

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## *Ανάπτυξη μικρού υδροηλεκτρικού έργου*

### **1.1 Φάσεις της μελέτης μικρού υδροηλεκτρικού έργου**

Τη στιγμή κατά την οποία οι φορείς χρηματοδότησης παρουσιάζονται με το αίτημα της επένδυσης σε κάποιο σχεδιαζόμενο ενεργειακό έργο, τότε προκύπτουν αρχικά ερωτήματα τα οποία σχετίζονται με την ακρίβεια της εκτίμησης, τις πιθανότητες υπερβάσεων του εκτιμώμενου κόστους και τη χρηματοδοτική σύγκριση του συγκεκριμένου έργου με εναλλακτικές επιλογές. Τα συγκεκριμένα ερωτήματα κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολο να απαντηθούν με βεβαιότητα, δεδομένου του γεγονότος ότι η προετοιμασία της αρχικής εκτίμησης συναντά δυο αντιτιθέμενες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα απαιτείται τόσο η διατήρηση των εξόδων ανάπτυξης του σχεδιαζόμενου έργου σε χαμηλά επίπεδα, στην περίπτωση που δεν εξασφαλίζεται ασφαλής χρηματοδότηση ή στην αντίστοιχη κατά την οποία το έργο αποδεικνύεται αντιοικονομικό συγκρινόμενο με άλλες πηγές ενέργειας, όσο και η διάθεση επιπρόσθετων χρημάτων και χρόνου στο πλαίσιο της ξεκάθαρης εκτίμησης των ενδεχόμενων κοστών του έργου και πιο ακριβούς εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν, ως ένα βαθμό, αντιθέσεις τέτοιου είδους, ως συνήθης διαδικασία προτείνεται η ανάπτυξη του σχεδιαζόμενου έργου μέσω αλληπάληλων σταδίων[1].

Έτσι η μελέτη ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου περιλαμβάνει διάφορες φάσεις οι οποίες αρχίζουν από την τεκμηριωμένη πρόταση υδροηλεκτρικής ανάπτυξης μιας θέσεως μέχρι την ολοκλήρωση της μελέτης εφαρμογής και την σύνταξη των τευχών δημοπράτησης του έργου. Η έκταση και εμβάθυνση της μελέτης ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου εξαρτάται σημαντικά από τον χαρακτήρα και το μέγεθος του έργου. Σύμφωνα με την διεθνή πρακτική η μελέτη ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου διεξάγεται σε τρεις διακριτές φάσεις[2]:

- ✚ την **αναγνωριστική μελέτη ή προμελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας** (reconnaissance/pre-feasibility study).
- ✚ την **προκαταρτική μελέτη ή οριστική μελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας** (feasibility study).
- ✚ την μελέτη εφαρμογής.

Η συνολική διάρκεια των μελετών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου, από την έναρξη της αναγνωριστικής μελέτης μέχρι την έναρξη της κατασκευής των έργων δεν μπορεί να είναι μικρότερη των 24 μηνών κυρίως επειδή οι διαδικασίες αδειοδότησης είναι χρονοβόρες και πολύπλοκες.

Το συνολικό κόστος της μελέτης ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου αποτελεί υψηλό ποσοστό της συνολικής επένδυσης, της τάξεως του 8-15% της όλης επένδυσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το τελικό ζητούμενο της προμελέτης και της οριστικής μελέτης είναι το αν το εξεταζόμενο έργο είναι οικονομοτεχνικά βιώσιμο, θα πρέπει στις δύο πρώτες φάσεις η εμβάθυνση να μην προχωρά περισσότερο από όσο δικαιολογείται από το παραδοτέο της κάθε φάσης, δηλ. για παράδειγμα δεν θα πρέπει στη προμελέτη να γίνει οποιαδήποτε τοπογραφική αποτύπωση ή γεωλογική μελέτη (οπότε θα δαπανηθούν σημαντικά ποσά) και οι εκτιμήσεις να βασισθούν σε υπάρχοντα στοιχεία, όπως γεωλογικούς και γεωγραφικούς χάρτες.

## **1.2 Αναγνωριστική μελέτη ή προμελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας(reconnaissance/pre-feasibility study)**

Η Μελέτη σκοπιμότητας εγκατάστασης ενός Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου (ΜΥΗΕ), αποτελεί το πρώτο βήμα προς την εκπόνηση του έργου και θεωρείται απαραίτητη καθώς θα εξετάσει και θα αναλύσει πιθανά και εναλλακτικά σενάρια για το σχεδιασμό του έργου.

Η αναγνωριστική μελέτη μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνοπτική προκαταρτική μελέτη με σκοπό την διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητας της υδροηλεκτρικής αξιοποίησης μιας θέσης. Επίσης η αναγνωριστική μελέτη που διεξάγεται για περισσότερες θέσεις επιτρέπει την κατάταξη τους από πλευράς παραγόμενης ενέργειας, ύψους επένδυσης, δεικτών οικονομικής απόδοσης της επένδυσης έτσι ώστε να δοθεί η προτεραιότητα στις περισσότερο ευνοϊκές θέσεις.

Πριν από την έναρξη της προμελέτης για την αξιοποίηση μιας υποψήφιας θέσης θα πρέπει να διερευνηθεί αν η ίδια θέση έχει κατά το παρελθόν

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

αποτελέσει αντικείμενο μελέτης χωρίς να υλοποιηθεί το έργο ή αν για την αξιοποίηση της θέσης αυτής έχει εκδοθεί άδεια από άλλον ενδιαφερόμενο.

Για την εκπόνηση της αναγνωριστικής μελέτης ακολουθούνται τα ίδια βήματα όπως και κατά την προκαταρκτική μελέτη με την διαφορά ότι η ανάλυση δεν είναι τόσο λεπτομερής ενώ παράλληλα βασίζεται στην συλλογή υπαρχόντων στοιχείων (τοπογραφικών, γεωλογικών, υδρολογικών κλπ) έτσι ώστε να μην δαπανηθεί χρόνος και χρήμα για ένα αβέβαιο αποτέλεσμα

Τα βήματα της αναγνωριστικής μελέτης είναι τα ακόλουθα:

✚ **Αναγνώριση της περιοχής:** Περιλαμβάνει την αρχική διάταξη και χωροθέτηση του έργου, την καταγραφή των τοπικών συνθηκών, των δυσκολιών, της υποδομής, των άλλων ανταγωνιστικών χρήσεων του νερού, τις γεωλογικές συνθήκες, την χάραξη του έργου σε γεωγραφικό χάρτη από την οποία προκύπτουν τα βασικά χαρακτηριστικά του έργου, όπως η υδραυλική πώση και το μήκος των έργων προσαγωγής. Στο βήμα αυτό καταγράφονται οι μείζονες δυσκολίες, αν υπάρχουν, όπως οικονομικές, κοινωνικές, χρήσης γης, περιβαλλοντικές, γεωλογικές κλπ, κάθε μια από τις οποίες θα μπορούσε από μόνη της να οδηγήσει στην ματαίωση του έργου.

✚ **Συλλογή υπαρχόντων υδρολογικών στοιχείων:** συλλέγονται και αξιολογούνται τα υπάρχοντα υδρολογικά στοιχεία και συγκεκριμένα χρονοσειρών παροχής. Επίσης εκτιμάται η μέγιστη πλημμυρική παροχή και η ελάχιστη παροχή το υδατορέυματος καθώς και η παροχή συντήρησης ώστε να καλύπτονται οι σχετικοί περιβαλλοντικοί περιορισμοί.

✚ **Προκαταρκτική χάραξη του έργου:** Η χάραξη αυτή γίνεται σε χάρτη κλίμακας 1:50.000 και 1:5.000 των έργων προσπέλασης στην θέση υδροληψίας και του υδροηλεκτρικού σταθμού. Εκτίμηση της απόστασης από την πλησιέστερη γραμμή μέσης τάσης η οποία θα μπορούσε να συνδεθεί με την έξοδο του υδροηλεκτρικού σταθμού.

✚ **Υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας:** Από τα στοιχεία των δύο προηγούμενων βημάτων υπολογίζεται η ετησίως παραγόμενη ενέργεια για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής και άρα της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος και για την εγκατάσταση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων.

✚ **Υπολογισμός του κόστους της επένδυσης:** Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής ( και άρα της εγκατεστημένης ισχύος) ο οποίος βασίζεται σε προσεγγιστικές συσχετίσεις και την εμπειρία από παρόμοια έργα που έχουν ήδη ολοκληρωθεί.

✚ **Επαναληπτική διαδικασία:** Τα δύο τελευταία βήματα επαναλαμβάνονται για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη τιμή της και άρα η βέλτιστη τιμή της εγκατεστημένης ισχύος.

✚ **Προτάσεις χρηματοδότησης του έργου.**

✚ **Καταγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων**

✚ **Σύνταξη έκθεσης αναγνωριστικής φάσεως:** Στην έκθεση αυτή αναφέρονται αναλυτικά όλα τα ευρήματα των προηγούμενων βημάτων με ιδιαίτερη έμφαση στην τεchnοοικονομική ανάλυση και την καταγραφή των σημείων που χρήζουν περισσότερης διευκρίνισης. Η έκθεση καταλήγει στο αν συνίσταται ή όχι να υπάρξει συνέχεια με την εκπόνηση της οριστικής μελέτης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Η αναγνωριστική μελέτη πρέπει να εκπονείται από ειδικευόμενο μηχανικό, με την συμμετοχή γεωλόγου και περιβαλλοντολόγου, έτσι ώστε να οδηγηθεί γρήγορα και με ασφάλεια σε εφικτές και ορθές εκτιμήσεις.

Η διάρκεια εκπόνησης της προμελέτης είναι της τάξεως του 1-2 μήνες. Η αναγνωριστική μελέτη αναμένεται να κοστίζει από 0.15% ως 0.30% του εκτιμώμενου κόστους κατασκευής.

## 1.3 Προκαταρκτική μελέτη ή οριστική μελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας (feasibility study)

Σκοπός της προκαταρκτικής μελέτης είναι να καθορίσει την οικονομοτεχνικά βέλτιστη διάταξη και διαστασιολόγηση των επί μέρους έργων και επιλογή του εξοπλισμού, όπως αυτή θα προκύψει από την εξέταση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Η προκαταρκτική μελέτη ολοκληρώνεται με πλήρη και λεπτομερή χρηματοδοτική ανάλυση του έργου η οποία θα περιλαμβάνει ανάλυση της ευαισθησίας των διαφόρων τεχνοοικονομικών παραμέτρων.

Η οριστική μελέτη βασίζεται στα κύρια συμπεράσματα της προμελέτης θεωρώντας ως αφετηρία της διερεύνησης της την διάταξη και διαστασιολόγηση η οποία προέκυψε ως βέλτιστη από την αναγνωριστική μελέτη. Συνεπώς στην φάση αυτή εξετάζονται λιγότερο εναλλακτικές διατάξεις αλλά περισσότερο συγκεκριμένες και με αναλυτική λεπτομέρεια.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την σύνταξη της προκαταρκτικής μελέτης είναι τα ακόλουθα[3]:

✚ **Αναγνώριση έργου:** Στόχος του συγκεκριμένου βήματος είναι η αναγνώριση της τοποθεσίας και των κύριων χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου έργου, όπως η χρήση φράγματος και η διασύνδεση με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο.

✚ **Συνθήκες τοποθεσίας:** Η αναγνώριση του έργου οδηγεί στην αποτίμηση των τοπικών συνθηκών. Το συγκεκριμένο σχέδιο είναι αναγκαίο να καθορίζει τις επιπρόσθετες αποτιμήσεις οι οποίες απαιτούνται για τον προσδιορισμό του αναμενόμενου ύψους υδατοπτώσεως που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο και να καταδεικνύει την πιθανή χρήση του ύδατος από τρίτους φορείς

✚ **Περιβαλλοντικοί παράγοντες:** Τα κύρια περιβαλλοντικά ζητήματα είναι αναγκαίο να εξετασθούν κατά την διάρκεια της οριστικής μελέτης του σχεδιαζόμενου έργου. Τα συγκεκριμένα περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις της εγκατάστασης στην τοπική χλωρίδα και πανίδα, τις ενδεχόμενες μεταβολές στην ποιότητα του ύδατος, τον προσδιορισμό των πιθανών αρχαιολογικών ερευνών και την οπτική επίδραση του σχεδιαζόμενου έργου στο περιβάλλον.

✚ **Νομικοί παράγοντες:** Στο πλαίσιο της οριστικής μελέτης του σχεδιαζόμενου έργου κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση των αντίστοιχων νομικών ζητημάτων. Στο συγκεκριμένο βήμα εντάσσονται οι διαπραγματεύσεις και η διαδικασία αιτήσεων με τις τοπικές και κυβερνητικές αρχές, οι αντίστοιχες διαπραγματεύσεις για την πώληση ή διανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και η ενημέρωση για τα ειδικά προγράμματα και τις αντίστοιχες διαδικασίες που απαιτούνται στο πλαίσιο της ανάπτυξης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

✚ **Εγκατεστημένη ισχύς και παραγόμενη ενέργεια:** Ο προσδιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος της εγκατάστασης και της

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

ετήσιας παραγόμενης ενέργειας εντάσσονται στο συγκεκριμένο βήμα. Η υδρολογική ανάλυση της αντίστοιχης τοποθεσίας αποτελεί το κλειδί για τον προσδιορισμό της παραγωγής του έργου και συνεπώς των αναμενόμενων οφελών.

✚ **Αναθεώρηση προκαταρκτικού σχεδίου έργου:** Η αναθεώρηση του σχεδίου του έργου το οποίο συντάχθηκε κατά το στάδιο της αναγνωριστικής μελέτης κρίνεται αναγκαία για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Εξεταζόμενα στοιχεία αποτελούν το μήκος και η διάμετρος του αγωγού πτώσης ύδατος, ο τύπος και το μέγεθος του υδροτροβίλου, οι απώλειες ύψους πτώσης ύδατος στους αγωγούς και η ποσότητα του ύδατος φυγής ως ποσοστό της παροχής του στροβίλου.

✚ **Εναλλακτικές πηγές ενέργειας:** Κρίνεται αναγκαίος ο καθορισμός του τελικού χρήστη ώστε να προσδιορισθεί το αναμενόμενο κόστος ενέργειας το οποίο πρόκειται να αντικατασταθεί από το σχεδιαζόμενο έργο. Συγκεκριμένα, απαιτείται η διάκριση μεταξύ εμπορικής και παραγωγού εταιρείας ως τελικού χρήστη και ο προσδιορισμός του κόστους εναλλακτικών πηγών ενέργειας τις οποίες καλείται να αντικαταστήσει το σχεδιαζόμενο έργο.

✚ **Κύριοι περιβαλλοντικοί παράγοντες:** Στο πλαίσιο του βελτιστοποιημένου σχεδίου του έργου απαιτείται η τελική αναθεώρηση των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Η αποτίμηση των στοιχείων τα οποία προκαλούν σημαντικά προβλήματα πρέπει να πραγματοποιηθεί.

✚ **Αρχικές πωλήσεις ενέργειας και χρηματοδότηση έργου:** Τη στιγμή που η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγόμενη ενέργεια του έργου έχουν προσδιορισθεί η αρχική αποτίμηση των πωλήσεων και της χρηματοδότησης του έργου μπορεί να ξεκινήσει. Το συγκεκριμένο βήμα περιλαμβάνει την αναθεώρηση των καμπύλων ζήτησης ενέργειας, την προσέγγιση πιθανών αγοραστών για τον προσδιορισμό της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, τον καθορισμό των πιθανών χρηματοδοτικών μεθόδων και την αρχική επιλογή της βέλτιστης και τη διερεύνηση πιθανών κρατικών επιχορηγήσεων, δανείων και δωρεών.

✚ **Αναμενόμενη ισχύς και ενέργεια:** Εκτιμήσεις της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας της εγκατάστασης είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν για διαφορετικά σχέδια του έργου. Η εξέταση τουλάχιστον τεσσάρων διαφορετικών επιλογών κρίνεται επιβεβλημένη για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας. Οι διαφορετικές επιλογές εντοπίζονται στον τύπο και το μέγεθος του υδροτροβίλου, το μήκος του αγωγού πτώσης ύδατος, το ύψος της υδατόπτωσης, το υψόμετρο του σταθμού παραγωγής κτλ.

✚ **Εκτιμώμενα κόστη έργου:** Η εκτίμηση των κοστών του έργου για το σύνολο των διαφορετικών επιλογών κρίνεται απαραίτητος. Οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις αρκεί να είναι προσεγγιστικές δεδομένου του γεγονότος ότι ο προσδιορισμός της βέλτιστης εγκατάστασης αναμένεται να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της οικονομικής αποτίμησης του έργου.

✚ **Βέλτιστη εγκατεστημένη ισχύς:** Ο προσδιορισμός του συνολικού κόστους και η εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας για κάθε σχέδιο της εγκατάστασης επιτρέπει την εξακρίβωση της βέλτιστης εγκατεστημένης ισχύος του έργου. Η συγκεκριμένη επιλογή προκύπτει από την αποτίμηση των ετήσιων κοστών και οφελών για τον συνολικό χρόνο ζωής του έργου, τη μετατροπή των μελλοντικών τιμών κόστους και

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

οφέλους σε παρούσες τιμές, τον υπολογισμό του συνολικού λόγου οφέλους προς το κόστος της εγκατάστασης και τον προσδιορισμό λοιπών οικονομικών χαρακτηριστικών της τελευταίας.

✚ **Τελική διευθέτηση:** Στο πλαίσιο του βέλτιστου σχηματισμού του σχεδιαζόμενου έργου η τελική του διάταξη είναι δυνατόν να προετοιμασθεί. Τα συγκεκριμένα σχέδια αναμένεται να είναι λιγότερο αναλυτικά από τα αντίστοιχα τελικά, ωστόσο κρίνεται αναγκαίο να επιτρέπουν την ανάλυση της κατανομής του διαθέσιμου χώρου και των πιθανών κατασκευαστικών δυσκολιών.

✚ **Τελικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις:** Κατά το συγκεκριμένο βήμα πραγματοποιείται ο τελικός καθορισμός των εναπομεινάντων περιβαλλοντικών ζητημάτων. Το σύνολο των αναγκαίων επανορθωτικών μέτρων πρέπει να καθορισθεί σε συνδυασμό με τον υπολογισμό των αντίστοιχων κοστών.

✚ **Τελικές νομικές απαιτήσεις:** Η προετοιμασία του τελικού πλάνου για την ικανοποίηση των αντίστοιχων νομικών απαιτήσεων κρίνεται αναγκαία.

✚ **Τελική παραγωγή ενέργειας:** Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου βήματος πραγματοποιείται ο τελικός προσδιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας βελτιστοποιώντας προγενέστερους υπολογισμούς με την πρόσθεση νέων στοιχείων.

✚ **Τελική εκτίμηση κόστους:** Η τελική εκτίμηση του κόστους προετοιμάζεται βασισμένη στο τελικό σχέδιο της εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη εκτίμηση περιλαμβάνει το σύνολο των κοστών κατασκευής, λειτουργίας, επισκευών καθώς και τα απρόβλεπτα κόστη του έργου.

✚ **Οριστική οικονομική ανάλυση:** Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιείται στο πλαίσιο της τελικής εγκατεστημένης ισχύος και παραγόμενης ενέργειας του έργου καθώς και της πλήρους εκτίμησης των επιμέρους κοστών.

✚ **Κοινωνικοοικονομική ανάλυση:** Η αναθεώρηση του έργου πραγματοποιείται στο πλαίσιο της τελειοποίησης της τελικής οικονομικής ανάλυσης. Η συγκεκριμένη αναθεώρηση περιλαμβάνει τη χρηματοδότηση της ανάπτυξης του έργου, τα κόστη της πώλησης και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάλυση των ταμειακών ροών κατά την διάρκεια του χρόνου κατασκευής και του αρχικού χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης.

✚ **Χρονοδιάγραμμα έργου:** Η ανάπτυξη αναλυτικού χρονοδιαγράμματος του έργου κρίνεται αναγκαία με τον προσδιορισμό των χρονικών ορόσημων σχεδιασμού, παραγγελίας των διατάξεων με μεγάλο χρόνο παράδοσης, κατασκευής, έναρξης λειτουργίας και διαδικασίας ικανοποίησης των αντίστοιχων νομικών απαιτήσεων.

✚ **Υπόδειξη και αναφορά:** Κατά το συγκεκριμένο τελικό βήμα πραγματοποιείται η σύνταξη συνολικής αναφοράς και υποδείξεων συμπεριλαμβανομένης της απόφασης για τη συνέχιση ή μη της ανάπτυξης του σχεδιαζόμενου έργου και του καθορισμού των επιπρόσθετων απαιτούμενων μελετών.

Για την εκπόνηση της οριστικής μελέτης απαιτείται η συνεργασία περισσότερων ειδικοτήτων μηχανικών και επιστημόνων, όπως πολιτικού μηχανικού (υδραυλικού), γεωλόγου, τοπογράφου, μηχανολόγου και ηλεκτρολόγου μηχανικού, οικονομολόγου, ενώ την γενική σύνθεση και



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

---

συντονισμό θα πρέπει να αναλάβει μηχανικός ή γραφείο μελετών με εμπειρία στο αντικείμενο.

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης επιβαρύνεται με ποσοστό 7% ως 15% του συνολικού κόστους του σχεδιαζόμενου έργου.

## **1.4 Μελέτη εφαρμογής**

Η μελέτη εφαρμογής σκοπό έχει την σύνταξη των τελικών σχεδίων και των προδιαγραφών κατασκευής, προμήθειας και εγκατάστασης του εξοπλισμού σύμφωνα με την οποία ο ανάδοχος θα κατασκευάσει και θα θέσει σε λειτουργία την μονάδα. Η μελέτη εφαρμογής ολοκληρώνεται με την σύνταξη των τευχών δημοπράτησης του έργου βάσει των οποίων θα δοθούν οι προσφορές και θα επιλεγεί ο ανάδοχος του έργου.

Στην οριστική μελέτη μελετώνται αναλυτικά όλες οι συνιστώσες του έργου και συντάσσονται τα οριστικά κατασκευαστικά σχέδια. Παραδοτέο της μελέτης εφαρμογής είναι τα πλήρη και αναλυτικά σχέδια, τα τεύχη των υπολογισμών(στατικών, γεωστατικών, μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών, υδραυλικών), το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης κάθε φάσης των εργασιών, τα τεύχη των προδιαγραφών κατασκευής και προμήθειας, εγκατάστασης και δοκιμών εξοπλισμού, η διαδικασία θέσης σε λειτουργία και δοκιμών παραλαβής του έργου κλπ., το τεύχος της προμέτρησης των υλικών και εργασιών και του προϋπολογισμού.

Για την εκπόνηση της μελέτης εφαρμογής και ιδιαίτερα της αρχιτεκτονικής και στατικής μελέτης του κτιρίου του υδροηλεκτρικού σταθμού θα πρέπει ο μελετητής να έχει στην διάθεση του τα πλήρη σχέδια που αφορούν τις ακριβείς ολικές διαστάσεις και λεπτομέρειες έδρασης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (υδροστροβίλου, μονάδας ισχύος ρυθμιστή στροφών, γεννήτριας, μετασχηματιστή), τα βάρη καθώς και τα φορτία που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία. Τα στοιχεία αυτά υποχρεούται να υποβάλλει εγκαίρως η κατασκευάστρια εταιρία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## *Υδροηλεκτρικοί σταθμοί*

### **2.1 Εισαγωγή**

Η ενέργεια έχει αποτελέσει απαραίτητο στοιχείο για την επιβίωση και ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Από τους αρχαίους χρόνους ο άνθρωπος παρατήρησε και προσπάθησε να αξιοποιήσει την άφθονη ενέργεια που παρέχει η φύση.[4] Πηγές όπως ο ήλιος, ο αέρας, το νερό και άλλες τις οποίες ονομάζουμε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), συνέβαλαν αποφασιστικά στην βελτίωση του τρόπου ζωής του ανθρώπου.

Η παγκόσμια αύξηση του πληθυσμού και η ανάγκη βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου οδήγησαν στην αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Μεγάλο ποσοστό αυτής καλύφθηκε από τη χρήση του πετρελαίου και των παραγώγων του.[4]



Ο σύγχρονος κόσμος βιώνει τις συνέπειες της ενεργειακής κρίσης η οποία αναδιτάζει, και αναμένεται να συνεχίσει, την αντίληψη σχετικά με τις ενεργειακές υποδομές από τις οποίες κατέληξε να εξαρτάται. Οι διαρκώς αυξανόμενες τιμές των πετρελαϊκών προϊόντων, οι προβλέψεις για την εξάντληση των πετρελαϊκών πηγών σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα και η χρήση των φυσικών καυσίμων για πολιτικούς σκοπούς επηρεάζουν δυσμενώς την παγκόσμια οικονομία και την κοινωνική ανάπτυξη. Ο αντίκτυπος από την ενεργειακή κρίση γίνεται περισσότερο αντιληπτός στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες όπου ένα διαρκώς αυξανόμενο ποσοστό του εθνικού προϋπολογισμού που προορίζεται για ανάπτυξη καθίσταται αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί για την αγορά πετρελαϊκών προϊόντων. Προκειμένου να περιορισθεί η συγκεκριμένη εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα με μεγάλη μεταβλητότητα τιμών, οι περισσότερες χώρες έχουν εγκαινιάσει προγράμματα τα οποία στοχεύουν στην ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών ενέργειας που βασίζονται σε τοπικές ανανεώσιμες πηγές. Μεταξύ των συγκεκριμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) διακρίνεται η εκμετάλλευση της υδροδυναμικής ενέργειας η οποία συναντά ιδιαίτερα αυξανόμενο ενδιαφέρον σε βαθμό τέτοιο που το σύνολο των χωρών με υδραυλικές πηγές εξετάζουν πλέον σοβαρά την ανάπτυξη αντίστοιχων ενεργειακών έργων.

Οι βιομηχανοποιημένες χώρες επανέρχονται στην ανάπτυξη υδροηλεκτρικών σταθμών ύστερα από την επανεξέταση των εκτιμήσεων σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα των συγκεκριμένων έργων καθώς κυρίως κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, κρίθηκαν αντιοικονομικά συγκρινόμενα με τα φυσικά καύσιμα. Παράλληλα οι αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες έχουν κατά κύριο λόγο επηρεασθεί από τις αυξήσεις των τιμών του πετρελαίου και παρουσιάζουν ταυτόχρονα τεχνικά προβλήματα στην ανάπτυξη γεννητριών diesel, ενθαρρύνουν την ανάπτυξη υδροηλεκτρικών σταθμών μέσω της απόκτησης καλλίτερης τεχνογνωσίας σχετικά με τους διαθέσιμους υδάτινους πόρους.

Η υδραυλική ενέργεια αποτελεί ανανεώσιμη και καθαρή σε σχέση με τη μόλυνση του περιβάλλοντος μορφή ενέργειας η οποία είναι δυνατό να μετατραπεί σε αντίστοιχη ηλεκτρική με απόδοση της τάξης του 70%[5]. Ωστόσο, προκαλεί και η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας διαταραχές στη μορφολογία του περιβάλλοντος και η χρησιμοποίησή της κρίνεται αναγκαία και συνδυάζεται με παράλληλες δραστηριότητες εκμετάλλευσης όπως ύδρευση, ιχθυοκαλλιέργειες, τουρισμό κτλ.

### **2.2 Ιστορική αναδρομή των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών**

Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας μέσω μετατροπής της σε μηχανική ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους με τους γνωστούς νερόμυλους[2]. Ήδη κατά την ρωμαϊκή εποχή παράγονται άλευρα κλπ. Με υδροκίνηση των μύλων. Ωστόσο, φαίνεται ότι η υδραυλική δύναμη χρησιμοποιήθηκε από την εποχή του αρχαίου κινέζικου πολιτισμού.

Η τεχνολογία των νερόμυλων δεν εξελίχθηκε ουσιαστικά μέχρι την εμφάνιση, στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, των πρώτων μηχανών που θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως υδροστρόβιλοι[2]. Ο πρώτος παγκόσμιος υδροηλεκτρικός σταθμός κατασκευάστηκε το 1882 στο Appleton του Winconsin η παραγωγή του οποίου (12,5KW) χρησιμοποιήθηκε στην τροφοδότηση δύο χαρτοβιομηχανιών και ενός σπιτιού. Έκτοτε η ανάπτυξη υδροηλεκτρικής ενέργειας διαδόθηκε γρήγορα, εν τούτοις ακόμη και μέχρι το 1910 οι περισσότερες μονάδες παρήγαγαν μόνο εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες KW.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Σταδιακά, η αύξηση των ενεργειακών αναγκών, που συμβάδιζε με τις τεχνολογικές προόδους και τα διαθέσιμα μέσα, επέτρεψε την κατασκευή όλο και μεγαλύτερων έργων μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική[2].

Στην Ευρώπη τουλάχιστον οι δυο-τρεις δεκαετίες μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως η χρυσή περίοδος των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων επειδή η έντονη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού έγινε με μονάδες μεγάλης ισχύος μερικών εκατοντάδων MW η κάθε μία. Σε σύγκριση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα παλαιάς τεχνολογίας μικρά υδροηλεκτρικά έργα που ήδη υπήρχαν αποδείχτηκαν αντιοικονομικά και σταδιακά εγκαταλείφθηκαν[2].

Το μέσο του 20<sup>ου</sup> αιώνα συνοδεύεται από την μείωση του ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη υδροηλεκτρικών σταθμών στο πλαίσιο του ανταγωνισμού από την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας. Από την δεκαετία του 1980 περίπου, παρατηρείται διεθνώς ένα έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών έργων που εκδηλώνεται είτε με την αξιοποίηση νέων μικρών υδατοπτώσεων είτε με την επανασχεδίαση και επανεξοπλισμό των μικρών υδροηλεκτρικών που είχαν απομείνει ή εγκαταλειφθεί[2].

Παράλληλα, κατά τις τελευταίες πέντε δεκαετίες παρατηρείται ιδιαίτερη πρόοδος στο σχεδιασμό υδραυλικών και μηχανικών διατάξεων και στην επιστήμη και τεχνολογία πολλαπλών μηχανικών αρχών στενά συσχετισμένων με τις υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Η συγκεκριμένη πρόοδος οδήγησε σε βελτιωμένες και οικονομικότερες λύσεις και σε εντελώς νέες τεχνολογικές μεθόδους.

Η ραγδαία αύξηση των εγκατεστημένων ισχύων συνέβαλε αναμφίβολα στον περιορισμό του κόστους της επένδυσης των εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας, τη στιγμή που ο τηλεχειρισμός και η αυτοματοποίηση των σταθμών παραγωγής οδήγησε στην μείωση των λειτουργικών κοστών. Δεδομένου του γεγονότος πως ο οικονομικός σχεδιασμός και η ασφαλής λειτουργία των σταθμών παραγωγής σχετίζονται άμεσα με τα αξιόπιστα υδρολογικά στοιχεία, η αξιοσημείωτη πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών στους τομείς των μετεωρολογικών και υδρολογικών επιστημών κρίνεται ως σημαντικός παράγοντας στην ανάπτυξη των υδροηλεκτρικών σταθμών. Τέλος, αξιοσημείωτη κρίνεται η υπεροχή των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων έναντι αντίστοιχων θερμικών και πυρηνικών στους τομείς της προστασίας του περιβάλλοντος και της ασφάλειας αντίστοιχα, τη στιγμή που σημαντικές προσπάθειες εγκαινιάζονται τελευταία στην κατεύθυνση της προστασίας του φυσικού τοπίου.[4]

### 2.3 Χαρακτηριστικά Μικρών Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Τα πλεονεκτήματα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παρουσιάζονται σύμφωνα με τον Ellis Armstrong, πρώην διευθυντή του Αμερικανικού Γραφείου Αναμόρφωσης (U.S. Bureau of Reclamation), ακολούθως[3]. Συγκεκριμένα οι μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις:

- ✚ Αποτελούν μη καταναλωτικούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, με την αξιοποίηση ανανεώσιμης πηγής η οποία καθίστανται διαρκώς διαθέσιμη μέσω του υδρολογικού κύκλου από την ενέργεια του ήλιου.
- ✚ Δεν συμμετέχουν στην μόλυνση του περιβάλλοντος και δεν απελευθερώνουν θερμότητα. Οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους κρίνονται αμελητέες και για μικρές εγκαταστάσεις είναι δυνατόν να παραβλεφθούν πλήρως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

- ✚ Είναι δυνατό να σχεδιασθούν και να κατασκευασθούν εντός του χρονικού διαστήματος των δύο ετών. Οι απαιτήσεις έκδοσης αδειών είναι ελάχιστες, ο αντίστοιχος εξοπλισμός είναι άμεσα διαθέσιμος και οι διαδικασίες κατασκευής γνωστές σε βάθος.
- ✚ Απαιτούν κάποιο είδος ελέγχου ύδατος, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους ρύθμισης της παροχής. Αποτελούν ωστόσο σημαντικό παράγοντα στην πολλαπλή χρήση των υδάτινων πόρων και είναι δυνατόν να περιορίσουν τις πιθανές καταστροφικές πλημμύρες. Στην περίπτωση ύπαρξης διαδικασιών αποθήκευσης ύδατος, τα νερά των πλημμυρών συγκρατούνται και διοχετεύονται καλύτερα στην αγροτική παραγωγή, τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, την ομαλή ναυσιπλοΐα, την προστασία των ψαριών και της άγριας ζωής, την αναψυχή, τις κοινοτικές χρήσεις και το βέλτιστο έλεγχο των λυμάτων.
- ✚ Αποτελούν αξιόπιστη ενεργειακή πηγή στο πλαίσιο των υδρολογικών περιορισμών της αντίστοιχης τοποθεσίας. Η σχετική απλότητα του υδραυλικού εξοπλισμού καθιστά την ενέργεια άμεσα διαθέσιμη. Δεδομένης της απουσίας θερμότητας, ο σχετικός εξοπλισμός χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρή συχνότητα βλαβών.
- ✚ Σε απομακρυσμένες περιοχές με τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας είναι δυνατόν να αποτελέσουν καταλυτικό παράγοντα στην κινητοποίηση παραγωγικών πηγών και στη δημιουργία σημαντικών οικονομικών ευκαιριών για τους ντόπιους κατοίκους.
- ✚ Χαρακτηρίζονται από αξιόπιστη και ευπροσάρμοστη λειτουργία, συμπεριλαμβανομένης ταχείας έναρξης και παύσης λειτουργίας (start-up and shut-down) ως αντίδραση σε απότομες μεταβολές της ζήτησης. Αποτελούν συνεπώς πολύτιμο τμήμα κάθε μεγάλου ηλεκτρικού συστήματος, αυξάνοντας τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία.
- ✚ Χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ικανότητα αιχμής ισχύος. Τη στιγμή που περίπου τέσσερις μονάδες ενεργειακής εισόδου απαιτούνται για την παραγωγή τριών μονάδων εξόδου, η είσοδος αποτελεί υδραυλική ενέργεια χαμηλού κόστους και η έξοδος αντίστοιχα υψηλής αξίας ηλεκτρική ενέργεια. Στο πλαίσιο μεγάλων ηλεκτρικών συστημάτων, η εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση φορτίων αιχμής προσφέρεται πιθανόν από τη χρήση ή πολυέξοδη επέκταση παλαιών και σχετικά χαμηλής απόδοσης θερμικών μονάδων.
- ✚ Διαθέτουν τεχνολογία επαρκώς αναπτυγμένη, με τις αποδόσεις των υδροτροβίλων να αγγίζουν τιμές της τάξης του 90%. Οι εγκαταστάσεις μικρού μεγέθους ισχύος από μερικά kW έως αρκετά MW βρίσκονται σε λειτουργία από την αρχή του αιώνα. Τη στιγμή που ο εξοπλισμός απαιτείται να προσαρμοσθεί στην αντίστοιχη τοποθεσία για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης, οι επιδόσεις του σε γενικές γραμμές ακολουθούν τις αξιώσεις του κατασκευαστή.
- ✚ Συνοδεύονται από διατάξεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής. Κατά κανόνα, τα φράγματα και τα έργα ελέγχου πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές για χρονικό διάστημα ενός αιώνα και πλέον, με περιορισμένες επισκευές.
- ✚ Απαιτούν περιορισμένο προσωπικό. Ορισμένοι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί λειτουργούν αποκλειστικά με τηλεχειρισμό. Παράλληλα η ανεξαρτησία από τα καύσιμα σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού καθιστούν τις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ανθεκτικές στον πληθωρισμό.
- ✚ Αναπτύσσονται σε συνδυασμό με μέγιστη αξιοποίηση των τοπικών υλικών και εργατικού δυναμικού. Συγκρινόμενες με τις θετικές μονάδες,

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

οι μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις προσφέρουν μεγαλύτερη απασχόληση κατά την κατασκευή των έργων πολιτικού μηχανικού.

- ✚ Αξιοποιούν ενεργειακές πηγές ανεκμετάλλευτες, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η χρήση του αντίστοιχου δυναμικού εκτιμάται σε ποσοστό κάτω του 7%. Σε ορισμένες χώρες το αντίστοιχο ποσοστό παραμένει κάτω του 2%.
- ✚ Χαρακτηρίζονται από οικονομική βιωσιμότητα βελτιωμένη σε σύγκριση με άλλες ενεργειακές πηγές οι οποίες χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα. Συνοδευόμενες από περισσότερο ρεαλιστικές μεθόδους οικονομικής αποτίμησης, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους εκτίμησης της αξίας της χρήσης του ανεξάντλητου ύδατος, της ανεξαρτησίας από τα καύσιμα και τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις καθίστανται αυξανόμενα επιθυμητές.
- ✚ Σε περίπτωση υπαρκτών εγκαταστάσεων σε βιομηχανοποιημένες χώρες παρέχεται η δυνατότητα αύξησης της εγκαταστημένης ισχύος τη στιγμή που η πιθανότητα μετασκευών και επιπρόσθετων στροβίλων και γεννητριών καθιστά την αναβάθμιση των υπαρκτών εγκαταστάσεων ελκυστική.

Τα μειονεκτήματα τα οποία συνδέονται με την ανάπτυξη και λειτουργία μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παρουσιάζονται αισθητά περιορισμένα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα, κρίνεται ωστόσο αναγκαία η θεώρηση και αντιμετώπιση τους στο πλαίσιο βέλτιστου σχεδιασμού αντίστοιχων έργων. Συγκεκριμένα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μικρής κλίμακας:

- ✚ Παρουσιάζουν υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής, το οποίο συνδέεται με τα εκτεταμένα έξοδα αγορών εκτάσεων, απαλλοτριώσεων, έργων διαμόρφωσης, στεγανοποίησης, κατασκευής καναλιών εκτροπής, φραγμάτων και δρόμων προσπέλασης καθώς και των απαραίτητων έργων πολιτικού μηχανικού για την εγκατάσταση του κατάλληλου ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού
- ✚ Χαρακτηρίζονται από λειτουργία άμεσα εξαρτημένη από τα υδρολογικά στοιχεία της αντίστοιχης περιοχής. Απαιτείται εκτενής μελέτη των στοιχείων παροχής ύδατος προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα διακοπόμενης λειτουργίας, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια των ξηρών μηνών του έτους.
- ✚ Κατασκευάζονται αποκλειστικά σε τοποθεσίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από αξιοποιήσιμα υδρολογικά στοιχεία. Συνεπώς δεν καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη τους με κριτήριο τις ενεργειακές απαιτήσεις και την ευκολία κατασκευής.
- ✚ Εγκαθίστανται συνήθως σε περιοχές ορεινές και απομακρυσμένες, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται η συνολική επένδυση με υψηλά έξοδα μεταφοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.4 Ταξινόμηση Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Από πλευράς αρχής λειτουργίας, τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική όσο και στη μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική, ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο δεν διαφέρει από ένα μεγάλο.

Ο χαρακτηρισμός ενός Υδροηλεκτρικού Έργου (ΥΗΕ) ως «μικρού» δεν αναφέρεται αποκλειστικά στην εγκατεστημένη ισχύ ή στις διαστάσεις των μονάδων αλλά σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών, πολλά από τα οποία δεν είναι

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

μετρήσιμα, δηλ. οι διαφορές μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ δεν είναι μόνο ποσοτικές αλλά κυρίως και ποιοτικές. [2]

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι δυνατό να ταξινομηθούν σύμφωνα με ποικίλες θεωρήσεις. Ορισμένες λογικές μέθοδοι ταξινόμησης των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παρατίθενται ακολούθως:

1. Οι σταθμοί αξιοποίησης της υδροδυναμικής ενέργειας ταξινομούνται από **τεχνικής πλευράς** στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ✚ Σταθμοί οι οποίοι εκμεταλλεύονται την ενέργεια των ρεόντων υδάτων και των λιμνών που τροφοδοτούνται από φυσικές πηγές(συμβατική χρήση υδροδυναμικής ενέργειας)
- ✚ Σταθμοί άντλησης-ταμίευσης, οι οποίοι λειτουργούν σύμφωνα με την ημερήσια καμπύλη φορτίου και πάντα σε παράλληλη λειτουργία με άλλους σταθμούς.
- ✚ Σταθμοί αξιοποίησης της παλιρροιακής ενέργειας.
- ✚ Υδροηλεκτρικοί σταθμοί πώσης ύδατος.
- ✚ Μετατροπείς ενέργειας κυμάτων

2. Ταξινόμηση των υδροηλεκτρικών σταθμών σύμφωνα με τη **δυνατότητα ταμίευσης (αποθήκευσης)**:

- ✚ Σταθμοί χωρίς αποθήκευση, στους οποίους περιλαμβάνεται μέρος των αντίστοιχων της παραπάνω κατηγορίας 1.
- ✚ Σταθμοί με αποθήκευση, οι οποίοι περιλαμβάνουν τους υπόλοιπους της παραπάνω κατηγορίας 1 και το σύνολο της κατηγορίας 2.
- ✚ Ανάλογα με το χρονικό διάστημα της αποθήκευσης, σταθμοί ημερήσιας, εβδομαδιαίας, εποχιακής, ετήσιας, πολλαπλών ετών και πλήρους χρόνου αποθήκευσης είναι δυνατό να διακριθούν.

3. Ταξινόμηση των σταθμών σύμφωνα με τις αρχές της **ευεργειακής οικονομίας**:

- ✚ Αυτόνομοι/μεμονωμένοι (isolated) σταθμοί, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα, χωρίς να συμμετέχουν σε ένα ευρύτερο δίκτυο και παρέχουν την παραγόμενη ενέργεια αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο.
- ✚ Διασυνδεδεμένοι (interconnected) σταθμοί, οι οποίοι λειτουργούν παράλληλα με άλλους σταθμούς, θερμικούς και υδροηλεκτρικούς και παρέχουν την παραγόμενη ενέργεια στο ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο των καταναλωτών.

