναρτάται από συρματοσχοίνο).

Η μετρημένη επιφανειακή ταχύτητα πρέπει να διορθωθεί με έναν κατάλληλο συντελεστή για να αντιπροσωπεύει την μέση ταχύτητα της κατακόρυφου. Ο ακριβής συντελεστής που εφαρμόζεται είναι μοναδικός για το συγκεκριμένο ρεύμα και για την θέση της κατακόρυφης στην διατομή της ροής. Ωστόσο, η πράξη έχει δείξει ότι εφαρμογή ενός συντελεστή 0.90 δεν θα εισάγει σφάλματα άνω του  $\pm 5\%$  σε κανάλια με επένδυση σκυροδέματος. Για τα φυσικά κανάλια η καλύτερη τιμή του συντελεστή είναι 0.85.

Ο μετρητής είναι μια στροβοσκοπική συσκευή που αποτελείται από ένα τηλεσκόπιο χαμηλής ισχύος, ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο που κινείται από έναν κινητήρα με ρυθμιζόμενη ταχύτητα και ένα στροφόμετρο. Η επιφάνεια του νερού στοχεύεται από πάνω μέσω του μετρητή, αλλάζοντας σταδιακά την ταχύτητα του κινητήρα για να επιφέρει ένα είδος συγχρονισμού της γωνιακής ταχύτητας του κατόπτρου με την κίνηση του νερού. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται όταν η μετατόπιση των διαταραχών στην επιφάνεια του νερού, όπως φαίνεται μέσα από τον μετρητή, σταματά. Η ανάγνωση του στροφόμετρου και του ύψους του μετρητή πάνω από την επιφάνεια του νερού είναι τα μόνα στοιχεία που απαιτούνται για τον υπολογισμό της επιφανειακής ταχύτητας.



**Σχήμα:** Στροβοσκοπική οπτική μέθοδος (WMO, 2010)

Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι  $\pm 5\%$  για τις ελάχιστες ταχύτητες που μπορούν να μετρηθούν. Αυτές εξαρτώνται από το ύψος τοποθέτησης του οργάνου και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Το σφάλμα είναι μικρότερο για μεγαλύτερες ταχύτητες.

**Πίνακας:** Ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα μέτρησης στροβοσκοπικής μεθόδου ανάλογα με το ύψος οργάνου

Ύψος οργάνου (m)	Μέγιστη ταχύτητα (m/s)	Ελάχιστη ταχύτητα (m/s)
0.30	1.52	0.09
0.61	3.05	0.18
1.52	7.62	0.49
3.05	15.2	0.98
4.57	22.9	1.46
6.10	30.5	1.95

## 4.8 Πλωτήρες

Οι πλωτήρες έχουν πολύ περιορισμένη χρήση στη μέτρηση της ροής, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου απαιτούνται μετρήσεις ροής και η δομή μέτρησης έχει καταστραφεί ή είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί μετρητής. Συνηθισμένοι τύποι είναι οι επιφανειακοί πλωτήρες και οι ράβδοι. Οι επιφανειακοί πλωτήρες μπορεί να είναι σχεδόν οτιδήποτε, όπως ξύλινοι δίσκοι, μπουκάλια μερικώς γεμάτα, ακόμα και πορτοκάλια. Τα επιπλέοντα φερτά της ροής μπορούν να χρησιμεύσουν επίσης ως φυσικοί πλωτήρες. Οι ράβδοι είναι συνήθως από ξύλο, με βάρος στο ένα άκρο έτσι ώστε να πλέουν κατακόρυφα στο ρεύμα. Είναι σημαντικό να εξασφαλισθεί ότι οι ράβδοι δεν θα αγγίξουν τον πυθμένα.

Δύο διατομές επιλέγονται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος του ρέματος για την μέτρηση της ροής. Οι διατομές πρέπει να έχουν ικανή απόσταση, ώστε να μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια ο χρόνος που χρειάζεται για να περάσει ο πλωτήρας από τη μία διατομή στην άλλη. Συνιστάται χρόνος διαδρομής τουλάχιστον 20 δευτερολέπτων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικρότερος χρόνος για μικρά ρέματα με υψηλές ταχύτητες όπου είναι αδύνατο να επιλεγεί κατάλληλο μήκος ευθύγραμμου καναλιού. Η άκρες των δύο διατομών πρέπει να εξασφαλίζονται με πασσάλους (ή σε άλλους δείκτες) σε κάθε όχθη. Αυτά τα σημεία θα χρησιμοποιηθούν σε μεταγενέστερη ημερομηνία, όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες, για να αποτυπωθούν οι σωστές διατομές και να μετρηθεί η απόσταση μεταξύ των. Οι επιφάνειες των διατομών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μέσης διατομής του τμήματος μέτρησης.

Για την μέτρηση κατανέμεται ομοιόμορφα ένας αριθμός πλωτήρων, σημειώνοντας την θέση του καθενός σε σχέση με την όχθη. Θα πρέπει να τοποθετούνται αρκετά ανάντη από την πρώτη διατομή, έτσι ώστε να αποκτήσουν την ταχύτητα του ρεύματος πριν φτάσουν στην πρώτη διατομή. Ένα χρονόμετρο δίνει τη διάρκεια της διαδρομής μεταξύ των δύο διατομών. Η απόσταση του κάθε πλωτήρα από την όχθη σημειώνεται καθώς περνάει τη δεύτερη διατομή.

Η ταχύτητα του πλωτήρα είναι ίση με την απόσταση μεταξύ των διατομών δια τον χρόνο της διαδρομής. Η μέση ταχύτητα ροής στην κατακόρυφο είναι ίση με την ταχύτητα πλωτήρα πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή που βασίζεται στο σχήμα της κατακόρυφης κατανομής των ταχυτήτων και του σχετικού βάθους της εμβάπτισης του πλωτήρα. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας συντελεστής περίπου 0.85 για την μετατροπή της επιφανειακής ταχύτητας σε μέση ταχύτητα. Ο συντελεστής για πλωτήρες ράβδων κυμαίνεται από 0.85 έως 1.00 ανάλογα με το σχήμα της διατομής, το μήκος της ράβδου και την κατανομή των ταχυτήτων.

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της παροχής είναι παρόμοια με αυτή για μια συμβατική μέτρηση με μυλίσκο. Η παροχή σε κάθε μερική διατομή (κάθε ένα από του πλωτήρες που απελευθερώθηκαν ταυτόχρονα καταλαμβάνει μια μερική διατομή) υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την μέση επιφάνεια του μερικού τμήματος με την μέση ταχύτητα στην κατακόρυφο για το μερικό αυτό τμήμα. Η συνολική παροχή είναι ίση με το άθροισμα των παροχών για όλα τα μερικά τμήματα.

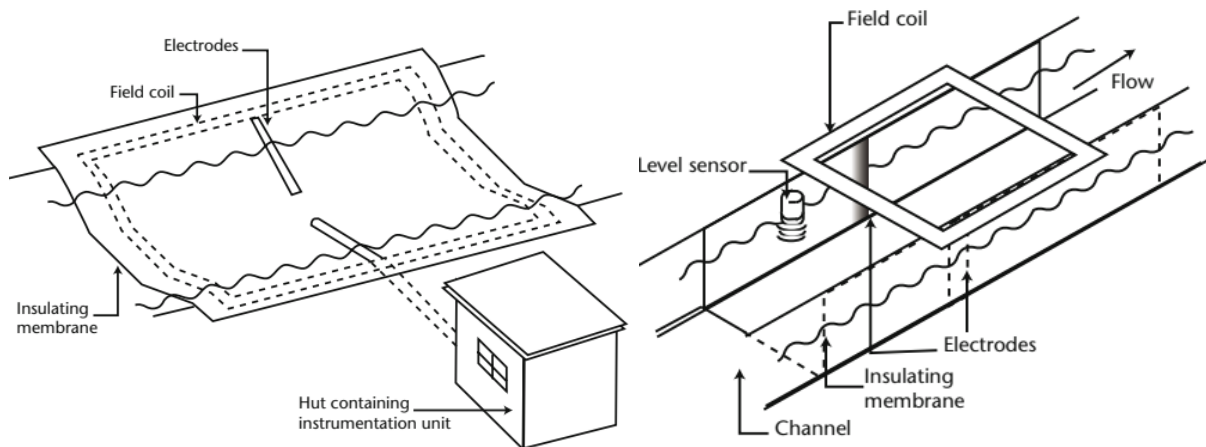
Οι μετρήσεις παροχής που πραγματοποιούνται με πλωτήρες υπό ευνοϊκές συνθήκες μπορεί να έχουν ακρίβεια  $\pm 10\%$ . Ο αέρας μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς την ακρίβεια λόγω της επίδρασής στην ταχύτητα των πλωτήρων, ειδικά αν η ταχύτητα ροής είναι πολύ αργή. Εάν έχει επιλεγεί μια ανεπαρκής προσέγγιση και δεν έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές



χρονομετρήσεις από διαδρομές πλωτήρων, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μπορεί πέσει στο  $\pm 25\%$ .

#### 4.9 Δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο σύνολο διατομής

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο είναι η αντίληψη που σχηματίζει ένας παρατηρητής που κινείται εντός της ροής του υδατορέματος και εισέρχεται στο σταθερό μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται σε μια διατομή. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται έχει δυναμικό ανάλογο της ταχύτητας ροής, του πλάτους της διατομής, και της έντασης το μαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα:** Εγκατάσταση για μέτρηση με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε όλο το μήκος της διατομής. Αριστερά φυσική διατομή, δεξιά τεχνητό κανάλι (WMO, 2010)

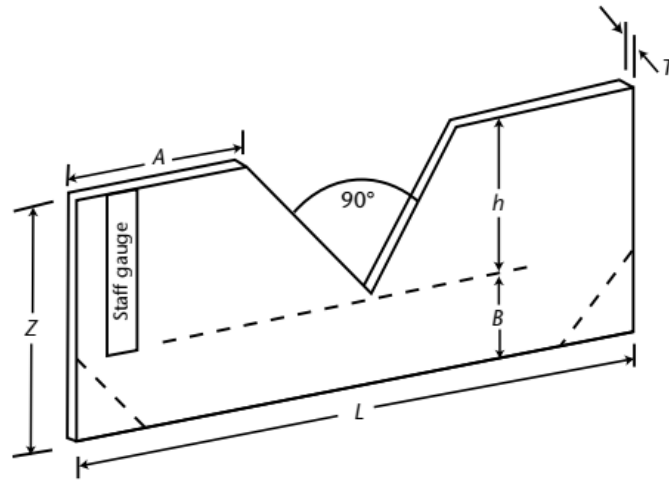
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται γι' αυτήν την μέθοδο. Η μέθοδος απαιτεί την εφαρμογή ενός μονωτικού υλικού στον πυθμένα για να αποφευχθεί η δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος, το οποίο μπορεί να μειώσει σημαντικά το δημιουργούμενο ηλεκτρικό δυναμικό. Ενδεικτικά, ένα πηνίο που καλύπτει διατομή στην οποία η ταχύτητα ροής είναι  $1 \text{ m/s}$ , έχει 500 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $1 \text{ A}$  θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δυναμικού τάσεως  $500 \text{ mV}$ . Αυτή η μέθοδος μπορεί να επιτύχει ακρίβεια μέχρι και  $\pm 2\%$ .

#### 4.10 Διατομές ελέγχου

Για χαμηλές ροές σε μικρά βάθη μπορούν να χρησιμοποιηθούν φορητά φράγματα όπως αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που φέρει άνοιγμα τύπου V  $90^\circ$ . Ένα τέτοιο φράγμα διαστάσεων  $1 \times 0.5 \text{ m}^2$  έχει βάρος περίπου 10 κιλά.

Για να τοποθετηθεί η λαμαρίνα σε ένα κανάλι με πυθμένα άμμου ή λάσπης τα μόνα απαιτούμενα εργαλεία είναι ένα αλφάδι και ένα φτυάρι. Η λαμαρίνα μπηγεται στην κοίτη και ράβδοι περασμένες μέσα από κρίκους βιδωμένους στη λαμαρίνα σε κάθε άκρο της βοηθούν στο να σταθεροποιηθεί και να λειτουργήσει ως φράγμα. Το αλφάδι χρησιμοποιείται για να κάνει την κορυφή της λαμαρίνας οριζόντια. Φερτά υλικά σωρρεύονται στα άκρα και το κάτω μέρος του φράγματος εμποδίζοντας τις διαφυγές. Ένας

καμβάς τοποθετείται αμέσως κατάντη για να αποτρέψει την εκσκαφή από την πτώση του πίδακα. Συνήθως ένα άτομο είναι αρκετό για να μετρήσει με ένα φράγμα αυτού του τύπου.



**Σχήμα:** Φορητό φράγμα με άνοιγμα τύπου V 90° (WMO, 2010)

Μια σταδία τοποθετείται ανάντη του φράγματος σε απόσταση 1 μέτρου και με το 0 στην κορυφή (η γωνία 90°) του τριγωνικού ανοίγματος. Η ροή θα πρέπει να σταθεροποιηθεί πριν την μέτρηση. Το ύψος της στάθμης θα πρέπει να διαβάζεται σε μεσοδιαστήματα για μια περίοδο περίπου 3 λεπτών και μια μέση τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιείται στην εξίσωση για τον υπολογισμό της παροχής. Η παροχή που διέρχεται από το άνοιγμα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q = C h^{2.5}$$

όπου  $C$  είναι ένας συντελεστής (λαμβάνεται ίσος με 1.36 συνήθως) και  $h$  είναι η στάθμη που μετράει η σταδία.

Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να μετρηθούν παροχές από 0.0005 έως 0.05 m<sup>3</sup>/s και με σφάλματα που στην καλύτερη περίπτωση μπορεί να φτάσει το 3%.

Για ακόμα πιο μικρές παροχές μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατασκευή σύγκλισης ροής που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα:** Μέτρηση χαμηλών παροχών με κατασκευή σύγκλισης ροής (WMO, 2010)



Η παροχή μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο.

$$Q = C h^{1.5}$$

όπου  $h$  η στάθμη στο τμήμα σύγκλισης της ροής. Η ακρίβεια αυτής της μεθόδου είναι 2%.

#### 4.11 Διάλυση ουσίας

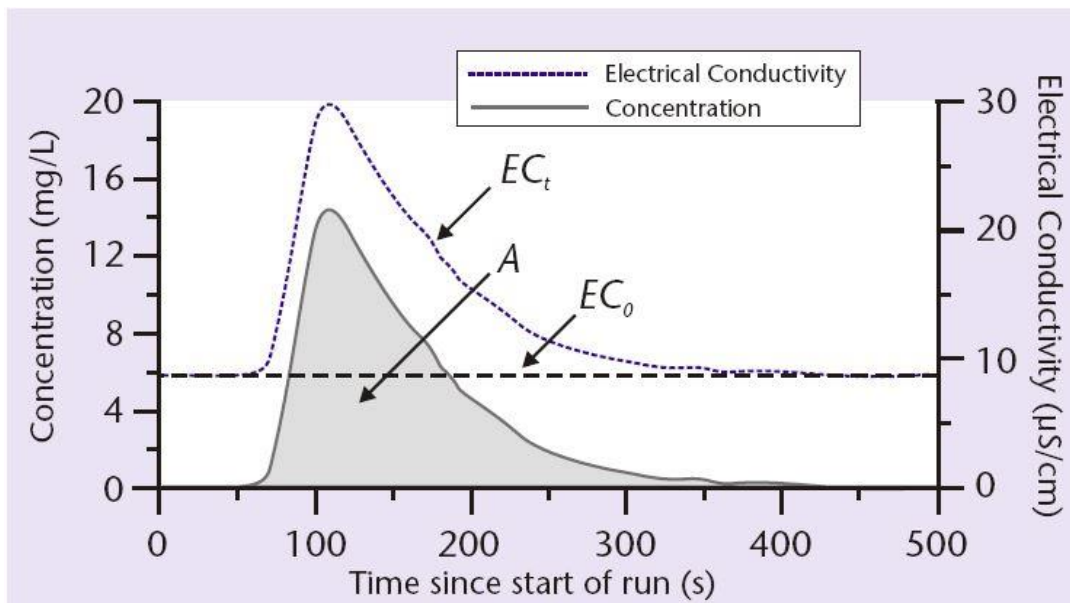
Η μέτρηση παροχής μέσω μέτρησης διαλελυμένης ουσίας είναι ιδανική για τις περιπτώσεις όπου είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι, λόγω μεγάλων ταχυτήτων και φερτών, όπου η ροή είναι μη προσβάσιμη, όπου η διατομή αλλάζει συνεχώς ακόμα και κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης, κλπ. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι μέτρησης παροχής μέσω διάλυσης ουσίας: η μέθοδος σταθερής διάθεσης της ουσίας-δείκτη και η μέθοδος ακαριαίας διάθεσης.

Η μέθοδος της ακαριαίας διάθεσης είναι η λιγότερο απαιτητική από άποψη εξοπλισμού. Στη μέθοδο αυτή γίνεται ακαριαία απελευθέρωση μέσα στη ροή ενός δείκτη, π.χ. αλατιού. Ακολούθως σε απόσταση  $L$  από το σημείο απελευθέρωσης γίνεται μέτρηση της συγκέντρωσης. Η απόσταση  $L$  ονομάζεται μήκος μίξης και η επιλογή του παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της μεθόδου. Ο γενικός κανόνας είναι ότι το  $L$  πρέπει να είναι από 10 μέχρι 25 φορές το μέσο πλάτος του υδατορέματος. Ο Sentlinger (2015) προτείνει το  $L$  να καθορίζεται μέσω προπαρασκευαστικής διαδικασίας συνεχούς απελευθέρωσης δείκτη (η απόσταση πέρα από την οποία δεν μεταβάλλεται η συγκέντρωση).

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του δείκτη (αλάτι), η οποία γίνεται μέσω μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Έχοντας ολοκληρώσει τη χάραξη του διαγράμματος συγκέντρωσης, το οποίο έχει εμβαδόν  $A$ , μπορεί να υπολογιστεί η παροχή από τον τύπο:

$$Q = M / A$$

όπου  $M$  είναι η μάζα του αλατιού που απελευθερώνεται σε γραμμάρια.

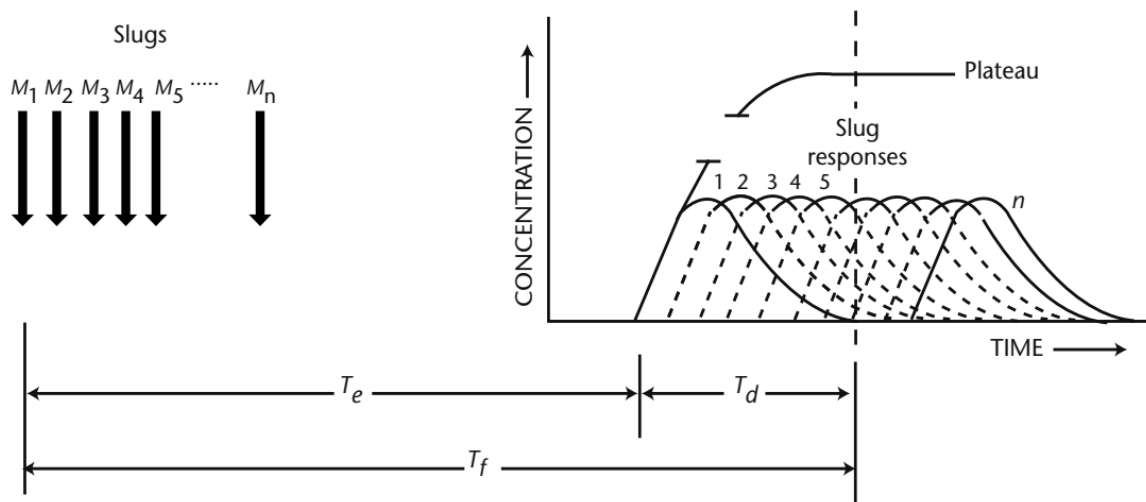


**Σχήμα:** Μέτρηση παροχής με ακαριαία απελευθέρωση δείκτη στη ροή (Hudson and Fraser, 2005)

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση του δείκτη είναι σημαντικό να γίνεται στο σωστό μήκος μίξης, διαφορετικά το εμβαδόν  $A$  εξαρτάται από τη θέση της διατομής στην οποία γίνεται η δειγματοληψία (αν η απελευθέρωση γίνεται στη μέση της διατομής, τότε, αν δεν επιτευχθεί πλήρης μίξη, η συγκέντρωση στις όχθες είναι χαμηλότερη). Για το θεωρητικό υπόβαθρο της αναμίξεως και διασποράς διαλελυμένων ουσιών σε επιφανειακά ύδατα και για πρακτικές συμβουλές σε συναφή θέματα με υδρομετρήσεις, βλέπε Fischer et al. (1979).

Η μέτρηση με ακαριαία απελευθέρωση έχει ορισμένες προϋποθέσεις για να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Καταρχάς, η βασική θεώρηση της πλήρους μίξης συνεπάγεται ότι υπάρχει ικανή τύρβη για να επιφέρει την επιθυμητή ανάμιξη. Αν το αλάτι με την απελευθέρωση του καθιζάνει στον πυθμένα, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Αν υπάρχει πυκνή βλάστηση εντός της κοίτης, τότε μπορεί να υπάρξει απορρόφηση του διαλυόμενου δείκτη από τα φυτά. Τέλος, αν υπάρχουν σημαντικές περιοχές όπου λιμνάζει το νερό, τότε ο δείκτης θα παραμένει σε αυτές τις περιοχές για σημαντικό διάστημα δίνοντας μεγάλες ουρές (αργή απόσβεση) στο διάγραμμα συγκέντρωση-χρόνος.

Η μέθοδος της συνεχούς απελευθέρωσης δείκτη με σταθερό ρυθμό φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Από μαθηματικής άποψης μπορεί να θεωρηθεί ότι ισοδυναμεί με μια αλληλουχία ακαριαίων απελευθερώσεων. Οι χαρακτηριστικοί χρόνοι είναι ο χρόνος άφιξης του δείκτη στο σημείο μετρήσεων  $T_e$  και ο χρόνος μέχρι τη σταθεροποίηση της συγκέντρωσης  $T_f$ . Για τον υπολογισμό της παροχής δεν είναι απαραίτητη η αποτύπωση της καμπύλης απόκρισης, όπως στη μέθοδο ακαριαίας απελευθέρωσης, αλλά αρκεί η μέτρηση της συγκέντρωσης όταν αυτή σταθεροποιείται.



**Σχήμα:** Μέτρηση παροχής με συνεχή απελευθέρωση δείκτη (WMO, 2010)

Η παροχή υπολογίζεται από τον τύπο:

$$q C = Q c$$

όπου  $q$  είναι η παροχή διάθεσης του διαλύματος (L/s),  $C$  είναι η συγκέντρωση του διαλύματος (mg/L),  $c$  (mg/L) είναι η σταθεροποιημένη συγκέντρωση, και  $Q$  (L/s) είναι η ζητούμενη παροχή.

Η απαιτούμενη διάρκεια της απελευθέρωσης δείκτη με σταθερό ρυθμό μπορεί να εκτιμηθεί από την καμπύλη απόκρισης της ακαριαίας απελευθέρωσης δείκτη. Η διάρκεια αυτή πρέπει να είναι ίση με την διάρκεια παρουσίας δείκτης στην καταγραφή ακαριαίας απελευθέρωσης  $T_d$ , συν όσος χρόνος χρειάζεται για να γίνει η μέτρηση της συγκέντρωσης.

Ενώ η απελευθέρωση σταθερού ρυθμού είναι ιδανική για χρήση σε χαμηλές ροές (κάτω από 100 L/s), η ακαριαία απελευθέρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει ροές μέχρι 10 m<sup>3</sup>/s ή και μεγαλύτερες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Η ακαριαία απελευθέρωση λειτουργεί καλά σε απότομες, πολύ τυρβώδεις ροές, όπως τα ορεινά κανάλια με διάσπαρτους ογκόλιθους (Moore, 2005). Η σταθερού ρυθμού απελευθέρωση γίνεται πάντα με τον δείκτη να είναι σε μορφή διαλύματος. Η ακαριαία απελευθέρωση μπορεί να γίνει με τον δείκτη είτε σε μορφή διαλύματος, είτε σε ξηρά μορφή (π.χ., κρυστάλλους αλατιού). Αν η συνθήκες ροής ευνοούν την μίξη, τότε η δεύτερη μέθοδος πλεονεκτεί γιατί είναι λίγο απλούστερη και γιατί μπορεί να εφαρμοστεί σε ροές μέχρι και 100 m<sup>3</sup>/s (Hudson and Fraser, 2005).