Επί του παρόντος οι εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος καθώς και η πλειοψηφία των αντίστοιχων μικρής και μίνι ισχύος κατασκευάζονται αποκλειστικά για λειτουργία στο πλαίσιο διασυνδεδεμένων δικτύων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

4. Ταξινόμηση των σταθμών ανάλογα με το **χαρακτήρα και την αξία της παραγόμενης ενέργειας**:

- ✚ Σταθμοί βάσης φορτίου, οι οποίοι παρέχουν ενέργεια σε συνεχή σχεδόν λειτουργία, με ετήσιο βαθμό χρησιμοποίησης από 60-80%.
- ✚ Σταθμοί φορτίου αιχμής, οι οποίοι λειτουργούν για μικρά χρονικά διαστήματα και καλύπτουν ανάγκες αιχμής του συστήματος. Ο ετήσιος βαθμός χρησιμοποίησης των συγκεκριμένων σταθμών κυμαίνεται από 10-15% ως 40-50% ανάλογα με τις συνθήκες εκμετάλλευσής.

5. Ο διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών με κριτήριο την **εγκατεστημένη ισχύ** τους παρουσιάζει διαφορές μεταξύ των χωρών. Ωστόσο,



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

λαμβάνοντας ως οδηγό τις γενικές συνθήκες της Ευρώπης, οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ταξινομούνται ως:

- ✚ Μίνι και μικρο (mini and micro) σταθμοί με ισχύ έως περίπου το 1MW.
- ✚ Μικροί (small) σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ από 1 MW ως 10 MW.
- ✚ Μεσαίος ισχύος (medium) σταθμοί με ισχύ από 10 MW ως 100 MW.
- ✚ Μεγάλης ισχύος (high capacity) από 100 MW και άνω.

Τα όρια αυτά μεταξύ micro, mini και μικρής δεν είναι απόλυτα και υπάρχουν αποκλίσεις σε διάφορες χώρες καθώς σχετίζονται κυρίως με τις διαδικασίες αδειοδότησης και τις προδιαγραφές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο.[2]

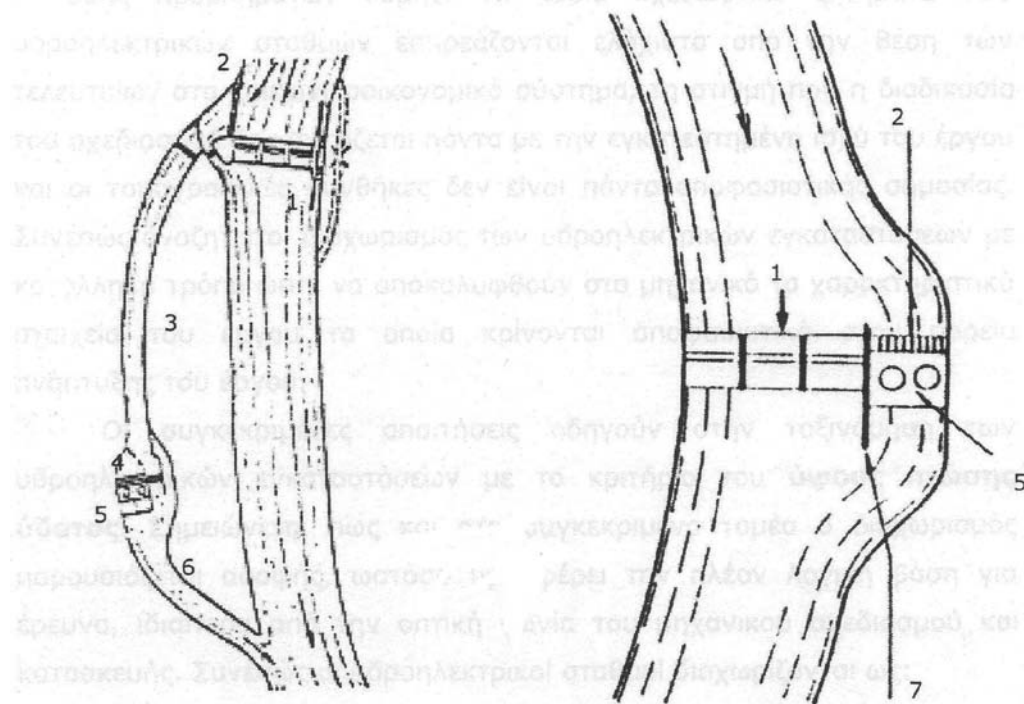
6. Με κριτήριο την **οικονομία ύδατος** ταξινομούνται:

- ✚ Σταθμοί αποκλειστικά για παραγωγή ενέργειας.
- ✚ Σταθμοί πολλαπλών χρήσεων με την αξιοποίηση του αποθηκευμένου ύδατος στο πλαίσιο αναγκών άρδευσης, ναυσιπλοΐας κ.α.
- ✚ Βοηθητικοί σταθμοί, οι οποίοι κατασκευάζονται κυρίως για να εξυπηρετήσουν άλλες ανάγκες, ενώ η παραγωγή ισχύος είναι μικρότερης σημασίας (π.χ. μικρές μονάδες στην έξοδο εκχειλιστών)

7. Ταξινόμηση με βάση τη **διάταξη** τους:

- ✚ Σταθμοί καναλιού εκτροπής.
- ✚ Σταθμοί ροής ποταμού (Run-of-river)

Οι συγκεκριμένοι τύποι διάταξης παρουσιάζονται στο Σχ. 2.1 [1]



α. Τύπος καναλιού εκτροπής (diversion canal)

β. Τύπος ροής ποταμού (run-of-river)

**Σχήμα 2.1** Κύριοι τύποι διάταξης υδροηλεκτρικών σταθμών

1. Φράγμα και εκχειλιστές, 2. Υδροληψία, 3. Αγωγός προσαγωγής,
4. Λεκάνη ποταμού, 5. Σταθμός παραγωγής, 6. Αγωγός φυγής, 7. Υποσύλωμα διαχωρισμού εξόδου σταθμού και φυσικής κοίτης ποταμού.

8. Ταξινόμηση με κριτήριο τα **τοπογραφικά στοιχεία**:

- ✚ Σταθμοί σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

- ✚ Σταθμοί σε λοφώδεις περιοχές.
- ✚ Σταθμοί σε ορεινές περιοχές.

9. Ταξινόμηση των υδροηλεκτρικών σταθμών με κριτήριο το είδος κατασκευής της υδροηλεκτρικής μονάδας:

- ✚ Μονάδες με ύδατα συνεχούς ροής: συσσωρεύεται το νερό ενός ποταμού και ελέγχεται η απορρέουσα ποσότητα για την παραγωγή ενέργειας.
- ✚ Μονάδες με ταμιευτήρα νερού: αποθηκεύεται το νερό για κάποιο χρονικό διάστημα (ώρες, ημέρες, εβδομάδες) και, όταν παρουσιαστεί ζήτηση φορτίου, διατίθεται το νερό για την παραγωγή ενέργειας.
- ✚ Αντλητική μονάδα: με τυχόν περίσσειμα ηλεκτρικής ενέργειας αντλείται το νερό από χαμηλό σημείο σε υψηλότερο και, όταν παρουσιαστεί ζήτηση φορτίου, διατίθεται το νερό για την παραγωγή ενέργειας.
- ✚ Άλλοι τύποι υδροηλεκτρικών μονάδων κατασκευάζονται λιγότερο και μόνο σε γεωγραφικές περιοχές με ειδικές προδιαγραφές, όπως για την αξιοποίηση της θαλάσσιας παλίρροιας, των θαλάσσιων κυμάτων και ρευμάτων κ.α.

Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών που έγινε με κριτήριο τη χρήση και τη θέση των σταθμών δεν προσφέρει πρακτική βοήθεια στον σχεδιασμό και την κατασκευή τους στο πλαίσιο της επίλυσης προβλημάτων δομής. Συνεπώς αναζητείται διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων με κατάλληλο τρόπο ώστε να αποκαλυφθούν στον μηχανικό τα χαρακτηριστικά στοιχεία του έργου τα οποία κρίνονται αποφασιστικά στην πορεία ανάπτυξης του έργου.

Μια τέτοια διάκριση των υδροηλεκτρικών έργων αναφέρεται στο μέγεθος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ . Σημειώνεται ότι και στον συγκεκριμένο ο διαχωρισμός παρουσιάζεται ασαφής, ωστόσο προσφέρει την πλέον λογική βάση για έρευνα, ιδιαίτερα από την οπτική γωνία του μηχανικού σχεδιασμού και κατασκευής. Συνεπώς οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διαχωρίζονται ως:

- ✚ Σταθμοί μικρού ύψους όταν το  $H$  είναι μικρότερο των 20 m
- ✚ Σταθμοί μέσου ύψους όταν  $20 < H < 150$  m
- ✚ Σταθμοί μεγάλου ύψους όταν  $H > 150$  m [2],[4].

Ο διαχωρισμός αυτός διαφοροποιείται στο πλαίσιο της βιβλιογραφίας. Έτσι συναντάται ο ακόλουθος διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων[7]:

- ✚ Σταθμοί μικρού ύψους όταν το  $H$  είναι μικρότερο των 15 m
- ✚ Σταθμοί μέσου ύψους όταν  $15 < H < 50$  m
- ✚ Σταθμοί μεγάλου ύψους όταν  $H > 50$  m

Μια ακόμα ταξινόμηση που συναντάται στην βιβλιογραφία είναι η εξής[8]:

- ✚ Σταθμοί μικρού ύψους όταν  $2 < H < 30$  m
- ✚ Σταθμοί μέσου ύψους όταν  $30 < H < 100$  m
- ✚ Σταθμοί μεγάλου ύψους όταν  $H > 100$  m

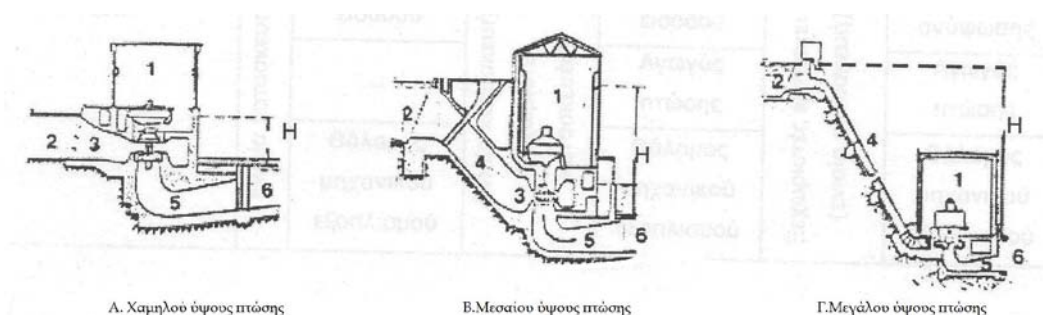
Σε ορισμένες περιπτώσεις παράλληλα συνδέεται το κριτήριο του ύψους υδατόπτωσης με το αντίστοιχο της εγκατεστημένης ισχύος. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκριμένης προσέγγισης[5].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	Ύψος υδατόπτωσης (m)		
	Μικρό	Μεσαίο	Μεγάλο
5-50	1,5-15	15-50	50-150
50-500	2-20	20-100	100-250
500-5000	3-30	30-120	120-400

**Πίνακας 2.1** Ταξινόμηση υδροηλεκτρικών σταθμών.

Η διάταξη των συγκεκριμένων τύπων υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 2.2.



**Σχήμα 2.2** Κύριοι τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών

1. Θάλαμος μονάδων
2. Υδροληψία
3. Αγωγός εισόδου
4. Αγωγός προσαγωγής
5. Αγωγός εκτόνωσης
6. Αγωγός φυγής

### 2.5 Διαμόρφωση μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός παράγει ηλεκτρική ενέργεια ή μηχανική με τη μετατροπή της διαθέσιμης δύναμης στο ρέον νερό των ποταμών, των καναλιών και των ρευμάτων. Ο αντικειμενικός σκοπός ενός σταθμού υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι να μετατρέπει την πιθανή ενέργεια μιας μάζας νερού που ρέει σε ένα ρεύμα με μια ορισμένη πτώση, η οποία λέγεται υδατόπτωση ( head ), σε ηλεκτρική ενέργεια στο χαμηλότερο όριο του σταθμού, όπου βρίσκεται το εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο όρος “υδροδυναμικό έργο” χαρακτηρίζει το σύνολο των τεχνικών έργων τα οποία κατασκευάζονται σε συγκεκριμένη υδροδυναμική τοποθεσία στο πλαίσιο της πλήρους ή της μερικής εκμετάλλευσης του υπάρχοντος ή τεχνητού υδάτινου δυναμικού. Το υδροδυναμικό έργο περιλαμβάνει διάφορα τεχνικά έργα, τα οποία παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές ίδια σε κάθε σχεδιαζόμενο έργο και κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

**1. Δομικά έργα** τα οποία αποτελούν αντικείμενο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ύψος της επένδυσης. Τα κύρια μέρη των έργων πολιτικού μηχανικού ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι:

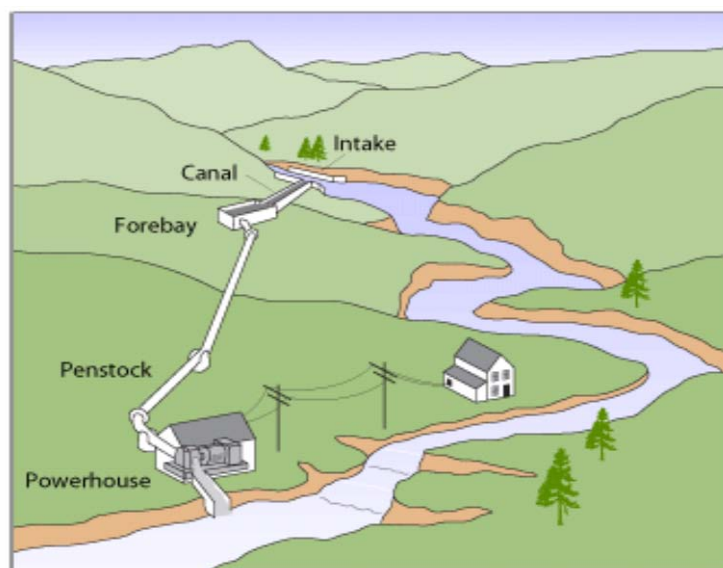
- ✦ Το φράγμα (dam) σκοπός του οποίου είναι η δημιουργία δεξαμενής, του ταμιευτήρα, στην οποία συγκεντρώνεται ποσότητα νερού ( προερχόμενη από την φυσική απορροή του υδατορεύματος) από την οποία μέσω του αγωγού προσαγωγής, το νερό προσάγεται στον υδροστρόβιλο[3].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

- ✚ Ο εκχειλιστής (spillway) σκοπός του οποίου είναι η διοχέτευση πλημμυρικής παροχής ώστε η στάθμη του νερού να μην ξεπεράσει την στέψη του φράγματος.
- ✚ Τα έργα εκτροπής ή η σήραγγα εκτροπής ( diversion canal) μέσω των οποίων διοχετεύεται η φυσική παροχή κατά την διάρκεια κατασκευής της τελευταίας φάσεως του φράγματος
- ✚ Ο εκκενωτής πυθμένος (ground cleaner) μέσω του οποίου εκκενώνεται ο ταμιευτήρας σε περίπτωση ανάγκης ή συντήρησης ενώ επίσης από αυτό διοχετεύεται η απαιτούμενη παροχή συντήρησης της κοίτης του ποταμού.
- ✚ Αγωγοί προσαγωγής (power canals), ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από τον αντίστοιχο των μονάδων παραγωγής.
- ✚ Σταθμός παραγωγής (power station)
- ✚ Αγωγός φυγής εκτόνωσης ( tailrace)

**2. Μηχανολογικός εξοπλισμός** που περιλαμβάνει κατασκευές ρύθμισης της παροχής ύδατος του φράγματος, των εκχειλιστών και του σταθμού παραγωγής και τον αναγκαίο εξοπλισμό ηλεκτροπαραγωγής, λειτουργίας και συντήρησης του έργου. Συγκεκριμένα ο μηχανολογικός εξοπλισμός απαρτίζεται από τις ακόλουθες διατάξεις:

- ✚ Εσχάρες εισαγωγής ύδατος (intake grills), για την προστασία των υδροστροβίλων από τα φερτά αντικείμενα του ποταμού (ξύλα, πάγος κτλ.), συνοδευόμενες από μηχανισμούς καθαρισμού και συντήρησης τους.
- ✚ Θυροφράγματα και βαλβίδες (gates and valves), για την προστασία από πιθανή ανύψωση της επιφάνειας του ύδατος, και τη ρύθμιση των αγωγών προσαγωγής καθώς και των υδροστροβίλων.
- ✚ Υδροστρόβιλοι ( water turbines).
- ✚ Ρυθμιστές στροφών (speed governors/regulators), για την εξασφάλιση σταθερής ταχύτητας περιστροφής του άξονα, ανεξάρτητα από την ζήτηση του ηλεκτρικού δικτύου.
- ✚ Πολλαπλασιαστές στροφών (speed adjusters), για την προσαρμογή των στροφών περιστροφής του άξονα του υδροστροβίλου στις αντίστοιχες στροφές της γεννήτριας.
- ✚ Αντλίες (pumps), για την άντληση των υδάτων στην περίπτωση σταθμών άντλησης και ταμίευσης.



**Σχήμα 2.3** Σχηματική απεικόνιση μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού.

**3. Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός,** ο οποίος περιλαμβάνει το σύνολο των κατασκευών που απαιτούνται για την παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και απαρτίζεται κύρια από τις ακόλουθες διατάξεις:

- ✚ Γεννήτριες ή εναλλακτήρες (generators/alternators), οι οποίες συνδέονται με τους υδροστροβίλους στοχεύοντας στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στο πλαίσιο διασυνδεδεμένων με ηλεκτρικό δίκτυο υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων χρησιμοποιούνται κύρια ασύγχρονες μονάδες τη στιγμή που οι αντίστοιχες σύγχρονες βρίσκουν εφαρμογή στην περίπτωση αυτόνομων εγκαταστάσεων[2].
- ✚ Κινητήριες μηχανές (engines).
- ✚ Συστήματα ρύθμισης διέγερσης και τάσης (automatic voltage regulators).
- ✚ Μετασχηματιστές (transformers), η χρήση των οποίων αποσκοπεί στην ανύψωση της παραγόμενης τάσης στο αναγκαίο επίπεδο για την άμεση χρήση της ή τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.
- ✚ Διακόπτες ζεύξης και απόζευξης.
- ✚ Όργανα ελέγχου.
- ✚ Γραμμές μεταφοράς (transmission lines), για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον τόπο κατανάλωσής της.

Οι τελικές διαστάσεις του σταθμού παραγωγής του σχεδιαζόμενου έργου καθορίζονται από τις επιλεγόμενες διατάξεις με το σημαντικότερο παράγοντα να αποτελούν ο τύπος, ο αριθμός και το μέγεθος των υδροστροβίλων και γεννητριών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## *Ροή ύδατος σε αγωγό*

### **3.1 Εισαγωγή**

Η ροή ύδατος σε αγωγούς αποτελεί αντικείμενο της υδραυλικής μηχανικής, η οποία βασίζεται στις αρχές της μηχανικής των ρευστών, σε συνδυασμό με τη χρήση πλήθους εμπειρικών σχέσεων που οδηγούν στην επίτευξη πρακτικών λύσεων μηχανικής. Μέχρι τώρα δεν υπάρχει και πιθανώς ποτέ δεν θα υπάρξει, μια γενική μεθοδολογία για τη μαθηματική ανάλυση της μετακίνησης των ρευστών. Με βάση την εμπειρία που συσσωρεύτηκε, μετά από πολλά χρόνια μελέτης και πρακτικής εφαρμογής, υπάρχουν ιδιαίτερες λύσεις για συγκεκριμένα προβλήματα[6].

Προκειμένου να αναπτυχθεί επιτυχώς ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός μια λεπτομερής κατανόηση των αρχών της υδραυλικής είναι απαραίτητη[6].

### 3.2 Μέθοδοι ελάττωσης τριβών

Η δυναμική ενέργεια που περιέχουν τα ρέοντα ύδατα, από κάποια υψόμετρο προς την επιφάνεια της θάλασσας, καταναλώνεται στο να υπερνικά τις τριβές κατά τη ροή και να τροφοδοτεί με ενέργεια τους στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ζητούμενο κατά την ανάπτυξη ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι η ελάττωση των τριβών και συνεπώς η εκμετάλλευση της μέγιστης δυναμικής ενέργειας. Η ενέργεια που χάνεται στις παραπάνω τριβές ονομάζεται αντίσταση κοίτης και μπορεί να ελαττωθεί με τις παρακάτω μεθόδους:

- ✚ Αυξάνοντας το βάθος του νερού, είτε χτίζοντας φράγματα, είτε φράσσοντας το με κινητά υδροφράγματα. Δημιουργείται έτσι μια διαφορά ύψους  $H$ , ανάμεσα στην στάθμη στάσιμων νερών και στη φυσική επιφάνεια του ποταμού, το οποίο μπορεί να προστεθεί στο ωφέλιμο ύψος της υδατόπτωσης. Ο βαθμός αξιοποίησης της δυναμικής ενέργειας, σε κάθε τμήμα του ποταμού  $L_0$ , παίρνοντας ως ωφέλιμο ύψος το  $H$  και για δεδομένη παροχή  $Q$  είναι:

$$n_m = \frac{H}{H_0} \quad (3.1)$$

Αυξάνοντας τον αριθμό των φραγμάτων ο βαθμός αξιοποίησης μπορεί να αυξηθεί, αλλά είναι αμφίβολο αν αυτή η λύση είναι οικονομική ή συμφέρει περιβαλλοντικά.

- ✚ Με την εκτροπή ολόκληρης ή τμήματος της ροής, μέσα σε τεχνητό βοηθητικό αγωγό ο οποίος ονομάζεται κανάλι ισχύος. Έτσι δημιουργείται υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο υψόμετρο της κοίτης του κανονικού ποταμού και στο υψόμετρο του καναλιού ισχύος, πάνω στο οποίο βρίσκεται ο σταθμός παραγωγής.
- ✚ Με την εκτροπή του ποταμού, συντομεύοντας την πορεία του, μέσω μιας τεχνητής διώρυγας ή σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε ικανοποιητική υψομετρική διαφορά, ιδίως αν η κοιλάδα του ποταμού χαρακτηρίζεται από πολλές απότομες ή πεταλοειδείς στροφές[7].

### 3.3 Χαρακτηριστικά ύδατος σε αγωγούς

Η ροή των πραγματικών ρευστών κρίνεται περισσότερο πολύπλοκη από την αντίστοιχη των ιδανικών ή τέλειων ρευστών, εξαιτίας των φαινομένων τα οποία προκύπτουν από την ύπαρξη του ιξώδους. Το ιξώδες προκαλεί διατμητικές τάσεις ή δυνάμεις τριβής μεταξύ των μορίων του ρευστού και μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων του αγωγών, μέσα στους οποίους κινείται το ρευστό, με τελικό αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντίστασης προς την κίνηση. Οι επιδράσεις του ιξώδους αναγκάζουν τα πραγματικά ρευστά να ρέουν υπό δύο διαφορετικές καταστάσεις οι οποίες είναι[8]:

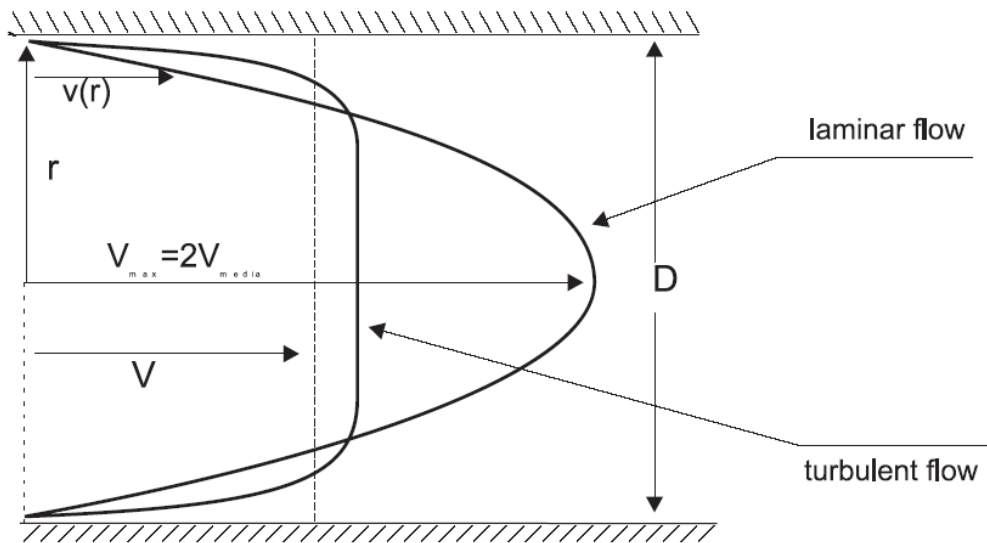
- ✚ η **στρωτή ή παράλληλη ροή** (laminar flow), όπου τα μόρια του ρευστού κινούνται σε παράλληλες γραμμές και
- ✚ η **τυρβώδης ροή** (turbulent flow), όπου τα μόρια του ρευστού κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις με τυχαίο και απρόβλεπτο τρόπο[7].

Η κατανομή ταχυτήτων του ρευστού έχει μορφή παραβολής και η μέση ταχύτητα αποτελεί το 50% της αντίστοιχης μέγιστης κεντρικής[6].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Οι συγκεκριμένες καταστάσεις ροής παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1.



**Σχήμα 3.1:** Κατανομή ταχυτήτων ρευστού για την στρωτή και για την τυρβώδη ροή[6]

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των παραπάνω καταστάσεων ροής πραγματικών ρευστών και ιδιαίτερα του ύδατος μελετήθηκαν από τον Osborne Reynolds κατά το έτος 1883 με τη βοήθεια της συσκευής η οποία παρουσιάζεται στο Σχ.3.2. Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια δεξαμενή που περιέχει καθαρό νερό. Εντός αυτής της δεξαμενής τοποθετείται γυάλινος αγωγός κυκλικής διατομής (σωλήνας) το ανάντη άκρο του οποίου έχει λάβει κωδωνοειδή μορφή προς ελαχιστοποίηση της διαταραχής του εισερχόμενου ρευστού. Ανάντη της εισόδου του γυάλινου σωλήνα υπάρχει ακροφύσιο συνδεδεμένο με μικρή δεξαμενή η οποία περιέχει ρευστό με δείκτη. Κατάντη της εισόδου υπάρχει βαλβίδα ελέγχου της παροχής.

Αν η ταχύτητα του ρευστού μέσω του σωλήνα είναι μικρή (**στρωτή ροή**) τότε δεν υπάρχει ανάμειξη μεταξύ ύδατος και δείκτη (Σχήμα 3.2 β). Η ροή είναι αρκετά ομαλή ώστε να φαίνεται ότι είναι σταθερή. Καθώς η βαλβίδα ανοίγει, διοχετεύεται περισσότερη παροχή μέσω του σωλήνα και ως εκ τούτου αυξάνει η ταχύτητα. Κάποτε έρχεται η στιγμή κατά την οποία ο δείκτης αρχίζει να κυματίζει (**μεταβατική ροή**). Περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας αυξάνει τους κυματισμούς. Ο δείκτης δεν έχει τώρα μορφή απλής ροϊκής γραμμής, ενός νήματος δηλαδή, αλλά εντελώς ξαφνικά αναμειγνύεται μερικώς ή ολικώς με το ύδωρ εντός του αγωγού (**τυρβώδης ροή**)[9].

Ο Osborne Reynolds μετά από πειράματα που διεξήγαγε, βρήκε ότι η μετάβαση από την στρωτή ροή στην τυρβώδη εξαρτάται, όχι μόνο στην ταχύτητα, επίσης από την διάμετρο του αγωγού και στο ιξώδες του ρευστού, και είναι ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς την δύναμη ιξώδους. Αυτός ο λόγος, είναι γνωστός ως αριθμός Reynolds και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

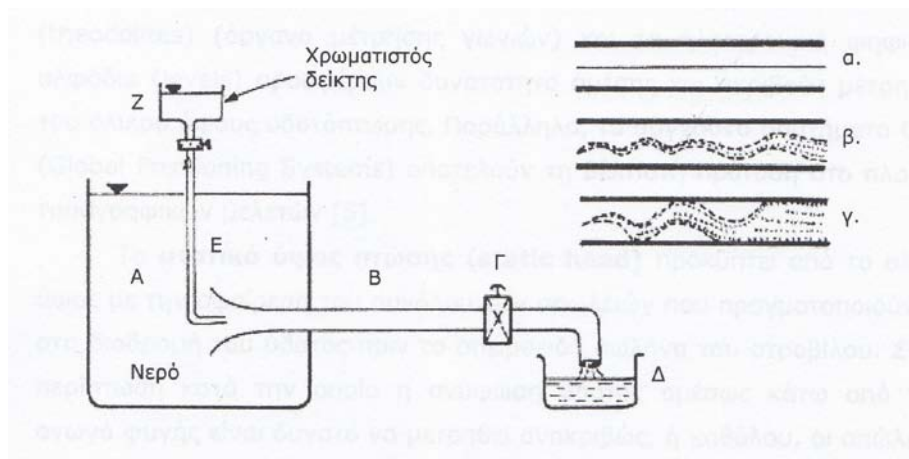
$$Re = \frac{u \cdot V}{\nu} \quad (3.3)$$

όπου  $u$  η μέση ταχύτητα ροής (m/sec),  $D$  η διάμετρος του αγωγού (m) και  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m<sup>2</sup>/sec)[6]. Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι τιμές του κινηματικού ιξώδους  $\nu$  του ύδατος για διάφορες θερμοκρασίες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Θερμοκρασία ύδατος (οC)	Κινηματικό ιξώδες (m <sup>2</sup> /sec)
0	0,179x10 <sup>-5</sup>
10	0,131x10 <sup>-5</sup>
15,6	0,112x10 <sup>-5</sup>
21,1	0,0974x10 <sup>-5</sup>
26,7	0,0862x10 <sup>-5</sup>
32,2	0,0763x10 <sup>-5</sup>

**Πίνακας 3.1** Κινηματικό ιξώδες νερού [3].



**Σχήμα 3.2** Συσκευή Reynolds και μορφές ροής.

### 3.4 Ύψος υδατόπτωσης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών

Η υδραυλική ισχύς που λαμβάνεται από κάποιο ποτάμι, το οποίο έχει παροχή  $Q$  και βρίσκεται σε μια υψομετρική διαφορά  $H$  είναι:

$$P = \rho g Q H \quad (3.4)$$

όπου,  $g$ : είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ ),  $\rho$ : είναι η πυκνότητα του υγρού ( $1000 \text{ kg/m}^3$  για το καθαρό νερό),  $Q$ : είναι η ροή ή η παροχή του νερού ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) και  $H$ : είναι το ύψος υδατόπτωσης ( $\text{m}$ ).

Από την παραπάνω εξίσωση είναι φανερή η σχέση της ισχύος με το ύψος υδατόπτωσης και συνεπώς με τις απώλειες κατά τη ροή των υδάτων, οι οποίες υπολογίζονται σαν μέτρα ύψους που αφαιρούνται από το ύψος υδατόπτωσης που αξιοποιείται στον υδροστρόβιλο[7].

**Ολικό ύψος πτώσης (gross head)** ονομάζεται η υψομετρική διαφορά μεταξύ της ελεύθερης στάθμης ύδατος του ταμειυτήρα και της ελεύθερης στάθμης της διώρυγας φυγής (έξοδος του σταθμού). Οι μετρήσεις του ολικού ύψους πτώσης πραγματοποιούνταν συνήθως χρησιμοποιώντας τοπογραφικές μεθόδους. Η ακρίβεια που απαιτείται στις μετρήσεις περιορίσε τις μεθόδους που μπορούν να υιοθετηθούν. Στο παρελθόν, ο καλύτερος τρόπος να μετρηθεί το ολικό ύψος πτώσης αποτελούσε η χρήση υψομετρικών ράβδων τοπογράφων μηχανικών, διαδικασία ωστόσο η οποία ήταν πολύ χρονοβόρα. Για ακριβέστερες μετρήσεις χρησιμοποιούνταν ταχύμετρα (tachometers) ή κλισιόμετρα με λιγότερη ακρίβεια (clinometer) ή αλφάδια Abney. Σήμερα με

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

τους ψηφιακούς θεοδολικούς, τα ηλεκτρονικά ψηφιακά και αλφάδια λέιζερ και ειδικά με τους ηλεκτρονικούς σταθμούς η εργασία έχει απλοποιηθεί.

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ψηφιακά αλφάδια παρέχουν μια αυτόματη εμφάνιση του ύψους και της απόστασης περίπου μέσα σε 4 δευτερόλεπτα με ακρίβεια μέτρησης ύψους 0,4 mm, και εσωτερική μνήμη που μπορούν να αποθηκεύσουν περίπου 2.400 σημεία δεδομένων. Η τοπογραφική μελέτη με τα συστήματα παγκόσμιας πλοήγησης (GSM) χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα και ένας φορητός δέκτης GPS είναι ιδανικός για τον προσδιορισμό τοποθεσιών, και για την χαρτογράφηση[6].

Το **στατικό ύψος πτώσης (static head)** προκύπτει από το ολικό ύψος με την αφαίρεση του συνόλου των απωλειών που πραγματοποιούνται στη διαδρομή του ύδατος πριν τον σπειροειδή σωλήνα του στροβίλου. Στην περίπτωση κατά την οποία η ανύψωση ύδατος αμέσως κάτω από τον αγωγό φυγής είναι δυνατόν να μετρηθεί ανακριβώς ή καθόλου, οι απώλειες μεταξύ της εξόδου της εγκατάστασης και του σημείου μέτρησης επιβάλλεται να προστεθούν στο σύνολο των αφαιρούμενων απωλειών[7]. Διαφορετικά, στην περίπτωση κατά την οποία ο δρομέας του στροβίλου βρίσκεται βυθισμένος στον αγωγό φυγής, προστίθενται και οι απώλειες του αγωγού εκτόνωσης[1]. Συνεπώς το στατικό ύψος υδατόπτωσης εκτιμάται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$H_{sta} = H_{gross} - \Sigma\Delta h \quad (3.5)$$

όπου,  $H_{sta}$  :το στατικό ύψος πτώσης (m),  $H_{gross}$ : το ολικό ύψος υδατόπτωσης (m) και

$\Sigma\Delta h$ : οι απώλειες ύψους υδατόπτωσης πριν τον σπειροειδή σωλήνα σε m( σε ορισμένες περιπτώσεις συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων στον αγωγό φυγής).

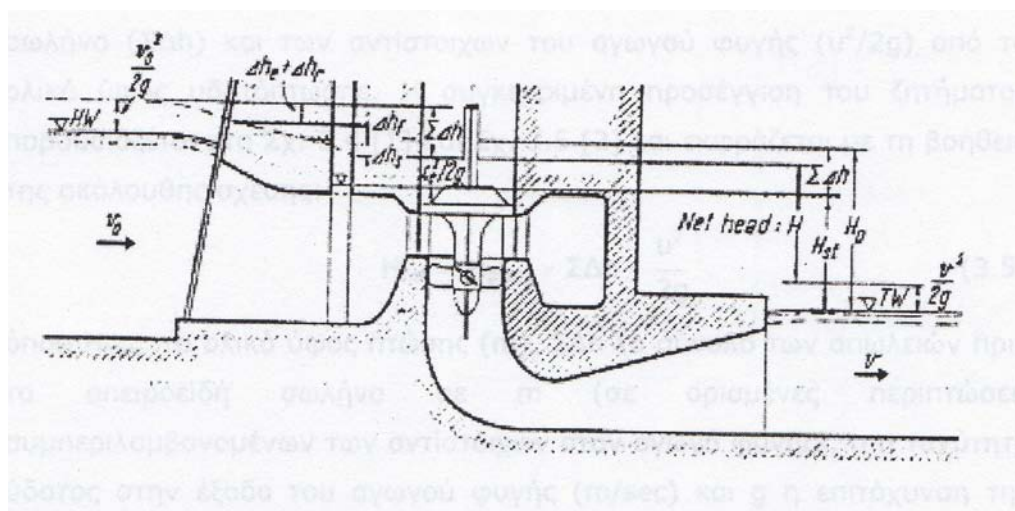
Καθαρό ή ωφέλιμο ύψος πτώσης (net or effective head) ορίζεται το ύψος που προκύπτει από τη διαφορά ύψους υδατόπτωσης μεταξύ της εισόδου του σπειροειδούς σωλήνα και της εξόδου του αγωγού φυγής. Συνεπώς το καθαρό ύψος πτώσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H_{net} = H_{gross} + \frac{u_o^2}{2g} - \Sigma\Delta h - \frac{u^2}{2g} \quad (3.6)$$

όπου,  $H_{net}$  :είναι το καθαρό ή ωφέλιμο ύψος πτώσης (m),  $H_{gross}$  :είναι το ολικό ύψος πτώσης (m),  $u_o$ : είναι η ταχύτητα ύδατος πριν την υδροληψία (m/sec),  $\Sigma\Delta h$ : το σύνολο των απωλειών πριν τον σπειροειδή σωλήνα σε m (σε ορισμένες περιπτώσεις συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων στον αγωγό φυγής), $u$ : είναι η ταχύτητα ύδατος στην έξοδο του αγωγού φυγής (m/sec) και, $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9, 81 m/sec<sup>2</sup>).

Η συγκεκριμένη διάταξη του ύψους πτώσης υδροηλεκτρικού σταθμού παρουσιάζεται στο Σχ. 3.3[10].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ



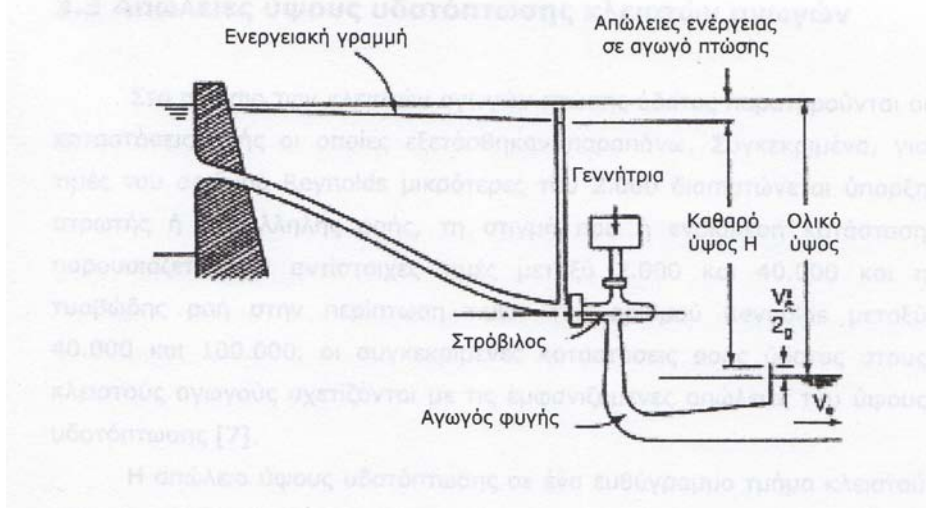
**Σχήμα 3.3** ύψος υδατόπτωσης ενός υδροηλεκτρικού σταθμού

Στο πλαίσιο της βιβλιογραφίας συναντώνται διαφορετικές προσεγγίσεις στον τρόπο προσδιορισμού των υψών πτώσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Συγκεκριμένα, το ολικό ύψος υδατόπτωσης ορίζεται ως η διαφορά της διαθέσιμης ενέργειας στα σημεία πριν την υδροληψία και μετά τον αγωγό φυγής της εγκατάστασης[11]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ολικό ύψος πτώσης δίνεται από την σχέση:

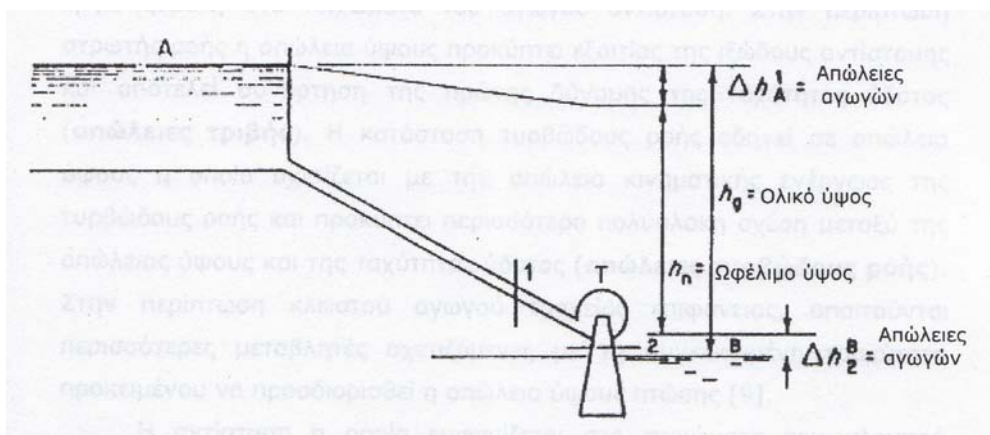
$$H_{gross} = H_{sta} + \frac{u_o^2}{2g} - \frac{u^2}{2g} \quad (3.7)$$

όπου,  $H_{sta}$  :το στατικό ύψος πτώσης (m), το οποίο στην προκειμένη περίπτωση ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ελεύθερης στάθμης ύδατος του ταμιευτήρα και της αντίστοιχης του αγωγού φυγής,  $u_o$  : και  $u$  η ταχύτητα ύδατος κατά την είσοδο και την έξοδο από την εγκατάσταση αντίστοιχα (m/sec) και  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9, 81 m/sec<sup>2</sup>).

Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά το καθαρό ύψος της υδατόπτωσης (Σχ. 3.4) και οι απώλειες (Σχ. 3.5) μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.



**Σχήμα 3.4** Καθαρό ύψος υδατόπτωσης ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού



**Σχήμα 3.5**

Απώλειες ύψους υδατόπτωσης ενός ΜΥΣ.

### 3.5 Απώλειες ύψους υδατόπτωσης

Η προσαγωγή του νερού στον υδροστρόβιλο γίνεται με δύο τύπους αγωγών, με ανοιχτό κανάλι (open channel) ή με κλειστό αγωγό (pipe). Και στους δύο τύπους αγωγών παρουσιάζονται οι καταστάσεις ροής που εξετάσθηκαν παραπάνω. Εξαιτίας της στρωτής ροής προκαλούνται απώλειες που ονομάζονται απώλειες τριβής και εξαιτίας της τυρβώδους ροής προκαλούνται απώλειες τυρβώδους ροής. Οι απώλειες δηλαδή, σχετίζονται με το είδος, το υλικό, το σχήμα και τα λοιπά χαρακτηριστικά των αγωγών υδατόπτωσης και η ύπαρξη τους μειώνει το ύψος υδατόπτωσης το οποίο αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο της εγκατάστασης. Συνεπώς η μελέτη, ο υπολογισμός και εν τέλει η μείωση τους κρίνεται απαραίτητη για το σχεδιασμό ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου.

#### 3.5.1 Απώλειες ύψους υδατόπτωσης κλειστών αγωγών

Στο πλαίσιο των κλειστών αγωγών πώσης ύδατος παρατηρούνται οι καταστάσεις ροής που εξετάσθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, για τιμές του αριθμού Reynolds μικρότερες του 2.000 διαπιστώνεται ύπαρξη στρωτής ή παράλληλης ροής, τη στιγμή που η ενδιάμεση κατάσταση παρουσιάζει τιμές μεταξύ 2000 και 40000 και η τυρβώδης ροή στην περίπτωση τιμών του αριθμού Reynolds μεταξύ 40000 και 100000 οι συγκεκριμένες καταστάσεις ροής ύδατος στους κλειστούς αγωγούς σχετίζονται με τις εμφανιζόμενες απώλειες του ύψους υδατόπτωσης [8].

Για τον προσδιορισμό των απωλειών σε κλειστούς αγωγούς πρέπει να σημειωθεί η σπουδαιότητα του υλικού κατασκευής του. Η αντίσταση η οποία εμφανίζεται στα τοιχώματα του κλειστού αγωγού εξαρτάται από την τραχύτητα του υλικού κατασκευής του αγωγού και την ταχύτητα ύδατος κοντά στα τοιχώματα. Η ταχύτητα, όπως διαπιστώνεται από το Σχ. 3.1, παρουσιάζεται μεγαλύτερη στην περίπτωση της τυρβώδους ροής από την αντίστοιχη στρωτής ροής. Συνεπώς, δεδομένων των τιμών του αριθμού Reynolds για τις αντίστοιχες καταστάσεις ροής, διαπιστώνεται ότι η αύξηση του αριθμού Reynolds οδηγεί σε αύξηση της απώλειας τριβής. Ταυτόχρονα, σε περιπτώσεις υψηλής τυρβώδους ροής, εμφανίζεται μεγαλύτερη δραστηριότητα ανάμειξης σωματιδίων και συνεπώς υψηλότερη απώλεια τυρβώδους ροής. Επομένως, οι απώλειες



ενέργειας των κλειστών αγωγών αυξάνουν με τον αριθμό Reynolds και την ταχύτητα των τοιχωμάτων του αγωγού.

### 3.5.1.1 Απώλειες τριβής κλειστών αγωγών

Οι Darcy και Weisbach εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της μάζας σε ένα συγκεκριμένο όγκο ρευστού σε κλειστό αγωγό, μεταξύ δύο τμημάτων καθέτων στον άξονά του, εξήγαγαν την ακόλουθη σχέση η οποία ισχύει στην περίπτωση ασυμπίεστων και σταθερών ροών ύδατος σε κλειστούς αγωγούς:

$$h_f = f \cdot \left( \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (3.8)$$

όπου,  $h_f$  : οι απώλειες τριβής (friction losses) του ύψους υδατόπτωσης (m),  $f$  : ο συντελεστής τριβής, αδιάστατος αριθμός,  $L$ : το μήκος του κλειστού αγωγού σε m,  $D$ : η διάμετρος του κλειστού αγωγού σε m,  $u$ : η μέση ταχύτητα ύδατος σε m/sec και,  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>).

Στην στρωτή ή παράλληλη ροή ο συντελεστής τριβής  $f$  μπορεί να υπολογισθεί απευθείας από την εξίσωση:

$$f = \frac{64 \cdot \nu}{u \cdot D} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.9)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.9) ο συντελεστής τριβής  $f$  στην στρωτή ή παράλληλη ροή είναι ανεξάρτητος της τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού και αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds. Το γεγονός αυτό, ότι ο συντελεστής  $f$  μειώνεται όταν ο αριθμός Reynolds αυξάνεται, προφανώς δεν σημαίνει ότι αυξάνοντας την ταχύτητα ελαττώνονται οι απώλειες τριβής. Αντικαθιστώντας τον συντελεστή  $f$  στην εξίσωση (3.8) από την σχέση (3.9) έχουμε:

$$h_f = \frac{64 \cdot \nu}{u \cdot D} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot u}{g \cdot D^2} \quad (3.10)$$

Αυτό δείχνει ότι η συγκεκριμένη απώλεια ύψους υδατόπτωσης, στην στρωτή ή παράλληλη ροή, είναι ανάλογη προς την ταχύτητα  $u$  και αντιστρόφως ανάλογη προς την  $D^2$  [6].

Όταν η ροή είναι σχεδόν τυρβώδης ( $\text{Re} > 2000$ ), ο συντελεστής τριβής  $f$  γίνεται λιγότερο εξαρτώμενος από τον αριθμό Reynolds και περισσότερο εξαρτώμενος από τη σχετική τραχύτητα  $k_s/D$ , όπου  $k_s$  η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου (equivalent sand roughness) των τοιχωμάτων του αγωγού και  $D$  η διάμετρος του τελευταίου. Η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας άμμου για διαφορετικά υλικά κατασκευής των τοιχωμάτων του αγωγού παρουσιάζεται στον πίνακα 3.2[13].

Είναι πολύ γνωστό ότι, ακόμα και στις τυρβώδεις ροές, ακριβώς δίπλα από τα τοιχώματα του αγωγού διαπιστώνεται η ύπαρξη ενός ιδιαίτερα λεπτού στρώματος ροής, το οποίο καλείται υποστρώμα στρωτής ροής. Όταν ο αριθμός  $\text{Re}$  αυξάνεται, το πάχος του υποστρώματος στρωτής ροής μειώνεται. Στις περιπτώσεις όπου η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας άμμου ( $k_s$ ) είναι ιδιαίτερα χαμηλότερη του πάχους του αντίστοιχου υποστρώματος, ο αγωγός θεωρείται υδραυλικά λείος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Υλικό τοιχωμάτων αγωγού	Ισοδύναμη τραχύτητα άμμου(mm)
Γυαλί, πλαστικό	0
Χαλκός, ορείχαλκος	$1,5 \times 10^{-3}$
Επεξεργασμένος σίδηρος, ατσάλι	$4,6 \times 10^{-2}$
Ασφαλτωμένος σίδηρος	0,12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0,15
Χυτοσίδηρος	0,26
τσιμέντο	0,3-3

**Πίνακας 3.2** Ισοδύναμη τραχύτητα άμμου τοιχωμάτων κλειστών αγωγών[13]

Σε μια ροή κλειστού αγωγού υδραυλικά λείου, ο συντελεστής τριβής  $f$  δεν επηρεάζεται από την τραχύτητα των τοιχωμάτων του αγωγού, και για αυτήν την περίπτωση ο Von Karman, ανέπτυξε την ακόλουθη εξίσωση για τον συντελεστή τριβής  $f$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left( \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{2,51} \right) \quad (3.11)$$

Για υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds, το πάχος του υποστρώματος γίνεται πολύ μικρό και ο συντελεστής τριβής  $f$  γίνεται ανεξάρτητος από το  $\text{Re}$  και εξαρτάται μόνο από την ισοδύναμη τραχύτητα άμμου ( $k_s$ ). Σε αυτήν την περίπτωση ο αγωγός κρίνεται ως ένας υδραυλικά τραχύς αγωγός, και ο Von Karman διαπίστωσε ότι ο συντελεστής τριβής προκύπτει ως:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left( 3,7 \frac{D}{k_s} \right) \quad (3.12)$$

Μεταξύ αυτών των δύο ακραίων περιπτώσεων, ο αγωγός δεν συμπεριφέρεται ούτε αποκλειστικά ως λείος ούτε και ως τραχύς, και για αυτήν την κατάσταση, οι Colebrook και White επινόησαν την ακόλουθη εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή τριβής  $f$ :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{k_s/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.13)$$

Με δεδομένο ότι οι εξισώσεις (3.12) και (3.13) παρουσιάζουν δυσκολίες επίλυσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η τιμή του συντελεστή τριβής  $f$  των κλειστών αγωγών, χρησιμοποιείται το διάγραμμα που αναπτύχθηκε από τον Moody και το οποίο παρουσιάζεται στο Σχ. 3.6. Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου διαγράμματος διαπιστώνονται τέσσερις διαφορετικές περιοχές:

- ✚ Η περιοχή στρωτής ή παράλληλης ροής όπου ο συντελεστής τριβής  $f$  αποτελεί γραμμική συνάρτηση του αριθμού Reynolds( $\text{Re}$ ).
- ✚ Η δύσκολα ορισμένη κρίσιμη περιοχή (σκιασμένη περιοχή).
- ✚ Η μεταβατική περιοχή, η οποία ξεκινά με τους λείους αγωγούς (εξίσωση 3.11) και καταλήγει στην περιοχή διακεκομμένης γραμμής, όπου ο

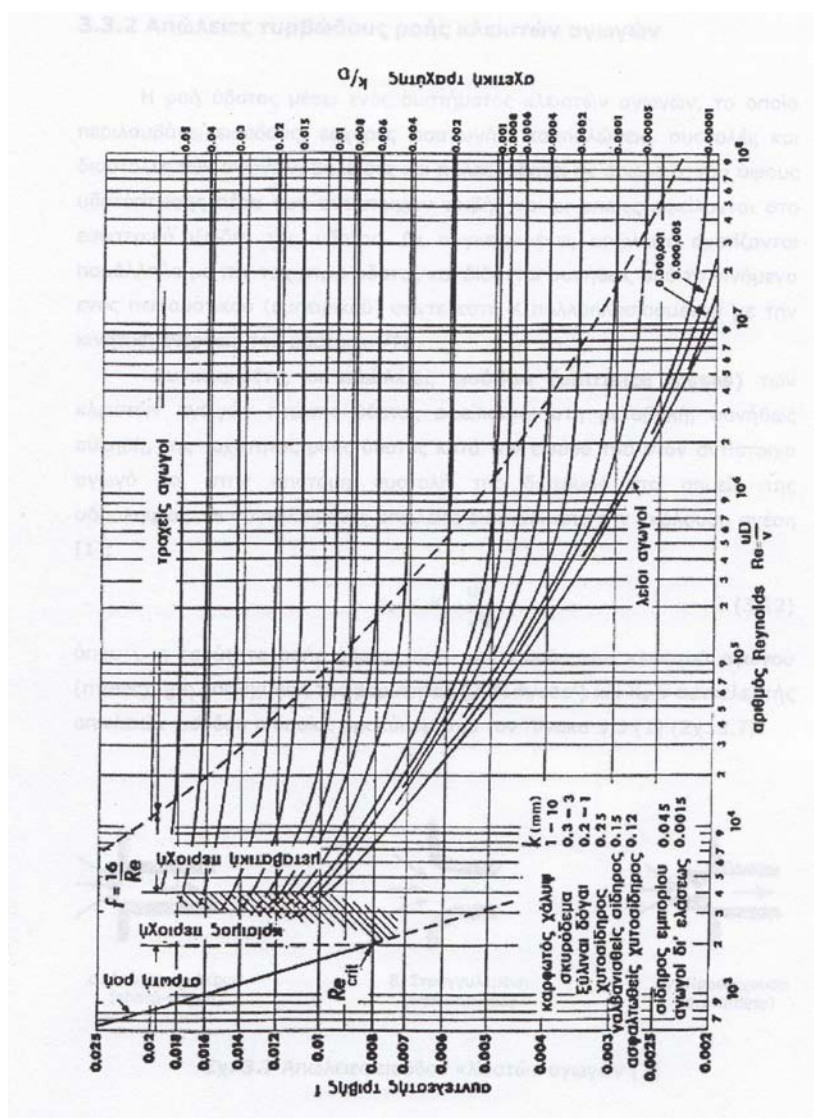
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

συντελεστής τριβής  $f$  εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ( $Re$ ) και τη σχετική τραχύτητα  $k_s/D$  (εξίσωση 3.13).

- ✚ Η περιοχή πλήρους τυρβώδους ροής, όπου ο συντελεστής τριβής  $f$  εξαρτάται αποκλειστικά από τη σχετική τραχύτητα  $k_s/D$  (εξίσωση 3.12)[6].

Στην προσπάθεια υπολογισμού του συντελεστή τριβής  $f$  διαπιστώνεται η δυσκολία χρήσης του διαγράμματος Moody στην περίπτωση ανάπτυξης προγραμμάτων λογισμικού. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα οι Swamee και Jain ανέπτυξαν μια εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής  $f$  διαπιστώνοντας πως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση της διαφέρουν από τα αντίστοιχα του διαγράμματος Moody κατά ποσοστό ως 3%. Η εξίσωση των Swamee και Jain έχει την ακόλουθη μορφή[13]:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.14)$$



**Σχήμα 3.6** Διάγραμμα Moody

### 3.5.1.2 Απώλειες τυρβώδους ροής κλειστών αγωγών

Εκτός από τις απώλειες τριβής, η ροή ύδατος μέσω ενός συστήματος κλειστών αγωγών, το οποίο περιλαμβάνει εισόδους, εσχάρες εισαγωγής, καμπυλώσεις, συστολές και διαστολές αγωγών, βαλβίδες και πύλες, οδηγεί σε απώλειες του ύψους υδατόπτωσης πέρα των αντίστοιχων τριβής και οι οποίες οφείλονται στο εσωτερικό ιξώδες. Οι συγκεκριμένες απώλειες βασίζονται στην ταχύτητα ύδατος και εκφράζονται συνήθως από ένα πειραματικό συντελεστή  $K$  πολλαπλασιαζόμενου με την κινητική ενέργεια  $u^2/2g$ .

Οι ενεργειακές απώλειες στους κλειστούς αγωγούς λόγω των κάμψεων και άλλων παρεμποδίσεων στη ροή ύδατος είναι οι ακόλουθες:

#### **Απώλειες εισόδου (entrance losses)**

Οι απώλειες εισόδου των κλειστών αγωγών πτώσης ύδατος οφείλονται στην μεταβολή, συνήθως αύξηση, της ταχύτητας ροής ύδατος κατά την είσοδο του στον αντίστοιχο αγωγό και στην απότομη συστολή της διατομής στο σημείο της υδροληψίας. Οι απώλειες εισόδου δίνονται από την ακόλουθη σχέση[3]:

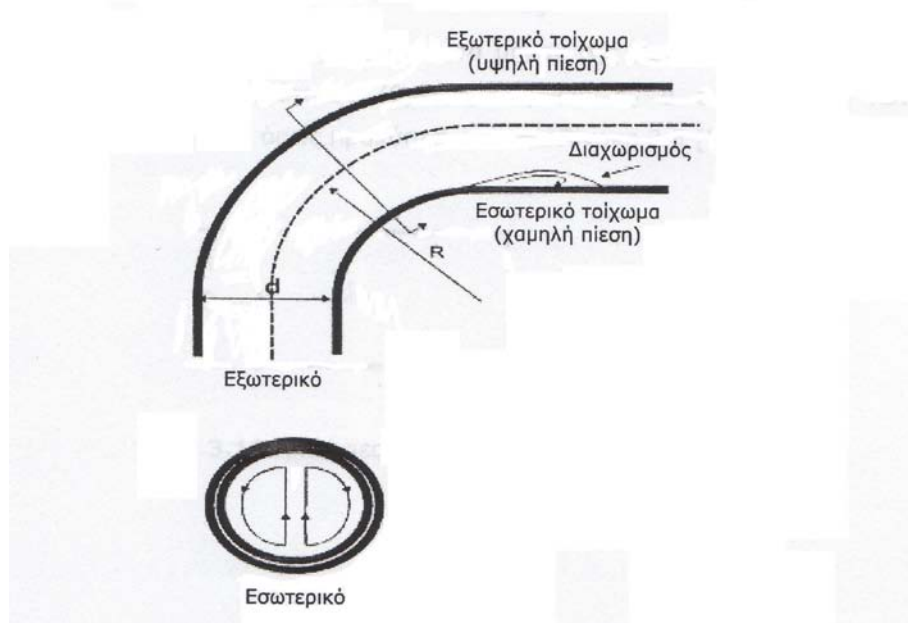
$$h_e = K_1 \frac{u^2}{2g} \quad (3.15)$$

όπου,

$u$ : η ταχύτητα ροής ύδατος πριν την είσοδο του κλειστού αγωγού (m/sec),  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>) και  $K_1$ : ο συντελεστής απωλειών εισόδου οι τιμές του οποίου δίνονται στον Πίνακα 3.3[3].

<b>Τύπος εισόδου</b>	<b><math>K_1</math></b>
Προεξέχουσα (protruding)	0,75
Απότομων άκρων (sharp-edged)	0,5
Στρογγυλεμένη (well rounded)	0,01

**Πίνακας 3.3** Τιμές συντελεστή απωλειών εισόδου κλειστών αγωγών για διάφορους τύπους εισόδου [3]



Σχήμα 3.7 Τύποι εισόδων κλειστών αγωγών

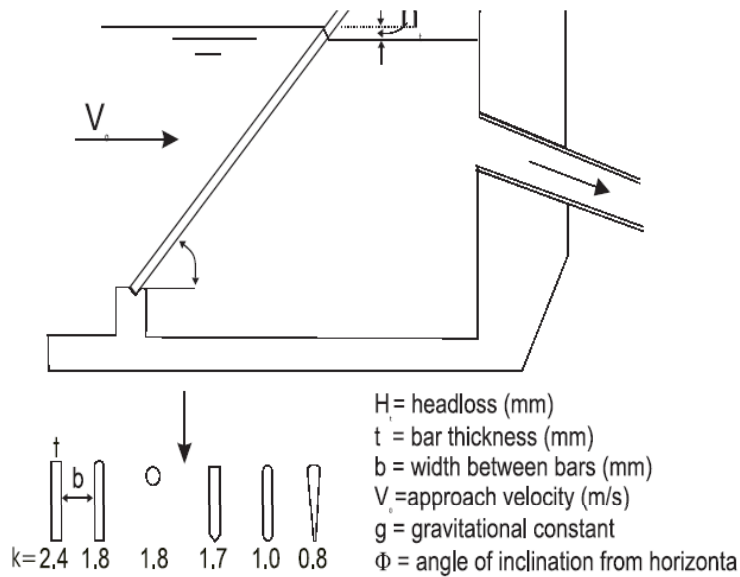
✚ **Απώλειες εσχάρας εισαγωγής (trash rack losses)**

Οι εσχάρες εισαγωγής είναι σχεδόν πάντα απαραίτητες για να προστατευθούν οι επιμέρους διατάξεις της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης από τα φερτά αντικείμενα του ποταμού. Η ροή του ύδατος μέσω των εσχάρων εισαγωγής οδηγεί σε αύξηση των απωλειών του ύψους υδατόπτωσης. Αν και συνήθως μικρές, μπορούν να υπολογισθούν με τη βοήθεια του τύπου του Kirschmer[8]:

$$h_t = k_t \left( \frac{t}{b} \right)^{4/3} \sin \phi \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (3.16)$$

όπου  $K_t=2,3$ ,  $t$ : το πάχος των ράβδων της εσχάρας ( cm),  $b$ : η απόσταση των ράβδων ( cm),  $\phi$ : η γωνία κλίσης της εσχάρας από το οριζόντιο επίπεδο,  $u$ : η ταχύτητα ροής ύδατος διαμέσου της εσχάρας (m/sec) και,  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ )(Σχήμα 3.8).

Για διαρθρωτικούς λόγους, αυτός ο τύπος ισχύει μόνο εάν το μήκος  $L$  των ράβδων είναι μικρότερο τουλάχιστον 5 φορές από τη διάμετρό τους. Εάν η εσχάρα δεν είναι κάθετη αλλά κάνει μια γωνία  $\beta$  με τη ροή του νερού (το  $\beta$  θα έχει μια μέγιστη τιμή  $90^\circ$  για μια εσχάρα που βρίσκεται στο πλευρικό τοίχωμα ενός καναλιού), θα υπάρξει μια πρόσθετη απώλεια ύψους υδατόπτωσης. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης 3.16 πρέπει να πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή διόρθωσης  $\kappa$  που δίνεται στον πίνακα 3.4.



Σχήμα 3.8 Απώλειες εσχάρας εισαγωγής κλειστών αγωγών[6].

**Απώλειες ύψους υδατόπτωσης από ξαφνικές συστολές ή διαστολές (contraction losses or expansion losses)**

Όταν ο αγωγός έχει μια ξαφνική συστολή υπάρχει μια απώλεια ύψους πτώσης λόγω της αύξησης στην ταχύτητα της ροής του νερού και στη μεγάλη κλίμακας τυρβώδη ροή που δημιουργείται από την αλλαγή της γεωμετρίας του. Η πορεία ροής είναι τόσο σύνθετη που, τουλάχιστον προς το παρόν, είναι αδύνατο να παραχθεί μια μαθηματική ανάλυση του φαινομένου. Η απώλεια ύψους υδατόπτωσης υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό της κινητικής ενέργειας στο μικρότερο αγωγό, με έναν συντελεστή  $K_c$  που ποικίλλει ανάλογα με τον λόγο της συστολής  $d/D$ . Επομένως οι απώλειες συστολών δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$h_c = K_c \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.17)$$

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της συστολής (m/sec),

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>) και,

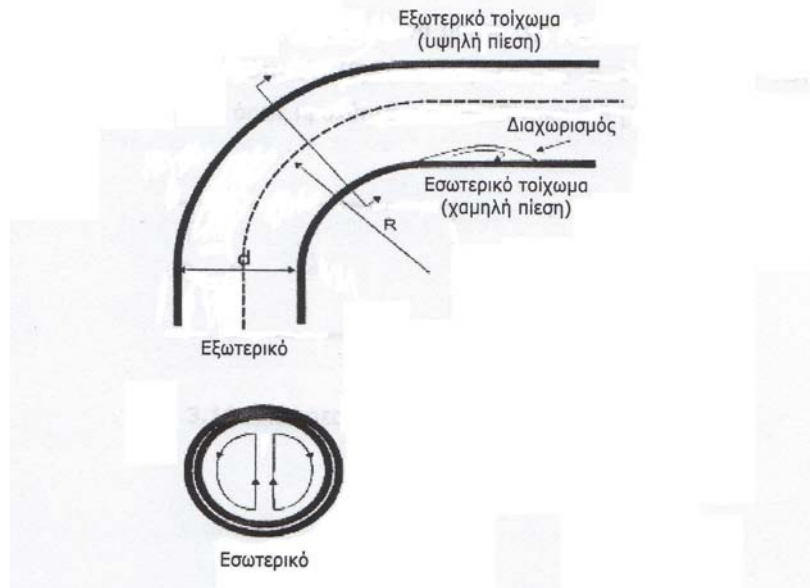
$K_c$ : ο συντελεστής απωλειών συστολής.

Ορισμένες τιμές του συντελεστή απωλειών συστολής δίνονται στον Πίνακα 3.5. Για ένα λόγο μεγαλύτερο από  $A_1/A_2 = 0,76$ , ο συντελεστής  $K_c$  ακολουθεί περίπου τον τύπο:

$$K_c = 0,42 \left( 1 - \frac{A_1^2}{A_2^2} \right) \quad (3.18)$$

όπου  $A_1$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού πριν την συστολή και,

$A_2$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού μετά την συστολή (Σχήμα 3.9)



**Σχήμα 3.9** Απώλειες καμπυλώσεων κλειστών αγωγών

$A_1/A_2$	$K_c$
0,1	0,45
0,2	0,42
0,3	0,39
0,4	0,36
0,5	0,33
0,6	0,28
0,7	0,22
0,8	0,15
0,9	0,06

**Πίνακας 3.4** Τιμές συντελεστή απωλειών συστολής κλειστών αγωγών όπου  $A_1$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού πριν την συστολή και,  $A_2$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού μετά την συστολή.

Στην περίπτωση ύπαρξης απότομων διαστολών στους κλειστούς αγωγούς πώσης ύδατος προκαλείται μείωση της ταχύτητας ύδατος και εμφάνιση τυρβώδους ροής κατά τη ροή ύδατος. Συνεπώς προκαλούν απώλειες που υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$h_{\text{exp}} = K_{\text{exp}} \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.19)$$



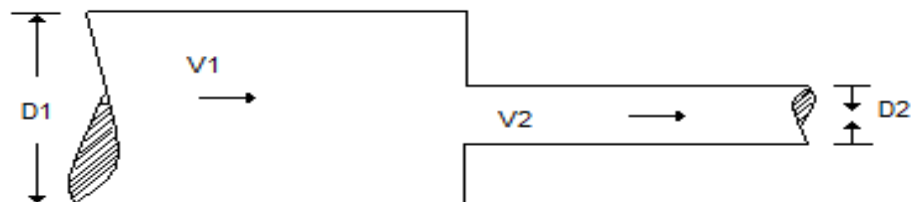
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της διαστολής (m/sec),

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ ) και,

$K_{exp}$ : ο συντελεστής απωλειών διαστολής.

Ορισμένες τιμές του συντελεστή απωλειών διαστολής δίνονται στον Πίνακα 3.5.(Σχήμα 3.10)



**Σχήμα 3.10** Απώλειες διαστολής κλειστών αγωγών.

Επίσης παρατίθεται και μια γραφική απεικόνιση των συντελεστών απωλειών συστολής και διαστολής στο Σχήμα 3.11.

$A_1 / A_2$	$K_{exp}$
0,1	0,99
0,2	0,96
0,3	0,91
0,4	0,84
0,5	0,75
0,6	0,64
0,7	0,51
0,8	0,36
0,9	0,19

**Πίνακας 3.5** Τιμές συντελεστή απωλειών διαστολής κλειστών αγωγών όπου  $A_1$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού πριν την διαστολή και,  $A_2$ : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού μετά την διαστολή.

### ✚ **Απώλειες καμπυλώσεων (bend losses)**

Σε μια καμπύλωση, η ροή του αγωγού υπόκειται μια αύξηση πίεσης κατά μήκος του εξωτερικού τοιχώματος και μια μείωση της πίεσης κατά μήκος του εσωτερικού τοιχώματος. Η συγκεκριμένη ανισοροπία πίεσης οδηγεί στην εμφάνιση δευτερεύουσας ροής η οποία σε συνδυασμό με τη διαμήκη ροή παράγουν μια αντίστοιχη σπειροειδή, η οποία ωστόσο σε μήκους περίπου 100 διαμέτρων διαλύεται εξαιτίας της ιξώδους τριβής. Οι **απώλειες καμπυλώσεως (bend losses)** του ύψους υδατόπτωσης οι οποίες προκαλούνται από τα παρακάτω φαινόμενα σχετίζονται με τον

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

τύπο της καμπύλωσης, τη γωνία αυτής και την εσωτερική διάμετρο του αγωγού, με αποτέλεσμα να δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$h_b = K_b \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.20)$$

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της καμπύλωσης (m/sec),

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>) και,  $K_b$ : ο συντελεστής απωλειών καμπυλώσεως.

Ορισμένες τιμές του συντελεστής καμπυλώσεως φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

Λείες καμπυλώσεις		Καμπυλώσεις ένωσης αγωγών	
$r/D$	$K_b$	$\Theta$	$K_b$
1	0,4	20°	0,06
2	0,27	40°	0,21
4	0,2	60°	0,5

**Πίνακας 3.6** Τιμές συντελεστή απωλειών καμπυλώσεων κλειστών αγωγών, όπου  $r$ : ακτίνα καμπύλωσης,  $D$ : εσωτερική διάμετρος αγωγού,  $\Theta$ : γωνία καμπύλωσης.

### ✚ **Απώλειες πυλών και βαλβίδων (gates and valves losses)**

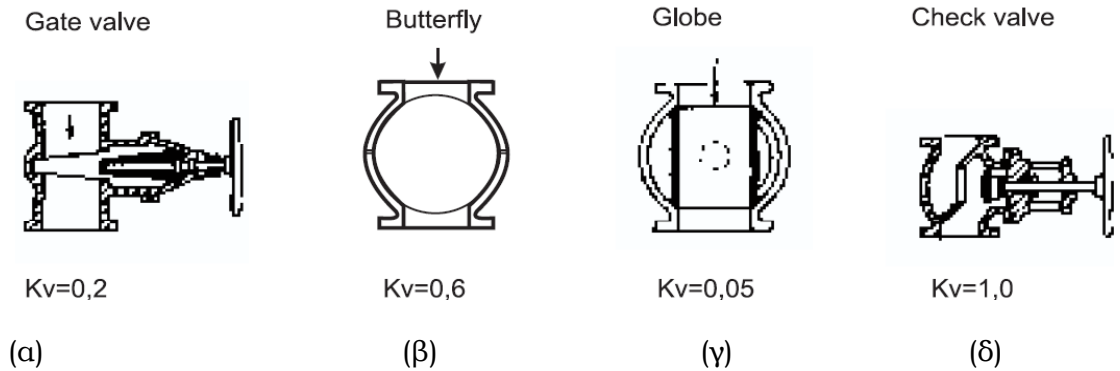
Οι βαλβίδες ή οι πύλες χρησιμοποιούνται στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα ώστε να απομονωθούν τα επιμέρους τμήματα των διατάξεων ροής ύδατος από τα υπόλοιπα, έτσι είτε είναι εξ ολοκλήρου κλειστές είτε εξ ολοκλήρου ανοικτές. Η απώλεια ύψους υδατόπτωσης που παράγεται από το νερό που διατρέχει μια ανοικτή βαλβίδα εξαρτάται από τον τύπο και την κατασκευή της βαλβίδας[6]. Οι απώλειες αυτές δίνονται από την παρακάτω εξίσωση[3]:

$$h_v = K_v \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.21)$$

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος διαμέσου της βαλβίδας (m/sec),  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>) και  $K_v$ : ο συντελεστής απωλειών πυλών και βαλβίδων.

Στο Σχήμα 3.12 φαίνονται διάφοροι τύποι βαλβίδων και στον Πίνακα 3.7 δίνονται οι τιμές του συντελεστή απωλειών πυλών και βαλβίδων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ



**Σχήμα 3.12** (α) Βαλβίδα πύλης, (β) Βαλβίδα περιστρεφόμενου δίσκου, (γ) Σφαιρική βαλβίδα, (δ) Βαλβίδα μη επιστροφής[6].

<b>Βαλβίδα πύλης</b>		<b>Βαλβίδα περιστρεφόμενου δίσκου</b>	
<b>Κατάσταση</b>	<b><math>K_v</math></b>	<b><math>t/D</math></b>	<b><math>K_v</math></b>
Πλήρως ανοικτή	2,3	0,1	0,3
$\frac{1}{2}$ ανοικτή	4,3	0,2	0,3
$\frac{1}{4}$ ανοικτή	10	0,3	0,75

**Πίνακας 3.7** Τιμές συντελεστών απωλειών πυλών και βαλβίδων κλειστών αγωγών, όπου  $t$ : πάχος βαλβίδας,  $D$ : διάμετρος αγωγού.

### ✚ **Απώλειες σταδιακών διαστολών (gradual expansions losses)**

Η ύπαρξη σταδιακών διαστολών στην μορφολογία των κλειστών αγωγών πτώσης ύδατος οδηγεί στην εμφάνιση φαινομένων αντιστοιχών με τα εμφανιζόμενα στις απότομες διαστολές και τα οποία οδηγούν στην ανάπτυξη απωλειών οι οποίες δίνονται από την παρακάτω σχέση[3]:

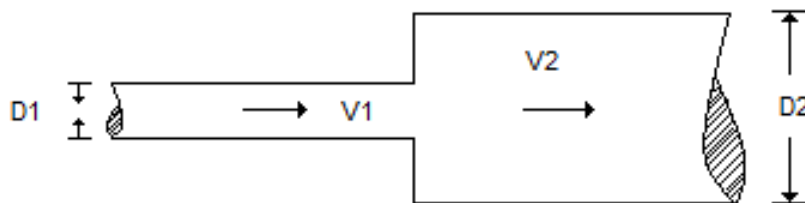
$$h_{ge} = K_{gev} \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.22)$$

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της σταδιακής διαστολής(m/sec),  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ ) και,  $K_{gev}$ : ο συντελεστής απωλειών σταδιακής διαστολής. Οι τιμές του συντελεστή απωλειών σταδιακής διαστολής δίνονται στον Πίνακα 3.8.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

	$K_{ge}$		
	$\Theta$		
$A_2/A_1$	20°	15°	10°
3	0,4	0,3	0,2
2,5	0,3	0,25	0,15
2	0,2	0,15	0,12
1,5	0,15	0,1	0,08

**Πίνακας 3.8** Τιμές συντελεστή απωλειών σταδιακής διαστολής κλειστών αγωγών όπου  $A_1$ : εμβαδόν διατομής αγωγού πριν την σταδιακή διαστολή,  $A_2$ : εμβαδόν διατομής μετά από τη σταδιακή διαστολή,  $\Theta$ : γωνία σταδιακής διαστολής(Σχήμα 3.13).



**Σχήμα 3.13** Απώλειες σταδιακών διαστολών κλειστών αγωγών.

### 3.5.2 Απώλειες ύψους υδατόπτωσης ανοικτών αγωγών

Ένας αγωγός που μεταφέρει νερό ονομάζεται ανοικτός ή αγωγός ελεύθερης ροής, όταν το νερό που ρέει μέσα σ' αυτόν παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια, που βρίσκεται κάτω από ατμοσφαιρική πίεση. Οι δυνάμεις που προκαλούν τη ροή στους ελεύθερους αγωγούς οφείλονται στη βαρύτητα και οι δυνάμεις που επιβραδύνουν τη ροή οφείλονται στην ιξώδη διάτμηση και στις τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του αγωγού.

Οι ανοικτοί αγωγοί διακρίνονται σε **φυσικούς αγωγούς** και σε **τεχνητούς**, ανάλογα με την αρχική τους διαμόρφωση. Η ροή σε έναν ανοικτό αγωγό ονομάζεται σταθερή ή μόνιμη όταν καμία μεταβλητή της (ταχύτητα, βάθος κτλ.) δεν μεταβάλλεται με το χρόνο· στην αντίθετη περίπτωση η ροή ονομάζεται ασταθής ή μη μόνιμη[11]. Παράλληλα, ο συγκεκριμένος διαχωρισμός ισχύει και στην περίπτωση που η μεταβολή της παροχής και του βάθους ύδατος εξετάζεται με κριτήριο το μήκος του αγωγού αντί του χρόνου.

Η σταθερή ροή διακρίνεται σε ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή. Η ροή ονομάζεται ομοιόμορφη όταν η μέση ταχύτητα της είναι σταθερή κατά μέγεθος και διεύθυνση, ενώ ανομοιόμορφη ροή ονομάζεται εκείνη η οποία η μέση

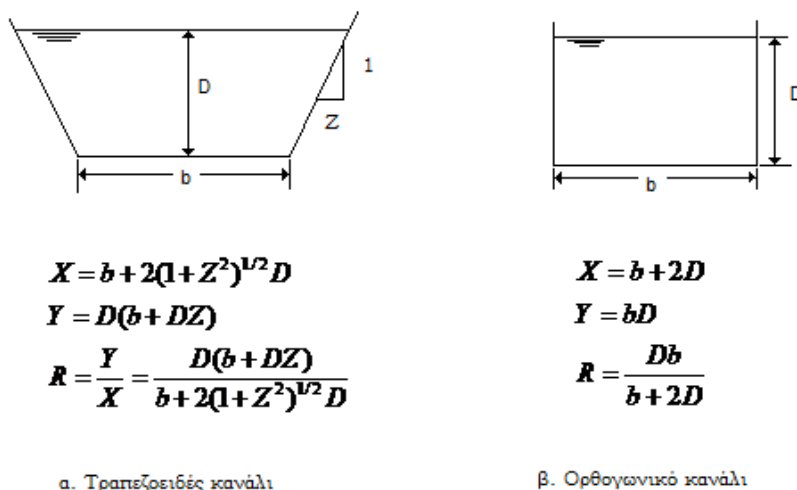
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

ταχύτητα της μεταβάλλεται με τη θέση σε όλο το μήκος του αγωγού που μελετάται.

Όπως στους κλειστούς κάτω από πίεση αγωγούς έτσι και στους ανοιχτούς αγωγούς η ροή διακρίνεται, με βάση τον αριθμό Reynolds, όπως αυτός ορίζεται παρακάτω, σε στρωτή ροή ( $Re < 500$ ) και σε τυρβώδη ροή ( $Re > 2000$ ), ενώ για ενδιάμεσες τιμές ( $500 < Re < 2000$ ) συνυπάρχουν σε μια μεταβατική κατάσταση. Ο αριθμός Reynolds, για ανοιχτά κανάλια, δίνεται από την σχέση 3.3 με τη μεταβλητή  $D$  να είναι το διπλάσιο της υδραυλικής ακτίνας. Ως υδραυλική ακτίνα ( $R$ ) ορίζεται το πηλίκο του εμβαδού της υγρής διατομής προς το μήκος της βρεχόμενης περιμέτρου του αγωγού σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$D = 2R = \frac{\text{εμβαδόν υγρής διατομής}}{\text{μήκος βρεχόμενης περιμέτρου}} \quad (3.23)$$

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της υδραυλικής ακτίνας δύο πολύ συνηθισμένων διατάξεων ανοιχτών καναλιών.



**Σχήμα 3.15** Υδραυλική ακτίνα τυπικών ανοιχτών καναλιών.

### 3.5.2.1 Απώλειες τριβής ανοιχτών καναλιών

Οι απώλειες τριβής ανοιχτών καναλιών δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$h_f = LS \quad (3.24)$$

όπου,  $L$ : το μήκος του ανοιχτού καναλιού (m) και  $S$ : η κλίση του αντίστοιχου τμήματος ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

### 3.5.2.2 Απώλειες τυρβώδους ροής ανοιχτών καναλιών

Κατά την κατασκευή των ανοιχτών καναλιών είναι απαραίτητη η δημιουργία εισόδων, εσχάρων εισαγωγής, καμπυλώσεων, συστολών και διαστολών που οδηγούν στην εμφάνιση τυρβώδους ροής και συνεπώς απωλειών στο ύψος υδατόπτωσης το οποίο αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο της εγκατάστασης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Τα διάφορα είδη απωλειών που οφείλονται στην τυρβώδη ροή υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις[3]:

### ✚ **Απώλειες εσχάρας εισαγωγής (trash rack losses)**

Οι απώλειες εσχάρας εισαγωγής υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση του Kirschmer:

$$h_t = 2,3 \left( \frac{t}{b} \right)^{4/3} \sin \phi \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (3.25)$$

όπου t: το πάχος των ράβδων της εσχάρας (cm), b: η απόσταση των ράβδων (cm), φ: η γωνία κλίσης της εσχάρας από το οριζόντιο επίπεδο, u: η ταχύτητα ροής ύδατος διαμέσου της εσχάρας (m/sec) και, g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>).

### ✚ **Απώλειες εισόδου**

Οι απώλειες εισόδου των ανοιχτών καναλιών δίνονται από την σχέση:

$$h_e = 0,05 \frac{u^2}{2g} \quad (3.26)$$

όπου, u: η ταχύτητα ροής ύδατος πριν την είσοδο του κλειστού αγωγού (m/sec), g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>).

### ✚ **Απώλειες καμπυλώσεων**

Οι απώλειες καμπυλώσεων υπολογίζονται με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης:

$$h_b = S \cdot L_b + 2 \cdot \frac{b}{r} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (3.27)$$

όπου, S: η διαμήκης κλίση του καναλιού, L<sub>b</sub> : το αξονικό μήκος της καμπύλωσης (m), r : η ακτίνα της καμπύλωσης (m), u: η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της καμπύλωσης (m/sec) και, g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>).

### ✚ **Απώλειες συστολών**

Οι απώλειες συστολών των ανοιχτών καναλιών εξαρτώνται από τον τύπο της αντίστοιχης συστολής και δίνονται από την σχέση:

$$h_c = K_c \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.28)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

Τύπος συστολής	$K_c$
Κυλινδρικό τεταρτημόριο (cylinder quadrant)	0,1
Γωνία (wedge)	0,2
Συνεστραμμένο τοιχώμα(warped wall)	0,1

**Πίνακας 3.9** Τιμές συντελεστή απωλειών συστολής ανοικτών καναλιών για διαφορετικούς τύπους συστολής [13].

### ✚ Απώλειες διαστολών

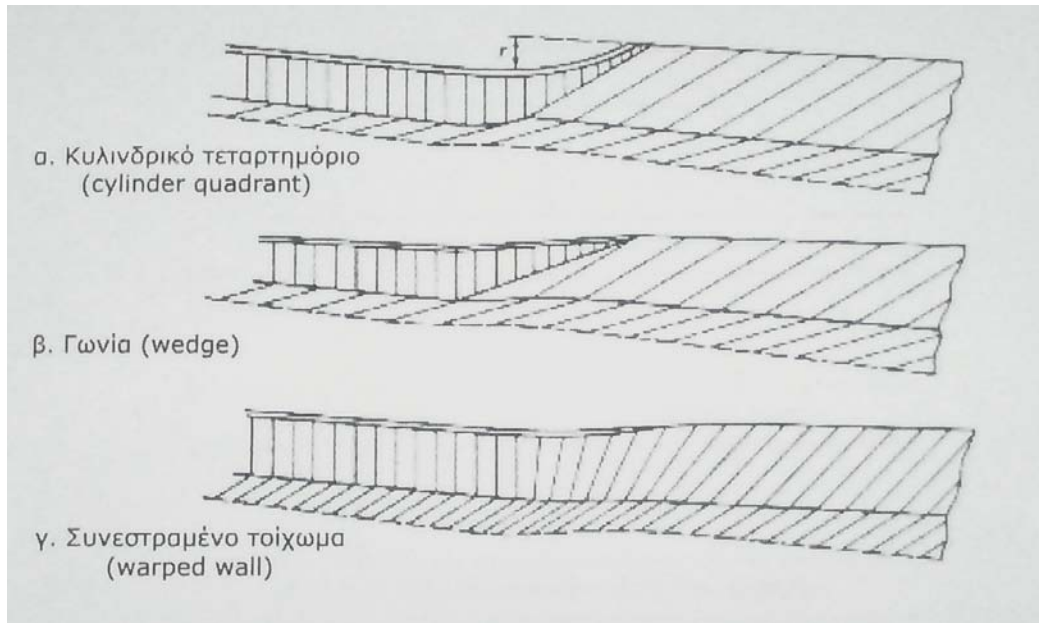
Στην περίπτωση των ανοικτών καναλιών οι απώλειες διαστολών δίνονται από την σχέση:

$$h_{\text{exp}} = K_{\text{exp}} \left( \frac{u^2}{2g} \right) \quad (3.29)$$

όπου,  $u$ : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της διαστολής (m/sec),  $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ ) και,  $K_{\text{exp}}$ : ο συντελεστής απωλειών διαστολής, ο οποίος προκύπτει από τον Πίνακα 3.10[13].