Η μέτρηση της συγκέντρωσης του δείκτη γίνεται έμμεσα μέσω της μέτρησης της αγωγιμότητας του νερού. Γι' αυτόν τον λόγο απαιτείται να είναι σημαντική η αύξηση της αγωγιμότητας λόγω της διάλυσης του άλατος. Σύμφωνα με τον Moore (2005), ορισμένοι ερευνητές προτείνουν αύξηση 50% ενώ άλλοι μέχρι και 500%. Ο Moore (2005) προτείνει ότι το 50% είναι ικανή αύξηση στην περίπτωση που οι αδιατάρακτες συνθήκες παρουσιάζουν αγωγιμότητες άνω των 100 μS/cm, ενώ 200% αύξηση σε περίπτωση που οι αδιατάρακτες συνθήκες παρουσιάζουν αγωγιμότητες κάτω των 50 μS/cm. Βάσει αυτών των παραδοχών οι Hudson και Fraser (2005) δίνουν την ανηγμένη (ως προς την παροχή) ποσότητα δείκτη που, ανάλογα με το μήκος μίξης, μεταβάλλεται από 0.5 έως 3 kg/(m<sup>3</sup>/s).

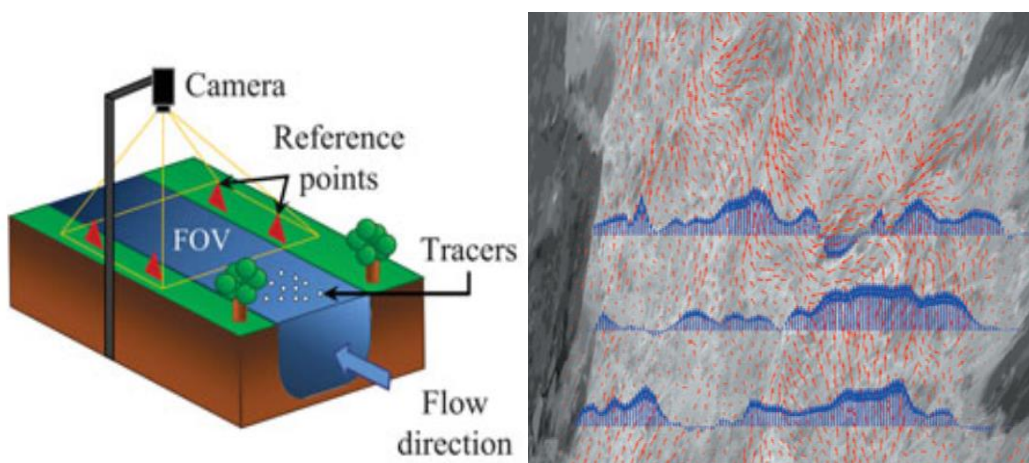
## 5 Προχωρημένες – “έξυπνες” μέθοδοι

### 5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται οι μέθοδοι που βασίζονται σε υψηλή τεχνολογία και επιτρέπουν την μέτρηση της παροχής χωρίς να απαιτείται να εμβαπτιστεί στη ροή οποιοδήποτε όργανο. Εκτός από την ακουστική μέθοδο με αισθητήρες Doppler σε σκαφίδι που επιπλέει στην επιφάνεια, οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν απαιτούν καμία επαφή με το υγρό στοιχείο.

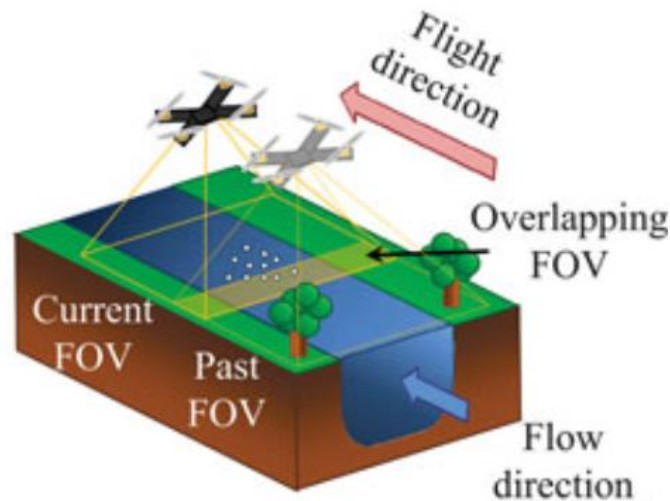
### 5.2 Μέτρηση ταχύτητας με οπτική μέθοδο (PIV, LSPIV)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην παρακολούθηση της τροχιάς διαφόρων τεμαχίων που επιπλέουν (particle image velocimetry, PIV). Για τη μέθοδο αυτή απαιτείται μια σταθερή κάμερα που καταγράφει από μακριά και συνεχώς την κίνηση των διαταραχών και των φερτών στην επιφάνεια του νερού σε μεγάλες διατομές ρεύματος. Ο εντοπισμός της κίνησης των ιχνών μεταξύ διαδοχικών εικόνων γίνεται χρησιμοποιώντας ανάλυση ετερο-συσχέτισης. Ξεκινώντας με την ένταση του γκρι μιας ομάδας εικονοστοιχείων στην πρώτη εικόνα, η μετατόπιση εκτιμάται με την εύρεση της ομάδας των ίδιων εικονοστοιχείων στην επόμενη εικόνα. Η εύρεση βασίζεται στην επιλογή της ομάδας που παρουσιάζει την υψηλότερη συσχέτιση με την ένταση του γκρι των εικονοστοιχείων της πρώτης φωτογραφίας. Τα διανύσματα ταχύτητας στη συνέχεια παράγονται διαιρώντας τα διανύσματα μετατόπισης με το χρονικό διάστημα μεταξύ των εικόνων (Hauet et al., 2008). Ένα μοναδικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να αποτυπώσει το πεδίο των ταχυτήτων ροής ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια του ποταμού που απεικονίζεται στις φωτογραφίες, το οποίο θα μπορούσε να έχει εφαρμογές στην επιστημονική και τεχνική ανάλυση σύνθετων συνθηκών ροής.



**Σχήμα:** Αριστερά: διάταξη για τη μέτρηση πεδίου ταχυτήτων σε εκτεταμένη επιφάνεια νερού. Δεξιά: με κόκκινα βέλη το πεδίο ταχυτήτων στην επιφάνεια, με μπλε βέλη η κατανομή κάθετων ταχυτήτων σε τρεις διατομές (Tauro et al., 2015)

Επεκτείνοντας αυτήν την τεχνική, οι Tauro et al. (2015) πρότειναν την πτήση μη επανδρωμένων σκαφών για τη λήψη διαδοχικών εικόνων κατά μήκος της ροής ενός υδατορέματος (κάτι παρόμοιο με την χρήση μη επανδρωμένων σκαφών για την κατασκευή ψηφιακού υποβάθρου με στερεοφωτογραμμετρία).



**Σχήμα:** Χρήση μη επανδρωμένου σκάφους για την εκτίμηση ταχυτήτων σε όλο το μήκος ενός τμήματος υδατορέματος (Tauro et al., 2015)

Οι Ran et al. (2016) συνδύασαν τη μέθοδο PIV με αυτόματη οπτική βαθυμετρία. Για το δεύτερο χρησιμοποίησαν μια 3D φωτογραφία του πυθμένα (δύο λήψεις του πυθμένα από διαφορετικές οπτικές γωνίες) και εφάρμοσαν μετασχηματισμούς, που είναι γνωστοί ως DLT, για να αντιστοιχίσουν τις συντεταγμένες πάνω στη φωτογραφία με πραγματικές συντεταγμένες. Αυτό έδωσε τη δυνατότητα να μπορεί να εξαχθεί η γεωμετρία οποιασδήποτε διατομής εντός της φωτογραφίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί αυτόματα να υπολογιστεί, μέσω του επιπέδου πλήρωσης μιας διατομής, τα βάθος ροής, το οποίο συνδυαζόμενο με τη μέθοδο PIV δίνει την παροχή. Οι Ran et al. (2016) βρήκαν ότι αυτή η μέθοδος έχει γενικά σφάλμα κάτω του 8% αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις που υπάρχει λεία και καθαρή επιφάνεια (σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος δυσκολεύεται να εντοπίσει την επιφάνεια του νερού) το σφάλμα μπορεί να ανέβει και στο 16%.

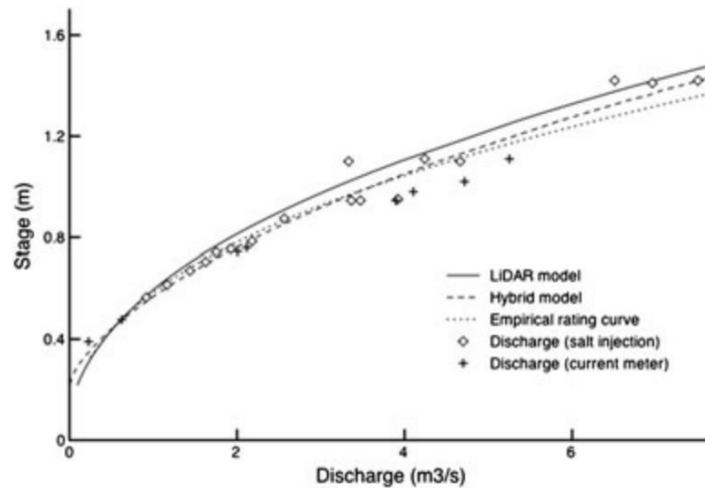
### 5.3 Απεικόνιση με laser (LiDAR, Light Detection And Ranging)

Η τεχνολογία LiDAR προσφέρει μια μέθοδο απεικόνισης αναγλύφου βασιζόμενη στη στόχευση του εδάφους με παλμικό laser και ακολούθως την καταγραφή των ανακλώμενων παλμών σε αισθητήρα. Για την ανάλυση του σήματος που λαμβάνουν οι αισθητήρες, με στόχο να καθοριστεί η απόσταση από την επιφάνεια ανάκλασης, υπάρχουν δύο μέθοδοι: η άμεση μέθοδος ανίχνευσης ενέργειας, που μετρά την αλλαγή στο εύρος ταλάντωσης του ανακλώμενου φωτός, και η συνεπής μέθοδος που χρησιμοποιεί οπτικό ετερόδυνο αισθητήρα.

Οι Nathanson et al. (2012) χρησιμοποίησαν δεδομένα LiDAR για να κατασκευάσουν την τοπογραφία ενός υδατορρέυματος. Το όργανο αναρτήθηκε σε ένα ελικόπτερο που έκανε πτήση πάνω από την περιοχή μελέτης στα 500-250 μέτρα. Η πυκνότητα δειγματοληψίας ήταν 5-10 σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων,



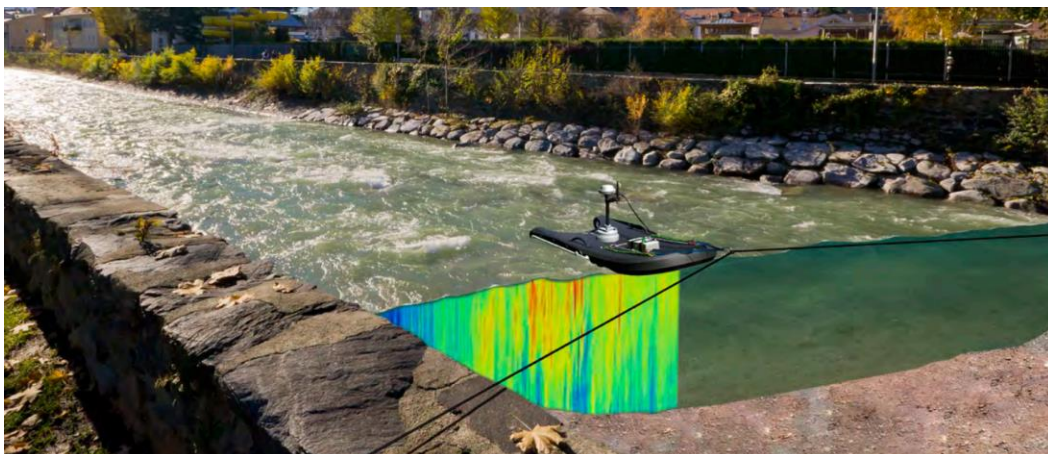
προέκυψε πληροφορία υψομέτρου για 472000 σημεία για την περιοχή μελέτης 160×160 τετραγωνικών μέτρων. Ακολουθώντας, βάσει μίας μόνο μέτρησης παροχής έγινε η εκτίμηση της μέσης τραχύτητας του υδατορέματος. Τέλος, επιλύθηκε η δισδιάστατη διαφορική εξίσωση των Kean and Smith (2005) για διάφορα βάθη ροής, θεωρώντας μια μέση υδραυλική κλίση, το οποίο έδωσε διάφορες ταχύτητες, που, με γνωστή τη γεωμετρία της διατομής, μεταφράζονται άμεσα σε παροχή. Αυτό έδωσε μια συνθετική καμπύλη στάθμης-παροχής, η οποία σύμφωνα με τους Nathanson et al. (2012) έχει τα περισσότερα από τα τμήματα της συνθετικής καμπύλης να είναι εντός των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% της καμπύλης που κατασκευάζεται από μετρήσεις.