Τύπος διαστολής	$K_{\text{exp}}$
Κυλινδρικό τεταρτημόριο (cylinder quadrant)	0,5
Γωνία (wedge)	0,5
Συνεστραμμένο τοιχώμα(warped wall)	0,3

**Πίνακας 3.10** Τιμές συντελεστή απωλειών διαστολής ανοικτών καναλιών για διαφορετικούς τύπους συστολής.



**Σχήμα 3.16** Απώλειες συστολών και διαστολών ανοιχτών αγωγών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Υδρολογική Ανάλυση

### 4.1 Εισαγωγή

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη υδροδυναμικού είναι η ύπαρξη επιφανειακής απορροής νερού και κλίσεως του εδάφους ώστε να σχηματίζεται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά. Ένα υδροηλεκτρικό έργο αξιοποιεί μέρος της ενέργειας στάθμης του νερού το οποίο, υπό την επίδραση της βαρύτητας, ρέει μέχρι να φθάσει στην κατώτατη δυνατή στάθμη που είναι η στάθμη της θάλασσας. Εάν η ενέργεια αυτή του νερού δεν αξιοποιηθεί από ένα υδροηλεκτρικό έργο τότε καταναλώνεται σταδιακά υπό μορφή τριβών κατά την διαδρομή του μέχρι το κατώτατο δυνατό σημείο, δηλαδή την επιφάνεια λίμνης ή της θάλασσας, αποτέλεσμα των οποίων είναι και η μεταφορά των φερτών υλικών.

Το βασικό δεδομένο που απαιτείται κατά την μελέτη ενός υδροηλεκτρικού έργου, ανεξαρτήτως μεγέθους, είναι η χρονική διακύμανση της παροχής του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

υδατορεύματος στην θέση όπου θα διαμορφωθεί η υδροληψία του έργου. Συνεπώς η ανάπτυξη ενός υδροηλεκτρικού έργου προϋποθέτει την μελέτη των υδρολογικών στοιχείων. Τα φυσικά αυτά στοιχεία καθορίζουν την παροχή του υδατορεύματος και συνεπώς το μέγεθος, την κατηγορία, τις δυνατότητες και τελικά το κόστος και τη βιωσιμότητα του έργου.

Ως **υδρολογικός κύκλος** ορίζεται η αέναη κίνηση του νερού μεταξύ των ωκεανών, των λιμνών, των ποταμών, της ατμόσφαιρας και της γης η οποία συνοδεύεται και από αλλαγές της κατάστασης του νερού μεταξύ υγρής, αέριας και στερεής φάσης[2]. Κινητήρια δύναμη αυτής της συνεχούς κίνησης είναι η ηλιακή ενέργεια και για το λόγο αυτό άλλωστε η υδραυλική ενέργεια είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Οι κυριότερες φάσεις του υδρολογικού κύκλου, όπως δίνονται σχηματικά στο Σχήμα 4.1 είναι οι ακόλουθες:

- ✚ Η **εξάτμιση** από την ξηρά και τις υδάτινες επιφάνειες (λίμνες, ποταμοί, θάλασσα). Το νερό από την υγρή φάση μετατρέπεται σε υδρατμούς που ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα και μετακινούνται υπό την επίδραση των ανέμων.
- ✚ Η **διαπνοή** από τα φυτά και την βλάστηση, οπότε και πάλι το νερό μετατρέπεται σε υδρατμούς που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα.
- ✚ Η **κατακρήμνιση** των ατμών, που έχουν συμπυκνωθεί στην ατμόσφαιρα σχηματίζοντας σύννεφα, από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης.
- ✚ Η **κατακράτηση του νερού** από την βλάστηση και το έδαφος.
- ✚ Η **διήθηση** του επιφανειακού νερού στο έδαφος. Μέρος της ποσότητας αυτής του νερού επαναφορτίζει τους υπόγειους ταμιευτήρες και απορρέει υπόγεια δια μέσω των ρωγμών των γεωλογικών σχηματισμών και καταλήγει είτε στην επιφάνεια της γης σχηματίζοντας πηγές είτε στη θάλασσα (υπόγεια εκροή).
- ✚ Η επιφανειακή απορροή, δηλ. ο σχηματισμός των ρεμάτων και των ποταμών τα οποία καταλήγουν στην θάλασσα ή σε λίμνες[2].



Σχήμα 4.1 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος εκφράζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$P = E + R + \Delta U \quad (4.1)$$

όπου, P: οι κατακρημνίσεις, E: η εξάτμιση, R: η απορροή και,  $\Delta U$ : οι λοιπές ποσότητες ύδατος οι οποίες συγκρατούνται από την βλάστηση και την καλλιέργεια, ρέουν προς το υπέδαφος κτλ[1].

Τα φυσικά στοιχεία, η γνώση των οποίων αφορά άμεσα τον καθορισμό ενός υδροηλεκτρικού έργου διακρίνονται σε **κλιματολογικά** και **υδρομετρικά**.

### 4.2 Μέτρηση της παροχής

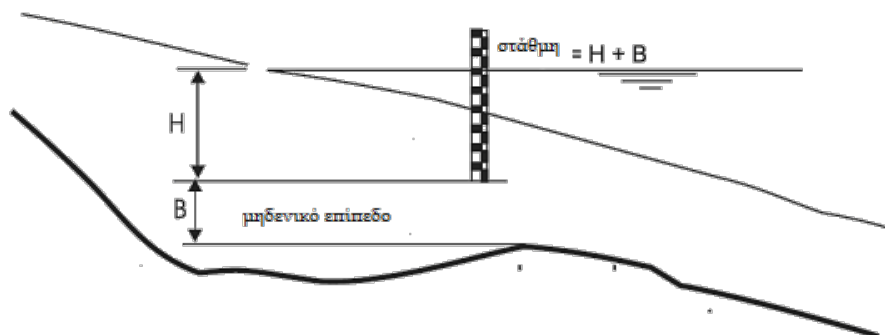
Στο πλαίσιο της διαδικασίας ανάπτυξης υδροηλεκτρικών σταθμών και παράλληλα με την εξέταση των κλιματολογικών στοιχείων, πολύ μεγάλη αξία έχει η μελέτη των υδρομετρικών στοιχείων τα οποία σχετίζονται με τον καθορισμό της φυσικής παροχής και της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του ποταμού. Ο υπολογισμός της φυσικής παροχής πραγματοποιείται με τη βοήθεια υδρομετρικών παρατηρήσεων κατά μήκος του ποταμού στη θέση των έργων της σχεδιαζόμενης εγκατάστασης. Οι παρατηρήσεις αυτές απαιτείται να είναι συνεχείς και πολυετείς με το χρονικό διάστημα του ενός έτους να αποτελεί το ελάχιστο όριο[5].

Επίσης, προτείνεται η συγκέντρωση υδρομετρικών στοιχείων για διάστημα πέντε ως δέκα ετών προκειμένου να περιορισθεί το ρίσκο της τελικής εκτίμησης της παροχής ύδατος[3]. Στην περίπτωση που η διεξαγωγή ικανοποιητικών και μακροχρόνιων παρατηρήσεων δεν καθίστανται δυνατή, κρίνεται απαραίτητη η αξιοποίηση συμπληρωματικών στοιχείων που αφορούν θέσεις του ποταμού εκτός της εξεταζόμενης υδροδυναμικής θέσης, υφιστάμενων υδρομετρικών στοιχείων άλλων ποταμών της εξεταζόμενης περιοχής και υδρομετρικών στοιχείων που προκύπτουν από το συσχετισμό μεταξύ κατακρημνίσεων και απορροής[1].

Η συγκέντρωση των απαραίτητων υδρομετρικών στοιχείων στο πλαίσιο της ενεργειακής αποτίμησης υδροηλεκτρικών σταθμών περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της φυσικής παροχής η οποία αναμένεται να αξιοποιηθεί από την αντίστοιχη εγκατάσταση. Η μέτρηση της παροχής ύδατος πραγματοποιείται με τη βοήθεια ποικίλων μεθόδων, οι διαφορές των οποίων εντοπίζονται στην ακρίβεια των υπολογισμών, το εύρος και την ευκολία εφαρμογής και οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

#### 4.2.1 Μέθοδος εμβαδού διατομής- ταχύτητας ύδατος

Αυτή είναι μια συμβατική μέθοδος για τα μεσαίους ως και τους μεγάλους ποταμούς, που περιλαμβάνει τη μέτρηση του εμβαδού διατομής του ποταμού και της μέσης ταχύτητας του νερού δια μέσω αυτής. Είναι μια χρήσιμη προσέγγιση για τον καθορισμό της ροής ρευμάτων με ελάχιστη προσπάθεια. Ένα κατάλληλο σημείο πρέπει να επιλεγεί σε μια ένα σχετικά ευθύγραμμο τμήμα, με στρωτή ροή στο τμήμα του ποταμού που θα μετρηθεί (σχήμα 4.2). Ο ποταμός πρέπει σε αυτό το σημείο να έχει ένα ομοιόμορφο πλάτος, με την περιοχή καλά καθορισμένη και καθαρή.



**Σχήμα 4.2** Μέτρηση στις στάθμης ποταμού, ορισμοί[6].

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διαδικασίας μετρώνται το εμβαδόν διατομής  $S$  ( $m^2$ ) και η μέση ταχύτητα ροής  $u$  ( $m/sec$ ) σε επιλεγμένη θέση του ποταμού με αποτέλεσμα η τιμή της παροχής ύδατος να προκύπτει με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

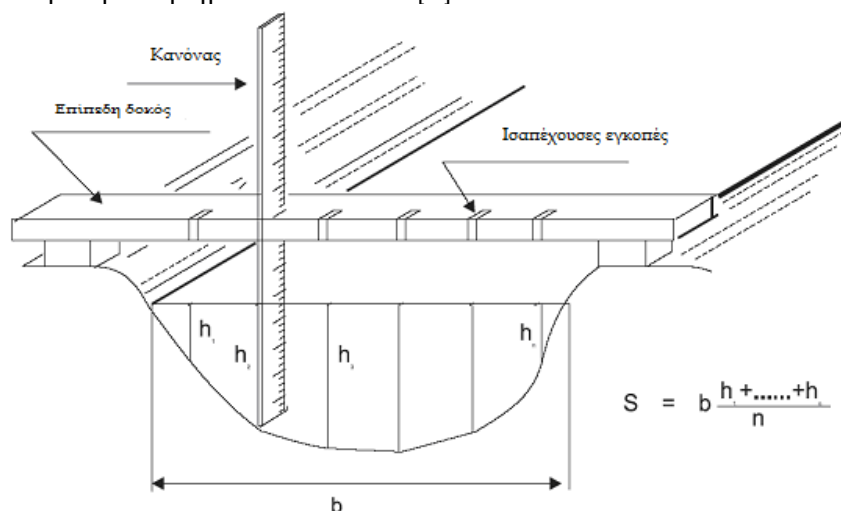
$$Q = S \cdot u \quad (4.2)$$

Η μέτρηση του εμβαδού διατομής της επιλεγμένης θέσης του ποταμού πραγματοποιείται με το χωρισμό της τελευταίας σε σειρά τραπεζίων εμβαδών. Ακολούθως, ο προσδιορισμός του μήκους των πλευρών των συγκεκριμένων σχημάτων οδηγεί στον υπολογισμό του επιθυμητού εμβαδού με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$S = b \cdot \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} \quad (4.3)$$

όπου  $b$ : το πλάτος του ποταμού στη συγκεκριμένη θέση ( $m$ ),  $h_i$ : το βάθος του ποταμού κατά την  $i$  μέτρηση ( $m$ ),  $n$ : ο αριθμός των μετρήσεων.

Η συγκεκριμένη διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3 τη στιγμή που η μέτρηση του βάθους του ποταμού στα επιλεγμένα σημεία πραγματοποιείται με τη βοήθεια βαθμονομημένων κανόνων[6].



**Σχήμα 4.3** Μέτρηση εμβαδού διατομής[6].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

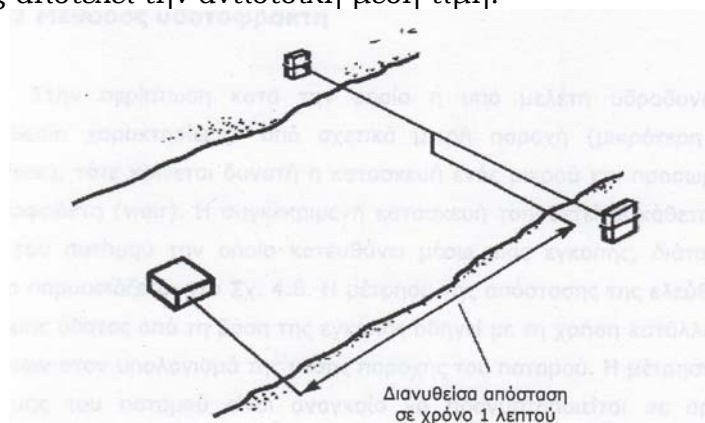
Δεδομένου ότι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος και κατά πλάτος του ποταμού δεν είναι σταθερή, είναι απαραίτητο να μετρηθεί η ταχύτητα του νερού σε διάφορα σημεία για να λάβουμε την μέση της τιμή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την μέτρηση της ταχύτητας, δύο από τους οποίους αναλύονται παρακάτω.

### Με πλωτήρα

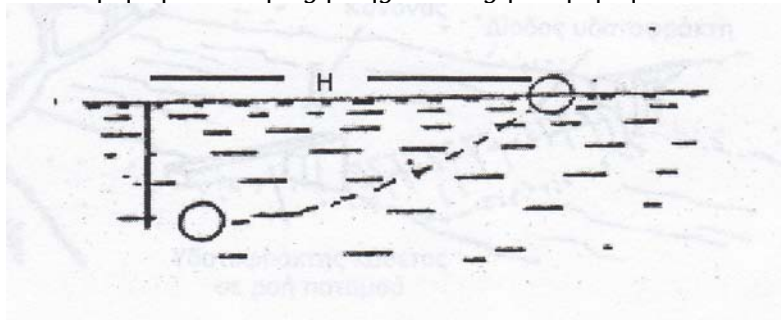
Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για μια προσεγγιστική εκτίμηση της παροχής αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Βασίζεται στην μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου (πλωτήρας) που επιπλέει στην ελεύθερη επιφάνεια μέσω της μέτρησης του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να διανύσει ο πλωτήρας μια συγκεκριμένη απόσταση (Σχήμα 4.4). Ο πλωτήρας καλό είναι να έχει μισοβυθισμένο ένα τμήμα του όγκου του έτσι ώστε η ταχύτητα του να πλησιάζει περισσότερο προς την μέση ταχύτητα του υδατορεύματος, χωρίς να επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου[2].

Η επιφανειακή ταχύτητα ροής ύδατος προκύπτει με απλούς υπολογισμούς, ενώ η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας ροής πραγματοποιείται με τον πολλαπλασιασμό της προκύπτουσας τιμής με συντελεστή διόρθωσης ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 0,85 ανάλογα με το βάθος του ποταμού και την τραχύτητα του πυθμένα και των όχθων του.

Παραλλαγή της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η χρήση ενός επιπλέοντος μέσου το οποίο μπορεί να είναι ένα μπαλάκι του πινγκ-πονγκ (Σχήμα 4.5), το οποίο απελευθερώνεται από επιλεγμένο βάθος του ποταμού ώστε με τη μέτρηση της οριζόντιας απόστασης και του αντίστοιχου χρόνου ως την άνοδο του συγκεκριμένου αντικειμένου στην επιφάνεια, υπολογίζεται η ταχύτητα ροής ύδατος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στο γεγονός ότι η μετρούμενη ταχύτητα ροής αποτελεί την αντίστοιχη μέση τιμή.



**Σχήμα 4.4** Μέτρηση ταχύτητας ροής ύδατος με χρήση επιπλέοντος μέσου.



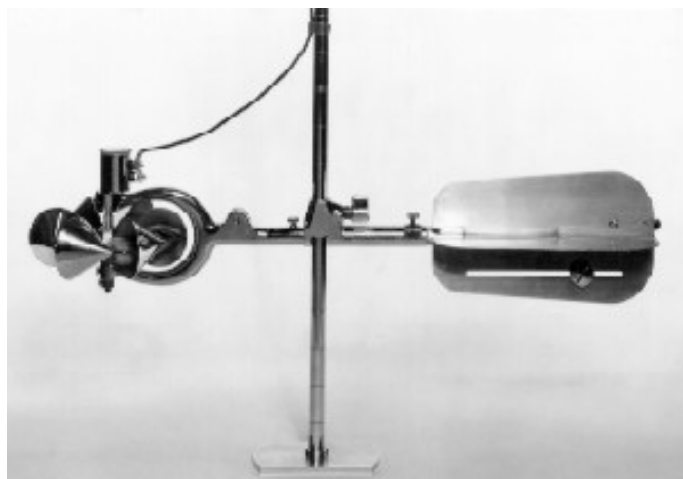
**Σχήμα 4.5** Μέτρηση ταχύτητας ροής ύδατος με την απελευθέρωση βυθισμένου αντικειμένου[1]

### **Με προπελωτό ή κυπελλοειδές όργανο**

Η μέτρηση της ταχύτητας ροής ύδατος γίνεται συνήθως με τη χρήση ειδικών οργάνων όπως το προπελωτό και το κυπελλοειδές όργανο. Το κυπελλοειδές όργανο είναι εφοδιασμένο με ένα κυπελλοειδή έλικα κάθετου άξονα(Σχήμα 4.7). Αυτή η συσκευή λειτουργεί σε χαμηλότερες ταχύτητες από το προπελωτό όργανο και έχει το πλεονέκτημα των ρουλεμάν που το προστατεύει από τα λασπώδη νερά. Το προπελωτό όργανο αποτελείται από ένα μικρό προπελωτό άξονα ο οποίος περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο και κρατείται παράλληλα στο ρεύμα από τα πτερύγια ουράς(Σχήμα 4.6). Αυτή η συσκευή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι λιγότερο πιθανό να επηρεάσει τη ροή ύδατος γύρω από το σημείο μέτρησης και επίσης να επηρεαστεί η μέτρηση από τα φερτά υλικά του ποταμού.



**Σχήμα 4.6** Προπελωτό όργανο μέτρησης ταχύτητας ροής ύδατος[3].



**Σχήμα 4.7** Κυπελλοειδές όργανο μέτρησης ταχύτητας ροής ύδατος[3].

Κάθε περιστροφή του προπελωτού άξονα καταγράφεται ηλεκτρικά μέσω ενός καλωδίου στον μετρητή και ο αριθμός των περιστροφών υπολογίζεται από τον μετρητή ή αυτόματα από το ίδιο το όργανο, κατά την διάρκεια μιας μικρής περιόδου (1 ή 2 λεπτών). Αυτές οι μετρήσεις μετατρέπονται σε ταχύτητες νερού με τη βοήθεια μιας καμπύλης βαθμονόμησης του οργάνου ( τα σύγχρονα όργανα, με την τεχνολογία μικροεπεξεργαστών υπολογίζουν και εμφανίζουν απευθείας την μέτρηση). Με την κίνηση του οργάνου κάθετα και οριζόντια σε διάφορα σημεία του ποταμού (οι συντεταγμένες των οποίων είναι καθορισμένες), μπορεί να σχεδιασθεί ένα πλήρης χάρτης της ταχύτητας του εμβαδού διατομής [6].

Η χρήση των συγκεκριμένων οργάνων προβλέπει, στην περίπτωση μικρών παροχών, τη χρήση μεταλλικής δοκού ή σχοιניού, τοποθετημένων κάθετα στη ροή του ποταμού, πάνω στην οποία κινείται το όργανο. Στην περίπτωση μελέτης μεγαλύτερων παροχών χρησιμοποιείται με ανάλογο τρόπο συρματόσχοινο ή κάποιο πλωτό μέσο (βάρκα) που μεταφέρει το προσωπικό το οποίο πραγματοποιεί τις αντίστοιχες μετρήσεις[1]. Οι τελευταίες εκτελούνται σε θέσεις κατά πλάτος του ποταμού σε απόσταση 50 cm περίπου μεταξύ τους και σε βάθος ίσο με 0,2 και 0,8 του συνολικού βάθους του ποταμού. Προτείνεται παράλληλα η πραγματοποίηση δυο μετρήσεων σε κάθε επιλεγμένη θέση, στοχεύοντας στη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, και η διεξαγωγή και τρίτης μέτρησης στην περίπτωση κατά την οποία θεωρείται σημαντική η διαφορά μεταξύ των προηγούμενων αποτελεσμάτων[1]. Η ακρίβεια η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση των συγκεκριμένων οργάνων είναι συνήθως καλύτερη του 3% καθώς το πλήθος των μετρήσεων οδηγεί στην εξάλειψη πιθανών σφαλμάτων [13].

### **Με χρήση ηλεκτρομαγνητικού οργάνου**

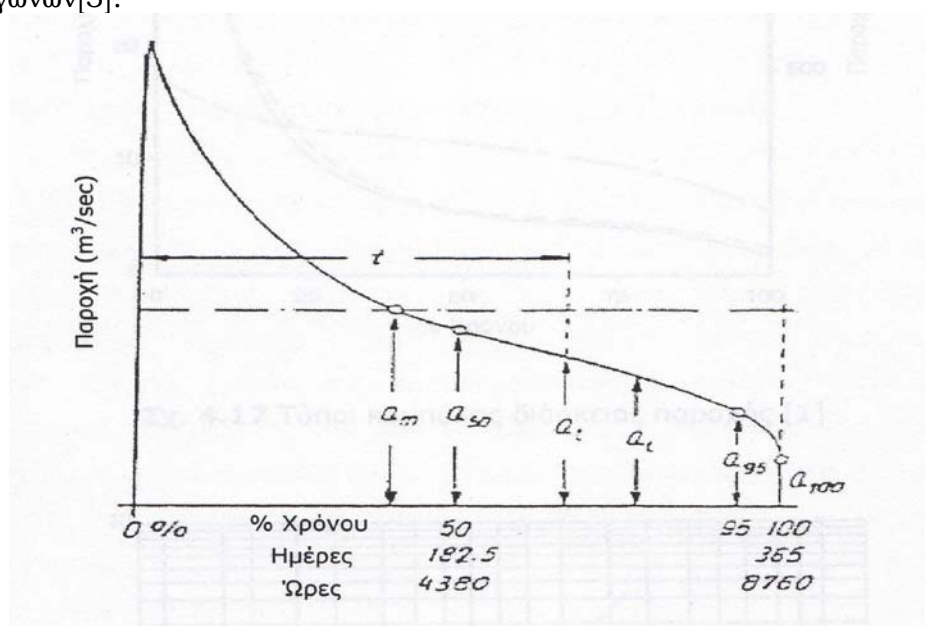
Ένα ηλεκτρομαγνητικό όργανο είναι ένα ηλεκτρικό όργανο επαγωγικής μέτρησης, χωρίς κινούμενα μέρη, τοποθετημένο σε ενιαίο, κλειστό και αεροδυναμικό κέλυφος. Παράλληλα είναι δυνατόν να συνδεθεί στο άκρο μεταλλικής ράβδου η οποία βυθίζεται στον ποταμό ή και να αιωρείται με τη βοήθεια καλωδίου, ενώ συνοδεύεται από επιφανειακή συσκευή ελέγχου αναλογικής ή ψηφιακής μορφής για την καταγραφή των μετρήσεων.

Το συγκεκριμένο όργανο έχει τα πλεονεκτήματα ότι έχει μικρό μέγεθος και διαθέτει μια ευρύτερη κλίμακα μέτρησης σε σχέση με το προπελωτό και κυπελλοειδές όργανο. Είναι επίσης ιδιαίτερα χρήσιμο στις πολύ χαμηλές ταχύτητες όπου το προπελωτό και το κυπελλοειδές όργανο παρουσιάζουν προβληματική συμπεριφορά.

Η ευαισθησία του και η χαμηλότερη ευπάθεια στην παρουσία βλάστησης και φερτών υλικών του ποταμού το καθιστά ελκυστικό για χρήση στην περίπτωση μολυσμένων και πυκνής βλάστησης ποταμών[6].

### 4.2.2 Μέθοδος καμπύλης στάθμης-παροχής

Λόγω ακριβώς εφαρμογής της μεθόδου μέτρησης της παροχής μέσω μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση της καμπύλης στάθμης-παροχής του υδατορεύματος στην εξεταζόμενη διατομή. Συγκεκριμένα μετράται η παροχή  $Q$  ανα τακτά χρονικά διαστήματα και καταγράφεται η αντίστοιχη στάθμη του νερού. Στο Σχήμα 4.8 δίνεται τυπικό παράδειγμα της καμπύλης στάθμης- παροχής σε γραμμικό διάγραμμα όπως προκύπτει από την επεξεργασία των μετρήσεων με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων[3].



**Σχήμα 4.8** Τυπικό παράδειγμα καμπύλης στάθμης-παροχής[2]

Στα περισσότερα υδατορέυματα η σχέση παροχή-στάθμης μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου λόγω μεταβολής της διατομής ή και τις κλίσης του υδατορεύματος ως αποτέλεσμα της διάβρωσης ή της απόθεσης φερτών υλικών. Άρα δεν υπάρχει μια διαχρονική συσχέτιση μεταξύ στάθμης και παροχής στην συγκεκριμένη διατομή του υδατορεύματος αλλά περισσότερες, κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα χρονικό διάστημα (μερικούς μήνες ή έτη). Συνήθως η μεταβολή της καμπύλης στάθμης-παροχής παρατηρείται μετά από μια μεγάλη πλημμύρα ως αποτέλεσμα της μεγάλης διαβρωτικής δράσης του νερού. Για τους λόγους αυτούς απαιτείται συνεχής περιοδική μέτρηση της παροχής ώστε να ελέγχεται η ισχύς της καμπύλης στάθμης-παροχής ή να πιστοποιείται η μετάβαση σε άλλη καμπύλη[2].

Στην περίπτωση ποταμών μικρού σχετικά βάθους η μέτρηση της στάθμης, μπορεί να γίνει με την βοήθεια σταθμημέτρου. Η απλούστερη μορφή σταθμημέτρου είναι μια σταδία με αποτυπωμένη εκατοσταμετρική κλίμακα[2]. Στις περιπτώσεις μεγαλύτερου βάθους χρησιμοποιείται ειδικό όργανο το οποίο καλείται βαρδάρης και καταγράφει τη γωνία που σχηματίζεται από τον πυθμένα του ποταμού και το σημείο μέτρησης[7]. Άλλοι τρόποι μέτρησης της στάθμης, με ευκολία στην μετατροπή της στάθμης σε ηλεκτρικό σήμα (και στη συνέχεια

σε ψηφιακό) βασίζονται στη χρησιμοποίηση μετατροπέων στατικής πίεσης ή στην τεχνολογία υπερήχων ή ακτινών laser.

### 4.2.3 Μέθοδος υδατοφράκτη(Weir)-(Μετρητικός υπερχειλιστής)

Η μέτρηση αυτή χρησιμοποιείται περισσότερο από τις άλλες για τη μέτρηση της παροχής μικρού υδατορεύματος. Η μέτρηση της παροχής ανάγεται στην μέτρηση της στάθμης του νερού ανάντη του υπερχειλιστού μέσω σταθμήμετρου. Ο υπολογισμός της παροχής γίνεται είτε από θεωρητικές εξισώσεις είτε από την καμπύλη βαθμονόμησης που χαράσσεται πειραματικά. Η θέση στην οποία γίνεται η μέτρηση πρέπει να επιλεγεί ώστε η κλίση του υδατορεύματος να είναι μικρή και η ροή ομαλή.

Η μέτρηση μικρών παροχών, μέχρι 4 m<sup>3</sup>/sec γίνεται με υδατοφράκτη λεπτού τοιχώματος του οποίου η στέψη μπορεί να είναι ορθογωνική, τριγωνική, τραπεζοειδής ή άλλης σύνθετης μορφής και κατασκευάζεται από έλασμα πάχους 5-8 mm[2].

Οι υδατοφράκτες τοποθετούνται κάθετα στη ροή του ποταμού και με κατάλληλη βαθμονόμηση της εγκοπής δημιουργούμε τη συνάρτηση στάθμης ποταμού-παροχής. Η μέτρηση της στάθμης το υ ποταμού πρέπει να γίνεται σε αρκετή απόσταση από τον υδατοφράκτη ( τουλάχιστον τέσσερις φορές το ύψος της εγκοπής του τελευταίου) προκειμένου να διατηρείται η εγκοπή καθαρή από ιζήματα και οι άκρες αιχμηρές και να αποφεύγεται η επίδραση της πτώσης στάθμης ύδατος κατά την διέλευση του από το φράκτη[7].

Στην συνέχεια δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού της παροχής για υδατοφράκτες λεπτού τοιχώματος ορθογωνικής και τριγωνικής μορφής. Οι σχέσεις αυτές δίνουν ακρίβεια της τάξης του 1-2%.

#### ι) Ορθογωνικός υδατοφράκτης (υπερχειλιστής) (Σχήμα 4.9)

Η παροχή δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \mu LH\sqrt{2gH} \quad (4.4)$$

όπου L το πλάτος της εγκοπής (m),H: το ύψος της στάθμης ύδατος από τη βάση της εγκοπής (m), g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec<sup>2</sup>) και μ: ο συντελεστής ροής, ο οποίος σχετίζεται με το πλάτος I<sub>c</sub> των πλευρικών τοιχωμάτων του υδατοφράκτη με τις ακόλουθες σχέσεις:

α) για I<sub>c</sub> =0 τότε:

$$\mu = \left( 0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{H}{H+z} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

στην οποία με z συμβολίζεται το βάθος από τον πυθμένα του υδατορεύματος μέχρι την ανάντη στάθμη του νερού (Σχήμα 4.11). Η σχέση 4.5 ισχύει όταν: 0,5m<L<2m 0,1m<H<0,6m και 0,2m<z<2m.

β) Στην περίπτωση τραπεζοειδούς υδατοφράκτη (όταν I<sub>c</sub> ≠ 0) ο συντελεστής μ δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu = \left( 0,405 - 0,03 \frac{I_c}{L + I_c} \right) \left[ 1 + 0,55 \left( \frac{LH}{(I_c + L)(H + z)} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

γνωστή και σαν εξίσωση του Hegly, η οποία ισχύει όταν:



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

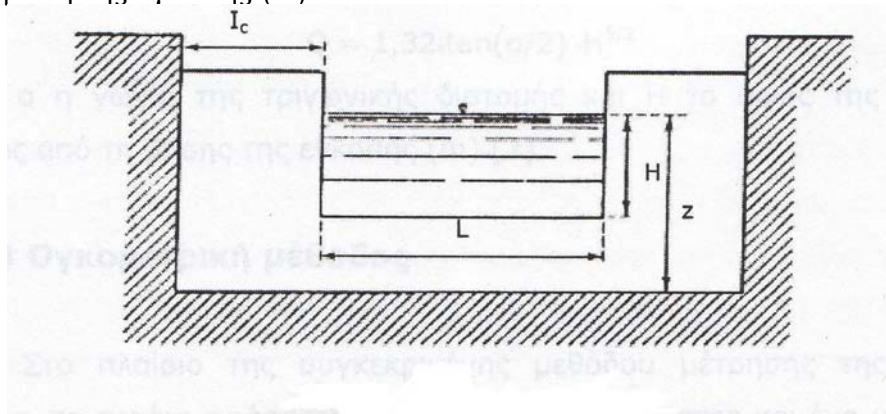
$$0,1\text{m}<H<0,6\text{m} \quad 0,4\text{m}<L<1,80\text{m} \quad 0,4\text{m}<z<0,8\text{m} \quad 0<\frac{I_c}{L+I_c}<0,9$$

### ii) Τριγωνικός υδατοφράκτης (Σχήμα 4.10)

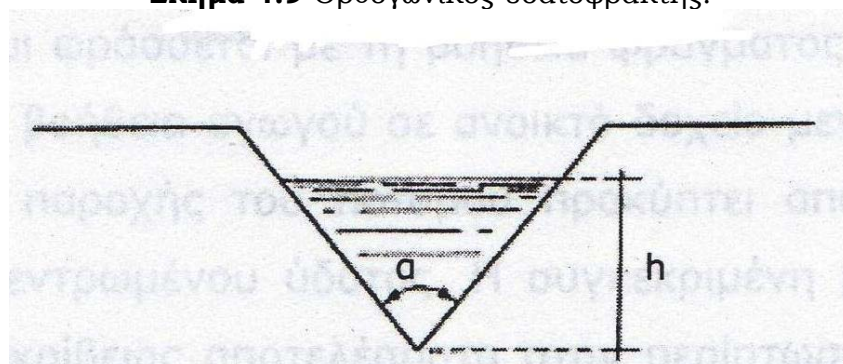
Η παροχή δίνεται από την εξίσωση των Gourley και Grimp:

$$Q = 1,32h^{2,47} \tan\left(\frac{a}{2}\right) \quad (4.7)$$

όπου  $a$ : η γωνία της τριγωνικής διατομής και  $H$ : το ύψος της στάθμης ύδατος από τη βάση της εγκοπής (m).



Σχήμα 4.9 Ορθογωνικός υδατοφράκτης.

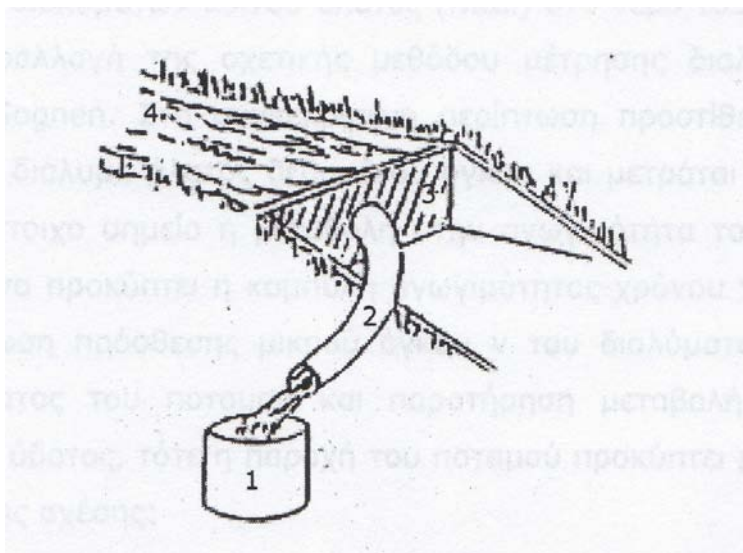


Σχήμα 4.10 Τριγωνικός υδατοφράκτης.

### 4.2.4 Μέθοδος μέτρησης όγκου

Στην συγκεκριμένη μέθοδο μέτρησης της παροχής ύδατος, το ποτάμι φράσσεται με τη βοήθεια φράγματος και ένα μέρος του εκτρέπεται με τη βοήθεια αγωγού σε ανοικτό δοχείο μεγάλων διαστάσεων. Η εκτίμηση της παροχής του ποταμού προκύπτει από τη μέτρηση του όγκου του συγκεκριμένου ύδατος. Η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελέσματα στην περίπτωση μικρών παροχών και εισάγει κάποιο σφάλμα σχετικό με τις απώλειες πτώσης ύδατος (Σχήμα 4.11) [1].





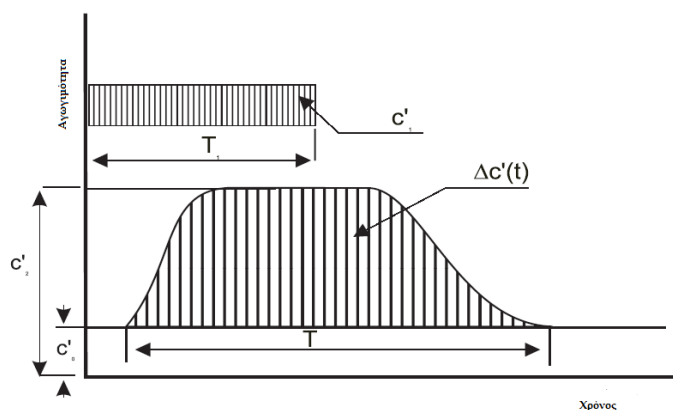
**Σχήμα 4.11** Μέθοδος μέτρησης όγκου

1. Δοχείο 2. Αγωγός εκτροπής 3. Φράγμα 4. επιφάνεια ποταμού

### 4.2.5 Μέθοδος Διαλυμάτων

Η μέθοδος διαλυμάτων εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ποταμών με μεγάλο βάθος και τυρβώδη ροή όπου η χρήση άλλων μεθόδων κρίνεται αδύνατη ή εξαιρετικά ακριβή. Η μέθοδος περιλαμβάνει την έγχυση μιας χημικής ουσίας στο ρεύμα και η δειγματοληψία του ύδατος, σε κάποια απόσταση και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα οδηγούν στη σχέση συγκέντρωσης και χρόνου. Η συγκέντρωση της χημικής ουσίας στο νερό οδηγεί στην εκτίμηση της παροχής του ποταμού. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η χημική ανάλυση του διαλύματος το οποίο προκύπτει από τη συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξειδικευμένου και ακριβού εξοπλισμού[6].

Ο ιδανικός δείκτης θα πρέπει να είναι πολύ διαλυτός στο νερό, να είναι χημικά ευσταθής και να μην αντιδρά με την ενδεχόμενα αιωρούμενη άργιλο στο νερό, να είναι εύκολα ανιχνεύσιμος, να έχει χαμηλό κόστος και να μην είναι τοξικός για τον άνθρωπο και για τους ζωντανούς οργανισμούς τουλάχιστον στις χρησιμοποιούμενες συγκεντρώσεις. Κατάλληλοι δείκτες είναι οι ακόλουθοι:  $\text{NaCr}_2\text{O}_2$ ,  $\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{C}_1\text{O}_3\text{N}_2$  (ροδαμίνη),  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{LiCl}$ [2]. Συνήθως ως δείκτης χρησιμοποιείται το κοινό αλάτι  $\text{NaCl}$  του οποίου η συγκέντρωση μετράται εύκολα με τη μέθοδο της αγωγιμότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προστίθενται σταδιακά στον ποταμό διάλυμα άλατος ορισμένου όγκου και μετράται σε απόσταση από το αντίστοιχο σημείο η μεταβολή στην αγωγιμότητα του ύδατος με αποτέλεσμα να προκύπτει η καμπύλη αγωγιμότητας-χρόνου (Σχήμα 4.12).



**Σχήμα 4.12** Καμπύλη αγωγιμότητας-χρόνου μεθόδου διαλύματος[6].

Η παροχή του ποταμού προκύπτει με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

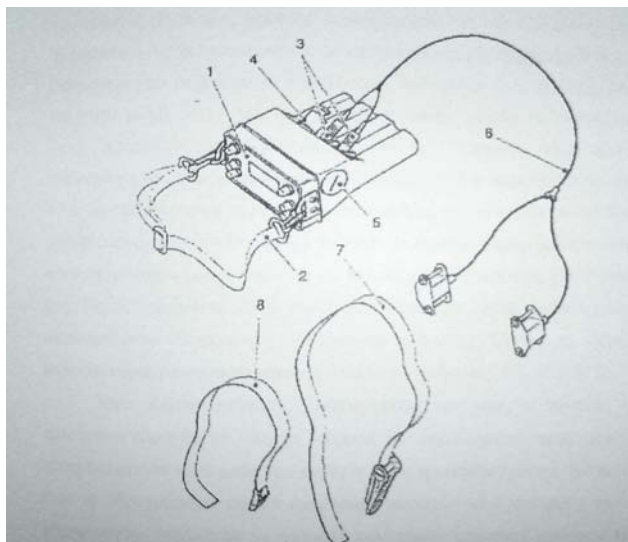
$$Q = \frac{V V_1 \Delta_c'}{T v \Delta_c} \quad (4.8)$$

όπου  $V$ : ο όγκος του διαλύματος έγχυσης,  $T$ : η διάρκεια των δόσεων διαλύματος (sec),  $v$ : ο όγκος του προστιθέμενου διαλύματος άλατος,  $V_1$ : ο όγκος ύδατος του ποταμού,  $\Delta_c$ : η μεταβολή στην αγωγιμότητα ύδατος ( $\Omega$ -1) συνέπεια της έγχυσης του διαλύματος  $v$  στο  $V_1$  και,  $\Delta_c'$ : η μέση τιμή των τεταγμένων της καμπύλης-αγωγιμότητας χρόνου.

### 4.2.6 Μέθοδος Υπερήχων

Η μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή δέσμης παλμών υπερήχων(Σχήμα 4.13) η οποία κατευθύνεται διαγώνια προς την επιφάνεια του υδατορεύματος όπου και ανακλάται. Η συχνότητα της ανακλώμενης δέσμης μετράται από αντίστοιχο αισθητήρα οπότε από την μεταβολή της συχνότητας της δέσμης προκύπτει η ταχύτητα της ροής. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής της παροχής, όμως στα μειονεκτήματα της συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος του εξοπλισμού [2].

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση παροχής ύδατος σε κλειστούς αγωγούς.



**Σχήμα 4.13** Όργανο μέτρησης ταχύτητας σε κλειστούς αγωγούς[7].

1. Οθόνη και πλήκτρα, 2. Ιμάντας, 3. Συνδέσεις αισθητήρων, 4. Βοηθητική σύνδεση, 5. Χώρος μπαταρίας, 6. Καλώδιο και αισθητήρια, 7. Ιμάντας για μεγάλης διατομής αγωγούς, 8. Ιμάντας για μικρής διατομής αγωγούς

### 4.3 Καταγραφή μετρήσεων παροχής ύδατος

Προκειμένου να μπορέσουν να εφαρμοστούν σε μια πραγματική περίπτωση, τα μακροχρόνια στοιχεία που παρέχουν την μέτρηση της ροής κατά τη διάρκεια αρκετών ετών πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία με κατάλληλες μεθόδους για την ανάλυση που απαιτεί κάθε ειδική περίπτωση. Για το λόγο αυτό η στατιστική ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική[10].