**Σχήμα:** Σύγκριση συνθετικής καμπύλης στάθμης-παροχής (LiDAR) με καμπύλη που έχει καταρτιστεί με πραγματικές μετρήσεις παροχής (Nathanson et al., 2012)

#### 5.4 Ακουστική μέθοδος Doppler καταγραφής προφίλ ταχυτήτων (ADCP)

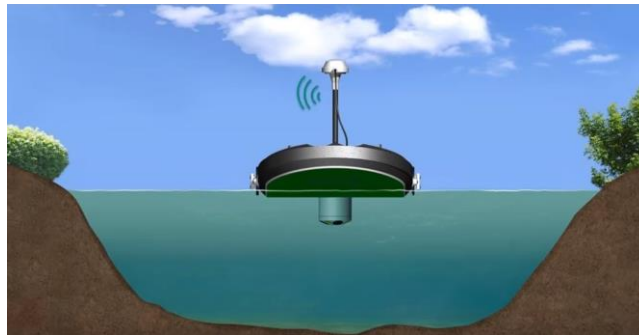
Για τη μέθοδο αυτή εξοπλίζεται ένας μικρός πλωτήρας (σκαφίδιο) με έναν ακουστικό πολυαισθητήρα που κάνει ταυτόχρονα τρεις λειτουργίες: καταγράφει το κατακόρυφο προφίλ ταχυτήτων, και μετράει το βάθος του πυθμένα, μετράει την ταχύτητα κίνησης του σκαφιδιού. Μέσω της τελευταίας λειτουργίας (μέτρηση ταχύτητας σκαφιδιού) μπορεί να εντοπιστεί και η θέση του στη διατομή.



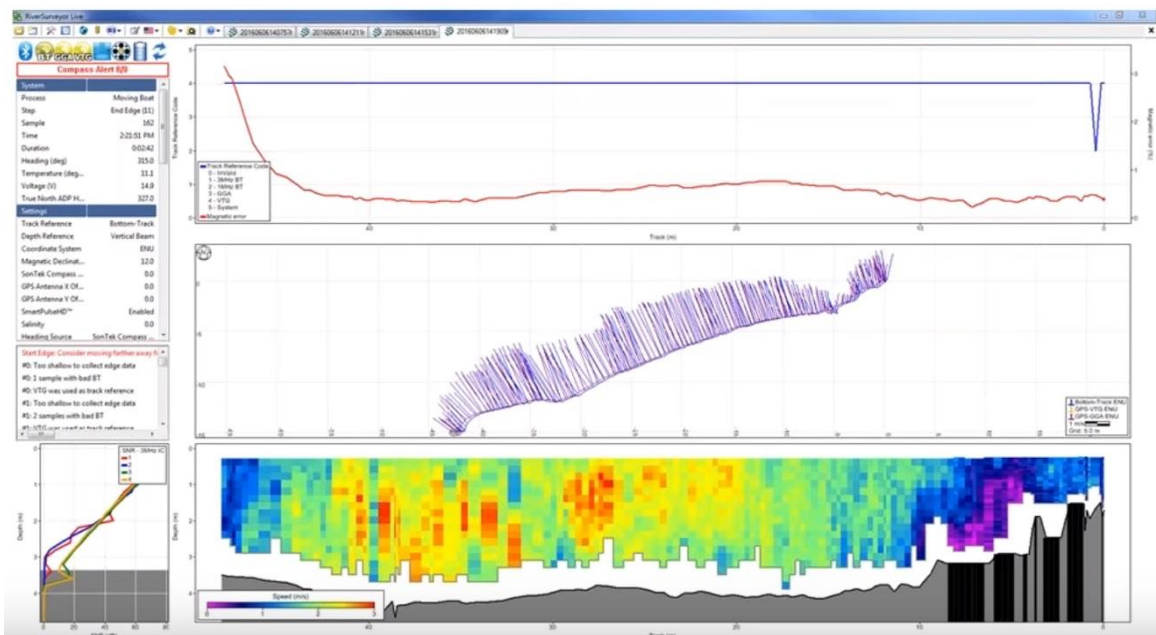
**Σχήμα:** Σάρωση διατομής με RiverSurveyor SonTek (2018b)

Για τον λόγο αυτό στο σκαφίδι ενσωματώνονται:

- ακουστικός πολυαισθητήρας που εκπέμπει 5 ακουστικές δέσμες (συχνότητας λίγων MHz), 1 κατακόρυφη δέσμη για ακριβή μέτρηση βάθους, και 4 δέσμες σε γωνία 25° μεταξύ τους, που, βασιζόμενες στο φαινόμενο Doppler, δίνουν εκτίμηση ταχύτητας ροής (ανάκλαση από φερτά ροής) και ταχύτητας κίνησης σκαφιδίου (ανάκλαση από πυθμένα),
- πυξίδα για σωστή καταγραφή του προσανατολισμού του σκαφιδίου (και άρα του διανύσματος των ταχυτήτων),
- διαφορικό σύστημα δορυφορικού εντοπισμού θέσης (DGPS), που χρησιμοποιείται εναλλακτικά ή σε συνδυασμό με το σύστημα εντοπισμού θέσης στη διατομή μέσω της ακουστικής μεθόδου,
- σύστημα τηλεμετρίας για μετάδοση των μετρήσεων στον υπολογιστή πεδίου.



**Σχήμα:** Εξοπλισμός σκαφιδίου με τα απαραίτητα ηλεκτρονικά όργανα. Στο τμήμα πάνω από την επιφάνεια του ύδατος, η κεραία του GPS και της τηλεμετάδοσης, κάτω από την επιφάνεια του ύδατος, ο αισθητήρας ADCP, που ενσωματώνει και τα λοιπά ηλεκτρονικά όργανα, όπως GPS, πυξίδα, ελεγκτή συστήματος, κλπ. (SonTek, 2018b)



**Σχήμα:** Οθόνη λογισμικού διαχείρισης μετρήσεων σκαφιδίου SonTek (SonTek, 2018b)

Το σύστημα συνοδεύεται από λογισμικό που εκτελεί ο υπολογιστής πεδίου, και όχι μόνο υπολογίζει αυτόματα τη συνολική παροχή, αλλά ειδοποιεί τον χρήστη για πιθανές πηγές σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της μέτρησης και τον προτρέπει ανάλογα να επαναλάβει την μέτρηση στο υπό αμφισβήτηση σημείο.

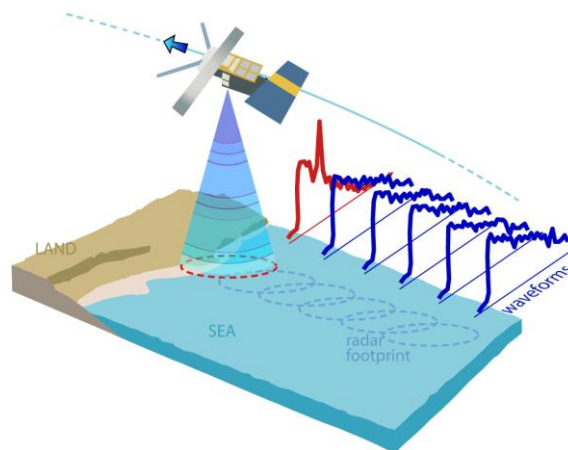
Σύμφωνα με τη SonTek (2018b) η ακρίβειες που επιτυγχάνει το σύστημα είναι  $\pm 0.2$  cm/s στον υπολογισμό ταχύτητας και 1% στον υπολογισμό βάθους. Τα εύρη μέτρησης είναι για τη μεν ταχύτητα μέχρι 20 m/s για το δε βάθος από 0.2 έως 15 μέτρα (80 μέτρα για τον πολυ-αισθητήρα M9).

Το κόστος απόκτησης αυτού του συστήματος είναι 10 φορές υψηλότερο από αυτό ενός μηχανικού μυλίσκου.

## 5.5 Τηλεπισκόπηση

Κατά τη διάρκεια πλημμυρικών ροών, η προσέγγιση στην περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να είναι αδύνατη. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλωτήρες που έχουν ριφθεί από ελικόπτερα, ακόμα και φυσικά φερτά όπως δέντρα ή μπλοκ πάγου, για να ληφθούν εκτιμήσεις της επιφανειακής ταχύτητας σε διάφορα σημεία ενός υδατορρέυματος. Αυτά τα δεδομένα μπορούν στη συνέχεια να συνδυαστούν με αποτυπώσεις διατομών και κατακόρυφα προφίλ ταχύτητας για τον υπολογισμό της παροχής. Παρόλο που δεν είναι τόσο ακριβείς όσο οι συμβατικές, αυτές οι μετρήσεις μπορούν να είναι πολύ χρήσιμες στην κάλυψη μιας μεγάλης πλημμύρας ή στην επέκταση των καμπυλών στάθμης-παροχής.

Η πιο ενδιαφέρουσα μέθοδος τηλεπισκόπησης, όμως, είναι οι διάφοροι τύποι ενεργητικών και παθητικών απεικονίσεων, μέσω αισθητήρων τοποθετημένων σε δορυφόρους ή αεροσκάφη, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποκτηθούν άμεσες ποσοτικές πληροφορίες όσον αφορά διάφορες υδραυλικές μεταβλητές, όπως η επιφάνεια του καναλιού, το πλάτος, η στάθμη και η ταχύτητα της ροής στην επιφάνεια. Υπολογισμοί μπορούν να γίνουν με τη χρήση αυτών των δεδομένων σε συνδυασμό με τοπογραφικές πληροφορίες για την πραγματοποίηση εκτιμήσεων της παροχής. Επομένως, είναι εφικτό να υπολογιστεί η παροχή, ειδικά σε τοποθεσίες που είναι δύσκολα προσβάσιμες ή όπου είναι δύσκολο να εκτελεστούν μετρήσεις με συμβατικές μεθόδους. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι πιθανόν χρήσιμη μόνο για σχετικά μεγάλους ποταμούς και, ακόμη και για αυτούς, η ακρίβεια μέτρησης θα είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι με τις επί τόπου μετρήσεις.



**Σχήμα:** Δορυφορική αλτιμετρία (Altimetry, 2018)



Η δορυφορική αλτιμετρία είναι μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε τα τελευταία 30 περίπου χρόνια και αρχικός σκοπός της ήταν η παρατήρηση και μελέτη των ιδιοτήτων του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας, των μετακινήσεων των πάγων, της ταχύτητας των ανέμων, του ύψους των κυμάτων και της θερμοκρασίας του νερού.

Η τεχνική βασίζεται στον υπολογισμό της επιφάνειας με ένα ραντάρ μικροκυμάτων (συχνότητας περίπου 13 GHz) που βρίσκεται σε τεχνητό δορυφόρο. Το ραντάρ-αλτίμετρο του τεχνητού δορυφόρου εκπέμπει παλμούς κατακόρυφα στην επιφάνεια της Γης, οι οποίοι ανακλώνται από την επιφάνεια της θάλασσας, επιστρέφουν στον δορυφόρο και μέσω του χρόνου μετάβασης-επιστροφής υπολογίζεται η απόσταση δορυφόρου και επιφάνειας. Οι πληροφορίες που παρέχουν τα ανακλώμενα κύματα (χρόνος διανύσεως απόστασης και μορφή ανακλώμενου σήματος) σε συνδυασμό με τον προσδιορισμό της θέσης του τεχνητού δορυφόρου με μεγάλη ακρίβεια (μέσω GPS) δίνουν τη δυνατότητα μετρήσεων υψηλής ακρίβειας σχετικά με τις θαλάσσιες μεταβολές.