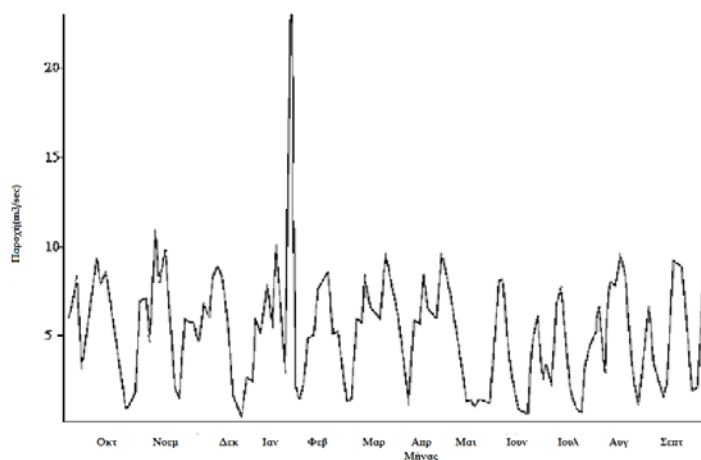
Στη συνέχεια ορίζονται μεγέθη που σχετίζονται με την επιφανειακή απορροή και είναι χρήσιμα στην υδρολογική και ενεργειακή ανάλυση μιας συγκεκριμένης λεκάνης απορροής. Τα μεγέθη αυτά χαρακτηρίζουν τις μεταβολές των διαφόρων υδρολογικών μεγεθών από έτος σε έτος:

- ✚ Ως υδρολογικό έτος ορίζεται η χρονική διάρκεια 12 μηνών που αρχίζει και τελειώνει στην εποχή της ελάχιστης απορροής. Στην Ελλάδα και γενικότερα στο Βόρειο Ημισφαίριο το υδρολογικό έτος αρχίζει την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου και τελειώνει την 30<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου. Με τον τρόπο αυτό, στην αρχή κάθε υδρολογικού έτους έχουν αποφορτισθεί οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες οπότε τα υδρολογικά φαινόμενα σε ένα υδρολογικό έτος είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητα από αυτά του προηγούμενου.
- ✚ Ως μέση μηνιαία παροχή υδατορεύματος σε συγκεκριμένη διατομή ορίζεται η μέση τιμή των ημερήσιων παροχών του εξεταζόμενου μήνα. Ως μέση μηνιαία παροχή του μέσου υδρολογικού έτους ορίζεται η μέση τιμή των μέσων μηνιαίων παροχών για όλα τα υδρολογικά έτη για τα οποία υπάρχουν παρατηρήσεις. Ως μέση ετήσια παροχή ορίζεται η μέση τιμή των 12 μέσων μηνιαίων παροχών λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό ημερών κάθε μήνα.
- ✚ Ως μέσο υδρολογικό έτος χαρακτηρίζεται το ιδεατό υδρολογικό έτος του οποίου τα υδρολογικά χαρακτηριστικά αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των αντίστοιχων χαρακτηριστικών όσο το δυνατόν περισσότερων και συνεχόμενων υδρολογικών ετών. Το πλήθος των υδρολογικών ετών από τα οποία προκύπτουν οι τιμές του μέσου υδρολογικού έτους πρέπει να σημειώνεται.

- ✚ Ως υδραυλικότητα μιας χρονικής περιόδου (πχ. ενός υδρολογικού έτους) ορίζεται ο λόγος της επιφανειακής απορροής κατά την χρονική περίοδο του μέσου υδρολογικού έτους.
- ✚ Ως ξηρασία χαρακτηρίζεται η χρονική περίοδος κατά την οποία η βροχή ή η επιφανειακή απορροή συνεχώς υπολείπεται του κλιματικώς αναμενόμενου ποσού[2].

### 4.3.1 Υδρογράφημα

Η ποσοτική παράσταση της χρονικής μεταβολής της απορροής (σε μονάδες παροχής) σε μία διατομή Α ενός υδατορεύματος ονομάζεται **υδρογράφημα**[2]. Με άλλα λόγια το υδρογράφημα προκύπτει από την χάραξη του διαγράμματος των μετρούμενων υδρολογικών παραμέτρων( παροχή, στάθμη, ταχύτητα ροής) συναρτήσει του χρόνου εκφρασμένου σε ώρες, ημέρες ή μήνες διατεταγμένες σε χρονολογική σειρά. Ένα παράδειγμα υδρογραφήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14[6]. Προκειμένου για τη μεταβολή της στάθμης του ποταμού συναρτήσει του χρόνου, το αντίστοιχο διάγραμμα καλείται **διάγραμμα ημερήσιας στάθμης** ή **σταθμηγράφημα** και αναφέρεται σε πλήρες υδρολογικό έτος. Στην περίπτωσης κατά την οποία η τεταγμένη του συγκεκριμένου διαγράμματος είναι η παροχή ύδατος, το διάγραμμα καλείται **υδρογράφημα παροχών** ή απλά **υδρογράφημα**[1],[7].



**Σχήμα 4.14** Υδρογράφημα μηνιαίων παροχών

Ένας επίσης χρήσιμος πίνακας στοιχείων είναι ο πίνακας μέσω ημερήσιων παροχών για όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους, στον οποίο αναγράφεται για κάθε μέρα του έτους η μέση ημερήσια παροχή. Καταρτίζεται έτσι το υδρογράφημα μέσω ημερήσιων παροχών του ποταμού, στο οποίο σημειώνονται παράλληλα τα στοιχεία των μέσω μηνιαίων παροχών και της μέσω ετήσιας παροχής, όπως και οι τιμές της μηνιαίας και της ετήσιας παροχής.

Πολύτιμες πληροφορίες συλλέγονται από την επεξεργασία των συγκεκριμένων υδατογραφημάτων. Διαπιστώνεται πως το υδρογράφημα μέσω ημερήσιων παροχών δίνει τη μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια παροχή και την αντίστοιχη ετήσια απορροή, τιμές οι οποίες αξιοποιούνται για την εκτίμηση των υδραυλικών στοιχείων κατά την περίοδο κατασκευής του έργου, στην

περίπτωση εκτροπής, και κατά την περίοδο λειτουργίας των εκχειλιστών. Αντίστοιχα, το υδρογράφημα μέσω μηνιαίων παροχών καταγράφει τιμές φυσικής παροχής πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές του διαγράμματος μέσω ημερήσιων παροχών.

### 4.3.2 Καμπύλη διάρκειας παροχής

Η καμπύλη διάρκειας παροχής είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την παράσταση της χρονικής μεταβλητότητας της παροχής και οποιουδήποτε μεγέθους γενικότερα. Χρησιμοποιείται συχνά στην υδρολογική ανάλυση για αρδευτικούς σκοπούς και κυρίως στις μελέτες αξιολόγησης μιας θέσης όσον αφορά την υδροηλεκτρική της αξιοποίηση για τον υπολογισμό της ισχύος και της ενέργειας που θα παράγεται ετησίως. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η καμπύλη διάρκειας παροχής στα υδροηλεκτρικά έργα χωρίς καθόλου ταμιευτήρα ή με πολύ μικρό ταμιευτήρα. Στα υδροηλεκτρικά έργα με μεγάλο ταμιευτήρα η καμπύλη διάρκειας της παροχής δεν εξυπηρετεί ιδιαίτερα καθώς δεν δίνει την πληροφορία της χρονικής ακολουθίας της παροχής στην εξεταζόμενη θέση.

Ως καμπύλη διάρκειας ενός μεγέθους πχ. της παροχής (Σχήμα 4.15) σε μια εξεταζόμενη διατομή υδατορεύματος, ορίζεται η καμπύλη που παριστάνει την τιμή του μεγέθους συναρτήσει του χρονικού διαστήματος επί τοις εκατό (% του χρόνου) για το οποίο το συγκεκριμένο μέγεθος έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από αυτή της καμπύλης. Προφανώς, κάθε καμπύλη διάρκειας είναι μια φθίνουσα καμπύλη. Στην περίπτωση της καμπύλης διάρκειας της παροχής σε  $t=0\%$  αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή της παροχής και σε  $t=100\%$  αντιστοιχεί η ελάχιστη τιμή της παροχής. Δηλαδή η καμπύλη διάρκειας παροχής ταξινομεί τις παροχές κατά σειρά μεγέθους δίνοντας την συνολική διάρκεια (μέσα σε ένα χρονικό διάστημα) στο οποίο η παροχή είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας τιμής της παροχής[2].

Ανάλογα με το συνολικό χρόνο παρατηρήσεων, οι καμπύλες διάρκειας παροχής διακρίνονται σε ημερήσιες, μηνιαίες και ετήσιες (Σχήμα 4.15), όπου φαίνεται ότι η αύξηση του χρόνου παρατηρήσεων οδηγεί στη μείωση των διακυμάνσεων μεταξύ των τιμών της παροχής ύδατος[7].

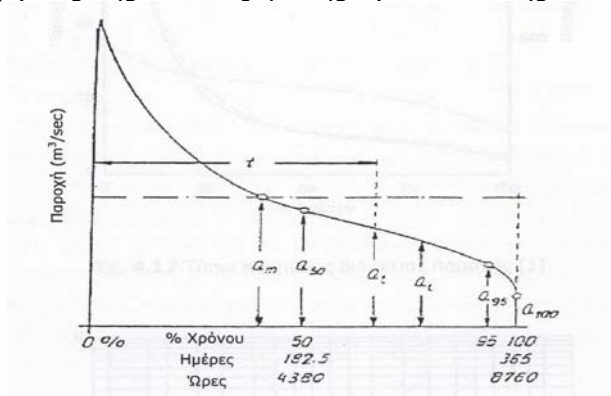
Χαρακτηριστικές τιμές της καμπύλης διάρκειας παροχής είναι η  $Q_{50}$  (αυτή για την οποία επί του 50% του χρονικού διαστήματος η παροχή είναι ίση ή μεγαλύτερη της) και αντίστοιχα η  $Q_{30}$  (αυτή για την οποία επί του 30% του χρονικού διαστήματος η παροχή είναι ίση ή μεγαλύτερη της).

Το βασικό μειονέκτημα της καμπύλης διάρκειας παροχής είναι ότι σε αυτή δεν παριστάνεται η χρονική διαδοχή των παροχών, δηλαδή σε δύο διαφορετικά υδρογραφήματα μπορεί να αντιστοιχεί η ίδια καμπύλη διάρκειας παροχής, χάνεται δηλαδή η πληροφορία του κατά πόσο η περίοδος των υψηλών παροχών περιορίζεται σε μία περίοδο του έτους ή οι υψηλές παροχές συμβαίνουν καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

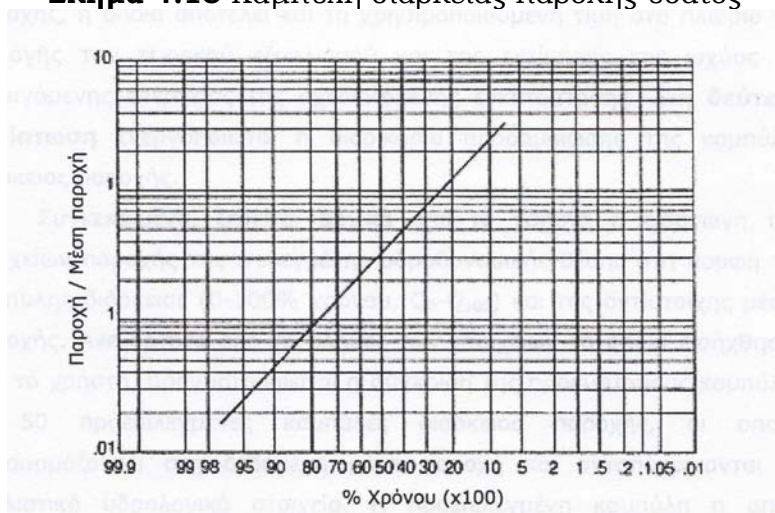
Μια εξαιρετική χρήσιμη απόδοση της καμπύλης διάρκειας είναι να εκφραστούν οι μετρούμενες τιμές της παροχής είτε ως το πηλίκο με τις αντίστοιχες μέσες τιμές (Σχήμα 4.16), είτε με τη χρήση της λογαριθμικής τιμής των παροχών ( $\log Q$ ). Έτσι προκύπτει η τυποποίηση των καμπυλών διάρκειας παροχής και μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υδροδυναμικών τοποθεσιών. Η σύγκριση καμπυλών παροχής του ίδιου ποταμού έδειξε ότι είναι περίπου παρόμοιες, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά προσέγγιση η καμπύλη διάρκειας της παροχής ενός σταθμού παρατηρήσεων και για άλλη θέση του ποταμού, για την οποία λείπουν οι υδρομετρικές παρατηρήσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι καμπύλες διάρκειας παροχής, χρησιμοποιούνται κυρίως στο στάδιο της προμελέτης για την ανάπτυξη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού. Συμβάλουν σημαντικά στη μελέτη των υδρολογικών δεδομένων της εξεταζόμενης τοποθεσίας, όπως στην εκτίμηση των μέγιστων και ελάχιστων παροχών και τη χρονική διαθεσιμότητα παροχών μεταξύ των συγκεκριμένων τιμών. Τέλος, η συγκεκριμένη καμπύλη είναι δυνατό να αποτελέσει βάση για την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας της σχεδιαζόμενης εγκατάστασης.



**Σχήμα 4.15** Καμπύλη διάρκειας παροχής ύδατος



**Σχήμα 4.16** Τυποποιημένη καμπύλη διάρκειας παροχής



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## *Στοιχεία υδροστροβίλων*

### **5.1 Εισαγωγή**

Στο πλαίσιο της λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας ύδατος σε μηχανική περιστροφική ενέργεια πραγματοποιείται με την βοήθεια των υδροστροβίλων[1]. Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του νερού και σταθερής περιστροφικής κίνησης[2]. Οι θεμελιώδεις αρχές τις οποίες καλούνται να ικανοποιήσουν οι υδροστρόβιλοι είναι η αποφυγή επαφής τους με νερό τυρβώδους ροής και η απώλεια αρχικής ταχύτητας ύδατος μετά την αξιοποίηση του από τον υδροστρόβιλο. Οι συγκεκριμένες συνθήκες κρίνεται αναγκαίο να τηρούνται προκειμένου να μην υπάρξει απώλεια ενέργειας υπό τη μορφή τυρβώδους ροής και ανεκμετάλλευτης κινητικής ενέργειας αντίστοιχα[2].

Η ανάπτυξη των υδροστροβίλων, όπως τους γνωρίζουμε, είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Πολλά αναπτυξιακά έργα κατευθύνθηκαν στην σχεδίαση πολύ

μεγάλων, αποδοτικών μονάδων. Δυστυχώς, η τεχνολογία των μικρών υδροστροβίλων δεν έχει ωφεληθεί σε ιδιαίτερο βαθμό από την έρευνα και την ανάπτυξη των μεγάλων μονάδων. Οι μικροί υδροστρόβιλοι, που είναι στην ουσία μεγάλοι υδροστρόβιλοι σε μικρότερη κλίμακα, δεν έχουν επιτύχει τον ίδιο βαθμό τελειοποίησης αντίστοιχα για καθαρά οικονομικούς λόγους.

Οι μικροί υδροστρόβιλοι είναι ουσιαστικά δομημένοι όπως οι μεγάλες διατάξεις, αλλά το μικρότερο μέγεθος τους καθιστά λιγότερο αποδοτικούς. Η ραγδαία αύξηση του κόστους της ενέργειας έκανε πολλές μικρότερες περιοχές οικονομικά βιώσιμες και οδήγησε σε μεγάλη επέκταση της αγοράς των μικρών υδροστροβίλων. Σ' αυτό προστίθενται και η αλματώδης αυξανόμενη ανάπτυξη μικρών υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων στις λιγότερο αναπτυγμένες χώρες όπου η υδροηλεκτρική ενέργεια καθίστανται ελκυστική πηγή ενέργειας αφού αναπτύσσεται πολύ εύκολα. Εξαιτίας αυτής της ταχείας ανάπτυξης προβλέπεται περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας των υδροστροβίλων, καθώς η αγορά δημιουργεί νέες ανταγωνιστικές πιέσεις για τους κατασκευαστές[3].

Οι διατάξεις οι οποίες συνθέτουν τα συστήματα υδροστροβίλων περιλαμβάνουν:

- ✚ Το **δρομέα** (runner), είναι το κύριο τμήμα του υδροστροβίλου που περιλαμβάνει τον άξονα και τον τροχό με τα πτερύγια, για την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική.
- ✚ Το **διανομέα** (distributor), είναι το τμήμα εισόδου του ύδατος στον υδροστρόβιλο στο οποίο, με τη μορφή συνήθως ακροφυσίων, προσπαθούμε να προσδώσουμε στο νερό την απαιτούμενη ταχύτητα.
- ✚ Τον **αγωγό εκτόνωσης** (draught pipe), είναι το τμήμα εξόδου του ύδατος στο οποίο ανακτάται η εναπομένουσα κινητική και δυναμική ενέργεια στην έξοδο του στροβίλου και διοχετεύει το νερό στη λεκάνη απορροής[7].

## 5.2 Ταξινόμηση Υδροστροβίλων

Οι υδροστρόβιλοι είναι δυνατό να ταξινομηθούν με κριτήριο την κίνηση του ύδατος σε σχέση με το δρομέα. Έτσι διακρίνουμε τους εξής τύπους:

- ✚ **Αξονικούς** στροβίλους στους οποίους παρατηρείται κίνηση του ύδατος παράλληλα με τον άξονα τους.
- ✚ **Ακτινωτούς** στροβίλους όπου το νερό κινείται κατά μήκος της ακτίνας τους.
- ✚ **Μικτούς** στροβίλους που αποτελούν συνδυασμό των αξονικών και των ακτινικών και,
- ✚ **Εφαπτομενικούς** στροβίλους που χαρακτηρίζονται από εφαπτομενική κίνηση ύδατος.

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται οι περιπτώσεις των τύπων αυτών.

Με κριτήριο την τοποθέτηση των υδροστροβίλων ταξινομούνται:

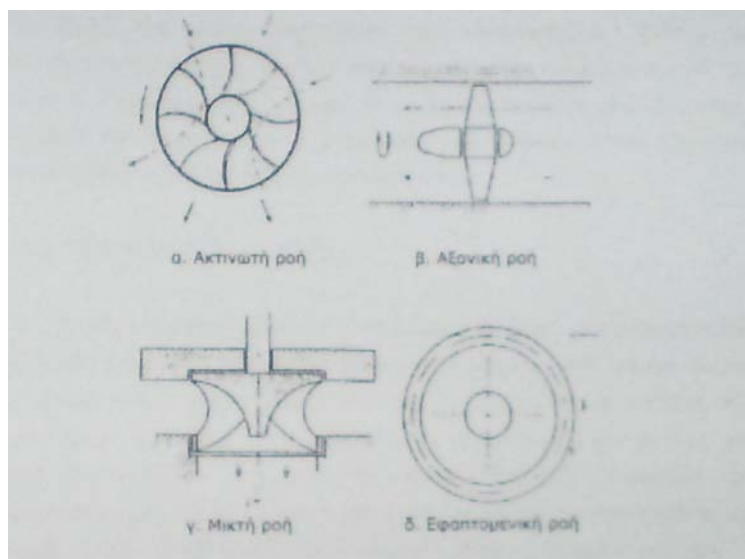
- ✚ Στους υδροστροβίλους **καθέτου άξονα περιστροφής**
- ✚ Στους υδροστροβίλους **οριζοντίου άξονα περιστροφής**.

Ένας ακόμη διαχωρισμός των υδροστροβίλων είναι:

- ✚ Υδροστρόβιλοι **μερικής έγχυσης**, στους οποίους πραγματοποιείται έγχυση ύδατος σε τμήμα της περιμέτρου του δρομέα και,
- ✚ Υδροστρόβιλοι **πλήρους έγχυσης** όπου το νερό διοχετεύεται στο σύνολο της περιμέτρου του δρομέα.

Ο κύριος διαχωρισμός των υδροστροβίλων πραγματοποιείται με κριτήριο το κατά πόσο αξιοποιείται αποκλειστικά η κινητική ενέργεια ύδατος ή ο συνδυασμός της ενέργειας κίνησης και πίεσης. Οι υδροστρόβιλοι οι οποίοι αξιοποιούν αποκλειστικά την κινητική ενέργεια του ύδατος χαρακτηρίζονται ως

**δράσης** (impulse turbines). Οι υδροστροβίλοι οι οποίοι αξιοποιούν συνδυασμό των ενεργειών κίνησης και πίεσης του ύδατος χαρακτηρίζονται ως **αντίδρασης** (reaction turbines)[1]. Παρακάτω περιγράφονται διεξοδικά οι υδροστροβίλοι δράσης και αντίδρασης.



**Σχήμα 5.1** Ταξινόμηση υδροστροβίλων βασισμένη στην κίνηση του ύδατος σε σχέση με τον δρομέα[1].

### 5.3 Είδη υδροστροβίλων

#### 5.3.1 Υδροστροβίλοι δράσης (impulse turbines)

Στην περίπτωση των υδροστροβίλων δράσης ένα ή περισσότερα ακροφύσια προκαλούν την πρόσκρουση του ύδατος στα πτερύγια του δρομέα του στροβίλου. Το νερό κινείται εσωτερικά και εξωτερικά των πτερυγίων προκαλώντας την περιστροφική κίνηση του άξονα. Το σύνολο του διαθέσιμου ύψους υδατόπτωσης μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στα ακροφύσια ενώ η κινητική ενέργεια με την οποία το νερό απομακρύνεται από το δρομέα θεωρείται ανεκμετάλλευτη. Συνεπώς κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός ο σχεδιασμός των πτερυγίων ώστε να περιορισθεί η ταχύτητα του νερού κατά την έξοδο[4].

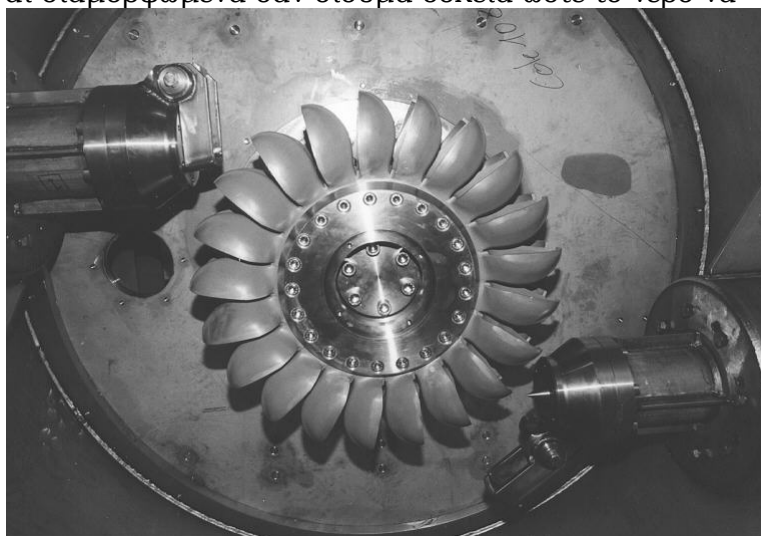
Παράλληλα, στο πλαίσιο της χρήσης των υδροστροβίλων δράσης δεν χρησιμοποιείται αγωγός φυγής, καθώς ο δρομέας λειτουργεί υπό την αναγκαία ατμοσφαιρική πίεση και το ύψος της μονάδας από την λεκάνη απορροής δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί[3]. Οι διαφορετικοί τύποι των υδροστροβίλων δράσης παρουσιάζονται παρακάτω.

##### 5.3.1.1 Υδροστροβίλος Pelton

Ο στροβίλος Pelton είναι μεταξύ των αποδοτικότερων τύπων υδροστροβίλων. Εφευρέθηκε από τον Lester Allan Pelton (1829-1908) στα 1890 και είναι ένας

στρόβιλος δράσης, πράγμα που σημαίνει ότι η λειτουργία του βασίζεται στον δεύτερο νόμο του Newton, για να εξάγει ενέργεια.

Το ύδωρ ρέει εφαπτομενικά κατά μήκος του δρομέα (Σχήμα 5.2). Τα ακροφύσια (Σχήμα 5.3) κατευθύνουν ισχυρά ρεύματα νερού αντίθετα σε μια σειρά σκαφιδιών (buckets) που είναι διαμορφωμένα σαν κουτάλια και τοποθετημένα περιμετρικά του τροχού. Καθώς το νερό ρέει μέσα στα σκαφίδια, η κατεύθυνση της ταχύτητας του ύδατος αλλάζει για να ακολουθήσει το περίγραμμα του σκαφιδίου. Όταν ο πίδακας νερού έρχεται σε επαφή με το σκαφίδιο, αυτό ασκεί πίεση στο τελευταίο και επιβραδύνεται ρέοντας από την άλλη πλευρά του σκαφιδίου σε χαμηλή ταχύτητα. Σ' αυτή την διαδικασία, η ορμή του ύδατος μεταφέρεται στο στρόβιλο μεταφέρεται στον στρόβιλο. Αυτή η «ώθηση» κάνει τον στρόβιλο να λειτουργεί. Για μέγιστη ισχύ και απόδοση, το σύστημα του στρόβιλου σχεδιάζεται έτσι ώστε η ταχύτητα του πίδακα ύδατος να είναι διπλάσια της ταχύτητας των σκαφιδίων. Ένα πολύ μικρό ποσοστό της αρχικής κινητικής ενέργειας του ύδατος παραμένει ακόμα στο νερό, εντούτοις αυτό επιτρέπει στο σκαφίδιο να εκκενωθεί στον ίδιο βαθμό που αυτό γεμίζει, επιτρέποντας κατά συνέπεια την αδιάκοπη ροή του νερού[23]. Συχνά τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα σαν δίδυμα δοχεία ώστε το νερό να



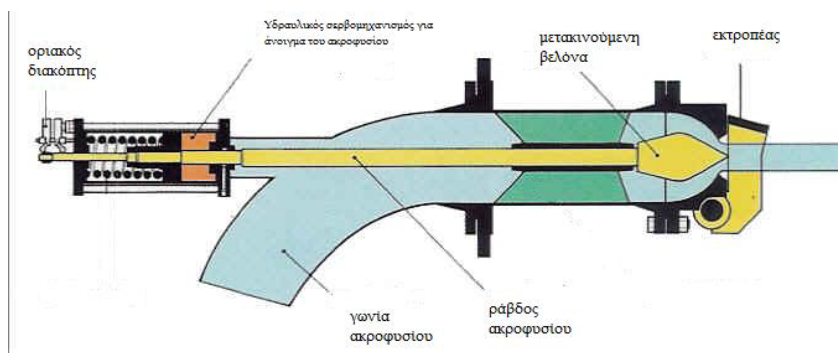
**Σχήμα 5.2** Δρομέας Pelton[8].

διαχωρίζεται στην αιχμηρή ακμή των δύο σκαφιδίων και να «γλύφει» την εσωτερική επιφάνεια τους, ακολουθώντας έτσι τοξοειδή διαδρομή και αποδίδοντας όλη την κινητική ενέργεια. Κάθε ακροφύσιο διοχετεύει περί τα 10 m<sup>3</sup>/sec και ο αριθμός των ακροφυσίων εξαρτάται από τις διαθέσιμες ποσότητες νερού. Η παρεχόμενη ροή ρυθμίζεται με βελονοειδής βαλβίδες (Σχήμα 5.4)[18]. Οι στρόβιλοι Pelton με ένα ή δύο ακροφύσια μπορούν να έχουν οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα. Οι στρόβιλοι με τρία ή περισσότερα ακροφύσια έχουν κάθετο άξονα. Ο μέγιστος αριθμός ακροφυσίων είναι έξι[6].

Οι στρόβιλοι Pelton προτιμούνται για υδροηλεκτρική ενέργεια, όταν η διαθέσιμη πηγή ύδατος έχει σχετικά μεγάλο ύψος υδατόπτωσης σε μικρές ποσότητες ύδατος. Χρησιμοποιούνται για μεγάλα ύψη από 60 μέτρα ως 1000 μέτρα[8] παρόλο που θεωρητικά δεν υπάρχει όριο[23]. Για ένα ύψος πτώσης νερού περίπου 1.000 μέτρα η ταχύτητα εξόδου νερού στο ακροφύσιο φτάνει τα 500 km/h και γι' αυτό η καταπόνηση των υλικών είναι τεράστια (σπηλαιώση του χάλυβα).



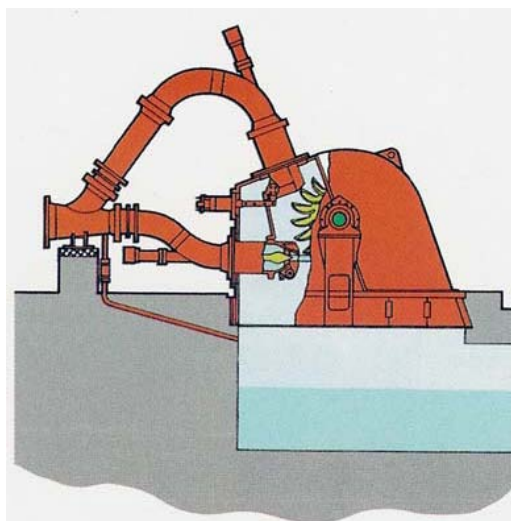
Σχήμα 5.3 Ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton[4].



Σχήμα 5.4 Βελονοειδής βαλβίδα και εκτροπέας[6].

Ο δρομέας ενός στροβίλου Pelton είναι συνήθως απευθείας συνδεδεμένος στον άξονα της γεννήτριας και μπορεί να βρίσκεται πάνω στην κατεύθυνση του ρεύματος.

Τέτοιου τύπου σρόβιλοι λειτουργούν με μεγάλο αριθμό στροφών περίπου 3000 ανά λεπτό και έχουν βαθμό απόδοσης 90%.



## Σχήμα 5.5 Άποψη υδροστροβίλου Pelton δύο ακροφυσίων

### 5.3.1.2 Υδροστρόβιλος Turgo

Ο στρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσης σχεδιασμένος για εφαρμογές μεσαίων υψών υδατόπτωσης. Οι λειτουργούντες υδροστρόβιλοι Turgo επιτυγχάνουν αποδόσεις περίπου 87%. Σε εργαστηριακές και εργασιματικές δοκιμές παρουσιάζουν αποδόσεις μεγαλύτερες του 90%.

Αναπτυγμένος το 1919 από τον Gilkes ως τροποποίηση του στροβίλου Pelton, ο Turgo έχει ορισμένα πλεονεκτήματα από τους στροβίλους Francis και Pelton σε ορισμένες εφαρμογές.

Κατ' αρχάς, ο δρομέας είναι λιγότερο ακριβός στο να κατασκευαστεί από έναν δρομέα Pelton. Δεύτερον, δεν χρειάζεται ένα αεροστεγές προστατευτικό κάλυμμα όπως ο Francis. Τρίτον, έχει υψηλότερη ειδική ταχύτητα και μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερη ροή από έναν στρόβιλο Pelton ίδιας διαμέτρου, κάτι που οδηγεί σε μειωμένο κόστος γεννητριών και εγκαταστάσεων[23]. Από την άλλη πλευρά, τα σκαφίδια ενός δρομέα Turgo δεν είναι τόσο σιβαρά όπως τα σκαφίδια του Pelton[23]. Οι Turgo λειτουργούν σε μια κλίμακα υψών υδατόπτωσης όπου οι Francis και οι Pelton επικαλύπτονται. Ενώ πολλές μεγάλες εγκαταστάσεις με στροβίλους Turgo υπάρχουν, είναι επίσης δημοφιλείς για μικρά υδροηλεκτρικά έργα όπου το χαμηλό κόστος είναι σημαντικό.

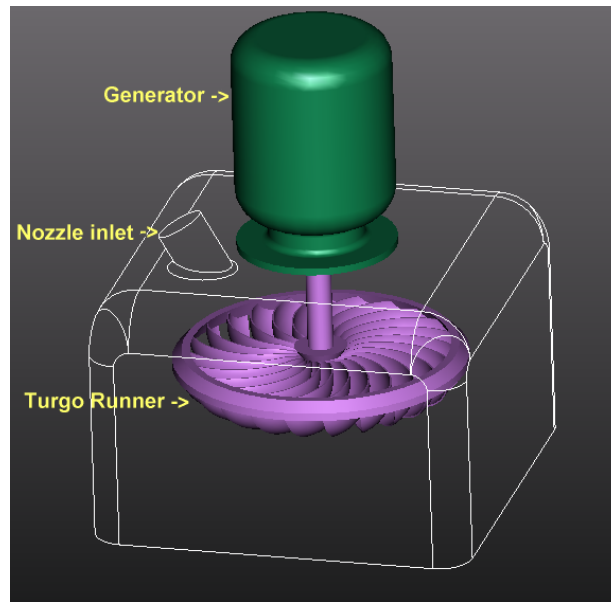
Ως στρόβιλος τύπου δράσης το νερό δεν αλλάζει πίεση καθώς μετακινείται μέσω των λεπίδων του στροβίλου. Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική με ένα ακροφύσιο. Ο εισερχόμενος πίδακας ύδατος υψηλής ταχύτητας προσκρούει στην μια πλευρά του δρομέα διαγώνια συνήθως με 20° και εξέρχεται από την άλλη. Η προκύπτουσα ώθηση περιστρέφει το δρομέα του στροβίλου, που μεταδίδει την ενέργεια στον άξονα του. Το νερό εξέρχεται με πολύ λίγη ενέργεια.

Ένας δρομέας Turgo μοιάζει με έναν δρομέα Pelton, χωρισμένο στην μέση. Για την ίδια ισχύ, ο δρομέας Turgo έχει την μισή διάμετρο από τον Pelton, κι έτσι διπλάσια ειδική ταχύτητα. Ο Turgo μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερη ροή ύδατος από ότι ο Pelton επειδή το εξερχόμενο νερό δεν συγκρούεται με τα παράπλευρα σκαφίδια.

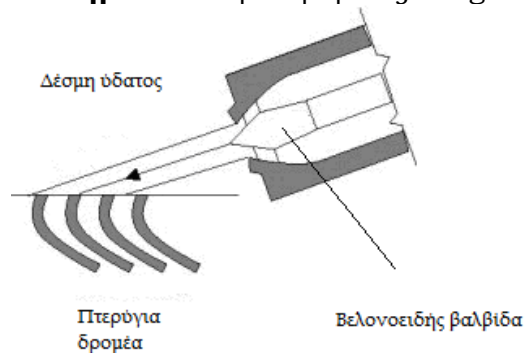
Η ειδική ταχύτητα του δρομέα Turgo είναι μεταξύ του Francis και του Pelton. Μονά ή διπλά ακροφύσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυξάνοντας τον αριθμό των πτερυγίων αυξάνεται η ειδική ταχύτητα του δρομέα[23].

Οι υδροστρόβιλοι αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται ως εφαιπομενικής ροής και συναντούν εφαρμογή στην περίπτωση ύψους υδατόπτωσης μεταξύ 30 και 300 μέτρα[8].





**Σχήμα 5.6** Υδροστρόβιλος Turgo.



**Σχήμα 5.7** Ακροφύσιο υδροστροβίλου Turgo[6].

### 5.3.1.3 Υδροστρόβιλος Cross-flow

Ένας στρόβιλος Cross-flow ή στρόβιλος Banki- Michell ή στρόβιλος Ossberger είναι ένας υδροστρόβιλος που δημιουργήθηκε από τον Αυστραλό Anthony Michell, τον Ούγγρο Donat Banki και τον γερμανό Fritz Ossberger. Αντίθετα από τους περισσότερους υδροστροβίλους οι οποίοι έχουν αξονικές ή ακτινωτές ροές, σε έναν στρόβιλο Cross-flow το νερό περνά εγκάρσια μέσω του δρομέα ή δια μέσου των λεπίδων του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο δρομέας αποτελείται από δυο ή περισσότερους παράλληλους δίσκους, οι οποίοι συνδέονται κοντά στο άκρο τους με πτερώγια καμπύλης κατασκευής. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διάταξης, το νερό εισέρχεται στον υδροστρόβιλο μέσω ενός ή περισσότερων οδηγικών πτερυγίων, τοποθετημένων σε μεταβατικό τμήμα στο επάνω μέρος του δρομέα. Ακολουθώντας, πραγματοποιείται η πρόσκρουση του ύδατος με το πρώτο στάδιο του δρομέα, το οποίο περιστρέφεται προκαλώντας μικρό βαθμό αντίδρασης, και στη συνέχεια το νερό

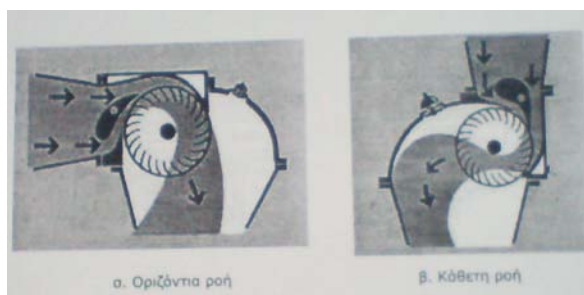
επιχειρεί να διασχίσει το κενό τμήμα του δρομέα, με αποτέλεσμα να συναντά το δεύτερο στάδιο του, όπου επιτυγχάνεται συμβιβαστική ροή. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οδηγεί στην εμφάνιση σημαντικών απωλειών πρόσκρουσης. Η παραπάνω διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 5.9.

Η μέγιστη απόδοση ενός στροβίλου Cross-flow είναι κάπως μικρότερη από έναν στρόβιλο Kaplan, Francis ή Pelton. Εντούτοις, ο στρόβιλος Cross-flow έχει επίπεδη καμπύλη απόδοσης υπό ποικίλο φορτίο.

Δεδομένου ότι η τιμή ενός στροβίλου Cross-flow είναι χαμηλή, και διαθέτει καλές ρυθμίσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μίνι και μικρο υδροηλεκτρικούς σταθμούς λιγότερο των 2.000 kW και με ύψη υδατόπτωσης μικρότερα των 200 μέτρων.

Η απλή κατασκευή τους καθιστά ευκολότερη την συντήρησή τους σε σχέση με άλλους τύπους στροβίλων· μόνο δυο ρουλεμάν πρέπει να συντηρούνται και υπάρχουν μόνο τρία περιστρεφόμενα στοιχεία.

Τέλος, κατατάσσονται στους υδροστροβίλους ακτινωτής ροής μερικής έγχυσης και είναι δυνατόν να λειτουργούν με παροχές ύδατος από 0,02 ως 10 m<sup>3</sup>/sec.



**Σχήμα 5.8** λειτουργία υδροστροβίλου Cross-flow[1].



**Σχήμα 5.9** Δρομέας στροβίλου Cross-flow[23].

### 5.3.2 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης

Η λειτουργία των στροβίλων αντίδρασης (reaction turbines) περιγράφεται από τον τρίτο νόμο κίνησης του Newton (η δράση και η αντίδραση είναι ίσες και αντίθετες).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η πίεση του ύδατος προκαλεί την εμφάνιση δύναμης στην πρόσοψη των περυγίων του δρομέα, η οποία εξασθενεί καθώς το νερό ρέει διαμέσου του στροβίλου[6]. Η επιτάχυνση του ύδατος αφήνοντας τα ακροφύσια που στην περίπτωση των στροβίλων αντίδρασης είναι συνδεδεμένα με τον στροφέα, παράγει μια δύναμη αντίδρασης στους αγωγούς προκαλώντας την κίνηση του ρότορα στην αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη του νερού[24].

Οι υδροστρόβιλοι τύπου αντίδρασης χαρακτηρίζονται από ακτινωτή, αξονική ή μικτή ροή ύδατος και δεδομένου του γεγονότος ότι τοποθετούνται βυθισμένοι στη ροή του νερού, απαιτούν περίβλημα ισχυρής κατασκευής, ικανό να ανταπεξέλθει στην υψηλή πίεση λειτουργίας.

Οι περισσότεροι υδροστρόβιλοι σε χρήση είναι στρόβιλοι αντίδρασης και χρησιμοποιούνται σε χαμηλά (<30m) και μεσαία (30-300m) ύψη υδατόπτωσης, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικούς στο πλαίσιο μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η σύγκριση των στροβίλων δράσης και των στροβίλων αντίδρασης.

Οι διαφορετικοί τύποι υδροστροβίλων αντίδρασης παρουσιάζεται διεξοδικά παρακάτω.

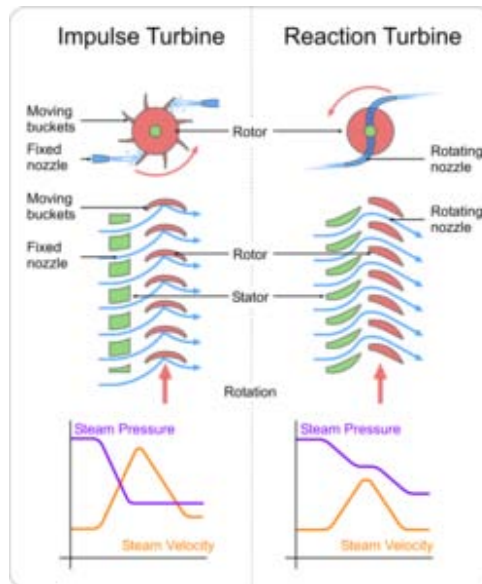
#### 5.3.2.1 Υδροστρόβιλος Francis

Ο στρόβιλος Francis είναι ένας τύπος υδροστροβίλου που δημιουργήθηκε από τον James B. Francis. Είναι ένας στρόβιλος αντίδρασης εσωτερικής ροής.

Οι Francis είναι στρόβιλοι με σταθερές λεπίδες στον δρομέα και διευθυντικά οδηγητικά περύγια, που χρησιμοποιούνται για μεσαία ύψη υδατόπτωσης. Σ' αυτόν τον στρόβιλο η ροή εισόδου είναι πάντα ακτινωτή αλλά η ροή έξοδου αξονική.

Ο δρομέας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11 και συνήθως περιλαμβάνει 8 ως 15 περύγια.

Κατά την λειτουργία των υδροστροβίλων Francis, το νερό εισέρχεται στο στρόβιλο από το σπειροειδές κέλυφος (spiral casing) το οποίο είναι σχεδιασμένο να διατηρεί την εφαιπτομενική ταχύτητα του σταθερή κατά μήκος των διαδοχικών τμημάτων και να την διανέμει περιφερειακά στον δρομέα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 ένας τέτοιος στρόβιλος έχει κινητά οδηγητικά περύγια (wicket gates), η λειτουργία των οποίων είναι να ελέγχουν την παροχή που εισέρχεται στο δρομέα και να προσαρμόζουν την εισερχόμενη γωνία ροής στις διαγώνιες λεπίδες του δρομέα.