Αν και ο αρχικός σκοπός της δορυφορικής αλτιμετρίας ήταν η παρακολούθηση της στάθμης της θάλασσας, η χρήση για την παρακολούθηση σχετικά μεγάλων υδάτινων σωμάτων (λίμνες επιφάνειας  $\sim 10 \text{ km}^2$  και ποτάμια πλάτους 500 m) έχει προταθεί από μερικούς ερευνητές. Μάλιστα, μια πρόσφατη δημοσίευση (Biancamaria et al., 2017) υποστηρίζει ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ποτάμια με πλάτη μικρότερα και από 100 m. Οι Biancamaria et al. (2017) συνέκριναν τις μετρήσεις από τρεις δορυφόρους (ENVISAT, Jason-2, και SARAL) με επιτόπιες μετρήσεις στον ποταμό Garonne, Γαλλία, και διαπίστωσαν ότι ο Jason-2 μπορεί να επιτύχει μέτρηση στάθμης με ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος 20 cm (για τον συγκεκριμένο δορυφόρο έγιναν αξιολογήσεις σε δύο διατομές, στην δεύτερη διατομή η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ήταν 36 cm). Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η περίοδος περιστροφής του Jason-2 είναι 10 ημέρες (οι άλλοι δύο δορυφόροι έχουν περίοδο 35 ημέρες). Αυτή είναι και η μέγιστη συχνότητα με την οποία μπορούν να αποκτηθούν μετρήσεις από αυτόν τον δορυφόρο. Άρα, αυτή η μέθοδος έχει τρία αρνητικά, την εφαρμογή μόνο σε σχετικά μεγάλα ποτάμια, την περιορισμένη ακρίβεια, και την χαμηλή συχνότητα μετρήσεων (10 μέρες), η οποία είναι χαμηλή ακόμα και για μεγάλα ποτάμια. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων δωρεάν (ESA, 2018).

## 6 Αβεβαιότητες - σφάλματα

---

Η ακρίβεια, ή πιο σωστά, η αβεβαιότητα της μέτρησης παροχής, είναι ένας όρος που αναγνωρίζει ότι καμία μέτρηση δεν είναι τέλεια. Επομένως, ορίζεται ως μια παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μίας μέτρησης και χαρακτηρίζει την διασπορά των τιμών που θα μπορούσε να αποδοθεί στην μέτρηση. Είναι δηλαδή το εύρος των τιμών στο οποίο, κατά πάσα πιθανότητα (πιο σωστά εκφρασμένο ως διάστημα στατιστικής εμπιστοσύνης), εμπίπτει η πραγματική τιμή που αντιστοιχεί σε μια μέτρηση. Ο όρος “ακρίβεια”, παρότι δεν αποδίδει ορθά την έννοια της αβεβαιότητας, χρησιμοποιείται συχνά για να αποδώσει αυτήν την έννοια. Γι αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται καταχρηστικά σε αυτό το κεφάλαιο ενίοτε ο όρος “ακρίβεια” αντί του όρου “αβεβαιότητα”.

### 6.1 Ακρίβεια μηχανικών μυλίσκων

#### 6.1.1 Γενικά

Η ακρίβεια μιας μέτρησης παροχής, με την παραδοχή ότι οι παροχές στα τμήματα της διατομής ορισμένα από τις κατακόρυφες των μετρήσεων είναι περίπου ίσες μεταξύ τους, δίδεται από τον τύπο:

$$u(Q) = \sqrt{u_m^2 + u_s^2 + \frac{1}{m} \left( u_b^2 + u_d^2 + u_p^2 + \frac{1}{n} (u_c^2 + u_e^2) \right)}$$

όπου  $u(Q)$  είναι η αβεβαιότητα της μετρούμενης παροχής,  $u_m$  είναι η αβεβαιότητα υπολογισμού της μέσης ταχύτητας μια διατομής,  $u_s$  είναι η αβεβαιότητα ρύθμισης των οργάνων της υδρομέτρησης (μυλίσκου, ταινίας μέτρησης πλάτους διατομής, ράβδου μέτρησης βάθους, κλπ.),  $m$  είναι ο αριθμός των κατακόρυφων,  $u_b$  είναι η αβεβαιότητα μέτρησης μήκους,  $u_d$  είναι η αβεβαιότητα μέτρησης βάθους,  $u_p$  είναι η αβεβαιότητα μέτρησης μέσης ταχύτητας στην κατακόρυφο,  $n$  είναι ο αριθμός των σημείων μέτρησης σε κάθε κατακόρυφο,  $u_c$  είναι η αβεβαιότητα ρύθμισης των παραμέτρων της εξίσωσης του μυλίσκου,  $u_e$  είναι η αβεβαιότητα μέτρησης σημειακής ταχύτητας.

#### 6.1.2 Αβεβαιότητες μέτρησης ταχυτήτων

Όσον αφορά τις ταχύτητες, υπάρχουν τρεις κύριες πηγές αβεβαιότητας: η πρώτη που προκύπτει από τον περιορισμένο χρόνο έκθεσης του μυλίσκου στη ροή για να μετρήσει την ταχύτητα, η δεύτερη από τη χρήση ενός περιορισμένου αριθμού σημείων στην κατακόρυφο, και η τρίτη από τη χρήση ενός περιορισμένου αριθμού κατακόρυφων σε μια διατομή.

**Αβεβαιότητες λόγω χρόνου έκθεσης ( $u_e$ ).** Η ταχύτητα οποιουδήποτε σημείου στην διατομή κυμαίνεται συνεχώς και τυχαία με τον χρόνο λόγω της τύρβης. Η μέση ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο, όπως προσδιορίζεται από τη μέτρηση κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, είναι μια προσέγγιση της πραγματικής μέσης ταχύτητας σε αυτό το σημείο. Η διακύμανση της ροής παρουσιάζει εσωτερική συσχέτιση. Η ταχύτητα στον χρόνο  $t_2$  επηρεάζεται από την ταχύτητα του χρόνου  $t_1$ . Αυτή η επίδραση

μειώνεται όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα  $t_2 - t_1$ . Η επίδραση της αύξησης του χρόνου μέτρησης στην αβεβαιότητα δίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας:** Αβεβαιότητα μέτρησης ταχύτητας (διάστημα εμπιστοσύνης 68%) λόγω περιορισμένου χρόνου έκθεσης μιλίσκου σε ροή

	20% - 60% βάθους				80% - 90% βάθους			
	0.5 min	1 min	2 min	3 min	0.5 min	1 min	2 min	3 min
<b>0.05 m/s</b>	25	20	15	10	40	30	25	20
<b>0.10 m/s</b>	14	11	8	7	17	14	10	8
<b>0.20 m/s</b>	8	6	5	4	9	7	5	4
<b>0.30 m/s</b>	5	4	3	3	5	4	3	3
<b>0.40 m/s</b>	4	3	3	3	4	3	3	3
<b>0.50 m/s</b>	4	3	3	2	4	3	3	2
<b>1.00 m/s</b>	4	3	3	2	4	3	3	2
<b>&gt; 1.00 m/s</b>	4	3	3	2	4	3	3	2

**Αβεβαιότητες λόγω αριθμού κατακορύφων ( $u_m$ ).** Αυτή η αβεβαιότητα προκύπτει από τον περιορισμένο αριθμό κατακόρυφων σημείων που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του μεγέθους και του σχήματος της διατομής, τις μεταβολές στο προφίλ του πυθμένα και το οριζόντιο προφίλ της ταχύτητας. Η αβεβαιότητα από αυτήν την αιτία μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κατακορύφων.

**Πίνακας:** Αβεβαιότητα μέτρησης ταχύτητας διατομής (διάστημα εμπιστοσύνης 68%) ανάλογα με αριθμό στάσεων μιλίσκου

Αριθμός στάσεων	Αβεβαιότητα
5	7.5
10	4.5
15	3.0
20	2.5
25	2.0
30	1.5
35	1.0
40	1.0
45	1.0

**Αβεβαιότητες λόγω αριθμού σημείων στην κατακόρυφο ( $u_p$ ).** Αυτή η αβεβαιότητα προκύπτει από τον περιορισμένο αριθμό σημείων δειγματοληψίας σε μια κατακόρυφο της διατομής. Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας σε μία κατακόρυφο, ως μέσον όρο ή σταθμισμένο μέσον όρο ενός αριθμού σημειακών ταχυτήτων, οδηγεί σε προσέγγιση της πραγματικής μέσης ταχύτητας στην κατακόρυφο.

Ο WMO (2010), χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό δειγμάτων, προτείνει τις ακόλουθες τιμές αβεβαιότητας (διάστημα εμπιστοσύνης 68%): για 5 σημεία μέτρησης στην κατακόρυφο 2.5%, για 2 σημεία (20% και 80%) 3.5%, για 1 σημείο (60% του βάθους) 7.5%, για μέτρηση στην επιφάνεια 15%.

### 6.1.3 Αβεβαιότητες μέτρησης μηκών

**Αβεβαιότητα πλάτους ( $u_b$ ).** Η μέτρηση του πλάτους μεταξύ των κατακόρυφων βασίζεται κανονικά σε μετρήσεις απόστασης από ένα σημείο αναφοράς στην όχθη. Εάν ο προσδιορισμός της θέσης της στάσης γίνεται με τη χρήση κορδέλας, ή μέτρηση της κίνησης του σύρματος στην περίπτωση ανάρτησης, τότε η αβεβαιότητα στην μέτρηση απόστασης είναι συνήθως αμελητέα. Όπου χρησιμοποιούνται οπτικά μέσα για τον προσδιορισμό των αποστάσεων, η αβεβαιότητα θα εξαρτηθεί από την απόσταση που μετράται. Αν η απόσταση μετρηθεί με ηλεκτρονικά μέσα, εμφανίζεται μια σταθερή αβεβαιότητα και μια αβεβαιότητα ανάλογα με την απόσταση. Οι αβεβαιότητες οφείλονται κυρίως σε λάθη οργάνων.

Η αβεβαιότητα στην μέτρηση του πλάτους δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 0,5%. Για παράδειγμα, η αβεβαιότητα που εισάγει μια συσκευή μέτρησης απόστασης μέσω φαινομένου οπτικής παράλλαξης για μήκος βάσης συσκευής 80 cm ποικίλει περίπου ως εξής: από 0 μέχρι 100 m η αβεβαιότητα είναι 0.15%, από 100 μέχρι 150 m η αβεβαιότητα είναι 0.20% και από 150 μέχρι 200 m η αβεβαιότητα είναι 0.25% (WMO, 2010).

**Αβεβαιότητα βάθους ( $u_d$ ).** Για βάθη μέχρι 0.300 m, η αβεβαιότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1.5% και για τα βάθη άνω των 0.300 m η αβεβαιότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5%. Για παράδειγμα, η αβεβαιότητα μέτρησης με την χρήση καλωδίου ανάρτησης σε αλλουβιακό ποταμό, του οποίου τα βάθη κυμαίνονταν από 2 m έως 7 m και η ταχύτητα κυμαινόταν μέχρι 1.5 m/s, ήταν της τάξης των 0.05 m ή 1%. Ως ένα άλλο παράδειγμα, οι αβεβαιότητες των μετρήσεων βάθους με ράβδο σε βάθη μέχρι 6 m και πέρα από το βάθος αυτό με καλώδιο, ήταν 0.02 m ή 0.65% για την ράβδο και 0.025 m ή 0.25 % για το καλώδιο (WMO, 2010).

### 6.1.4 Αβεβαιότητες οργάνων

**Αβεβαιότητα ρύθμισης παραμέτρων μιλίσκου ( $u_c$ ).** Στους μιλίσκους για τη μετατροπή των στροφών ανά λεπτό σε ταχύτητα ροής χρησιμοποιείται συνήθως μια γραμμική εξίσωση. Οι δύο παράμετροι της εξίσωσης είναι η κλίση και ο σταθερός όρος. Επίσης, στην περίπτωση που η γραμμική εξίσωση δεν προσαρμόζεται καλά σε όλο το εύρος των ταχυτήτων που μετράει ο μιλίσκος, εναλλακτικές μη γραμμικές εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το μέγεθος της μετρούμενης ταχύτητας.

Η ρύθμιση των παραμέτρων μπορεί να έχει γίνει είτε ξεχωριστά για τον συγκεκριμένο μιλίσκο είτε να χρησιμοποιηθούν οι καθιερωμένοι παράμετροι που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Το τελευταίο είναι εφικτό στις περιπτώσεις που ο κατασκευαστής του μιλίσκου εφαρμόζει αυστηρούς ελέγχους στην τήρηση των προδιαγραφών για την κατασκευή των οργάνων.

Η αβεβαιότητα ανάλογα με τον τρόπο που προκύπτουν οι παράμετροι των εξισώσεων του μιλίσκου δίνεται στον παρακάτω πίνακα (WMO, 2010).

**Πίνακας:** Αβεβαιότητα μετρήσεων λόγω ρύθμισης παραμέτρων εξίσωσης μιλίσκου

Ταχύτητα (m/s)	ξεχωριστή ρύθμιση (%)	καθιερωμένες παράμετροι (%)
0.03	10	10
0.10	2.5	5.0
0.15	1.25	2.5
0.25	1.0	2.0
0.50	0.5	1.5
>0.50	0.5	1.0

**Αβεβαιότητα ρύθμισης οργάνων ( $u_s$ ).** Η αβεβαιότητα περιέχει τα σφάλματα βαθμονόμησης όλων των οργάνων που υπεισέρχονται στη μέτρηση παροχής. Ο WMO (2010) προτείνει να λαμβάνεται η τιμή 1% για αυτή την αβεβαιότητα.

### 6.1.5 Παράδειγμα υπολογισμού αβεβαιότητας μέτρησης παροχής

Μια μέτρηση παροχής έγινε με τις ακόλουθες συνθήκες: αριθμός κατακορύφων 20, αριθμός σημείων σε κάθε κατακόρυφο 2, μέση ταχύτητα 0.3 m/s, χρόνος έκθεσης μιλίσκου στη ροή σε κάθε σημείο 3 λεπτά, βαθμονόμηση παραμέτρων έγινε ξεχωριστά για τον μιλίσκο που χρησιμοποιήθηκε. Η αβεβαιότητα σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση είναι:

$$\begin{aligned}
 u_m &= 2.5 \\
 u_s &= 1.0 \\
 u_b &= 0.5 \text{ (max)} \\
 u_d &= 0.5 \text{ (max)} \\
 u_p &= 3.5 \\
 u_c &= 0.9 \\
 u_e &= 3.0 \text{ (20\% βάθους) και } 3.0 \text{ (80\% βάθους), συνολικό}
 \end{aligned}$$

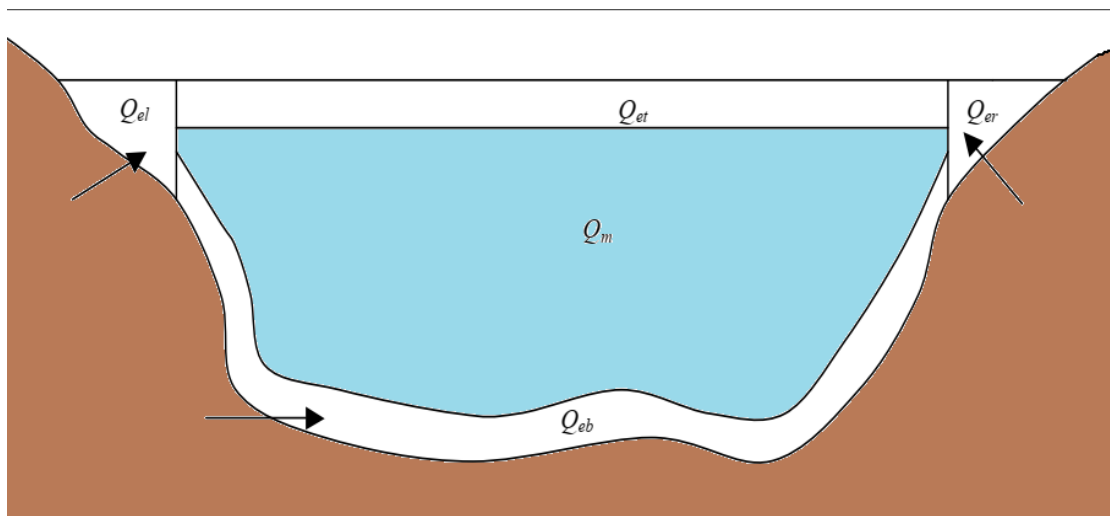
$$u_e = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4.2 \sqrt{2.5^2 + 1^2 + 1/20 (0.5^2 + 0.5^2 + 3.5^2 + 1/2 (0.9^2 + 4.2^2))} = 2.89\%$$

Η πιο πάνω περιγραφείσα μέθοδος έχει τυποποιηθεί με τα ISO 1088 (2007) και ISO 748 (2007) και είναι η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στη Ευρώπη για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας μέτρησης παροχής. Στις ΗΠΑ όμως, η USGS προτείνει διαφορετική μέθοδο, η οποία όμως είναι κατάλληλη μόνο για τους μιλίσκους που χρησιμοποιεί αυτή η υπηρεσία, τους Price AA και Price Pygmy. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τους Sauer και Meyer (1992) και η περιγραφή της μπορεί να βρεθεί στο σχετικό ανοικτό κείμενο της USGS.

## 6.2 Αβεβαιότητες ακουστικής μεθόδου Doppler καταγραφής προφίλ ταχυτήτων (ADCP)

Η ακουστική μέθοδος Doppler (ADCP) για την πραγματοποίηση μετρήσεων παροχής ξεκίνησε στη δεκαετία του 1980 και έχει περάσει από πολυάριθμα στάδια ανάπτυξης. Σήμερα έχει γίνει μια εξαιρετικά αξιόπιστη μέθοδος και αντικαθιστά σταδιακά τα συμβατικά όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ροών σε ποτάμια, εκβολές ποταμών, καθώς και για παλιρροϊκά φαινόμενα.

Η πηγές των σφαλμάτων αυτής της μεθόδου είναι δύο. Πρώτον, η μέθοδος ADCP δεν μπορεί να μετρήσει κοντά σε σταθερά όρια και στην ελεύθερη επιφάνεια.



**Σχήμα:** Με γαλάζιο το τμήμα της διατομή που μπορεί να μετρηθεί με τη μέθοδο ADCP

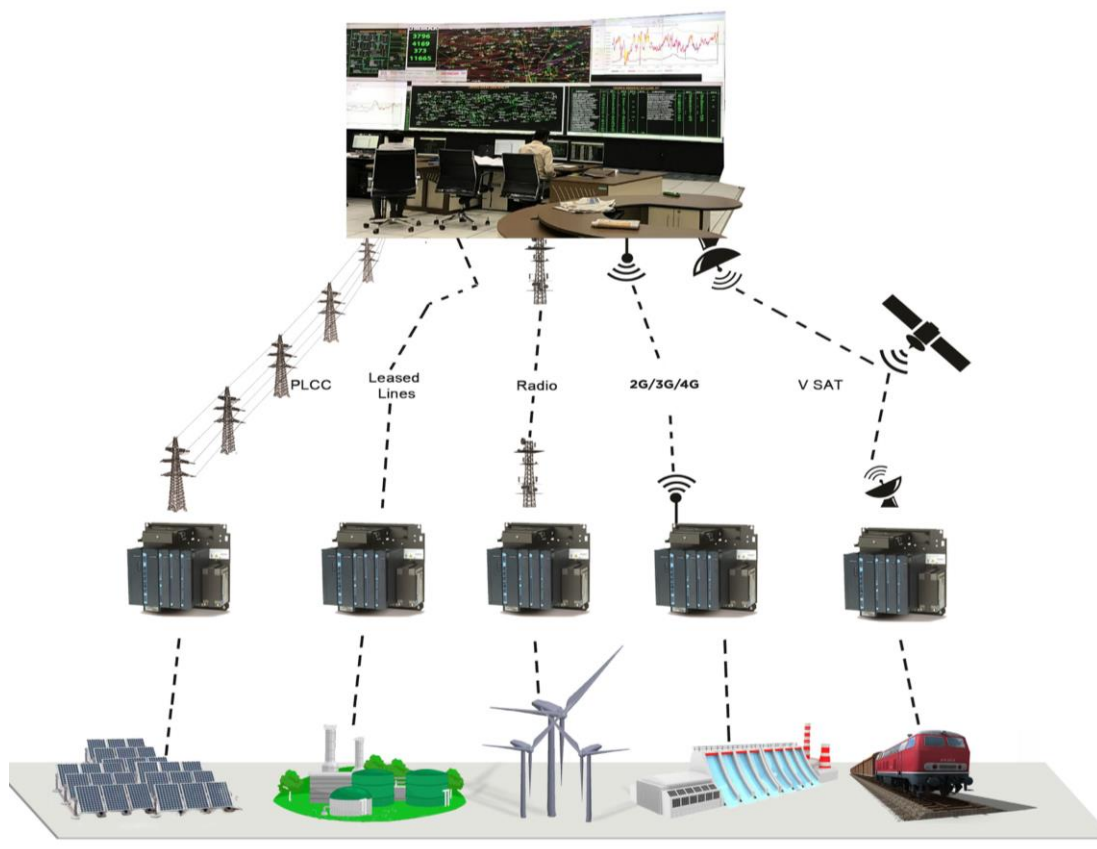
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να μετρηθεί η παροχή μόνο σε ένα τμήμα της διατομής (βλέπε προηγούμενο σχήμα). Η έλλειψη δυνατότητας μετρήσεων σε αυτές τις περιοχές αντιμετωπίζεται με χρήση εξισώσεων επέκτασης. Αυτό εισάγει όμως σφάλμα το οποίο εξαρτάται από την εξίσωση που χρησιμοποιείται καθώς και από τις συνθήκες ροής, δηλαδή το ποσοστό της ροής που περνάει από αυτές τις περιοχές.

Η δεύτερη πηγή σφαλμάτων έχει να κάνει με τις διάφορες φυσικές διεργασίες που εμπλέκονται στη μέτρηση. Οι González-Castro και Muste (2007) απαρίθμησαν 20 τέτοιες πηγές σφαλμάτων, που συμπεριλαμβάνουν τη συνάθροιση των τριών ακουστικών δεσμών, τον θόρυβο Doppler, την ασάφεια ταχύτητας, την παρεμβολή από τον πλευρικό λοβό εκπομπής δέσμης, το σφάλμα χωρικής διακριτοποίησης, το σφάλμα ταχύτητας ήχου, το σφάλμα γωνίας δέσμης, τα σφάλματα προκαλούμενα από την κίνηση του σκαφιδιού, το σφάλμα λόγω διάρκειας δειγματοληψίας, τις αναταραχές στη ροή που δημιουργεί το σκαφίδιο, το σφάλμα στη μέτρηση βάθους, το σφάλμα λόγω κακής εκτίμησης του επιπέδου του σκαφιδιού ως προς τον ορίζοντα, την μέτρηση απόστασης από τις όχθες, την θεωρούμενη κατανομή ταχυτήτων ως προς την κατακόρυφο, κ.α.

# 7 Τηλεμετρία

## 7.1 Γενικά

Η τηλεμετρία είναι η επιστήμη που επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων εξ αποστάσεως. Με τον όρο τηλεμετρία εννοείται συνήθως η ασύρματη μετάδοση δεδομένων με χρήση πομποδεκτών μεγάλης ή μικρής εμβέλειας, τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων κλπ., αλλά και η καλωδιακή μετάδοση δεδομένων, κυρίως σήμερα μέσω δικτύων όπως το ίντερνετ ή μέσω τηλεφωνικού δικτύου. Η τηλεμετρία χρησιμοποιείται για την συλλογή επιστημονικών δεδομένων αλλά και για τον αυτόματο έλεγχο σε βιομηχανικά και τεχνολογικά συστήματα (π.χ. για τον έλεγχο της λειτουργίας ανεμογεννητριών, που είναι εγκατεστημένες σε απόμακρα σημεία, μέσω SCADA). Τελευταία η τηλεμετρία εισάγεται και στις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας με χρήση του προτύπου M-Bus (τυποποίηση EN 13757-2 φυσικό επίπεδο, EN 13757-3 ανώτερο επίπεδο).



**Σχήμα:** Τρόποι μετάδοσης δεδομένων (MB, 2018)

Τα συστήματα τηλεμετρίας για τη μετάδοση δεδομένων από σταθμό μέτρησης σε απομακρυσμένη τοποθεσία περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά μόντεμ, κινητά τηλέφωνα, συστήματα ραδιοφωνικής μετάδοσης, και δορυφορική τεχνολογία. Ορισμένα από αυτά είναι σχετικά νέα και βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης. Τα ασύρματα συστήματα



μετάδοσης δεδομένων βρίσκονται σε ταχεία ανάπτυξη, με νέα συστήματα στον ορίζοντα. Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι επιλογές μετάδοσης δεδομένων. Οι επιλογές περιλαμβάνουν: μετάδοση μέσα από γραμμές μεταφοράς/διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μετάδοση μέσω τηλεφωνικής γραμμής, ραδιοζεύξη, χρήση δικτύου κινητής τηλεφωνίας, και δορυφορική σύνδεση.