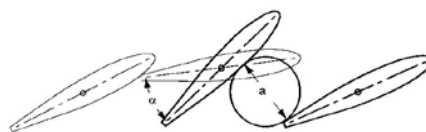


**Σχήμα 5.10** Σύγκριση στροβίλων δράσης και στροβίλων αντίδρασης[23].

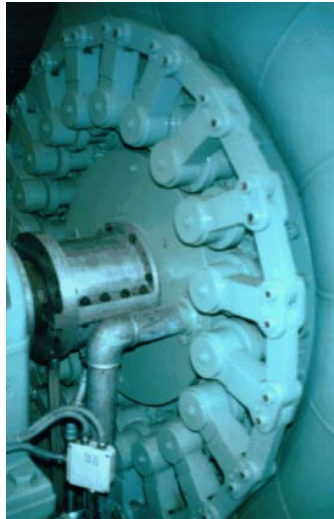
Περιστρέφονται γύρω από τους άξονες τους μέσω συνδεδειγμένων μοχλών που προσδένονται με έναν μεγάλο δακτύλιο ο οποίος συγχρονίζει την κίνηση όλων των περυγίων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διακοπή της ροής στον στρόβιλο σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης, αν και η χρήση τους δεν αποκλείει την εγκατάσταση βαλβίδας πεταλούδας (butterfly valve) στην είσοδο του στροβίλου. Ο δρομέας μετασχηματίζει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική και το νερό επιστρέφει ακτινικά στον αγωγό φυγής (draft tube)[6].



**Σχήμα 5.11** Δρομέας στροβίλου Francis.



(a)



(β)

**Σχήμα 5.12** (α) Αρχή λειτουργίας οδηγητικών πτερυγίων, (β) Οδηγητικά πτερύγια υδροστροβίλου Francis[14].

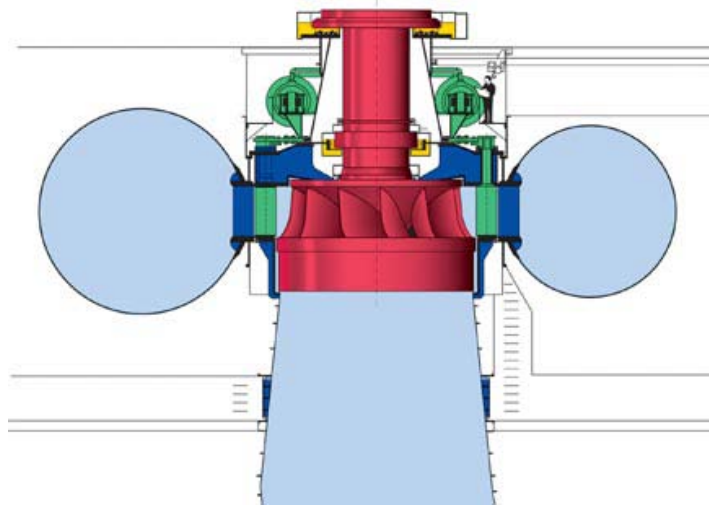
Προκειμένου να περιορισθεί η παραμένουσα κινητική ενέργεια στην ποσότητα ύδατος η οποία απομακρύνεται από το δρομέα, καθίσταται αναγκαία η χρήση αγωγού φυγής (draft tube) μεταξύ του στροβίλου και της λεκάνης απορροής. Ο προσεκτικός σχεδιασμός του συγκεκριμένου αγωγού επιτρέπει εντός ορισμένων ορίων, την τοποθέτηση του στροβίλου υψηλότερα από το επίπεδο της λεκάνης απορροής χωρίς την απώλεια ύψους υδατόπτωσης. Δεδομένου του συσχετισμού μεταξύ της κινητικής ενέργειας ύδατος και του τετραγώνου της ταχύτητας ροής ( $u^2/2g$ ), βασικός στόχος του αγωγού φυγής αποτελεί ο περιορισμός της ταχύτητας εξόδου. Κύριο χαρακτηριστικό του αποδοτικού αγωγού φυγής αποτελεί το κωνικό τμήμα του, του οποίου η γωνία ωστόσο είναι σχετικά μικρή, προκειμένου να αποφεύγεται πιθανός διαχωρισμός του ύδατος. Συγκεκριμένα, κρίνεται ως βέλτιστη γωνία του αγωγού φυγής η τιμή των  $7^\circ$ , η οποία είναι δυνατόν να αυξηθεί ως τις  $15^\circ$  προκειμένου να περιορισθεί το μήκος του και συνεπώς το κόστος του[7]. Όσο το ύψος είναι μικρότερο, τόσο πιο σημαντικός είναι ο αγωγός φυγής.

Οι μικροί υδροστρόβιλοι είναι συνήθως κατασκευασμένοι από ανοξείδωτα κελύφη. Μερικοί κατασκευαστές επίσης χρησιμοποιούν κελύφη αλουμινίου-χαλκού ή ενωμένες λεπίδες οι οποίες είναι γενικά συνδεδεμένες απευθείας στον άξονα της γεννήτριας.

Οι μεγάλοι στρόβιλοι Francis σχεδιάζονται ξεχωριστά για κάθε τοποθεσία στην οποία θα λειτουργήσουν στην μέγιστη πιθανή απόδοση, συνήθως ως 90%. Η χρήση τους προτείνεται σε περίπτωση υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων μεσαίου ύψους υδατόπτωσης (25-350m) και παροχής ύδατος ως  $30 \text{ m}^3/\text{sec}$ . Παρουσιάζουν ταχύτητες περιστροφής 250 ως 1.000 ΣΑΛ.

Οι στρόβιλοι Francis μπορούν να σχεδιασθούν για ένα ευρύ φάσμα υψών και ροών και σε συνδυασμό με την υψηλή τους απόδοση καθίστανται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι στρόβιλοι στον κόσμο.

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται το σύνολο των διατάξεων των υδροστροβίλων Francis για την περίπτωση κάθετης τοποθέτησης.



**Σχήμα 5.13** Υδροστρόβιλος Francis κάθετης τοποθέτησης[23].

### 5.3.2.2 Υδροστρόβιλος Kaplan

Ο στρόβιλος Kaplan είναι ένας στρόβιλος προπελωτού τύπου. Δημιουργήθηκε το 1913 από τον Αυστριακό καθηγητή Viktor Kaplan. Ο στρόβιλος Kaplan είναι εξέλιξη του στροβίλου Francis. Η εφεύρεση του επέτρεψε την αποδοτική παραγωγή ενέργειας σε εφαρμογές χαμηλού ύψους υδατόπτωσης όπου αδυνατούσαν οι στρόβιλοι Francis[23].

Οι στρόβιλοι Kaplan είναι στρόβιλοι αξονικής ροής. Ένας τέτοιος στρόβιλος έχει ρυθμιζόμενες λεπίδες στον δρομέα του και μπορεί να έχει ή να μην έχει ρυθμιζόμενα οδηγητικά περύγια (wicket gates). Αν και οι λεπίδες και τα οδηγητικά περύγια είναι ρυθμιζόμενα περιγράφεται ως στρόβιλος «διπλής ρύθμισης (double-regulated) ενώ αν τα οδηγητικά περύγια είναι σταθερά είναι στρόβιλος «απλής ρύθμισης (single-regulated)». Οι στρόβιλοι Kaplan με σταθερές λεπίδες στον δρομέα ονομάζονται προπελωτοί στρόβιλοι. Χρησιμοποιούνται όταν και η ροή και το ύψος υδατόπτωσης παραμένουν πρακτικά σταθερά, το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό που τους καθιστά σπάνιους σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα.

Η διπλή ρύθμιση επιτρέπει, οποιαδήποτε στιγμή, την προσαρμογή του δρομέα και των οδηγητικών περυσίων σε οποιοδήποτε ύψος ή διαφορετική παροχή. Είναι ο πιο ευέλικτος στρόβιλος Kaplan ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ 15% ως 100% της μέγιστης σχεδιαζόμενης παροχής.

Ο Kaplan μονής ρύθμισης επιτρέπει καλή προσαρμογή στην ποικίλα διαθέσιμη ροή αλλά είναι λιγότερο ευέλικτος στην περίπτωση σημαντικών αλλαγών στο ύψος υδατόπτωσης. Μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ 30% ως 100% της μέγιστης σχεδιαζόμενης παροχής.

Ο στρόβιλος Kaplan διπλής ρύθμισης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14 είναι μια μηχανή κάθετου άξονα με ένα σπειροειδές κέλυφος και ένα σύνολο ακτινωτών οδηγητικών περυσίων. Η ροή εισέρχεται εσωτερικά με ακτινωτό τρόπο και κάνει δεξιόστροφη γωνία πριν εισέλθει στο δρομέα σε μια αξονική κατεύθυνση[6]. Η κατασκευή των περυσίων του δρομέα αποσκοπεί στην διατήρηση της αξονικής ροής ύδατος και ο αριθμός τους κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10[1]. Το σύστημα ελέγχου είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να ρυθμίζεται η γωνία των λεπίδων του δρομέα και σε συνδυασμό με τα οδηγητικά περύγια να παρέχεται η βέλτιστη απόδοση πέρα από ένα ευρύ φάσμα ροών και υψών υδατόπτωσης. Οι λεπίδες μπορούν να περιστρέφονται με τον στρόβιλο σε

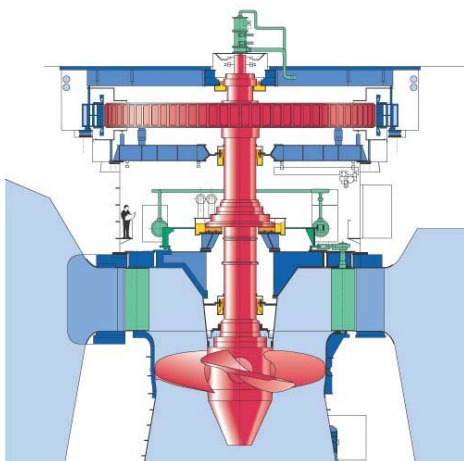


λειτουργία, μέσω κάθετου μοχλού που γλιστρά στον κοίλο άξονα του στροβίλου[6].

Οι υδροστροβίλοι Karlan παρουσιάζουν απόδοση της τάξης του 80-90% και χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις παροχής ύδατος μεταξύ 5-100 m<sup>3</sup>/sec και χαμηλού ύψους υδατόπτωσης από 2 ως 40 μέτρα.



**Σχήμα 5.14** Δρομέας στροβίλου Karlan[6].



**Σχήμα 5.15** Υδροστροβίλος Karlan κάθετης τοποθέτησης[23].

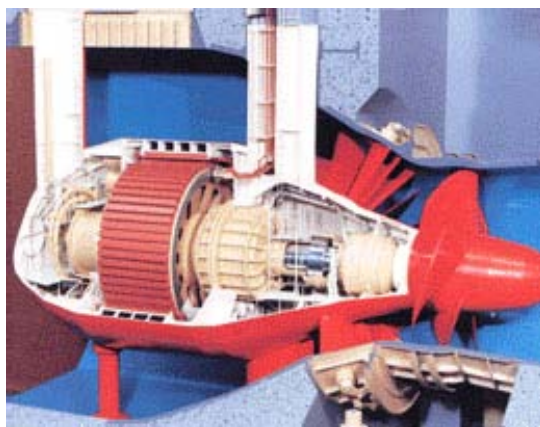
### **5.3.2.3 Υδροστροβίλοι τύπου βολβού (bulb turbines)**

Ο δρομέας των υδροστροβίλων τύπου βολβού δεν παρουσιάζει διαφορές από τον αντίστοιχο των υδροστροβίλων Karlan. Η ιδιαιτερότητα των συγκεκριμένων διατάξεων έγκειται στο γεγονός ότι ο στροβίλος και η γεννήτρια περιβάλλονται από κοινό, στεγανό κέλυφος, το οποίο βρίσκεται βυθισμένο στο νερό. Οι συγκεκριμένες διατάξεις, σε συνδυασμό με τον πολλαπλασιαστή στροφών, στην περίπτωση μη άμεσης σύνδεσης στροβίλου και γεννήτριας, ψύχονται με τη βοήθεια αέρα υπό πίεση και συνδέονται με την υπόλοιπη εγκατάσταση μέσω ηλεκτρικών καλωδίων. Το Σχήμα 5.16 παρουσιάζει τη διάταξη μονάδας του συγκεκριμένου τύπου.

Η χρήση των υδροστροβίλων τύπου βολβού προτείνεται στην περίπτωση χαμηλών υψών υδατόπτωσης και η σχετική απλότητα της εγκατάστασης τους καθιστά ελκυστική τη χρήση τους στην περίπτωση μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Η επιλογή τους ωστόσο συνοδεύεται από την ανάγκη πραγματοποίησης εκτεταμένων έργων πολιτικού μηχανικού για την τοποθέτηση της αντίστοιχης εγκατάστασης καθώς επίσης και αυξημένες απαιτήσεις για αποκατάσταση ειδικών βλαβών.

#### **5.3.2.4 Υδροστρόβιλοι STRAFLO**

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Straflo (STRAight FLOW) είναι προπελωτοί υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, με την γεννήτρια εξωτερικά του καναλιού ύδατος και με δρομέα με τα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου τύπου Kaplan. Η διαφοροποίηση τους ωστόσο έγκειται στο γεγονός ότι περιφερειακά των πτερυγίων του δρομέα τοποθετείται ο ρότορας της γεννήτριας. Στο πλαίσιο των συγκεκριμένων διατάξεων η χρησιμοποιούμενη γεννήτρια χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη μηχανική αδράνεια από την αντίστοιχη των μονάδων τύπου βολβού και απαιτεί προστασία του δρομέα και του στάτη (stator) της με τη βοήθεια ειδικού αδιάβροχου μέσου.



**Σχήμα 5.16** Υδροστρόβιλος τύπου βολβού[24].

#### **5.3.2.5 Υδροστρόβιλοι Deriaz**

Ο στρόβιλος Deriaz είναι ένας τύπος υδροστροβίλου παρόμοιος με τον Kaplan με τη διαφορά ότι διαθέτει κεκλιμένες λεπίδες, πράγμα που τον καθιστά πιο ιδανικό για μεγαλύτερα ύψη. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για μια τάξη υψών υδατόπτωσης μεταξύ 20 μέτρων και 100 μέτρων. Ο στρόβιλος Deriaz κατατάσσεται στους στροβίλους αντίδρασης, διπλής ρύθμισης και μικτής ροής. Το όνομα του οφείλεται στον εφευρέτη του Paul Deriaz και ήταν ο πρώτος τύπος διαγωνίου στροβίλου που δημιουργήθηκε. Εξαιτίας του ότι οι λεπίδες του δρομέα του είναι ρυθμιζόμενες, η διάταξη Deriaz προσφέρει διάφορα άλλα πλεονεκτήματα:

- ✚ Ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα υψών υδατόπτωσης και φορτίων.
- ✚ Ομοιόμορφη κατανομή πίεσης και φορτίου εγκάρσια της λεπίδας.
- ✚ Ελευθερία από την ανάπτυξη σπηλαιώσης.

Οι υδροστροβίλοι Deriaz αρχικά χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο εφαρμογών άντλησης και αποθήκευσης ύδατος, σύντομα ωστόσο επεκτάθηκε η χρήση τους στην περίπτωση υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική απόδοση για ευρύ φάσμα εγκατεστημένης ισχύος, ανάλογη με την περίπτωση των συνηθισμένων διατάξεων τύπου Kaplan.

## 5.4 Επιλογή υδροστροβίλου

Στο πλαίσιο της μελέτης ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου η οποία συνεπάγεται τη γεωμετρία, τις διαστάσεις και τα έργα πολιτικού μηχανικού που απαιτούνται. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι συνδεδεμένη άμεσα με την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας και το συνολικό κόστος του έργου. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του επιλεγόμενου στροβίλου καθορίζουν τον τύπο και τις διαστάσεις των υπόλοιπων διατάξεων του έργου δηλαδή τις διατάξεις εισόδου και εξόδου του ύδατος, του πολλαπλασιαστή στροφών και της γεννήτριας, με αποτέλεσμα την προδιαγραφή αυτών και επομένως του τελικού κόστους της εγκατάστασης.

Η επιλογή του τύπου, της γεωμετρίας και των διαστάσεων του υδροστροβίλου καθορίζεται πλήρως από τα παρακάτω κριτήρια:

- ✚ Διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης.
- ✚ Εύρος παροχής ύδατος
- ✚ Ταχύτητα περιστροφής
- ✚ Διακυμάνσεις του βαθμού απόδοσης.
- ✚ Προβλήματα σπηλαιώσης
- ✚ Περιβαλλοντικές απαιτήσεις (αισθητικές και ηχητικές)
- ✚ Κόστος της εγκατάστασης

Ο ρόλος που διαδραματίζεται από τις συγκεκριμένες παραμέτρους εξετάζεται στη συνέχεια.

### 5.4.1 Ύψος υδατόπτωσης

Το πρώτο κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην επιλογή κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου αποτελεί στατικό ύψος υδατόπτωσης ( $H_{sta}$ ). Το στατικό ύψος υδατόπτωσης προκύπτει από την διαφορά του ολικού ύψους υδατόπτωσης και του συνόλου των απωλειών, όπως αυτό ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Ο πίνακας 5.1 διευκρινίζει το εύρος των χρησιμοποιούμενων υψών υδατόπτωσης για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων, όπου παρατηρούμε τιμές ύψους υδατόπτωσης για τις οποίες προτείνονται περισσότεροι του ενός τύποι υδροστροβίλων.

Εκτός του στατικού ύψους, η τιμή του οποίου λαμβάνεται υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου, χρησιμοποιείται και η τιμή του καθαρού ύψους υδατόπτωσης ( $H_{net}$ ) προκειμένου να εξετασθεί η εγκυρότητα της απόδοσης του χρησιμοποιούμενου υδροστροβίλου, όπως προκύπτει από τα

στοιχεία του κατασκευαστή. Το καθαρό ύψος υδατόπτωσης έχει επίσης ορισθεί στο Κεφάλαιο 3.

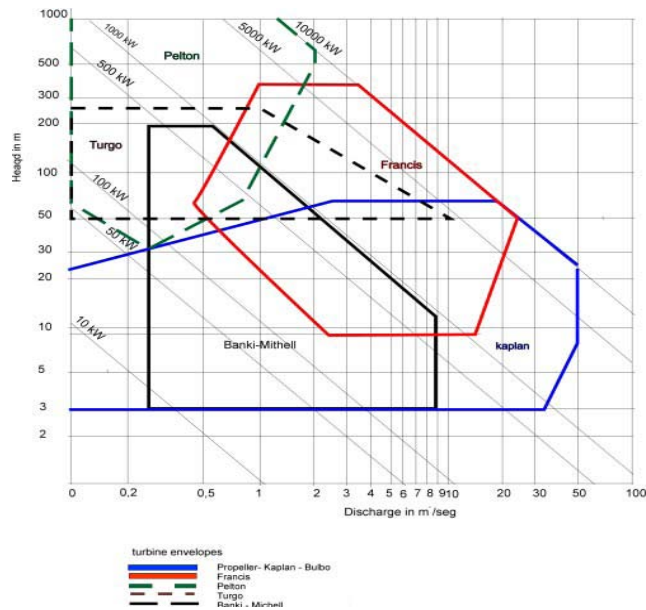
<b>Τύπος Υδροστροβίλου</b>	<b>Εύρος ύψος υδατόπτωσης(m)</b>
Kaplan	$2 < H < 40$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Cross-flow	$5 < H < 200$
Turgo	$50 < H < 250$

**Πίνακας 5.1** Εύρος χρησιμοποιούμενου ύψους υδατόπτωσης για διάφορους τύπους υδροστροβίλων[14].

#### 5.4.2 Παροχή ύδατος

Η παροχή ύδατος της εξεταζόμενης υδροδυναμικής τοποθεσίας μεταβάλλεται με τον χρόνο και συνήθως αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη διάρκειας παροχής όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Ο χρησιμοποιούμενος υδροστροβίλος, ωστόσο αξιοποιεί συγκεκριμένη τιμή παροχής, η οποία αποτελεί την παροχή λειτουργίας (rated flow) και ορίζεται από τον κατασκευαστή. Η μεταβολή της παροχής τροφοδοσίας της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης οδηγεί στην μεταβολή της απόδοσης του υδροστροβίλου.

Κατά την διαδικασία επιλογής του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου, παρέχεται από τους κατασκευαστές το διάγραμμα ύψους υδατόπτωσης συναρτήσεως της παροχής ύδατος(Σχήμα 5.17), στο οποίο οι διαφορετικοί τύποι υδροστροβίλων αντιπροσωπεύονται από γεωμετρικά σχήματα, με αποτέλεσμα να καταδεικνύεται το εύρος λειτουργίας τους. Το καθαρό ύψος υδατόπτωσης και η εκτιμώμενη παροχή λειτουργίας ορίζουν ένα σημείο στο συγκεκριμένο διάγραμμα. Τα σχήματα τα οποία περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο σημείο καθορίζουν τους κατάλληλους τύπους υδροστροβίλων. Διακρίνεται παράλληλα η ύπαρξη κοινών σημείων διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων και συνεπώς απαιτείται περαιτέρω μελέτη της ισχύος, της παραγόμενης ενέργειας και του κόστους εγκατάστασης πριν την λήψη της οριστικής απόφασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα αυτά ποικίλουν μεταξύ των κατασκευαστών και θα πρέπει να θεωρούνται ως πρωταρχικός οδηγός επιλογής κατάλληλου υδροστροβίλου[1],[7].



**Σχήμα 5.17** Διάγραμμα εύρους ύψους υδατόπτωσης συναρτήσει παροχής-ύδατος λειτουργίας για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[14].

### 5.4.3 Ειδική ταχύτητα υδροστροβίλων (specific speed)

Στο πλαίσιο της διαδικασίας επιλογής κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για ένα εξεταζόμενο υδροηλεκτρικό έργο απαιτείται η ύπαρξη κοινής βάσης αξιολόγησης των συγκεκριμένων τύπων, ανεξάρτητα από τις επιμέρους διαστάσεις τους[1],[7]. Η ειδική ταχύτητα (specific speed) αποτελεί ένα αξιόπιστο κριτήριο για την επιλογή υδροστροβίλου, αναμφίβολα με περισσότερη ακρίβεια σε σχέση με τα διαγράμματα εύρους ύψους υδατόπτωσης συναρτήσει παροχής ύδατος που προαναφέρθηκαν[14].

Η έννοια της ειδικής ταχύτητας έχει εισαχθεί για να κάνει δυνατή τη σύγκριση μεταξύ μηχανών διαφόρων μεγεθών όσον αφορά την ταχύτητα περιστροφής. Ως ειδική ταχύτητα υδροστροβίλου ορίζεται η περιστροφική ταχύτητα (ΣΑΛ) υδροστροβίλου κατάλληλου μεγέθους, ώστε να παράγει ισχύ 1HP αξιοποιώντας ύψος υδατόπτωσης 1 ft, και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$n_s = n \frac{\sqrt{P(HP)}}{H^{\frac{5}{4}}(ft)} \quad (5.1)$$

όπου  $n_s$  η ειδική ταχύτητα του υδροστροβίλου σε ΣΑΛ,  $n$  η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου (ΣΑΛ),  $P$  η μηχανική ισχύς του υδροστροβίλου (HP),  $H$  το καθαρό ύψος υδατόπτωσης (ft).

Στην περίπτωση χρήσης της μηχανικής ισχύος σε kW και του ύψους υδατόπτωσης σε m, η σχέση 5.1 παίρνει την ακόλουθη μορφή[4]:

$$n_s = \frac{1}{3,815} n \frac{\sqrt{P(kW)}}{H^{\frac{5}{4}}(m)} \quad (5.2)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου  $n$  προκύπτει από την σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας  $n_g$ , η οποία δίνεται από την σχέση:

$$n_g = \frac{120 f}{p} \quad (5.3)$$

όπου  $f$  η συχνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Hz) και  $\rho$  ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Στην περίπτωση του Ελληνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας η συχνότητα  $f$  λαμβάνει την τιμή των 50 Hz, ακολούθως, η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου προκύπτει από το πηλίκο της ταχύτητας της γεννήτριας προς τον αριθμό του πολλαπλασιαστή στροφών, στην περίπτωση που ο τελευταίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του υδροστροβίλου και της γεννήτριας. Συνεπώς η ταχύτητα του υδροστροβίλου  $n$ , υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$n = n_g / a \quad (5.4)$$

όπου,  $n_g$  η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (ΣΑΛ) και  $a$  ο αριθμός του πολλαπλασιαστή στροφών.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση κατά την οποία ο πολλαπλασιαστής στροφών τριπλασιάζει την ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου, λαμβάνεται  $a=3$ , ενώ η απουσία πολλαπλασιαστή στροφών οδηγεί σε τιμή του  $a=1$ .

Η ειδικά ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του ύψους υδατόπτωσης το οποίο αξιοποιείται από το χρησιμοποιούμενο υδροστρόβιλο. Συνεπώς, στην περίπτωση εγκαταστάσεων μικρού ύψους πτώσης προτείνεται η χρήση υδροστροβίλων μεγάλης ειδικής ταχύτητας και τα μεγαλύτερα ύψη συνδυάζονται με στροβίλου μικρής ειδικής ταχύτητας. Σε γενικές γραμμές, οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton χαρακτηρίζονται από μικρή ειδική ταχύτητα, οι αντίστοιχοι τύπου Francis από μεσαίες τιμές ειδικής ταχύτητας και οι Kaplan από μεγαλύτερες τιμές. Παράλληλα, οι υδροστρόβιλοι τύπου Turgo δεν διαφέρουν ιδιαίτερα από τους αντίστοιχους Pelton τη στιγμή που οι Cross-flow παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών ειδικής ταχύτητας. Το εύρος των τιμών ειδικής ταχύτητας για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες όπου παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στην ταξινόμηση των διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων με βάση την ειδική ταχύτητα στην βιβλιογραφία. Αποτέλεσμα είναι η επιλογή υδροστροβίλου να καθίσταται δύσκολη και να απαιτεί περαιτέρω μελέτη.

<b>Τύπος Υδροστροβίλου</b>	<b>Εύρος ειδικής ταχύτητας(ΣΑΛ)</b>
Kaplan	415-697
Francis	50-415
Pelton	8-22
Cross-flow	1-100
Turgo	17-43

**Πίνακας 5.2** Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[4].



Τύπος Υδροστροβίλου	Εύρος ειδικής ταχύτητας(ΣΑΛ)
Kaplan	290-860
Francis	68-300
Pelton	9-82
Cross-flow	20-80
Turgo	20-70
Deriaz	142-470
Bulb	645-1150

**Πίνακας 5.3** Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[2].

Τύπος Υδροστροβίλου	Εύρος ειδικής ταχύτητας(ΣΑΛ)
Kaplan	300-1.200
Francis	55-5.000
Pelton	1-31
Cross-flow	1-300

**Πίνακας 5.4** Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[5],[15].

Τύπος Υδροστροβίλου	Εύρος ειδικής ταχύτητας(ΣΑΛ)
Kaplan	400-1.100
Francis	200-500

**Πίνακας 5.5** Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[12],[16].

Τύπος Υδροστροβίλου	Εύρος ειδικής ταχύτητας(ΣΑΛ)
Kaplan	100-200
Francis	20-120
Pelton	1-20

**Πίνακας 5.6** Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων[17],[19].

#### 5.4.4 Απόδοση υδροστροβίλων

Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου στροβίλου αποτελεί η μελέτη της απόδοσης του. Η συνολική απόδοση του υδροστροβίλου εξαρτάται από μια σειρά επιμέρους αποδόσεων οι οποίες είναι οι εξής:

- **Υδραυλική απόδοση ή απόδοση πίεσης (pressure or hydraulic efficiency)**, ορίζεται ως ο λόγος του ύψους υδατόπτωσης που αξιοποιείται από τον υδροστροβίλο προς το καθαρό ύψος. Επίσης μπορεί να οριστεί και ως ο λόγος του καθαρού ύψους προς το ολικό ύψος υδατόπτωσης και σχετίζεται με τις απώλειες πίεσης που οφείλονται

στην εμφάνιση τριβής και τυρβώδους ροής. Συνεπώς, η υδραυλική απόδοση  $n_h$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_h = \frac{h_u}{h_{net}} = \frac{h_{net}}{h_{gross}} \quad (5.5)$$

όπου,  $h_u$  το ύψος υδατόπτωσης που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο,  $h_{net}$  το καθαρό ύψος υδατόπτωσης και  $h_{gross}$  το ολικό ύψος υδατόπτωσης.

✚ **Ογκομετρική απόδοση (volumetric efficiency)**  $n_v$  ορίζεται ως ο λόγος της παροχής που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο προς την αντίστοιχη η οποία ρέει μέσω του τελευταίου και δίνεται από τη σχέση:

$$n_v = \frac{Q - Q_L}{Q} \quad (5.6)$$

Όπου,  $Q$  η συνολική παροχή που τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο και  $Q_L$  η αντίστοιχη διαρροής (leakage flow), η οποία απομακρύνεται από τον δρομέα του στροβίλου χωρίς την παραγωγή έργου.

✚ **Μηχανική απόδοση (mechanical efficiency)**, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της διαθέσιμης ισχύος στον άξονα του στροβίλου προς την αντίστοιχη που μεταδίδεται από το νερό στο δρομέα. Η μηχανική απόδοση σχετίζεται με τις απώλειες λόγω της μηχανικής τριβής στον υδροστρόβιλο και υπολογίζονται από τη σχέση:

$$n_m = \frac{bp}{bp + fp} \quad (5.7)$$

Όπου  $bp$  η ισχύς πέδης (brake power) (διαθέσιμη στον άξονα) και  $fp$  οι απώλειες ισχύος που οφείλονται στην μηχανική τριβή και την ύπαρξη ιξώδους.

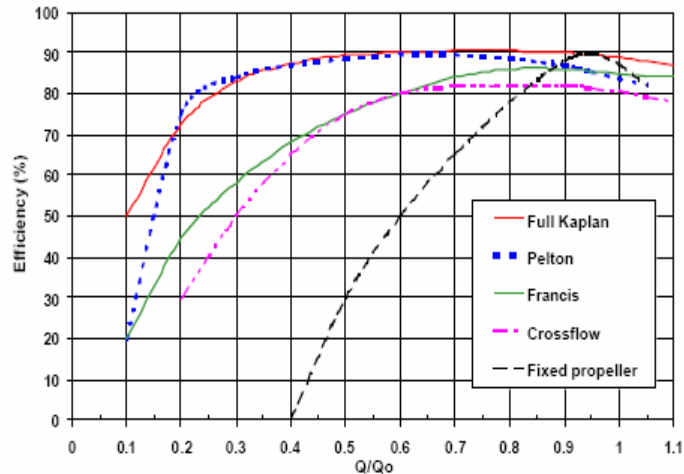
Ως **συνολική απόδοση (overall efficiency)** ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παρέχεται από τον υδροστρόβιλο (μηχανική ισχύς που μεταφέρεται από τον άξονα του στροβίλου) προς την υδραυλική ισχύ (την αντίστοιχη που απορροφάται από τον υδροστρόβιλο), δηλαδή[6]:

$$n = \frac{P_{μηχ.}}{P_{υδρ.}} \quad (5.8)$$

Η τιμή της συνολικής απόδοσης διαφορετικά προκύπτει από το γινόμενο των προαναφερθέντων αποδόσεων, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$n_t = n_h \cdot n_v \cdot n_m \quad (5.9)$$

Η συνολική απόδοση των υδροστροβίλων μεταβάλλεται ανάλογα με το βαθμό ανοίγματος των οδηγητικών πτερυγίων και συνεπώς ανάλογα με την παροχή η οποία τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο. Η συγκεκριμένη διαπίστωση εκφράζεται με τη βοήθεια καμπυλών του βαθμού απόδοσης των υδροστροβίλων συναρτήσει του βαθμού ανοίγματος των οδηγητικών πτερυγίων, οι οποίες εντάσσονται στις προδιαγραφές των διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων και παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα για διάφορους τύπους υδροστροβίλων.



**Σχήμα 5.18** Καμπύλες απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων

Από την σύγκριση των καμπυλών απόδοσης των υδροστροβίλων πρέπει να σημειωθεί ότι οι υδροστρόβιλοι Pelton και Kaplan παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι διατηρούν ψηλό βαθμό απόδοσης ακόμη και σε μερικά φορτία, δηλαδή έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας. Αντίθετα οι υδροστρόβιλοι Cross flow παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση από τους υπόλοιπους τύπους υδροστροβίλων, ενώ οι υδροστρόβιλοι Francis και οι προπελωτοί υδροστρόβιλοι παρουσιάζουν περισσότερο απότομες καμπύλες απόδοσης.

Στο πλαίσιο των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων οι αποδεκτές τιμές παροχής περιορίζονται μεταξύ της παροχής λειτουργίας του υδροστροβίλου και της ελάχιστης τιμής, η οποία ορίζεται από την καμπύλη απόδοσης του υδροστροβίλου, επιδιώκοντας τη διατήρηση της απόδοσης σε υψηλά επίπεδα. Στην περίπτωση τροφοδότησης του υδροστροβίλου με παροχή εκτός ορίων, υπάρχει ο κίνδυνος εμφάνισης αστάθειας, ως αποτέλεσμα μηχανικών δονήσεων και ταλαντώσεων. Δεδομένου ότι ένας υδροστρόβιλος μπορεί να δέχεται παροχές μεταξύ του μεγίστου και του πρακτικά ελαχίστου, είναι μερικές φορές επωφελές να εγκαθίστανται μερικοί υδροστρόβιλοι αντί ενός μεγάλου υδροστροβίλου. Οι υδροστρόβιλοι θα πρέπει να ξεκινούν διαδοχικά έτσι ώστε όλοι εκτός από έναν, θα λειτουργούν στις ονομαστικές παροχές τους και επιπλέον θα έχουν μεγάλη απόδοση. Η χρήση δύο ή τριών υδροστροβίλων σημαίνει χαμηλότερο βάρος και όγκο μονάδας και διευκόλυνση της μεταφοράς και της συναρμολόγησης στην τοποθεσία. Ο μερισμός της ροής ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες μονάδες επιτρέπει επίσης την υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλασιαστές στροφών. Η χρήση μεγαλύτερου αριθμού υδροστροβίλων μεταφράζεται σε μικρότερο βάρος μονάδων και συνεπώς ευκολότερη μεταφορά και συναρμολόγηση τους, ενώ περιορίζει το λόγο βάρους υδροστροβίλων προς κυβικά μέτρα παροχής. Η τελική επιλογή μεταξύ ενός ή περισσότερων μονάδων ή ενός τύπου υδροστροβίλου θα είναι το αποτέλεσμα ενός επαναλαμβανόμενου υπολογισμού λαμβάνοντας υπόψη το κόστος επένδυσης και την ετήσια παραγωγή δεδομένου ότι η αύξηση αριθμού υδροστροβίλων επιφέρει αύξηση των γεννητριών, των συσκευών ελέγχου και επομένως του κόστους[6].

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού και κατασκευής των υδροστροβίλων κρίνεται αναγκαία η προσαρμογή της θεωρητικής τους απόδοσης στα πραγματικά δεδομένα, με τον πολλαπλασιασμό της συγκεκριμένης τιμής με συντελεστή διόρθωσης. Οι μελέτες της συγκεκριμένης διαδικασίας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η τιμή του συντελεστή διόρθωσης αυξάνει με την μείωση της εγκατεστημένης ισχύος του σταθμού. Συνεπώς, η απόδοση των υδροστροβίλων

αυξάνει παράλληλα με την αύξηση του μεγέθους τους, γεγονός το οποίο δρα αρνητικά στην ανάπτυξη μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

## 5.5 Σπηλαιώση υδροστροβίλων

**Σπηλαιώση** (cavitation) ονομάζεται το φαινόμενο ατμοποίησης του νερού και το οποίο αναπτύσσεται σε θέσεις όπου η στατική πίεση του υγρού τείνει να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού.

Το υγρό εισέρχεται στον υδροστροβίλο σε υψηλή πίεση· η πίεση αυτή είναι συνδυασμός στατικών και δυναμικών συνιστωσών. Η δυναμική πίεση του υγρού είναι αποτέλεσμα της ταχύτητας ροής και η άλλη συνιστώσα, η στατική πίεση είναι η ακριβής πίεση ρευστού την οποία εφαρμόζει το υγρό και η οποία επενεργεί πάνω σε αυτό. Η στατική πίεση ελέγχει την διαδικασία του σχηματισμού φυσαλίδων ατμών (vapor bubble) ή του βρασμού (boiling). Κατά συνέπεια, η σπηλαιώση μπορεί να εμφανιστεί πλησίον των γρήγορα κινούμενων λεπίδων του στροβίλου όπου το τοπικό δυναμικό ύψος υδατόπτωσης αυξάνεται εξαιτίας της κίνησης των λεπίδων που προκαλούν την πτώση της στατικής πίεσης. Σπηλαιώση επίσης εμφανίζεται στην έξοδο του στροβίλου καθώς το ρευστό έχει χάσει σημαντικό μέρος της πίεσης από το ύψος υδατόπτωσης του και κάθε αύξηση στο δυναμικό ύψος θα οδηγήσει στην μείωση της στατικής πίεσης προκαλώντας σπηλαιώση. Η σπηλαιώση διακρίνεται από τον βρασμό (boiling), ο οποίος οφείλεται στην ανύψωση της πίεσης ατμοποίησης πάνω από την υδροδυναμική πίεση με την βοήθεια θέρμανσης. Στα αρχικά στάδια της η σπηλαιώση είναι υπό την μορφή μεμονωμένων φυσαλίδων (bubbles) οι οποίες μεταφέρονται από την περιοχική ελάχιστης πίεσης μέσω του υγρού και συντρίβονται στις περιοχές υψηλότερης πίεσης. Υπολογισμοί, καθώς επίσης και εξεζητημένες εργαστηριακές μελέτες δείχνουν ότι οι προς συντριβή φυσαλίδες δημιουργούν πολύ υψηλές πιέσεις δράσης. Συγκεκριμένα, η συντριβή των φυσαλίδων παράγει κύματα πίεσης, τα οποία μπορεί να είναι υψηλών συχνοτήτων και προκαλούν φθορά στα μηχανήματα. Οι φυσαλίδες οι οποίες συντρίβονται κοντά στην επιφάνεια της μηχανής είναι πιο καταστροφικές και προκαλούν διάβρωση στην επιφάνεια η οποία καλείται διάβρωση σπηλαιώσης. Οι συντριβές των μικρότερων φυσαλίδων δημιουργούν κύματα υψηλότερων συχνοτήτων από ότι οι μεγαλύτερες φυσαλίδες. Έτσι, οι πρώτες είναι περισσότερο καταστρεπτικές για τις υδραυλικές μηχανές. Παρόλα αυτά οι μικρότερες φυσαλίδες δεν προκαλούν οποιαδήποτε σημαντική μείωση της απόδοσης του στροβίλου. Με περαιτέρω μείωση της στατικής πίεσης διαμορφώνεται μεγαλύτερος αριθμός φυσαλίδων και αυξάνεται επίσης το μέγεθος τους. Αυτές οι φυσαλίδες συγχωνεύονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν μεγαλύτερες και τελικά τους θύλακες ατμού. Αυτό διαταράσσει την ροή του υγρού και προκαλεί τον διαχωρισμό της ροής ο οποίος μειώνει την απόδοση των στροβίλων απότομα.

Ένα άλλο αποτέλεσμα της σπηλαιώσης είναι η παραγωγή έντονου θορύβου ( η εμφάνιση σπηλαιώσης σε υδροστροβίλο ηχεί όπως η πρόσκρουση αμμοχάλικου σε αυτόν).



**Σχήμα 5.19** Διάβρωση σπηλαιώσης σε στρόβιλο[23]

Τα μηχανικά αποτελέσματα της σπηλαιώσης ενισχύονται από την υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται από την συντριβή των φυσαλίδων και την παρουσία αερίων πλούσιων σε οξυγόνο. Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας διάβρωσης είναι πολύπλοκες, αλλά τα αποτελέσματα είναι πρακτικής σημασίας. Πολλά εξαρτήματα ενός στρόβιλου είναι ευαίσθητα στην εκτεταμένη φθορά όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.19. Συνέπεια των συγκεκριμένων φθορών αποτελεί η απώλεια 10 έως 40 mm υλικού ετησίως και η ανάγκη επισκευών και πιθανής αντικατάστασης του εξοπλισμού, διαδικασίες οι οποίες επιβαρύνουν το κόστος του σχεδιαζόμενου έργου[8].

Η αντιμετώπιση του συγκεκριμένου φαινομένου πραγματοποιείται με τη χρήση διατάξεων ελέγχου της ταχύτητας ροής ύδατος και με προσεκτικό σχεδιασμό των αγωγών προσαγωγής και φυγής. Παράλληλα, προτείνεται η χρήση κατάλληλων κραμάτων στο πλαίσιο της κατασκευής των υδροστρόβιλων, όπως ανοξείδωτου χάλυβα (stainless steel) (18% χρώμιο και 8% νικέλιο). Τέλος, θετικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται και με την αύξηση του αριθμού μονάδων, επιλογή ωστόσο που οδηγεί στην επιβάρυνση του κόστους εγκατάστασης. Η σπηλαιώση των υδροστρόβιλων παρουσιάζεται κύρια σε εγκαταστάσεις μεγάλων μεταβολών ισχύος, χαμηλού ύψους υδατόπτωσης και προπελωτών στρόβιλων υψηλής σχετικής ταχύτητας και είναι δυνατό να επιτραπεί περιορισμένος βαθμός σπηλαιώσης, προκειμένου να περιορισθεί το κατασκευαστικό κόστος του σχεδιαζόμενου έργου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο, επιβάλλεται ο προγραμματισμός περιοδικής αντικατάστασης ή επισκευής των δρομέων των χρησιμοποιούμενων υδροστρόβιλων[16].

Ο λόγος:

$$\sigma = \frac{H_{\theta}}{H} \quad (5.10)$$

ονομάζεται συντελεστής σπηλαιώσης Thoma (Thoma coefficient) ή παράμετρος σπηλαιώσης της εγκατάστασης, όπου  $H_{\theta}$  η διαφορά της ολικής πίεσης στην διατομή εξόδου του υδροστρόβιλου ως προς την τάση ατμών του υγρού και  $H$  το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης, και χαρακτηρίζει αποκλειστικά την εγκατάσταση του υδροστρόβιλου.

Ο συντελεστής σπηλαιώσης Thoma στην περίπτωση υδροστρόβιλου Francis υπολογίζεται από την εξής εμπειρική σχέση[2]:

$$\sigma = \frac{n_s}{25.000} \quad (5.11)$$

Στην περίπτωση υδροστρόβιλων Kaplan η παραπάνω εμπειρική σχέση παίρνει την μορφή[16]:

$$\sigma = \frac{n_s}{20.000} \quad (5.12)$$

Η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαιώσης εκφράζεται ως:

$$\sigma = \frac{H_{\Theta}}{H} > \sigma_{κρ} = \frac{H_{κρ}}{H} \quad (5.13)$$

στην οποία με  $\sigma_{κρ}$  συμβολίζεται η παράμετρος σπηλαιώσης του υδροστροβίλου και  $H_{κρ}$  είναι το κρίσιμο ύψος σπηλαιώσης.