## 7.2 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η επικοινωνία μέσω γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με μεταφορά δεδομένων σε έναν αγωγό, ο οποίος χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για μετάδοση εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος ή για την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Απαιτείται μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών για τις διάφορες εφαρμογές τηλεμετρίας, που κυμαίνονται από τον αυτοματισμό στο σπίτι έως τον χειρισμό μιας βιομηχανικής μονάδας. Οι περισσότερες τεχνολογίες περιορίζονται σε ένα μόνο είδος καλωδίων (όπως για παράδειγμα καλωδιώσεις εντός ενός κτιρίου), αλλά μερικές μπορούν να περάσουν από το ένα επίπεδο στο άλλο (για παράδειγμα από το δίκτυο διανομής στην καλωδίωση των εγκαταστάσεων). Ένα τυπικό εμπόδιο σε αυτή τη μετάβαση μεταξύ επιπέδων είναι οι μετασχηματιστές, το οποίο για να ξεπεραστεί απαιτεί πολλαπλές τεχνολογίες. Διάφοροι ρυθμοί δεδομένων και συχνότητες χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές συνθήκες. Η λύση αυτή συνήθως δεν είναι πρόσφορη για υδρομετρικούς σταθμούς, επειδή δεν υπάρχουν οι υποδομές στις περιοχές ενδιαφέροντος και επιπλέον η μεταφορά δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις είναι προβληματική.

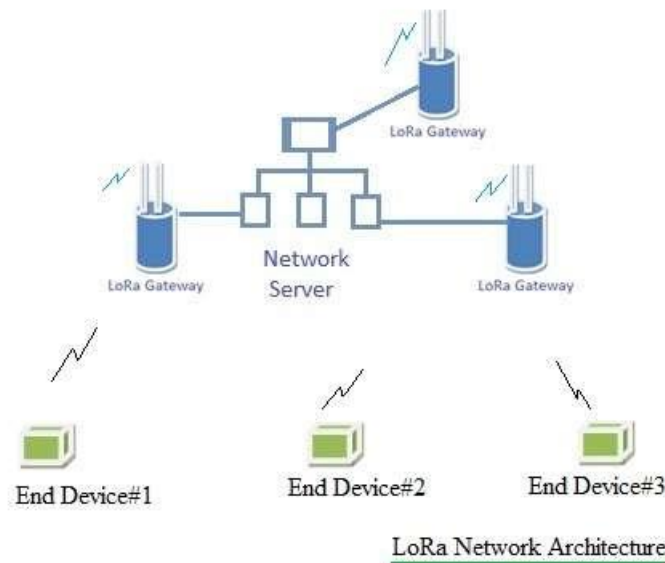
## 7.3 Ραδιοζεύξη

Οι ραδιοπομποί μικρής ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποστολή δεδομένων. Ο κύριος περιορισμός των ασύρματων μόντεμ είναι ότι απαιτούν οπτική επαφή στην διαδρομή των ραδιοσημάτων, δηλ. διαδρομή χωρίς εμπόδια. Συνήθως, τα σήματα μπορούν να μεταδοθούν σε αποστάσεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Η απόσταση μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα ασύρματα μόντεμ ως επαναλήπτες. Έτσι, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα δίκτυο παρατήρησης σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Αρκεί σε έναν σταθμό μέτρησης στάθμης ύδατος να εγκατασταθεί ένας δορυφορικός πομπός ή ένα GSM/GPRS μόντεμ ικανής εμβέλειας για να μεταδίδονται τα δεδομένα ολόκληρου του δικτύου.

Η ραδιοζεύξη μπορεί να είναι μεταξύ του καταγραφικού και του αισθητήρα ή μεταξύ του καταγραφικού και ενός κεντρικού υπολογιστή. Στην πρώτη περίπτωση, ένας ραδιοπομπός μικρής εμβέλειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή δεδομένων από έναν αισθητήρα σε έναν καταγραφικό δεδομένων. Απαιτούνται δύο μονάδες, μία στο σημείο αποστολής και μία στη σημείο λήψης. Για παράδειγμα, ο ραδιοζεύκτης Adcon SDI-12 Radio Link αποτελείται από έναν ασύρματο πομποδέκτη που μπορεί να τοποθετηθεί έως και 400 m μακριά από άλλους πομποδέκτες (η απόσταση μπορεί να αυξηθεί αντικαθιστώντας τις απλές κεραίες που συνοδεύουν τη μονάδα με κατευθυντικές). Αυτές οι συσκευές μεταδίδουν εντολές και αποκρίσεις SDI-12 μεταξύ ενός καταγραφικού και μέχρι δέκα αισθητήρες ανά κανάλι. Ο πομποδέκτης χρησιμοποιεί πολύ λίγη ισχύ (μικρότερη από 10 mA κατά μέσο όρο) και μπορεί να χρησιμοποιήσει την ίδια πηγή ενέργειας με το καταγραφικό ή τον αισθητήρα. Ο ραδιοζεύκτης λειτουργεί στα 916.5 MHz και η ευαισθησία του δέκτη είναι -92 dBm (Propertyandcasualty, 2018).

Ένα πρωτόκολλο που γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές είναι το LoRa. Ανάλογα με την περιοχή, το LoRa λειτουργεί σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, για παράδειγμα στις ΗΠΑ 902 έως 928 MHz, στην ΕΕ 863 έως 870 MHz και στην Κίνα 779 έως 787 MHz. Είναι τεχνολογία χαμηλής ισχύος, μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής ταχύτητας δεδομένων που αναπτύχθηκε από την Cycleo of Grenoble, και την πατέντα κατέχει η SEMTECH. Η τεχνολογία απαρτίζεται από το φυσικό επίπεδο, που είναι το LoRa, και το ανώτερο επίπεδο το LoRaWAN, που είναι το πρωτόκολλο δικτύωσης και επικοινωνίας.

Το LoRa αποτελείται από πύλες (gateways), εξυπηρετητές δικτύου (servers) και συσκευές τερματισμού (end device). Η τοπολογία του δικτύου είναι ακτινωτή (βλ. πιο κάτω σχήμα). Οι συσκευές τερματισμού και οι πύλες συνδέονται ασύρματα. Οι πύλες και οι διακομιστές δικτύου συνδέονται χρησιμοποιώντας ενσύρματο δίκτυο.



**Σχήμα:** Τοπολογία δικτύου με τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης LoRa (RF, 2018)

Το LoRaWAN ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική του συστήματος για το δίκτυο. Το LoRaWAN είναι επίσης υπεύθυνο για τη διαχείριση των συχνοτήτων επικοινωνίας, του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της ισχύος για όλες τις συσκευές. Οι συσκευές στο δίκτυο είναι ασύγχρονες και μεταδίδουν όταν έχουν διαθέσιμα δεδομένα για αποστολή. Τα δεδομένα που μεταδίδονται από μια συσκευή τερματισμού λαμβάνονται από πολλαπλές πύλες, οι οποίες προωθούν τα πακέτα δεδομένων σε κεντρικό εξυπηρετητή δικτύου. Ο εξυπηρετητής φιλτράρει τα διπλά πακέτα, εκτελεί ελέγχους ασφαλείας και διαχειρίζεται το δίκτυο. Στην συνέχεια διαβιβάζονται δεδομένα στους εξυπηρετητές εφαρμογών. Η τεχνολογία δείχνει υψηλή αξιοπιστία για μέτριο φορτίο.

Η τεχνολογία αυτή προσφέρεται σε πολύ χαμηλό κόστος. Για παράδειγμα υπάρχουν στο διαδίκτυο περιγραφές κατασκευών ασύρματων μετεωρολογικών αισθητήρων με κόστος κάτω από 10\$ (Instructables, 2018). Η συγκεκριμένη κατασκευή χρησιμοποιεί ένα LoRa modem από το Hoperf (2018), το οποίο έχει συνεχή έξοδο RF στα 20 dBm ή 100 mW. Η ευαισθησία του δέκτη είναι -148 dbm. Περισσότερα για τον σχεδιασμό ενός LoRa modem βλέπε SEMTECH (2013) και Willis (2007).

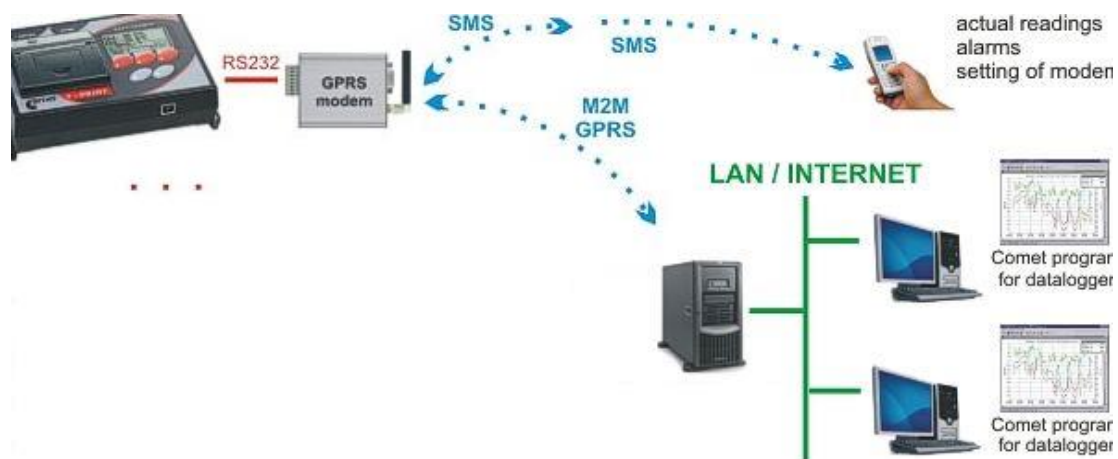
Πέρα από το σχετικά καινούργιο LoRa, διάφορες εταιρίες προσφέρουν τυποποιημένες λύσεις για ασύρματη σύνδεση. Για παράδειγμα, η CAMBELL (2018) προσφέρει το

καταγραφικό CR310-RF422, που ενσωματώνει ασύρματη σύνδεση με πρωτόκολλο επικοινωνίας RF422. Το RF422 είναι ένα πρωτόκολλο ραδιοφωνικής ζεύξης στην συχνότητα 868 MHz σχεδιασμένο να παρέχει λειτουργίες χωρίς να απαιτείται στην Ευρώπη άδεια για χρήση ασύρματης επικοινωνίας. Το RF422 μεταδίδει δεδομένα με ταχύτητα 10 kbps με μέγιστη ισχύ 25 mW, ευαισθησία 106 dBm, και χρησιμοποιεί τεχνολογίες LBT και AFA για να παρέχει μια αξιόπιστη σύνδεση σε έως και 5 km (οπτική ευθεία). Το κόστος ενός τέτοιου καταγραφικού είναι πάνω από 1000 ευρώ.

## 7.4 Ασύρματη τηλεφωνία

Άλλα συστήματα τηλεμετρίας για τη μετάδοση δεδομένων από σταθμό μέτρησης σε απομακρυσμένη τοποθεσία είναι τα μόντεμ κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS. Μια εξέχουσα επιλογή είναι η χρήση του GPRS που παρέχεται από τους περισσότερους διαχειριστές δικτύων GSM. Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο GSM, που βασίζεται στην μεταφορά δεδομένων μέσω της τηλεφωνικής κλήσης, στο GPRS τα δεδομένα μεταδίδονται ως πακέτα βάσει ενός διαδικτυακού πρωτοκόλλου. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίζονται λειτουργίες όπως, μεταφορά αρχείων (ftp) ή αποστολή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Σε κάθε περίπτωση η αποστολή δεδομένων μπορεί να γίνεται ανά τακτά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή όταν συγκεντρωθεί ένας συγκεκριμένος όγκος δεδομένων.

Υπάρχουν καταγραφικά που ενσωματώνουν μόντεμ κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS (π.χ. CR310-CELL της CAMBELL, 2018). Το κόστος αυτών των καταγραφικών είναι της τάξης των 1000 ευρώ. Στην αγορά υπάρχουν και μόντεμ κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS που μπορούν συνδεθούν εξωτερικά με ένα καταγραφέα δεδομένων (π.χ. μέσω θύρας RS232). Μερικά από αυτά προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου του καταγραφικού από κινητό τηλέφωνο μέσω αποστολής μηνυμάτων SMS (βλέπε πιο κάτω σχήμα).