Η λειτουργία του υδροστροβίλου θα είναι ασφαλής από πλευράς σπηλαιώσης όταν  $H_{\Theta} > H_{κρ}$  ή αντίστοιχα  $\sigma > \sigma_{κρ}$ . Η λειτουργία του υδροστροβίλου θα είναι επισφαλής από πλευράς σπηλαιώσης όταν  $H_{\Theta} \approx H_{κρ}$ , ή αντίστοιχα  $\sigma \approx \sigma_{κρ}$ , ενώ για  $H_{\Theta} < H_{κρ}$ , αντίστοιχα  $\sigma < \sigma_{κρ}$  η λειτουργία του υδροστροβίλου γίνεται με συστηματική ανάπτυξη σπηλαιώσης.

Η παράμετρος σπηλαιώσης  $\sigma_{κρ}$  χαρακτηρίζει την εμφάνιση της κυριότερης μορφής σπηλαιώσης στους υδροστροβίλους αντιδράσεως, αυτής δηλαδή που έχει την μορφή φυσαλίδων που αναπτύσσονται στην κυρτή επιφάνεια των περυγίων (πλευρά υποπίεσης) και κοντά στην ακμή εκφυγής.

Εκτός από αυτή την μορφή σπηλαιώσης στους υδροστροβίλους αναπτύσσονται και άλλες μορφές σπηλαιώσης των οποίων η εμφάνιση είναι σχεδόν ανεξάρτητη της τιμής της παραμέτρου σπηλαιώσης  $\sigma$  και εξαρτάται κύρια από το σημείο λειτουργίας, δηλαδή για καλά σχεδιασμένο υδροστροβίλο αυτές οι μορφές σπηλαιώσης δεν αναπτύσσονται στην περιοχή του κανονικού σημείου λειτουργίας. Με σκοπό την αποφυγή των άλλων μορφών σπηλαιώσης, εάν αυτές είναι επικίνδυνες για την ανάπτυξη φθοράς, περιορίζεται το επιτρεπόμενο εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου. Σύμφωνα με τα προηγούμενα η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου, ως προς την στάθμη απαγωγής, καθορίζεται από την ελάχιστη τιμή της παραμέτρου  $\sigma$ , δηλαδή την  $\sigma_{κρ}$  μέσω των εξισώσεων (5.10) και (5.13).

Μια μορφή σπηλαιώσης που είναι ανεξάρτητη από την στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου είναι η ανάπτυξη της στήλης σπηλαιώσης κατάντη του κώνου της πλήμνης του δρομέα. Η ανάπτυξη της σπηλαιώσης οφείλεται στο ότι σε σημεία λειτουργίας εκτός του κανονικού η ροή από την έξοδο του δρομέα έχει συστροφή θετική (εάν η παροχή είναι μικρότερη της κανονικής) ή αρνητική (εάν η παροχή είναι μεγαλύτερη της κανονικής). Καθώς οι γραμμές ροής συγκλίνουν προς τον άξονα περιστροφής η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας τείνει προς το άπειρο με αποτέλεσμα την πτώση της στατικής πίεσης και την ανάπτυξη σπηλαιώσης υπό μορφή στήλης η οποία έχει κωνική μορφή ή ελικοειδή μορφή (Σχήμα 5.21). Ο όγκος της στήλης σπηλαιώσης είναι τόσο μεγάλος όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου  $\sigma$ . Η ανάπτυξη της στήλης σπηλαιώσης δεν προκαλεί φθορά από διάβρωση καθώς αναπτύσσεται μακριά από τις επιφάνειες του υδροστροβίλου (διακυμάνσεις της πίεσης και της ισχύος της τάξεως του 3,3%) και μηχανικές ταλαντώσεις. Αποφυγή της ανάπτυξης στήλης σπηλαιώσης ή μείωση του όγκου της επιτυγχάνεται με διάφορους εμπειρικούς τρόπους όπως η έγχυση αέρα τον κώνο της πλήμνης, την διαμόρφωση λεπτών περυγίων στον κώνο απαγωγής.

Η τιμή του  $\sigma_{κρ}$  ενός υδροστροβίλου προσδιορίζεται εργαστηριακά όμως, για καλά σχεδιασμένους υδροστροβίλους, η τιμή του  $\sigma_{κρ}$  θα πρέπει να συσχετίζεται με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$ . Οι συσχετίσεις αυτές για τον υδροστροβίλο Francis δίνονται από την εμπειρική σχέση[2]:

$$\sigma_{κρ} = 7,54 \cdot 10^{-5} n_s^{1,41} \quad (5.14)$$

και για τον υδροστροβίλο Kaplan:

$$\sigma_{κρ} = 6,40 \cdot 10^{-5} n_s^{1,46} \quad (5.15)$$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### *Ισχύς και ενέργεια μικρών υδροηλεκτρικών έργων*

#### **6.1 Εισαγωγή**

Κύριος σκοπός της ανάπτυξης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ασφαλής εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας σε μια υδροδυναμική τοποθεσία, συνιστά το βασικό κριτήριο για τη δημιουργία και τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης. Στόχος συνεπώς όλων των προηγούμενων μελετών (υδρολογικές, κλιματολογικές, εκλογής στροβίλου κτλ) είναι ο υπολογισμός με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν συχνά σε σύνδεση με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται ως **διασυνδεδεμένα (interconnected)** συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση **αυτόνομης (isolated)** λειτουργίας των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων, αναλαμβάνεται αποκλειστικά η εξυπηρέτηση του φορτίου της τοπικής ζήτησης.

Με κριτήριο την χρονική διάρκεια λειτουργίας των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών διακρίνουμε αυτές τις εγκαταστάσεις σε συνεχούς και διακοπτόμενης λειτουργίας. Ο χαρακτηρισμός των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών ανάλογα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

με τη χρονική διάρκεια λειτουργίας τους σχετίζεται άμεσα με τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης υδροδυναμικής τοποθεσίας και του χρησιμοποιούμενου υδροηλεκτρικού εξοπλισμού. Έτσι, αποκλειστικά **συνεχούς λειτουργίας (continuous operation)** χαρακτηρίζονται οι εγκαταστάσεις οι οποίες τοποθετούνται σε κανάλι εκτροπής του επιλεγμένου ποταμού και παρέχουν ενέργεια σχεδόν σε όλη την διάρκεια του έτους. Αντίθετα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί ροής ποταμού (run-of-river) είναι δυνατό να αποτελούν εγκαταστάσεις **ασυνεχούς ή διακοπτόμενης λειτουργίας (intermittent operation)** και μπορούν να παρέχουν ενέργεια όταν οι υδρολογικές συνθήκες το επιτρέπουν[19].

Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος λειτουργίας των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών είναι σε σύνδεση με το ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι σταθμοί αυτοί μπορεί να είναι διακοπτόμενης λειτουργίας και συχνά χρησιμοποιούνται για κάλυψη του φορτίου αιχμής. Η εύρυθμη και αξιόπιστη λειτουργία των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων και η τήρηση των προδιαγραφών των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας (σταθερή τάση, συχνότητα κτλ) καλύπτονται από το δίκτυο με την προϋπόθεση ότι η εγκατεστημένη ισχύς του σχεδιαζόμενου σταθμού αποτελεί ποσοστό κατώτερο του 10% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς του δικτύου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα σε σύνδεση με μεγάλο δίκτυο μπορεί να μη είναι πρακτικά επειδή το κόστος σύνδεσης είναι πάρα πολύ υψηλό σε σύγκριση με το διαθέσιμο ποσό ισχύος. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, παρόλο που η ανάπτυξη διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι τεχνικά εφικτή, το κόστος αυτής της διασύνδεσης μπορεί να αποτελεί σημαντικό μέρος των συνολικών δαπανών του έργου.

Στην περίπτωση αυτόνομου μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού απαιτείται συνεχής λειτουργία του σταθμού και αντιμετώπιση υπερεντάσεων, που εμφανίζονται κύρια κατά την διαδικασία έναρξης λειτουργίας μεγάλων ηλεκτρικών κινητήρων. Συγκεκριμένα, απαιτείται η τροφοδοσία των φορτίων, τα οποία εξυπηρετούν οι αυτόνομες εγκαταστάσεις, με ηλεκτρική ενέργεια της οποίας τα χαρακτηριστικά θα εξασφάλιζε η τροφοδοσία τους από σταθερό ηλεκτρικό δίκτυο. Η ανταπόκριση των αυτόνομων συστημάτων στις συγκεκριμένες υπερεντάσεις κρίνεται τεχνικά εφικτή, οδηγεί ωστόσο στην επιβάρυνση της λειτουργίας της αντίστοιχης εγκατάστασης και την αύξηση του κόστους των παρεχόμενων υπηρεσιών. Παράλληλα η ανάπτυξη αυτόνομων εγκαταστάσεων εγκυμονεί τον κίνδυνο της ασυνεχούς λειτουργίας. Η ύπαρξη ξηρών περιόδων, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της παροχής ύδατος, και η ανάγκη ελέγχου και επισκευών των επιμέρους διατάξεων, προκαλούν την διακοπή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση συνεπώς που η συγκεκριμένη διακοπή κρίνεται μη αποδεκτή στο πλαίσιο της εξυπηρέτησης του φορτίου, απαιτείται η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης/εφεδρείας και υβριδικών δικτύων ηλεκτροπαραγωγής με αποτέλεσμα την οικονομική επιβάρυνση του σχεδιαζόμενου έργου.

Στο πλαίσιο της κυρίως μελέτης τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών, σημαντική θέση κατέχει ο προσδιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος και η εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας της σχεδιαζόμενης εγκατάστασης. Ο λανθασμένος υπολογισμός της διαθέσιμης ισχύος αποτελεί αποπροσανατολιστικό παράγοντα κατά την επιλογή κατάλληλου ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού.

Παράλληλα, η αποτυχία ακριβούς και ασφαλούς εκτίμησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προκαλεί αντίστοιχο σφάλμα στην εκτίμηση των εσόδων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

του έργου και συνεπώς στην οικονομική αποτίμηση της σχεδιαζόμενης επένδυσης.

### 6.2 Ισχύς μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών

Ο προσδιορισμός της ισχύος μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης καθορίζεται κυρίως από την παροχή του ύδατος και το ύψος υδατόπτωσης και συνεπώς επηρεάζει άμεσα την επιλογή του μεγέθους και του κόστους της εγκατάστασης. Κατά την διάρκεια του υδρολογικού κύκλου οι υδρατμοί, που σχηματίζονται κατά την εξάτμιση των επιφανειακών υδάτων της γης, κατά την άνοδο τους στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας αποκτούν δυναμική ενέργεια. Σημαντικό ποσοστό της συγκεκριμένης ενέργειας χάνεται κατά την πτώση του ύδατος στην επιφάνεια της γης υπό την μορφή κατακρημνίσεων. Η εναπομένουσα ποσότητα δυναμικής ενέργειας καταναλίσκεται κατά τη ροή ύδατος από τα υψηλότερα στρώματα της γης προς τη θάλασσα και αποτελεί την ενεργειακή πηγή που εν προκειμένω καλούνται να αξιοποιήσουν οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Το ενεργειακό περιεχόμενο κάθε υδροδυναμικής τοποθεσίας προσδιορίζεται με την βοήθεια της υδροδυναμικής ισχύος, η οποία αποτελεί και το μέγιστο ποσό ισχύος που δύναται να αξιοποιηθεί κατά την εγκατάσταση μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού και ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση[14]:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (6.1)$$

όπου  $P_h$  είναι η υδροδυναμική ισχύς (W),  $\gamma$  το ειδικό βάρος ύδατος, το οποίο είναι το γινόμενο της μάζας του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ N/m}^3$ ),  $Q$  η παροχή ύδατος ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) και  $H$  το ολικό ύψος υδατόπτωσης (m). Αντικαθιστώντας το ειδικό βάρος ύδατος με την ισοδύναμη τιμή του η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή[5]:

$$P_h = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \quad (6.2)$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα ύδατος ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ ) και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9,81 \text{ m/sec}^2$ ),  $P_h$  είναι η υδροδυναμική ισχύς (W) και  $H$  το ολικό ύψος υδατόπτωσης (m). Επομένως, στην περίπτωση του ύδατος η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$P_h = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad (6.3)$$

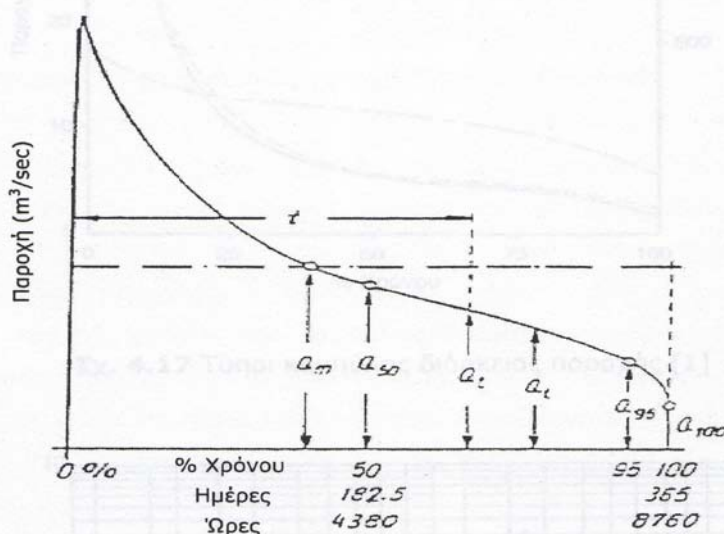
Η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $g$  παρουσιάζει μεταβολές ανάλογα με το υψόμετρο της εξεταζόμενης τοποθεσίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται κατά  $0,31 \text{ cm/sec}^2$  κάθε 1000 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά την χρήση των παραπάνω εξισώσεων, κρίνεται αναγκαία η συνεκτίμηση των συγκεκριμένων διαφοροποιήσεων στην τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας, στην περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά υψομέτρου μεταξύ της τοποθεσίας διεξαγωγής μετρήσεων και της αντίστοιχης εγκατάστασης του σχεδιαζόμενου σταθμού.

Για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής ισχύος, με την βοήθεια των παραπάνω σχέσεων, η τιμή του χρησιμοποιούμενου ύψους υδατόπτωσης λαμβάνεται ίση με την αντίστοιχη του ολικού ύψους ( $H_{\text{gross}}$ ) όπως αυτό ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η επιλογή ωστόσο της χρησιμοποιούμενης τιμής παροχής ύδατος οδηγεί σε διαφορετικές εκτιμήσεις της διαθέσιμης υδροδυναμικής ισχύος. συγκεκριμένα, στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται η ελάχιστη τιμή παροχής της καμπύλης διάρκειας παροχής ( $Q_{100}$ ), προκύπτει η **ελάχιστη δυναμική ισχύς ή θεωρητική τιμή του 100% (minimum potential power)**, η οποία διατίθενται για το σύνολο των 8.760 ωρών του έτους. Αντίστοιχα, ο υπολογισμός της υδροδυναμικής ισχύος με τη χρήση της παροχής ύδατος του 95% του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

χρόνου ( $Q_{95}$ ) οδηγεί στην **μικρή δυναμική ισχύ (small potential power)**, η οποία διατίθενται για το διάστημα των 8.322 ωρών ετησίως. Η **μέση ή πλεονασματική δυναμική ισχύς (median or overage potential power)** διατίθενται για χρονική περίοδο 6 μηνών ή 4.380 ωρών και προκύπτει από τη χρήση της παροχής που αντιστοιχεί στο 50% του χρόνου ( $Q_{50}$ ). Η **μέση δυναμική ισχύς (mean potential power)** εκφράζει τη μέση παροχή ύδατος, η οποία αποτελεί τη μέση τιμή των ετήσιων μέσων παροχών για χρονικό διάστημα 10 ως 30 ετών [10].

Οι παραπάνω χρησιμοποιούμενες τιμές παροχής ύδατος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1 και η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αντίστοιχων υπολογισμών σχετίζεται με την χρονική διάρκεια των υδρολογικών παρατηρήσεων.



**Σχήμα 6.1** Παροχές για τον προσδιορισμό της υδροδυναμικής ισχύος μιας υδροηλεκτρικής μονάδας.

### 6.2.1 Μηχανική ισχύς

Κατά την διαδικασία ανάπτυξης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού, η διαθέσιμη υδροδυναμική ισχύς περιορίζεται κατά τη ροή ύδατος μέσω των αγωγών, εξαιτίας των απωλειών του ύψους υδατόπτωσης, και μέσω του υδροστροβίλου, ανάλογα με την απόδοση του τελευταίου. Συνεπώς, η **μηχανική ισχύς** η οποία προκύπτει από τον άξονα της γεννήτριας, προσδιορίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης [3]:

$$P_m = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (6.4)$$

όπου  $\eta_t$  ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου, ο οποίος υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης 5.9 (Κεφάλαιο 5) και κυμαίνεται μεταξύ 70 και 94% με συνηθέστερη την τιμή του 80%. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης σχέσης η τιμή του χρησιμοποιούμενου ύψους υδατόπτωσης αντιστοιχεί στο στατικό ύψος ( $H_{sta}$ ), όπως αυτό προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 3 και υπολογίστηκε με την βοήθεια της σχέσης 3.5. Κατά την μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας συναντώνται περιπτώσεις που η αντίστοιχη τιμή αντιπροσωπεύει το καθαρό ύψος υδατόπτωσης [3],[5]. Βαθύτερη προσέγγιση του ζητήματος ωστόσο, αποκαλύπτει ότι το ύψος υδατόπτωσης το οποίο αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο, είναι το στατικό ύψος, δεδομένου του γεγονότος ότι η διαφορά

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

μεταξύ στατικού και καθαρού ύψους εντοπίζεται στις απώλειες του αγωγού φυγής, οι οποίες εντάσσονται στον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου. Συνεπώς, η χρήση του καθαρού ύψους υδατόπτωσης αποσκοπεί στον έλεγχο του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου που προκύπτει από τα στοιχεία του κατασκευαστή. Παράλληλα, ο υπολογισμός της μηχανικής ισχύος πραγματοποιείται με τη χρήση της επιλεγμένης παροχής λειτουργίας του υδροστροβίλου. Τέλος, σημειώνεται πως προτιμάται η αξιοποίηση μεγαλύτερου ύψους υδατόπτωσης και μικρότερης παροχής στο πλαίσιο της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης του σχεδιαζόμενου έργου [1].

### 6.2.2 Εγκατεστημένη ισχύς

Ο όρος **εγκατεστημένη ισχύς** (kW ή MW) υδροηλεκτρικού σταθμού αναφέρεται στη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ η οποία είναι δυνατό να διαθέτει από το συγκεκριμένο σταθμό[10]. Η συγκεκριμένη τιμή αποτελεί τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ η οποία λαμβάνεται στους ζυγούς εξόδου του σταθμού και συνεπώς προσδιορίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης [10]:

$$P_e = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot n \quad (6.5)$$

όπου Q η παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου (m<sup>3</sup>/sec), H το στατικό ύψος υδατόπτωσης της εγκατάστασης (m) και n ο συνολικός βαθμός απόδοσης του σταθμού, ο οποίος προκύπτει από τη σχέση [10]:

$$n = n_t \cdot n_{in} \cdot n_g \cdot n_{tr} \quad (6.6)$$

όπου  $n_t$  ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου (80-90%),  $n_{in}$  ο βαθμός απόδοσης του πολλαπλασιαστή στροφών,  $n_g$  η απόδοση της γεννήτριας (85-95%) και  $n_{tr}$  η αντίστοιχη του μετασχηματιστή. Οι συνήθεις τιμές απόδοσης των συγκεκριμένων διατάξεων προκύπτουν ως 80%,90%,90% και 90% αντίστοιχα.

Το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος το οποίο είναι δυνατό να προσφέρει η επιλεγμένη υδροηλεκτρική εγκατάσταση προκειμένου να ικανοποιήσει τις ανάγκες του φορτίου, ορίζεται ως εγγυημένη ισχύς. Η χρησιμοποιούμενη γεννήτρια είναι δυνατό να προσφέρει για διαστήματα περιορισμένης χρονικής διάρκειας ισχύ μεγαλύτερη από την εγκατεστημένη, με την προϋπόθεση της τροφοδοσίας της από τον υδροστροβίλο με την απαιτούμενη μηχανική ισχύ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο εμφανίζονται φαινόμενα υπερθέρμανσης της γεννήτριας, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της διάρκειας ζωής της. Τέλος, υπό οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, δεν είναι δυνατή η διάθεση από την γεννήτρια ισχύος μεγαλύτερης τιμής από την μηχανική ισχύ του υδροστροβίλου μείον τις απώλειες λειτουργίας της[3].

### 6.3 Εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας

Το βασικό κριτήριο για την ανάπτυξη ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού είναι η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παράγει, στην οποία εισάγεται και η έννοια του χρόνου λειτουργίας του σταθμού. Κατά την λειτουργία των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών η ενέργεια η οποία είναι δυνατό να παραχθεί στο πλαίσιο της εγκατεστημένης ισχύος της εγκατάστασης, καλείται πρωτεύουσα ενέργεια. Πιθανό επιπρόσθετο ποσό παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τη δευτερεύουσα ενέργεια. Η πρωτεύουσα ενέργεια καλείται να



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ικανοποιήσει τις ανάγκες του φορτίου των καταναλωτών, τη στιγμή που η αντίστοιχη δευτερεύουσα είναι δυνατό να πωληθεί σε τρίτους φορείς.

Συνεπώς, αποκαλύπτεται η ιδιαίτερη σχέση μεταξύ της εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας και του προσδιορισμού των εσόδων του σχεδιαζόμενου έργου. Η συγκεκριμένη εκτίμηση αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο ανάμεσα στην ενεργειακή και οικονομική αποτίμηση των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών και στην πραγματοποίηση της συντελούν διαφορετικές μέθοδοι, οι οποίες εξετάζονται παρακάτω.

### 6.3.1 Μέθοδος συντελεστή χρησιμοποίησης

Η πρώτη προσέγγιση της παραγόμενης ενέργειας μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού επιτυγχάνεται με τη χρήση του βαθμού ή συντελεστή χρησιμοποίησης. Ως συντελεστής χρησιμοποίησης  $f$  ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας σε δεδομένη χρονική διάρκεια προς την αντίστοιχη διαθέσιμη ενέργεια η οποία θα ήταν δυνατό να παραχθεί στην αντίστοιχη διάρκεια. Ο συγκεκριμένος συντελεστής εκφράζει το ποσοστό του χρόνου στο οποίο πραγματοποιείται η εκμετάλλευση του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού και οδηγεί στην εκτίμηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης[4]:

$$E(kWh) = P_e \cdot 8760 \cdot f \quad (6.7)$$

όπου  $P_e$ (kW) η εγκατεστημένη ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού,  $f$  ο συντελεστής χρησιμοποίησης και 8760 ο αριθμός των ωρών του έτους. Στην περίπτωση εκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας που αντιστοιχεί σε μικρότερο ή μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του έτους (π.χ. ημερήσια, μηνιαία), απαιτείται στην παραπάνω σχέση η αντικατάσταση της τιμής 8760 από τον αριθμό των ωρών της επιλεγμένης περιόδου.

### 6.3.2 Μέθοδος καμπύλης διάρκειας παροχής

Το ενεργειακό περιεχόμενο κάθε υδροδυναμικής τοποθεσίας καθορίζεται από τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της, τη στιγμή που το σύνολο των υδρομετρικών στοιχείων καταγράφονται με τη βοήθεια της καμπύλης διάρκειας παροχής. Η ακριβής και αξιόπιστη εκτίμηση συνεπώς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού, προκύπτει από την αξιοποίηση της καμπύλης διάρκειας παροχής ύδατος της αντίστοιχης τοποθεσίας.

Η χρήση ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού βαθμού απόδοσης  $n$  για την αξιοποίηση στατικού ύψους υδατόπτωσης  $H$  και παροχής ύδατος  $Q$ , οδηγεί στην ανάπτυξη μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού εγκατεστημένης ισχύος που προσδιορίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης 6.5. Το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο διατίθενται κατά τη λειτουργία της συγκεκριμένης εγκατάστασης για χρονικό διάστημα  $t$  προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E(kWh) = \int_0^t 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot n \cdot dt \quad (6.8)$$

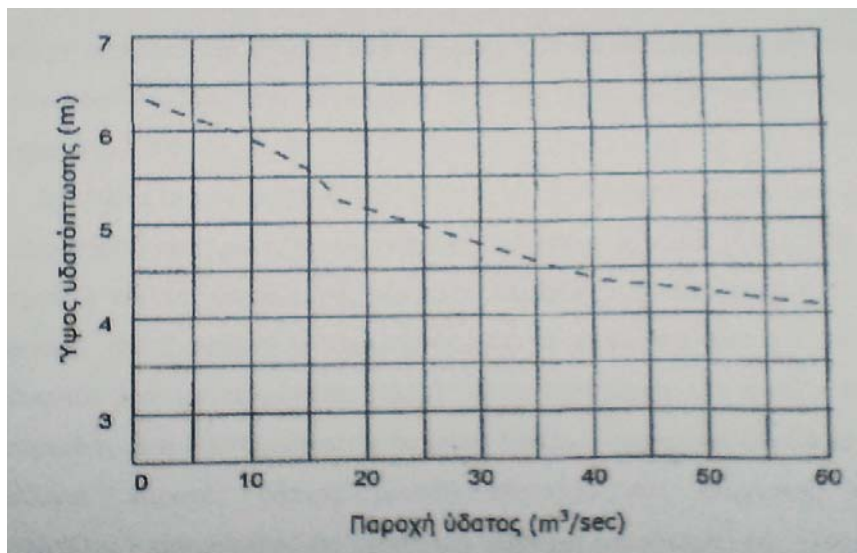
Στην προσπάθεια διερεύνησης της παραπάνω εξίσωσης είναι φανερό ότι:

- η στάθμη ύδατος στην υδροληψία και στον αγωγό φυγής μεταβάλλεται παράλληλα με τις διακυμάνσεις της παροχής ύδατος. Παράδειγμα του συγκεκριμένου συσχετισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2. Στις περισσότερες περιπτώσεις ωστόσο, μελέτης μικρών υδροηλεκτρικών



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

σταθμών, συγκεκριμένη μεταβολή του ύψους υδατόπτωσης κρίνεται σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα να παραβλέπεται. Συνεπώς, η χρήση σταθερής τιμής ύψους υδατόπτωσης, ίσης με το στατικό ύψος, δεν εισάγει αξιολογούμενο σφάλμα στην ενεργειακή εκτίμηση της εξεταζόμενης εγκατάστασης.



**Σχήμα 6.2** Μεταβολή ύψους υδατόπτωσης με παροχή ύδατος[4].

- ✚ Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας μικρής υδροηλεκτρικής εγκατάστασης προκύπτει από το γινόμενο των αντίστοιχων βαθμών του υδροτροβίλου, του πολλαπλασιαστή στροφών, της γεννήτριας και του χρησιμοποιούμενου μετασχηματιστή σύμφωνα με την εξίσωση 6.6. Οι συγκεκριμένες τιμές απόδοσης παραμένουν σταθερές, με εξαίρεση τον υδροτροβίλο του οποίου ο βαθμός απόδοσης μεταβάλλεται ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη παροχή ύδατος. Η χρήση ωστόσο τιμών παροχής για τις οποίες παρατηρείται μέγιστος βαθμός απόδοσης του υδροτροβίλου, καθιστά σταθερή την απόδοση του τελευταίου και συνεπώς το συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Η αποδοχή σταθερών τιμών του ύψους υδατόπτωσης και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, οδηγεί στην ενεργειακή εκτίμηση του σχεδιαζόμενου έργου βάσει της σχέσης 6.8:

$$E(kWh) = 9.81 \cdot H \cdot n \cdot \int_0^t Q \cdot dt \quad (6.9)$$

Συνεπώς, η εκτίμηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από τον προσδιορισμό του ολοκληρώματος της παραπάνω σχέσης για το χρονικό διάστημα  $t=8760$  ώρες.

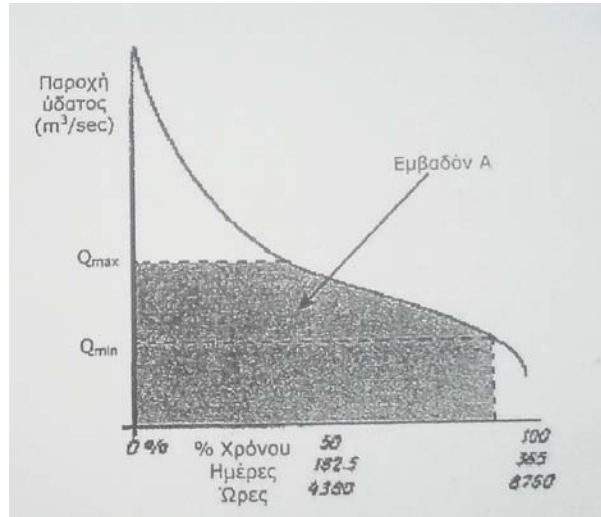
Στο πλαίσιο των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών η ομαλή λειτουργία του υδροτροβίλου περιορίζεται μεταξύ της μέγιστης παροχής  $Q_{max}$  (παροχή λειτουργίας) και της αντίστοιχης ελάχιστης τιμής  $Q_{min}$ . Επομένως, κατά τον υπολογισμό του ζητούμενου ολοκληρώματος οι τιμές της παροχής ύδατος λαμβάνονται ίσες με τη μέγιστη  $Q_{max}$  στην περίπτωση που ξεπερνούν την συγκεκριμένη τιμή ( $Q_i > Q_{max}$ ) και η διαφορά  $Q_i - Q_{max}$  παραμένει αναξιοποίητη. Παράλληλα, παροχές ύδατος μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής ( $Q_{min} < Q_i < Q_{max}$ ) παραμένουν ως έχουν και παροχές μικρότερες της ελάχιστης τιμής ( $Q_i < Q_{min}$ ) λαμβάνονται ίσες με μηδέν. Επομένως, η τιμή του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ζητούμενου ολοκληρώματος προκύπτει ίση με το εμβαδόν της περιοχής A της καμπύλης διάρκειας παροχής του Σχήματος 6.3.

Η τελική εκτίμηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει επομένως με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$E(kWh) = 9,81 \cdot H \cdot n \cdot A \quad (6.10)$$



**Σχήμα 6.3** Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας με χρήση καμπύλης διάρκειας παροχής[1]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## *Οικονομοτεχνική ανάλυση μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού*

### **7.1 Εισαγωγή**

Η οικονομική ανάλυση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου έχει ως αντικείμενο την εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου η οποία είναι μια σύγκριση των κοστών και των οφελών του που επιτρέπει στους επενδυτές να επιλέξουν αν το έργο θα αναπτυχθεί ή θα εγκαταλειφθεί. Η οικονομική ανάλυση μπορεί να γίνει είτε συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης του πληθωρισμού ή παραβλέποντας την. Αξιολογώντας τα οφέλη και τα κόστη σε σταθερή νομισματική αξία έχουμε το πλεονέκτημα να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ανεξάρτητα του ποσοστού πληθωρισμού.

Η οικονομική ανάλυση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού διαφέρει από εκείνη ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού λόγω του ότι το αρχικό κόστος επένδυσης του ανα kW είναι υψηλότερο αλλά το κόστος λειτουργίας του είναι εξαιρετικά χαμηλό, αφού δεν απαιτείται αγορά καυσίμου.

Η κοινωνικοοικονομική βιωσιμότητα και η οικονομική βιωσιμότητα αποτελούν τις συνιστώσες για κάθε υδροηλεκτρικό έργο υπό μελέτη.

Η **κοινωνικοοικονομική βιωσιμότητα (socioeconomic feasibility)** έγκειται στον προσδιορισμό των οφελών και των δαπανών του σχεδιαζόμενου έργου από την σκοπιά της κοινωνίας ως συνόλου, και πρέπει να

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

συμπεριλαμβάνει και τα άμεσα (υλικά) και τα έμμεσα (άυλα) οφέλη και κόστη του έργου αυτού. Εντούτοις, μόνο τα άμεσα οφέλη και κόστη μπορούν να εκτιμηθούν από την σκοπιά της λογιστικής. Το σχεδιαζόμενο ενεργειακό έργο χαρακτηρίζεται οριστικά ως κοινωνικοοικονομικά βιώσιμο στην περίπτωση κατά την οποία τα συνολικά κέρδη, άμεσα και έμμεσα, υπερβαίνουν τα κόστη ανάπτυξης και λειτουργίας.

Η **οικονομική βιωσιμότητα (financial feasibility)**, εντούτοις, εκφράζει αν τα άμεσα οφέλη του σχεδιαζόμενου έργου θα είναι επαρκή προκειμένου να αποσβέσουν την δανειοδότηση και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης και να ικανοποιηθεί το επιτόκιο και οι λοιπές οικονομικές υποχρεώσεις. Η συγκεκριμένη συνιστώσα της οικονομικής ανάλυσης συνεπώς, εξετάζεται από την σκοπιά του χρηματοδότη του σχεδιαζόμενου έργου και ορίζεται σύντομα ως η κατάσταση ταμειακής ροής (cash flow)[3].

Ένα κοινωνικοοικονομικά βιώσιμο σχεδιαζόμενο έργο δεν είναι απαραίτητα και οικονομικά βιώσιμο. Παραδείγματος χάριν, ένα σχεδιαζόμενο υδροηλεκτρικό έργο μπορεί να έχει τα αξιοσημείωτα έμμεσα οφέλη όπως ο έλεγχος των πλημμυρών ή παροχή επιλογών αναψυχής λόγους για τους οποίους ο χρηματοδότης δεν μπορεί να αποκομίσει τα έσοδα. Αυτά τα έμμεσα οφέλη καθιστούν το σχεδιαζόμενο έργο κοινωνικοοικονομικά βιώσιμο, αλλά τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του σχεδιαζόμενου έργου μπορεί να είναι ανεπαρκή ώστε να υποστηρίξουν το απαιτούμενο χρέος. Αντιστρόφως, ένα σχεδιαζόμενο έργο μπορεί να είναι δείχνει οικονομικά βιώσιμο αλλά να μην είναι κοινωνικοοικονομικά βιώσιμο εξαιτίας της υπεροχής των κοινωνικών κοστών έναντι των αντίστοιχων οφελών.

Το κριτήριο της οικονομικής βιωσιμότητας εξαρτάται από το αν το μικρό υδροηλεκτρικό έργο τροφοδοτεί ένα διασυνδεδεμένο ή ένα ηλεκτρικό αυτόνομο δίκτυο.

Αν το σχεδιαζόμενο έργο θα τροφοδοτήσει ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο τότε πρόκειται για μια επένδυση η οποία θα πρέπει να είναι αποδοτική συγκρινόμενη με άλλη εναλλακτική τοποθέτηση των χρημάτων. Όταν το σχεδιαζόμενο υδροηλεκτρικό έργο συνδυάζεται με άλλες χρήσεις και διευθετήσεις όπως η άρδευση, η τουριστική αξιοποίηση κλπ. Η ανάλυση της οικονομικής απόδοσης του δεν είναι απλή. Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την έντονη διακύμανση της φυσικής απορροής κατά την διάρκεια ενός έτους καθώς και την διακύμανση της από έτος σε έτος τίθενται έντονα το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του έργου και επιλογής του μεγέθους και του πλήθους των υδροστροβίλων ώστε να μεγιστοποιηθεί η οικονομική του απόδοση, ανεξάρτητα της παραγόμενης ανά έτος ενέργειας και της καμπύλης διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας[3].

Στην περίπτωση κατά την οποία ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο προβλέπεται να καλύπτει εν μέρει ή στο σύνολο του ένα αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο, η οικονομική του απόδοση θα πρέπει να συγκριθεί με εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας[2].

Η οικονομική αποτίμηση ένταξης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού σε ηλεκτρικό δίκτυο συνίσταται στην ολοκλήρωση της οικονομικής και κοινωνικοοικονομικής ανάλυσης και της **μελέτης ευαισθησίας (sensitivity analysis)**. Η τελευταία αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση των οικονομικών χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου έργου μέσω της διερεύνησης εναλλακτικών χρηματοδοτικών σεναρίων, και συνεπώς οδηγεί στον περιορισμό του τελικού ρίσκου της απαιτούμενης επένδυσης [1].

Στο πλαίσιο της οικονομικής αποτίμησης έργου ανάπτυξης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού προτείνεται η μελέτη πολλαπλών σχεδίων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

---

συγκεκριμένων υδροδυναμικών τοποθεσιών. Η οικονομική και κοινωνικοοικονομική ανάλυση των συγκεκριμένων περιπτώσεων διαιρείται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ✚ Ανάλυση συγκεκριμένης τοποθεσίας προκειμένου να καθορισθούν η βέλτιστη διαμόρφωση και η αντίστοιχη ενεργειακή δυνατότητα στο πλαίσιο δεδομένων υδραυλικών πηγών και απαιτήσεων φορτίου. Συγκεκριμένα, απαιτείται η μελέτη των μονάδων υδροστροβίλου και γεννήτριας, διαφορετικών μεγεθών στις περιπτώσεις ύπαρξης διακυμάνσεων στην διαθεσιμότητα ύδατος και τη ζήτηση ενέργειας, του μεγέθους πιθανού ταμιευτήρα, του ύψους του χρησιμοποιούμενου φράγματος κτλ.
- ✚ Ανάλυση προκειμένου να συγκριθεί το σχεδιαζόμενο υδροηλεκτρικό έργο με εναλλακτικές εγκαταστάσεις (θερμικοί σταθμοί, γεννήτριες diesel κτλ.).
- ✚ Ανάλυση προκειμένου να καθορισθεί η βέλτιστη υδροδυναμική τοποθεσία ανάπτυξης του έργου δεδομένων διαφόρων υδραυλικών πηγών, ενεργειακών αναγκών και γεωγραφικών περιορισμών.
- ✚ Ανάλυση εφαρμογής εναλλακτικών οικονομικών σχεδίων.
- ✚ Ανάλυση πολλαπλών χρήσεων, η οποία αποσκοπεί στον προσδιορισμό των κοστών και οφελών σε συνδυασμό με επιπρόσθετα έργα, όπως άρδευσης, ελέγχου πλημμυρών και παροχής πόσιμου ύδατος.

Θεμελιώδη αρχή της διεξαγωγής των παραπάνω αναλύσεων αποτελεί η σύγκριση εναλλακτικών λύσεων στο πλαίσιο ισοδύναμης βάσης, όπως η σταθερή ενεργειακή παραγωγή, το χρονικό όριο μελέτης και οι σταθερές χρηματοοικονομικές μεταβλητές. Η διαδικασία συνεπώς της κοινωνικοοικονομικής, οικονομικής ανάλυσης και ανάλυσης ευαισθησίας των εναλλακτικών επιλογών ανάπτυξης του σχεδιαζόμενου υδροηλεκτρικού έργου ολοκληρώνεται μέσω των ακόλουθων σταδίων [3]:

- ✚ Καθορισμός των θεμελιωδών στοιχείων της οικονομικής ανάλυσης, όπως η περίοδος της ανάλυσης, το προεξοφλητικό επιτόκιο, το κόστος του απαιτούμενου κεφαλαίου και ανάλογων οικονομικών μεταβλητών.
- ✚ Εκτίμηση των κοστών του σχεδιαζόμενου έργου, συμπεριλαμβανομένων των κοστών κεφαλαίου, των αντίστοιχων εξασφάλισης άδειας, και των κοστών λειτουργίας, επισκευών και αντικατάστασης εξοπλισμού. Η εκτίμηση των αμοιβών των μηχανικών, των εξόδων εκοκαφών, κατασκευής, εργατικού δυναμικού και υλικών, κάλυψης νομικών απαιτήσεων και επιτοκίων κρίνεται αναγκαίο να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο του επιθυμητού χρονοδιαγράμματος κατασκευής του έργου.
- ✚ Προσδιορισμός των οφελών του σχεδιαζόμενου έργου, κυρίως των αναμενόμενων εσόδων από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (καθώς και από την παροχή ύδατος προς πόση ή άρδευση στην περίπτωση έργου πολλαπλών χρήσεων).
- ✚ Καθορισμός της πηγής χρηματοδότησης και των όρων πιθανής δανειοδότησης. Στην περίπτωση κατασκευής του έργου από φορέα διαφορετικό από τον τελικό χρήστη του έργου, το συμβόλαιο για την πώληση της παραγόμενης ενέργειας πρόκειται να αποτελέσει το κλειδί για την επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας.
- ✚ Επιλογή κατάλληλης μεθοδολογίας οικονομικής ανάλυσης και καθορισμός της οικονομικής και κοινωνικοοικονομικής βιωσιμότητας.
- ✚ Εκτέλεση μελέτης ευαισθησίας προκειμένου να καθορισθεί η επίδραση παραγόντων όπως η ισχύς του έργου, το προεξοφλητικό επιτόκιο, η

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

χρηματοδότηση και η δυνατότητα αποθήκευσης στο ύψος των κοστών και οφελών της εγκατάστασης.

Τα συγκεκριμένα στάδια της οικονομικής ανάλυσης εξετάζονται διεξοδικά στη συνέχεια.

### 7.2 Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης

Για την οικονομική ανάλυση σχεδιαζόμενου έργου ανάπτυξης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού καθίσταται αρχικά αναγκαία η επεξήγηση μερικών θεμελιωδών ορισμών της δημόσιας οικονομίας και του συγκεκριμένου έργου. Τα παρακάτω οικονομικά μεγέθη κρίνουν κατά πολύ την βιωσιμότητα του έργου.

*Επιτόκιο δανεισμού (interest rate):*

Το επιτόκιο δανεισμού υπεισέρχεται στην χρηματοδοτική ανάλυση καθώς εκφράζει την ποσοστιαία προσαύξηση που πρέπει να καταβληθεί στον δανειοδότη (πχ. την τράπεζα) για το ποσό του δανείου με το οποίο καλύπτεται μέρος της συνολικής επένδυσης[2]. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος το οποίο ορίζεται από την κεφαλαιαγορά και διακυμαίνεται με τις μεταβολές του επιπέδου της οικονομίας και την κυβερνητική δημοσιονομική και νομισματική πολιτική. Το επιτόκιο δανεισμού σχετίζεται με την πηγή της δανειοδότησης, με μικρότερες τιμές να διατίθενται από τους δημόσιους δανειοδότες και υψηλότερες τιμές από εμπορικούς δανειοδότες και χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει το χρέος. Το επιτόκιο δανεισμού αποσκοπεί στην εξακρίβωση της οικονομικής εφικτότητας[3].

*Προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate):*

Το προεξοφλητικό επιτόκιο λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της σημερινής αξίας ενός χρηματικού ποσού που θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί στο μέλλον και χρησιμοποιείται στην ανάλυση της κοινωνικοοικονομικής βιωσιμότητας[2]. Αποτελεί το επιτόκιο επιστροφής (rate of return) το οποίο είναι δυνατό να εξασφαλισθεί επενδύοντας το κόστος κεφαλαίου (capital cost) του σχεδιαζόμενου έργου σε μια επένδυση παρόμοιου ρίσκου ή ενός εναλλακτικού έργου[3]. Συνήθως λαμβάνεται υψηλότερο από το επιτόκιο δανεισμού (interest rate) έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι οικονομικές αβεβαιότητες και η αβεβαιότητα της παραγωγής κατά την διάρκεια ζωής και λειτουργίας του έργου. Η τιμή του εθνικού προεξοφλητικού επιτοκίου διαφέρει μεταξύ των χωρών και τις περισσότερες περιπτώσεις καθορίζεται στο 10%.

*Βαθμός φορολογίας (scale of taxation):*

Ο βαθμός φορολογίας του σχεδιαζόμενου έργου αντιπροσωπεύει το ποσό των οικονομικών οφελών που προκύπτουν από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και αξιώνει το κράτος.

*Οικονομική ή ωφέλιμη διάρκεια ζωής (economic or useful life):*

Η διάρκεια ζωής ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου είναι της τάξεως των 15-30 ετών, ενώ η διάρκεια ζωής των έργων πολιτικού μηχανικού είναι τουλάχιστον 50 χρόνια. Στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου και ανάλογα με τις συνθήκες θα πρέπει να αποφασισθεί είτε η ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είτε η πλήρης ανακατασκευή του. Η οικονομική ανάλυση θα πρέπει να γίνεται για ένα χρονικό ορίζοντα της τάξεως των 20 ετών.

Στην οικονομική βιωσιμότητα του μικρού υδροηλεκτρικού έργου σημαντικό ρόλο παίζει η διάρκεια κατασκευής του, δηλαδή η περίοδος κατά την οποία υπάρχουν υψηλές δαπάνες αλλά μηδενικά έσοδα. Συνήθως η διάρκεια



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

κατασκευής ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου είναι της τάξεως του ενός με δύο έτη με περισσότερο πιθανή αυτή των 2 ετών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διάρκεια των μελετών και των διαδικασιών δανειοδότησης είναι τουλάχιστον δύο έτη στα οποία υπάρχουν δαπάνες. Στην πράξη και για λόγους απλοποίησης ως αφετηρία της οικονομικής ανάλυσης θεωρείται συνήθως η έναρξη κατασκευής του έργου και όχι η έναρξη των διαδικασιών και μελετών[2].

*Πληθωρισμός (inflation):*

Ως πληθωρισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αύξησης (θετικός πληθωρισμός) ή μείωσης (αρνητικός πληθωρισμός) των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών με το πέρασμα του χρόνου, κατά τρόπο μη ομοιόμορφο για κάθε ένα από αυτά. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας όσο και τις διεθνείς εξελίξεις. Ιδιαίτερα στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, των οποίων η διάρκεια ζωής είναι σημαντική, η εξέλιξη του πληθωρισμού σε τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα είναι δύσκολο να προβλεφθεί[2].

*Περίοδος οικονομικής έρευνας (calculation period):*

Ως περίοδος οικονομικής έρευνας λαμβάνεται η οικονομική ζωή του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα η εναπομένουσα αξία των έργων πολιτικού μηχανικού να υπολογίζεται ως μελλοντικό όφελος στην ανάλυση οφέλους προς κόστος. Στην περίπτωση λήψης περιόδου οικονομικής έρευνας ίσης με την αντίστοιχη οικονομική ζωή των δομικών έργων, τα έξοδα για την αντικατάσταση τμημάτων του εξοπλισμού θεωρούνται μελλοντική επένδυση κεφαλαίου[19].

### 7.3 Κόστος μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού

Για την διερεύνηση του κόστους ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού απαιτείται να ορισθούν το συνολικό και τα επιμέρους κόστη που προσδιορίζουν το χαρακτήρα και την ποιότητα του έργου.

*Συνολικό κόστος (total cost)*

Ως συνολικό κόστος της εγκατάστασης καλείται το συνολικό ποσό της απαιτούμενης επένδυσης στο πλαίσιο της προετοιμασίας, κατασκευής και λειτουργίας του έργου συμπεριλαμβανομένου του τόκου κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου και προσδιορίζεται με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$C_0 = C_1 P + C_2 \quad (7.1)$$

όπου  $C_0$  είναι το συνολικό κόστος της εγκατάστασης σε €,  $C_1$  το μοναδιαίο κόστος της εγκατάστασης (€/kW),  $P$  η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης (kW) και  $C_2$  το κόστος του έργου ανεξάρτητο της παραγόμενης ισχύος (€). Η συγκεκριμένη παράμετρος σχετίζεται άμεσα με το αρχικό κόστος της εγκατάστασης, το κόστος του κεφαλαίου επένδυσης, το λειτουργικό ή ετήσιο κόστος και το χρόνο ζωής του έργου[1].

*Αρχικό κόστος (initial cost)*

Το αρχικό κόστος ενός σχεδιαζόμενου υδροηλεκτρικού έργου σχετίζεται με την εγκατεστημένη ισχύ και το δυναμικό της διαθέσιμης υδατόπτωσης και περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους κόστη:

1. Κόστος απαιτούμενων μετρήσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

---

2. Κόστος αγοράς γεωγραφικής έκτασης.
3. Κόστος μελέτης.
4. Κόστος εξασφάλισης άδειας και κάλυψης νομικών αμοιβών.
5. Κόστος έργων πολιτικού μηχανικού (κατασκευή δρόμων, εκσκαφές, κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα).
6. Κόστος αγοράς ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού (υδροληψία, αγωγοί πτώσης, πύλες και βαλβίδες, υδροστρόβιλοι, πολλαπλασιαστές στροφών, γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς).
7. Κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης εξοπλισμού.
8. Κόστος κατασκευής υποσταθμού παραγωγής.
9. Κόστος επιστημονικού και εργατικού δυναμικού
10. Κόστος διεξαγωγής δοκιμών και μετρήσεων στο πλαίσιο διεθνών κανονισμών και προδιαγραφών.
11. Κόστος φόρων και εισφορών,
12. Κόστος ασφάλισης
13. Κόστος πρόβλεψης μελλοντικών απρόβλεπτων εξόδων.

Διαπιστώνεται ότι το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού αποτελεί συνήθως περίπου το μισό του συνολικού κόστους του έργου και εξαρτάται από τη μορφολογία της περιοχής, τη φύση των υλικών και το ύψος των τοπικών μισθών, τη στιγμή που το αντίστοιχο κόστος του εξοπλισμού προσδιορίζεται σε λιγότερο του μισού της απαιτούμενης επένδυσης. Τα απρόβλεπτα έξοδα και τα κόστη έργων ηλεκτρολόγου μηχανικού υπολογίζονται ως σταθερά ποσοστά του συνολικού κόστους του έργου. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την διάρκεια προσδιορισμού των παραπάνω κοστών, προκειμένου να εξασφαλισθεί η κατάλληλη χρηματοδότηση για την κάλυψη των αντίστοιχων οικονομικών αναγκών[3].

### *Ετήσιο κόστος λειτουργίας (annual operation cost)*

Η ολοκλήρωση της κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού έργου οδηγεί στην αντιμετώπιση του ετήσιου κόστους λειτουργίας του έργου το οποίο περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους κόστη [3]:

1. Κόστος οφειλών (ετήσια πληρωμή δανείων).
2. Μισθοδοσία προσωπικού.
3. Φόροι και ασφάλιστρα.
4. Ανατίμηση γης.
5. Πληρωμές δικαιωμάτων αξιοποίησης υδάτινων πόρων.
6. Έξοδα τακτικών επισκευών.
7. Κόστος απρόβλεπτων επισκευών (αντικαταστάσεις εξοπλισμού και ανταλλακτικά).
8. Κόστος διοικητικού και διαχειριστικού ελέγχου.
9. Κόστος απαιτούμενης ενέργειας για λειτουργία εγκατάστασης.
10. Έξοδα γενικής φύσης (εξοπλισμός μηχανογράφησης, μετακινήσεων προσωπικού κτλ.).

### *Κόστος κεφαλαίου επένδυσης (capital cost)*

Ο όρος κόστος κεφαλαίου επένδυσης σχετίζεται με τους τόκους που προκύπτουν κατά την διάρκεια ανάπτυξης του σχεδιαζόμενου έργου, και με το χρόνο απόσβεσης του αντίστοιχου ποσού. Παράλληλα, επηρεάζεται άμεσα από το επιτόκιο δανειοδότησης και το χρόνο ζωής της εγκατάστασης.

Ταυτόχρονα, το λειτουργικό κόστος των μικρών υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων παρουσιάζεται περιορισμένο σε σύγκριση με το αντίστοιχο των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, λόγω της απουσίας ανάγκης αγοράς καυσίμων [3]. Τη στιγμή ωστόσο που το λειτουργικό κόστος μειώνεται κατά τρεις με τέσσερις φορές περίπου στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

σταθμών, το αντίστοιχο αρχικό κόστος παρουσιάζεται αυξημένο κατά τρεις φορές από το εκείνο των μονάδων νηξελογεννητριών.

*Κόστος ζωής της παραγόμενης ενέργειας (life cost of energy)*

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της σχεδιαζόμενης επένδυσης ιδιαίτερα σημαντικός κρίνεται ο προσδιορισμός του Κόστους ζωής της παραγόμενης ενέργειας (€/kWh) της εγκατάστασης. Ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού κόστους και του κόστους λειτουργίας του έργου προς την παραγόμενη ενέργεια για το σύνολο της περιόδου οικονομικής έρευνας.

*Ειδικό κόστος κεφαλαίου (specific capital cost)*

Το ειδικό κόστος κεφαλαίου (€/kWh) ορίζεται ως το πηλίκο του συνολικού κόστους της επένδυσης προς την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

*Αρνητικά κόστη (negative costs)*

Τα αρνητικά κόστη προκύπτουν από τις σχετικές φοροαπαλλαγές.

Στο πλαίσιο της οικονομικής ανάλυσης έργων μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών ο προσδιορισμός των παραπάνω τιμών κόστους συνοδεύεται από τον καθορισμό της χρονικής διάρκειας των αντίστοιχων εργασιών. Συγκεκριμένα, απαιτείται η διευκρίνιση της περιόδου κατασκευής της εγκατάστασης, της αντίστοιχης των έργων πολιτικού μηχανικού και λειτουργίας του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού.

### 7.4 Οφέλη μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού

Η ανάπτυξη και λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού συνοδεύεται από την αποκόμιση οφελών τα οποία καθορίζουν το αν το έργο θα αποδειχθεί βιώσιμο. Τα οικονομικά οφέλη διακρίνονται σε άμεσα και έμμεσα:

Τα **άμεσα οφέλη** προκύπτουν από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και προσδιορίζονται με την βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$B_j = E_j \cdot p \quad (7.2)$$

Όπου  $B_j$  είναι το ετήσιο οικονομικό όφελος (annual benefit) από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας (€),  $E_j$  η είναι η ετήσια παραγόμενη και προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια χωρίς της απώλειες μεταφοράς και διανομής της (kWh) και  $p$  η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh). Ο προσδιορισμός του οικονομικού οφέλους του σχεδιαζόμενου έργου σχετίζεται με τη διαμόρφωση των τιμών πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, για το σύνολο των ετών λειτουργίας της και οι οποίες απαιτείται να υπερβαίνουν το αντίστοιχο κόστος παραγωγής.

Τα έμμεσα οφέλη περιλαμβάνουν την αύξηση της τοπικής αγροτικής παραγωγής με τον έλεγχο της άρδευσης, την παροχή αυξημένων εργασιακών ευκαιριών στον τοπικό πληθυσμό, την προσέλκυση βιομηχανικών μονάδων στο πλαίσιο της χρήσης της παραγόμενης ενέργειας κτλ.[3]. Τα έμμεσα οφέλη αποτελούν αντικείμενο της κοινωνικοοικονομικής ανάλυσης του σχεδιαζόμενου έργου αντίθετα από τα άμεσα που είναι αντικείμενο της οικονομικής ανάλυσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

### 7.5 Χρηματοδότηση μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Σημαντικό στάδιο στην πορεία οικονομικής ανάλυσης σχεδιαζόμενου υδροηλεκτρικού σταθμού αποτελεί ο προσδιορισμός της χρηματοδότησης του έργου. Ενεργειακά έργα, με έντονο αναπτυξιακό χαρακτήρα και μεγάλη συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος, όπως τα μικρά υδροηλεκτρικά, συνήθως εντάσσονται σε εθνικά ή αναπτυξιακά προγράμματα. Έτσι ένα μέρος της επένδυσης καλύπτεται από επιδότηση και το υπόλοιπο από ίδια κεφάλαια και με τη χρήση επιχορήγησης κεφαλαίου και επιτοκίου. Σε περίπτωση δανειοδότησης προκύπτει το αντίστοιχο κόστος, ως το απαιτούμενο κεφάλαιο για την εξυπηρέτηση του δανείου. Το αντίστοιχο κεφάλαιο ετήσιων ισόποσων δόσεων εξόφλησης του δανείου (τοκοχρεωλυτική απόσβεση) δίνεται από την ακόλουθη σχέση[22]:

$$L_j = L_0 \cdot CRF = L_0 \frac{ir(1+ir)^n}{(1+ir)^n - 1} \quad (7.3)$$

όπου  $L_j$  είναι η ετήσια δόση εξόφλησης του δανείου (τοκοχρεωλυτική δόση) (€),  $L_0$  το συνολικό κεφάλαιο του δανείου (€),  $CRF$  ο συντελεστής τοκοχρεωλυτικής απόσβεσης,  $ir$  το επιτόκιο δανεισμού και  $n$  η χρονική περίοδος δανειοδότησης.

Η διαδικασία της οικονομικής ανάλυσης του έργου απαιτεί τον προσδιορισμό των ποσοστών κάλυψης της επένδυσης από τις αντίστοιχες χρηματοδοτικές πηγές, κατά την χρονική διάρκεια δανειοδότησης και επιχορήγησης και του αριθμού των ετών αποπληρωμής της σχεδιαζόμενης επένδυσης.

### 7.6 Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης

Ο προσδιορισμός των θεμελιωδών οικονομικών στοιχείων, ο υπολογισμός των στοιχείων κόστους και οφέλους και η επιλογή κατάλληλης χρηματοδοτικής μεθόδου επιτρέπουν τον καθορισμό των οικονομικών και κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών του σχεδιαζόμενου υδροηλεκτρικού έργου. Τα συγκεκριμένα κριτήρια οικονομικής ανάλυσης διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά, σε σχέση με τη θεώρηση των κοστών και οφελών της εξεταζόμενης εγκατάστασης και του χρονοδιαγράμματος των ταμειακών ροών. Ταυτόχρονα, τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων αποτελούν αντικείμενο της αντίστοιχης μελέτης των σχεδιαζόμενων εγκαταστάσεων.

Αν και το κριτήριο της επανάκτησης κεφαλαίου είναι η ευκολότερη στον υπολογισμό, οι περισσότεροι λογιστές θα προτιμούσαν να εξετάσουν την καθαρή παρούσα αξία και τον εσωτερικό συντελεστή απόσβεσης. Οι τελευταίες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τον μέγιστο αριθμό συντελεστών, και ειδικότερα, είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να επιδέχονται την χρονική αξία των χρημάτων (time value of money)[6].

Κατά την σύγκριση των διαφορετικών επενδύσεων σχεδιαζόμενων υδροηλεκτρικών έργων η πιο απλή μέθοδος είναι η σύγκριση του λόγου της συνολικής επένδυσης προς την εγκατεστημένη ισχύ ή του λόγου της συνολικής επένδυσης προς την ετήσια παραγωγή ενέργειας για κάθε σχεδιαζόμενο έργο. Αυτά τα κριτήρια δεν καθορίζουν την κερδοφορία ενός δοσμένου σχεδιαζόμενου έργου λόγω του ότι τα έσοδα δεν λαμβάνονται υπόψη και στην πραγματικότητα αποτελούν μια αρχική αξιολόγηση[6].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Για να είναι δυνατή η εφαρμογή μιας μεθόδου οικονομικής ανάλυσης σε ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο θα πρέπει να είναι γνωστά τουλάχιστον τα ακόλουθα μεγέθη[2],[3]:

1. Εγκατεστημένη ισχύς (Installed capacity)
2. Ετήσια παραγωγή ενέργειας (Annual energy production)
3. Συντελεστής φορτίου (Load factor)
4. Κόστος κεφαλαίου (Capital cost)
5. Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operating and maintenance cost)
6. Επιτόκιο δανεισμού (Interest rate)
7. Προεξοφλητικό επιτόκιο (Discount rate)
8. Περίοδος κατασκευής (Construction period)
9. Περίοδος χρηματοδότησης (Financing period)
10. Τιμολόγιο πώλησης της ενέργειας (Value of energy)
11. Κόστος συστήματος διανομής (Cost of distribution system)
12. Ποσοτικά κοινοτικά οφέλη (Quantifiable community benefits)

Στην συνέχεια εξετάζονται αναλυτικά τα κριτήρια οικονομική ανάλυσης.

### 7.6.1 Στατικά κριτήρια οικονομικής ανάλυσης

#### 7.6.1.1 Κριτήριο επανάκτησης κεφαλαίου (payback period)

Η μέθοδος **επανάκτησης κεφαλαίου (payback period) (PBP)** προσδιορίζει τον αριθμό των ετών που απαιτούνται προκειμένου να καλυφθεί το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης από τα προκύπτοντα οικονομικά οφέλη. Ο απαιτούμενος αριθμός ετών καλείται περίοδος επανάκτησης, ανάκαμψης ή εξισορρόπησης.

Εναλλακτικά, η συγκεκριμένη περίοδος αντιστοιχεί στο νεκρό σημείο της επένδυσης, το χρονικό διάστημα δηλαδή κατά το οποίο τα οικονομικά οφέλη της εγκατάστασης ισοδυναμούν με το εναπομένον χρέος. Στην περίπτωση περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου  $n$  ετών, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$I_0 = \sum_{j=1}^n NB_j \quad (7.4)$$

όπου  $I_0$  είναι το αρχικό ύψος της επένδυσης (initial invested capital)(€),  $NB_j$  είναι το καθαρό ετήσιο όφελος (net annual benefit) (€). Επομένως η περίοδος επανάκτησης κεφαλαίου θα υπολογίζεται ως εξής:

$$PBP = \frac{\text{investment\_cost}}{\text{net\_annual\_benefit}} \quad (7.5)$$

Το καθαρό ετήσιο όφελος προσδιορίζεται με την βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$NB_j = (1 - st)(B_j - C_j - L_j) + st \cdot \frac{I_0}{n} \quad (7.6)$$

όπου  $st$  είναι ο βαθμός φορολογίας (scale of taxation),  $B_j$  είναι το ετήσιο οικονομικό όφελος όπως αυτό προκύπτει από την σχέση 7.2 (€),  $C_j$  είναι το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης (€),  $L_j$  είναι η ετήσια τοκοχρεωλυτική δόση όπως δίνεται από την σχέση 7.3,  $I_0$  είναι το αρχικό ύψος της επένδυσης (€) και  $n$  η συνολική χρονική διάρκεια οικονομικής έρευνας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Το συγκεκριμένο κριτήριο παραβλέπει συνήθως το ευκαιριακό κόστος κεφαλαίου (opportunity cost of capital). Το ευκαιριακό κόστος κεφαλαίου είναι το κέρδος που θα μπορούσε να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας πόρους για μια εναλλακτική επένδυση. Το συνολικό κόστος της επένδυσης στην προκειμένη περίπτωση περιλαμβάνει συνήθως τα αρχικά κόστη (έργα πολιτικού μηχανικού, υδροηλεκτρικός εξοπλισμός) και τα οικονομικά οφέλη είναι τα προκύπτοντα καθαρά ετήσια εισοδήματα που αναμένονται από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μετά από αφαίρεση των κοστών λειτουργίας και συντήρησης, σε σταθερή λογιστική βάση. Ο λόγος επανάκτησης κεφαλαίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 7 έτη προκειμένου να θεωρηθεί το μικρό υδροηλεκτρικό σχεδιαζόμενο έργο κερδοφόρο.

Εντούτοις, η ανάλυση της μεθόδου επανάκτησης κεφαλαίου δεν συγκρίνει την επιλογή από διαφορετικές τεχνικές λύσεις για την ίδια εγκατάσταση ή την επιλογή μεταξύ διαφόρων σχεδιαζόμενων έργων. Στην πραγματικότητα δεν διερευνά τις ταμειακές ροές (cash flows) μετά το πέρας της περιόδου επανάκτησης κεφαλαίου και συνεπώς δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της απόδοσης της σχεδιαζόμενης επένδυσης καθ' όλη την διάρκεια ζωής της.

Υπό την ανάλυση της μεθόδου επανάκτησης κεφαλαίου, σχεδιαζόμενα έργα ή αγορές με μικρότερες περιόδους επανάκτησης κεφαλαίου ταξινομούνται υψηλότερα από ότι εκείνα με μεγαλύτερες περιόδους επανάκτησης. Η υπόθεση είναι τα σχεδιαζόμενα έργα με μικρότερη περίοδο επανάκτησης είναι πιο ρευστοποιήσιμα, και έτσι αποτελούν λιγότερο ρίσκο.

Για τον επενδυτή, όταν χρησιμοποιούμε αυτή την μέθοδο είναι φρόνιμο να γίνουν αποδεκτά τα σχεδιαζόμενα έργα που ανακτούν την επένδυση, κι αν υπάρχει μια επιλογή, επιλέγει το σχεδιαζόμενο έργο το οποίο έχει την μικρότερη περίοδο επανάκτησης. Αυτό το κριτήριο είναι απλό να χρησιμοποιηθεί και είναι ελκυστικό αν υπάρχει θέμα ρευστότητας αλλά δεν επιτρέπει την χρονική αξία του χρήματος για του επενδυτές.

### 7.6.1.2 Κριτήριο απόδοσης επένδυσης (return of investment method)

Η **απόδοση επένδυσης (return of investment) (ROI)** υπολογίζει τα μέσα ετήσια οφέλη, τις καθαρές ετήσιες δαπάνες, όπως η απόσβεση, ως ένα ποσοστό της αρχικής εσωτερικής αξίας της μετοχής της επένδυσης. Ορίζεται ως ο λόγος της ετήσιας απόδοσης της επένδυσης προς το κεφαλαίο επένδυσης, με αποτέλεσμα να προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$ROI = \frac{NB_i}{I_0} \cdot 100 \quad (7.7)$$

Η χρήση της απόδοσης επένδυσης μπορεί να μας δώσει μια γρήγορη εκτίμηση των καθαρών οφελών του σχεδιαζόμενου έργου και μπορεί να παρέχει μια βάση για τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιαζόμενων υδροηλεκτρικών έργων. Υπό την ανάλυση της μεθόδου, εξετάζονται τα κέρδη για ολόκληρη την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του σχεδιαζόμενου έργου (αντίθετα με την μέθοδο επανάκτησης κεφαλαίου). Ωστόσο, η μέθοδος απόδοσης επένδυσης (ROI) χρησιμοποιεί ως δεδομένα τα έσοδα αντί τις ταμειακές ροές και αγνοεί εντελώς την χρονική αξία του χρήματος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

### 7.6.2 Δυναμικά κριτήρια οικονομικής ανάλυσης

Αυτά τα κριτήρια οικονομικής ανάλυσης λαμβάνουν υπόψη τα συνολικά κόστη και οφέλη καθ' όλη την διάρκεια ζωής της επένδυσης και τις ταμειακές ροές.

#### 7.6.2.1 Κριτήριο καθαρής παρούσας αξίας (net present value)

##### *Αναγωγή σε παρούσα αξία*

Η χρονική αξία του χρήματος είναι η έννοια ότι ένα χρηματικό ποσό που λαμβάνεται σήμερα έχει μεγαλύτερη αξία από την αντίστοιχη μελλοντική λόγω των επιτοκίων. Η ανάλυση της χρονικής αξίας του χρήματος γενικά περιλαμβάνει την σχέση ανάμεσα σε ένα ορισμένο χρηματικό ποσό, μια ορισμένη χρονική περίοδο και σε έναν ορισμένο ανατοκισμό. Ένα επενδύσιμο σχεδιαζόμενο έργο εξετάζει τα κόστη και τα οφέλη που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Σε κάθε οικονομική ανάλυση που περιλαμβάνει οικονομική αξία υπάρχουν πάντα δύο μεταβλητές, το χρήμα και ο χρόνος. Ένα ορισμένο χρηματικό ποσό που καταβάλλεται ή παραλαμβάνεται σε ορισμένη χρονική στιγμή έχει διαφορετική αξία αν καταβάλλεται ή παραλαμβάνεται σε άλλη χρονική στιγμή.

Ο όρος **παρούσα αξία (present value)** αντιπροσωπεύει την τρέχουσα αξία ενός μελλοντικού χρηματικού ποσού ή μιας σειράς αποδοχών αποτιμημένη σε ένα δοσμένου επιτόκιο δανεισμού. Προκειμένου να καθορισθεί η παρούσα αξία (PV) ενός μελλοντικού χρηματικού ποσού ή η μελλοντική αξία (FV), σε ένα δοσμένο προεξοφλητικό επιτόκιο ( $r$ ) για έναν αριθμό  $n$  ετών χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση[8]:

$$PV_0 = \frac{1}{(1+r)^n} FV_n \quad (7.8)$$

Ο όρος  $\frac{1}{(1+r)^n}$  καλείται **συντελεστής παρούσας αξίας (PVF)**. Συνεπώς η παρούσα αξία μελλοντικού κεφαλαίου υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση[6],[22]:

$$C_0 = \left[ \frac{1}{(1+r)^n} \right] \cdot C_n \quad (7.9)$$

όπου  $C_0$  είναι το αρχικό κεφάλαιο ή παρούσα αξία του αντίστοιχου μελλοντικού κεφαλαίου (€),  $C_f$  το μελλοντικό ή διαχρονικό κεφάλαιο (€),  $r$  το προεξοφλητικό επιτόκιο ή επιτόκιο δανεισμού και  $n$  τα έτη του διαχρονικού κεφαλαίου.

Αντίστοιχα, η μελλοντική αξία κεφαλαίου του παρόντος προκύπτει από την ακόλουθη σχέση[1]:

$$C_f = C_0 (1+i)^n \quad (7.10)$$

όπου  $i$  είναι ο ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού (Inflation).

Αν και ο συντελεστής παρούσας αξίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να λύσει οποιοδήποτε πρόβλημα παρούσας αξίας που μπορεί να προκύψει, πρέπει να ορισθεί και ένας δεύτερος ορισμός προκειμένου να επιταχυνθεί η αριθμητική διαδικασία: η **παρούσα αξία μιας ράντας (present value of an annuity)**. Ως ράντα ορίζεται μια σειρά χρηματικών ροών σε τακτές χρονικές

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

στιγμές. Στην περίπτωση κατά την οποία πρόκειται για σειρά ισόποσων χρηματικά ροών, η ράντα χαρακτηρίζεται ως σταθερών όρων, με την αντίστοιχη άνισων όρων να αναφέρεται στη σειρά μη σταθερών χρηματικών ποσών. Η παρούσα αξία ράντας άνισων όρων προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$PVA = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+r)^j} \quad (7.11)$$

όπου  $C_j$  είναι η χρηματική ροή της περιόδου  $j$  (€),  $r$  είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο και  $n$  η περίοδος οικονομικής έρευνας. Στην περίπτωση ράντας σταθερών όρων η συγκεκριμένη σχέση αποκτά την ακόλουθη μορφή:

$$PVA = C \left[ \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \right] \quad (7.12)$$

όπου  $C$  είναι η σταθερή ετήσια χρηματική ροή (€) και οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ως έχουν.

Το κριτήριο της **καθαρής παρούσας αξίας (net present value) (NPV)** της επένδυσης περιλαμβάνει τον ορισμό του πρώτου έτους κατασκευής του σχεδιαζόμενου έργου ως έτος βάσης και την αναγωγή (υπολογισμός παρούσας αξίας) του καθαρού οφέλους κάθε έτους στη συγκεκριμένη βάση. Στην περίπτωση κατά την οποία παρουσιάζονται άνισα ποσά καθαρού οφέλους για την περίοδο οικονομικής έρευνας της σχεδιαζόμενης επένδυσης, προκύπτει η καθαρή παρούσα αξία ράντας άνισων όρων, από την παρακάτω σχέση:

$$NPV = \sum_{j=1}^n \frac{NB_j}{(1+r)^j} - I_0 + \frac{V_n}{(1+r)^n} \quad (7.13)$$

όπου  $NB_j$  είναι το καθαρό όφελος κατά την περίοδο  $j$ , το οποίο προσδιορίζεται σύμφωνα με την σχέση (7.11) (€),  $r$  το προεξοφλητικό επιτόκιο,  $I_0$  είναι το αρχικό ύψος της επένδυσης  $V_n$  η εναπομένουσα αξία της επένδυσης κατά την περίοδο  $n$  (€) και  $n$  είναι η περίοδος οικονομικής έρευνας του έργου.

Στην περίπτωση υπολογισμού της καθαρής παρούσας αξίας ράντας σταθερών όρων, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$NPV = \left[ \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \right] \cdot NB_j - I_0 + \frac{V_n}{(1+r)^n} \quad (7.14)$$

όπου  $NB_j$  αποτελεί το σταθερό ετήσιο καθαρό όφελος (€) και οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ως έχουν.

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας να είναι θετική. Έργα με αρνητική παρούσα αξία πρέπει να απορρίπτονται. Ο δείκτης αυτός είναι χρήσιμος για την κατάταξη διαφόρων εναλλακτικών λύσεων κατά σειρά οικονομικής βιωσιμότητας: το πλέον αποδοτικό είναι αυτό στο οποίο αντιστοιχεί υψηλότερη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας.

Τα αποτελέσματα της καθαρής παρούσας αξίας είναι αρκετά ευαίσθητα στο προεξοφλητικό επιτόκιο και η αποτυχία να επιλεχθεί το κατάλληλο επιτόκιο μπορεί να μεταβάλει ή ακόμα και να αντιστρέψει την κατάταξη απόδοσης των σχεδιαζόμενων έργων.

Τέλος, η μέθοδος δεν διακρίνει ανάμεσα στα σχεδιαζόμενα έργα με υψηλά κόστη επένδυσης που υπόσχονται ένα βέβαιο όφελος, από άλλα που παράγουν το ίδιο όφελος αλλά απαιτούν χαμηλότερη επένδυση αφού θα έχουν την ίδια καθαρή παρούσα αξία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

### 7.6.2.2 Λόγος οφέλους προς κόστος (Benefit to cost ratio) (BCR)

Ο **λόγος οφέλους προς κόστος (BCR)** ορίζεται ως το πηλίκο της παρούσας αξίας του οφέλους της επένδυσης προς την αντίστοιχη του κόστους της τελευταίας και υπολογίζεται στην περίπτωση ράντας άνισων όρων με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$BCR = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{NB_j}{(1+r)^j} + \frac{V_n}{(1+r)^n}}{I_0} \quad (7.15)$$

όπου  $NB_j$  είναι το καθαρό όφελος κατά την περίοδο  $j$ , το οποίο προσδιορίζεται σύμφωνα με την σχέση (7.11) (€),  $r$  το προεξοφλητικό επιτόκιο,  $I_0$  είναι το αρχικό ύψος της επένδυσης  $V_n$  η εναπομένουσα αξία της επένδυσης κατά την περίοδο  $n$  (€) και  $n$  είναι η περίοδος οικονομικής έρευνας του έργου.

Στην περίπτωση ράντας σταθερών όρων η συγκεκριμένη σχέση παίρνει τη μορφή:

$$BCR = \frac{\left[ \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \right] \cdot NB_j + \frac{V_n}{(1+r)^n}}{I_0} \quad (7.16)$$

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει ο λόγος οφέλους προς κόστους να είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

### 7.6.2.3 Κριτήριο εσωτερικού συντελεστή απόσβεσης (Internal rate of interest) (IRR)

Ως **εσωτερικός συντελεστής απόσβεσης (IRR)** μιας επένδυσης ορίζεται η τιμή του επιτοκίου για την οποία η καθαρή παρούσα αξία γίνεται μηδενική. Η μέθοδος εσωτερικού συντελεστή απόσβεσης ανάλυσης σχεδιαζόμενου έργου επιτρέπει την εκτίμηση της χρονικής αξίας του χρήματος. Ο προσδιορισμός της συγκεκριμένης παραμέτρου πραγματοποιείται με τη βοήθεια επαναληπτικών μεθόδων, οι οποίες αναπτύσσονται κύρια σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο χαρακτηρισμός της οικονομικής βιωσιμότητας αποδίδεται στην εξεταζόμενη επένδυση στην περίπτωση υπολογισμού εσωτερικού συντελεστή απόσβεσης μεγαλύτερου από το επιτόκιο δανεισμού ή το αντίστοιχο εναλλακτικής επενδυτικής επιλογής.

Δεδομένου ότι η τιμή του επιτοκίου με το οποίο γίνονται οι αναγωγές στην παρούσα αξία είναι ένα μέγεθος μακροοικονομικό και ενδέχεται να μεταβληθεί κατά την διάρκεια ζωής του έργου, το κριτήριο της εσωτερικής απόδοσης εκφράζει το πόσο κινδυνεύει να ανατρέψει η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου λόγω μεταβολής των επιτοκίων[2].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

---

### 7.7 Κοινωνικοοικονομικά κριτήρια

Θεμελιώδες χαρακτηριστικό των έργων ανάπτυξης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών αποτελεί ο συνδυασμός του οικονομικού οφέλους για το φορέα κατασκευής και εκμετάλλευσης του έργου με το αντίστοιχο όφελος για το ευρύτερο κοινωνικό σύνολο. Στο πλαίσιο συνεπώς του κοινωνικοοικονομικού σκέλους της οικονομικής αποτίμησης του σχεδιαζόμενου έργου, απαιτείται η διερεύνηση των αντίστοιχων κριτηρίων. Συγκεκριμένα, ορίζεται το **ετήσιο κοινωνικό όφελος (annual social benefit)** ως το ύψος του κεφαλαίου του οποίου η δαπάνη αποφεύγεται με την ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο ισοδυναμεί με τα απαιτούμενα έξοδα παραγωγής ποσού ενέργειας ίσου με το αντίστοιχο του υδροηλεκτρικού σταθμού, με τη χρήση συμβατικών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κτλ.). ο προσδιορισμός συνεπώς της συγκεκριμένης τιμής απαιτεί τη μελέτη των ποσοστών συμμετοχής των συμβατικών πηγών στην παραγωγή ενέργειας, της ηλεκτρικής απόδοσης, της ελάχιστης θερμογόνου δύναμης (kJ/kg) και της τιμής προμήθειας των τελευταίων (€/kg). Παράλληλα, υπολογίζεται η παρούσα αξία του ετήσιου κοινωνικού οφέλους, προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση συγκρίσεων. Τέλος, κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός των τιμών εκπομπής CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> και SO<sub>2</sub> καθώς και κατανάλωσης τόνων ισοδύναμου πετρελαίου (tones of oil equivalent) (TOE), που αποφεύγονται με την ανάπτυξη του σχεδιαζόμενου έργου.

### 7.8 Στοιχεία μελέτης ευαισθησίας

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης έργου μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού, η διαδικασία της οικονομικής ανάλυσης της απαιτούμενης επένδυσης περιορίζει αλλά δεν εξαλείφει το σχετικό ρίσκο, με αποτέλεσμα να διατηρείται ο κίνδυνος εκπλήξεων. Συγκεκριμένα, θεμελιώδες στοιχείο της οικονομικής και κοινωνικοοικονομικής ανάλυσης του σχεδιαζόμενου έργου αποτελεί η εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας της εγκατάστασης, των μελλοντικών τιμολογίων πώλησης της τελευταίας, των εξόδων λειτουργίας και των επιμέρους κοστών του έργου. Οι τελευταίες δαπάνες, στο συγκεκριμένο σημείο, εκτιμώνται με ακρίβεια της τάξης του ±10%. Συνεπώς, η πιθανότητα μεταβολών στα εκτιμώμενα στοιχεία του έργου, καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση των επιπτώσεων των συγκεκριμένων μεταβολών στην απόδοση της επένδυσης. Η προαναφερθείσα διαδικασία συνιστά τη μελέτη ευαισθησίας της επένδυσης, με την οποία επιτυγχάνεται ακρίβεια εκτίμησης των κοστών του έργου της τάξης του ±5%. Η αξιοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης προτείνεται στους χρηματοδότες του έργου προκειμένου να περιορισθεί το λαμβανόμενο ρίσκο. Ωστόσο, παράλληλα είναι δυνατή η χρήση των αποτελεσμάτων της από τους εμπλεκόμενους (κυρίως κρατικούς) φορείς, προκειμένου να προσδιορισθεί η μελλοντική πολιτική κινήτρων, δηλαδή υποστήριξης αντίστοιχων επενδύσεων (επιχορήγηση, δανειοδότηση, φορολογία, επιτόκια, τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

### 7.9 Νομικό καθεστώς μικρών υδροηλεκτρικών έργων στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο του νομικού καθεστώτος στην χώρα μας πραγματοποιείται η διάκριση των μικρών υδροηλεκτρικών σε μονάδες αυτοπαραγωγών και ανεξάρτητων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αυτοπαραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τον νόμο 3468/2006 θεωρείται εκείνος που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από μονάδες Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α, κυρίως για δική του χρήση και διοχετεύει τυχόν πλεόνασμα της ενέργειας αυτής στο Σύστημα ή στο Δίκτυο και διακρίνεται σε «διασυνδεδεμένο» ή αυτόνομο ανάλογα αν ο σταθμός είναι συνδεδεμένος ή όχι με το δίκτυο της Δ.Ε.Η. Ως ανεξάρτητος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται εκείνος που παράγει ηλεκτρική ενέργεια και τη διαθέτει αποκλειστικά στην Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.). Οι συγκεκριμένες αρχές προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας ισχύουν και στην περίπτωση πώλησης της πλεονάζουσας ενέργειας των μονάδων των αυτοπαραγωγών. Ο τιμοκατάλογος αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. διαμορφώνεται όπως στον Πίνακα 7.1.

	<b>ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ</b>		<b>ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ</b>	
		ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ	ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ	ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ
ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ ΑΥΤΟΠΑΡΑΓΩ ΓΗΣ από ΣΘΗ με λοιπά καύσιμα (πλην ΑΠΕ)		0,05639 €/kWh	0,06611 €/kWh	<b>Ενέργεια</b> (€/kWh): Αιχμή.: 0,02978 Ενδιάμεσο φορτίο: 0,02063 Ελάχιστο φορτίο: 0,01531
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ από ΣΘΗ με λοιπά καύσιμα (πλην ΑΠΕ)			<b>Ενέργεια:</b> 0,06611 €/kWh  <b>Ισχύς:</b> 1,5645 €/kW	<b>Ενέργεια</b> (€/kWh): Αιχμή.: 0,03475 Ενδιάμεσο φορτίο: 0,02407 Ελάχιστο φορτίο:0,017 68  <b>Ισχύς</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

				(€/kWh): Αιχμή.: 3,98675 Ενδιάμεσο φορτίο: - Ελάχιστο φορτίο: -
ΠΛΕΟΝΑΣΜΑ ΑΥΤΟΠΑΡΑΓΩ ΓΗΣ (από ΑΠΕ ή από ΣΘΗ με ΑΠΕ)	Από ΑΠΕ: 0,09945 €/kWh Από ΣΘΗ: 0,05639 €/kWh	0,09945 €/kWh	0,08785 €/kWh	<b>Ενέργεια</b> (€/kWh): Αιχμή.: 0,03475 Ενδιάμεσο φορτίο: 0,02407 Ελάχιστο φορτίο:0,017 68
ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (από ΑΠΕ ή από ΣΘΗ με ΑΠΕ)	0,08458 €/kWh		<b>Ενέργεια:</b> 0,08785 €/kWh <b>Ισχύς:</b> 1,75645 €/kW	<b>Ενέργεια</b> (€/kWh): Αιχμή.: 0,03475 Ενδιάμεσο φορτίο: 0,02407 Ελάχιστο φορτίο:0,017 68

**Πίνακας 7.1** Τιμολόγια Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συμπαράγωγή και ΑΠΕ και Χρέωσης Ισχύος στο Ηλεκτρικό Δίκτυο[25].

Παράλληλα, ο νέος αναπτυξιακός νόμος προβλέπει την οικονομική ενίσχυση των έργων ανάπτυξης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Συγκεκριμένα, παρέχονται τα εξής είδη ενισχύσεων: (α) Επιχορήγηση του έργου σε ποσοστό 40%, (β) επιχορήγηση ή και επιδότηση χρηματοδοτικής μίσθωσης (leasing) (γ) Φορολογική απαλλαγή και (δ) Επιδότηση του κόστους της δημιουργούμενης απασχόλησης. Η επιχορήγηση ή και επιδότηση χρηματοδοτικής μίσθωσης (leasing) καθορίζεται ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή. Έτσι, για την περιοχή Α (νομοί Αττικής και Θεσσαλονίκης πλην της Β.Ε.ΠΕ. και των νησιών τους) το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 20%, για την περιοχή Β (νομοί Θεσσαλίας, Νοτίου Αιγαίου, Ιονίων νησιών, Κρήτης, Κεντρικής και Δυτικής Μακεδονίας και Στερεάς Ελλάδας) στο 30% ενώ για την περιοχή Γ (νομοί Ανατολικής Μακεδονίας, Θράκης, Ηπείρου, Βορείου Αιγαίου καθώς και την Δυτική Ελλάδα) το ποσοστό επιχορήγησης ή και επιδότησης χρηματοδοτικής μίσθωσης (leasing) ανέρχεται στο 40%. Εναλλακτικά, παρέχεται φορολογικά απαλλαγή σε ποσοστό 60% για την περιοχή Α και 100% για τις υπόλοιπες περιοχές. Παράλληλα, το ποσοστό της ίδιας συμμετοχής στις επενδύσεις που εντάσσονται στο καθεστώς ενίσχυσης της επιχορήγησης ή και επιδότησης χρηματοδοτικής μίσθωσης δεν μπορεί να είναι του 25% των ενισχυόμενων δαπανών. Απαιτείται



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

---

τέλος, το ύψος της επιχορήγησης και επιδότησης χρηματοδοτικής μίσθωσης να μην υπερβαίνει για το διάστημα των 5 ετών το ποσό των 15.000.000 € [27].