**Σχήμα:** Σύνδεση καταγραφικού μέσω GSM/GPRS modem (COMET, 2018)

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της λύσης είναι το κόστος επικοινωνίας. Για παράδειγμα η COSMOTE χρεώνει την υπηρεσία DATA & FAX 0.0031€/δευτερόλεπτο, με μηνιαίο πάγιο 9.016€ (COSMOTE, 2018). Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η λύση είναι πρόσφορη οπουδήποτε υπάρχει κάλυψη από δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

## 7.5 Ενσύρματη τηλεφωνία

Η περίπτωση αυτή είναι η πλέον βολική, αλλά η πλέον απίθανο να είναι εφικτή. Μια ρεαλιστική υλοποίηση είναι να μεταφέρονται τα δεδομένα με ασύρματη ζεύξη σε κάποια θέση όπου είναι διαθέσιμη η ενσύρματη σύνδεση. Από εκεί τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (FTP). Μια άλλη επιλογή είναι να σταλούν τα δεδομένα σε μια διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

## 7.6 Δορυφορική επικοινωνία

Δορυφορική επικοινωνία, και συγκεκριμένα το σύστημα μετάδοσης GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), είναι η κύρια μέθοδος τηλεμετρίας που χρησιμοποιείται από την USGS. Η χρήση του GOES είναι εφικτή μόνο στη Βόρεια και Νότια Αμερική. Υπάρχουν άλλοι πάροχοι δορυφορικών εκπομπών που καλύπτουν άλλα μέρη του κόσμου (Meteosat, Inmarsat, Inmarsat, Iridium, ORBCOMM, κ.α.). Οι περισσότεροι από αυτούς τους παρόχους δορυφορικής μετάδοσης λειτουργούν σε εμπορική βάση. Η μετάδοση μέσω δορυφόρου μπορεί να είναι δαπανηρή, ειδικά εάν απαιτείται το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης της αποστολής δεδομένων να είναι μικρό (π.χ. άμεση ανάκτηση πληροφορίας για συστήματα έγκαιρης πρόγνωσης). Παρόλα αυτά, αν ο σταθμός βρίσκεται σε απομακρυσμένη θέση και απαιτείται αυτόματη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η δορυφορική μετάδοση μπορεί να είναι η μόνη επιλογή.

Ένας από τους πιο γνωστούς πάροχους δορυφορικής σύνδεσης είναι η ORBCOMM, μια αμερικανική εταιρεία που προσφέρει λύσεις επικοινωνίας βιομηχανικού διαδικτύου (IoT) και σύνδεση σημείο με σημείο, αρχικά σχεδιασμένες να εντοπίζουν, να παρακολουθούν και να ελέγχουν σταθερά και κινητά περιουσιακά στοιχεία στις αγορές, ναυτιλία, πετρέλαιο και φυσικό αέριο, επιχειρήσεις κοινής ωφελείας και κυβέρνηση. Η εταιρεία παρέχει υλισμικό (hardware), μόντεμ, εφαρμογές διαδικτύου και υπηρεσίες δεδομένων που παρέχονται μέσω δορυφορικών δικτύων και δικτύων κινητής τηλεφωνίας.



**Σχήμα:** Δορυφορικός πομποδέκτης DataGarrison Satellite (DataGarrison, 2018)

Στην αγορά υπάρχουν εταιρίες που παρέχουν λύσεις βασιζόμενες σε αυτήν την υπηρεσία. Για παράδειγμα, η εταιρία ONSET (ONSET, 2018b) προσφέρει τον δορυφορικό πομποδέκτη DataGarrison Satellite, με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί πρόσβαση εξ αποστάσεως σε οποιοδήποτε σημείο στον κόσμο που καλύπτεται από το δορυφορικό δίκτυο ORBCOMM. Ο πομποδέκτης αυτός, συμβατός με τους σταθμούς που έχουν το καταγραφικό δεδομένων HOBO της ONSET, επιτρέπει στους χρήστες να λαμβάνουν δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών, να βλέπουν γραφήματα σε πραγματικό χρόνο, να ρυθμίζουν τον ρυθμό δειγματοληψίας, να ελέγχουν την κατάσταση της μπαταρίας και να ελέγχουν την λειτουργία του μετεωρολογικού σταθμού. Παρέχει επίσης αυτόματη ειδοποίηση συναγερμού μέσω μηνυμάτων κειμένου κινητού τηλεφώνου ή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, όταν οι συνθήκες υπερβαίνουν τα όρια.

Το κόστος του πομποδέκτη είναι 1439 \$ ενώ το κόστος της υπηρεσίας επικοινωνίας με δορυφόρο είναι 460 \$ το χρόνο (DataGarrison, 2018).

## 8 Αναφορές

---

- AIRS, 2018, Developing Techniques for Non-Contact Streamgaging, available at [http://www.apl.washington.edu/projects/developing\\_techniques\\_ncs/summary.html](http://www.apl.washington.edu/projects/developing_techniques_ncs/summary.html).
- Altimetry, 2018, Radar Altimetry Tutorial and Toolbox, available online at <https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry.html>
- Biancamaria S. , Frappart F. , Leleu A.S., Marieu V., Blumstein D., Desjonquères J.D., Boy F., Sottolichio A., Valle-Levinson A., 2017, Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200m wide river: Evaluation over the Garonne River, Advances in Space Research, Volume 59, Issue 1, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.008>.
- Buchanan, T.J.; Somers, W.P. 1968. Stage measurement at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Washington D.C. 29 p.
- Carter, J.R., and Gamble, C.R., 1963: Tests of crest-stage gauge intakes. United States Geological Survey open-file report, Water Resources Division, Washington D.C.
- CAMBELL, 2018, CR310 Datalogger with Ethernet, <https://www.campbellsci.eu/cr310>
- COMET, 2018, GSM communication with data loggers, available online at <https://www.comet-sensors.ch/german/gsm-datalogger.htm>
- Cordex, 2018, Why use a Laser Distance Meter?, available at <http://www.transcat.com>.
- COSMOTE, 2018, Αναλυτικός Τιμοκατάλογος, available online at <https://www.cosmote.gr/mobile/cosmoportal/pricelist/index.jsp?catName=DataServicesTR>.
- Costa, J. E., R. T. Cheng, F. P. Haeni, N. Melcher, K. R. Spicer, E. Hayes, W. Plant, K. Hayes, C. Teague, and D. Barrick, 2006, Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods, Water Resour. Res., 42, W07422, doi:10.1029/2005WR004430.
- DataGarrison, 2018, DataGarrison Store Autonomous solar-powered environmental monitoring stations, available online at <https://squareup.com/store/DataGarrison/>.
- ESA, 2018, Access to ESA Earth Observation data by Copernicus users, available online at <https://spacedata.copernicus.eu/web/cscda/data-access/access-to-esa-eo-data>.
- H.B. Fischer, J.E. List, C.R. Koh, J. Imberger, N.H. Brooks, 1979, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, London.
- Friday, John, 1965: Tests of crest-stage intake systems. United States Geological Survey open-file report.
- González-Castro J.A., and MusteM., 2007, Framework for estimating uncertainty of ADCP measurements from a moving boat by standardized uncertainty analysis, ASCE Journal of Hydraulic Engineering.
- Hauet A., Kruger A.; Krajewski W.F.; Bradley A., Muste M., Creutin J., and Wilson M., 2008. Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method, Journal of Hydrologic Engineering, 13(2), 105-110, doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(105).

HOPERF, 2018, RFM95W 868/915Mhz RF Transceiver Module, available online at [http://www.hoperf.com/rf\\_transceiver/lora/RFM95W.html](http://www.hoperf.com/rf_transceiver/lora/RFM95W.html)

Hudson R. and Fraser J., 2005, Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part IV: The Mass Balance (or Dry Injection) Method, Streamline Watershed Management Bulletin Vol. 9/No. 1.

HYQUESTSOLUTIONS, 2018, Redback Model RB1 Type Current Meter, available online at <https://www.hyquestsolutions.com/products-services/products-hardware/water-flow/redback-model-rb1-type-current-meter/>

HYQUESTSOLUTIONS, 2018b, Top Set Wading Rod Model MAGNA, available online at: <https://www.hyquestsolutions.com/products-services/products-hardware/water-flow/top-set-wading-rod-model-magna/>.

Instructables, 2018, INTERNET OF THINGS: LORA WEATHER STATION, available online at <https://www.instructables.com/id/LoRaWan-Weather-Station/>

Kean, J. W., and J. D. Smith, 2005, Generation and verification of theoretical rating curves in the Whitewater River basin, Kansas, J. Geophys. Res., 110, F04012, doi:10.1029/2004JF000250.

Kimball S., 2015, Cost Comparison of Wading Point Velocity Discharge Equipment, WMA Instrument News, USGS.

MB, 2018, M.B. Control & Systems Pvt. Ltd, Telemetry Systems, available online at: <https://www.mbcontrol.com/telemetry-systems/>

Moore R.D., 2005, Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part III: Slug Injection Using Salt in Solution, Streamline Watershed Management Bulletin Vol. 8/No. 2.

ONSET, 2018, available online at [https://www.onsetcomp.com/view\\_cart](https://www.onsetcomp.com/view_cart).

ONSET, 2018b, available online at <https://www.onsetcomp.com/>.

OTT, 2018, Small - Mini Current meter for discharge measurements OTT C", available online at: <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c2-385/>.

Propertyandcasualty, 2018, Product/Service, SDI-12 Radio Link, available online at <https://www.propertyandcasualty.com/doc/sdi-12-radio-link-0001>.

Ran, Q., Li, W., Liao, Q., Tang, H., and Wang, M., 2016, Application of an automated LSPIV system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. Hydrol. Process., 30: 3014–3029. doi: 10.1002/hyp.10836.

RF Wireless World, 2018, Home of RF and Wireless Vendors and Resources, available online at <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRa-tutorial.html>

RiverSonde, 2008, RiverSonde™ Non-Contact River Monitor Model 100 Documentation, CODAR Ocean Sensors, Ltd.

Sauer, V.B., and Meyer, R.W., 1992: Determination of error in individual discharge measurements. United States Geological Survey Open-File Report 92-144, 21 p.

SEMTECH, 2013, SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer's Guide AN1200.13.



Sentlinger G., 2015, Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement, available online at: <http://www.fathomscientific.com/introduction-to-sd-gauging/>.

SOMMER, 2018, Contact-free discharge measurement for channels and open rivers using radar technology, διαθέσιμο από [www.sommer.at](http://www.sommer.at).

SonTek, 2018, ARGONAUT-ADV® ROBUST VELOCITY MEASUREMENTS IN A COMPACT, EASY-TO-USE PACKAGE, available online at: <https://www.sontek.com/argonaut-adv>.

SonTek, 2018b, RIVERSURVEYOR® S5 AND M9 A NEW PERSPECTIVE TO THE NOTION OF MEASURING OPEN CHANNEL HYDRAULICS, available online at <https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>.

Tamari, S.; Garcia, F.; Arciniega-Ambrocio, J.I.; Porter, A., 2013, Laboratory and Field Testing of a Handheld Radar to Measure the Water Velocity at the Surface of Channels. Available online: [http://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/laboratory-field-testing/laboratory-field-testing.pdf](http://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/laboratory-field-testing/laboratory-field-testing.pdf).

Tauro F., C. Pagano, P. Phamduy, S. Grimaldi and M. Porfiri, 2015, "Large-Scale Particle Image Velocimetry From an Unmanned Aerial Vehicle," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 6, pp. 3269-3275, doi: 10.1109/TMECH.2015.2408112.

Tesfalem Tsegay Tekle, 2014, Ultrasonic stream bridge sensors (USBS) error in water level estimation, MS Thesis, University of Iowa.

Valeport, 2018, MODELS 001 & 002 Flow Meters, available online at: <http://www.valeport.co.uk/Portals/0/Docs/Datasheets/Valeport-Model-001-and-002.pdf>.

Valeport, 2018b, MODEL 801 Electromagnetic Flow Meter, available online at: <http://www.valeport.co.uk/Portals/0/Docs/Datasheets/Valeport-Model-801.pdf>

Willis, M., 2007, An introduction to radiowave propagation, available online at <http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF1.htm>.

World Meteorological Organization, 2010. Manual on stream gauging, vol. I and II. WMO-No.1044, Geneva, Switzerland.

Young, K.B., 1950: A comparative study of mean-section and mid-section methods for computation of discharge measurements. United States Geological Survey openfile report, 52 pp.

Δ. Κουτσογιάννης, και Θ. Ξανθόπουλος, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.