



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1751

"Μελέτη μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού"

"Study of small Hydroelectric Power Station"

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

ΠΑΓΙΟΛΛΑΡΙ ΑΡΜΠΕΡΙ (6774)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία θέλουμε να μελετήσουμε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιεί υδροστρόβιλο για να μπορέσει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στην εργασία μας, αρχικά θα μελετήσουμε τους υδροστρόβιλους γενικά, κάνοντας αναφορά στις αρχές λειτουργίας τους. Οι υδροστρόβιλοι κατατάσσονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- Τους υδροστρόβιλους δράσεως,
- Τους υδροστρόβιλους αντιδράσεως.

Επίσης ένας άλλος διαχωρισμός ο οποίος είναι δυνατός να γίνει είναι, ανάλογα με την διεύθυνση του νερού μέσα τους, σε:

- Υδροστρόβιλοι αξονικής ροής.
- Υδροστρόβιλοι ακτινικής ροής.
- Υδροστρόβιλοι εφαπτομενικής ροής.

Θα μελετήσουμε σε ποιες κατηγορίες ο κάθε υδροστρόβιλος. Θα μελετήσουμε τους υδροστρόβιλους:

- Francis
- Pelton
- Kaplan

Επίσης στην ανάλυση της εργασίας μας θα κάνουμε μια ανάλυση της ροής από το υψηλότερο σημείο στο χαμηλότερο. Θα κάνουμε μια ανάλυση με την βοήθεια της μηχανικής των ρευστών, για την κίνηση του ρευστού μέσα σε σωλήνα.

Στη συνέχεια της ανάλυσης μας θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε τις γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές είναι οι σύγχρονες γεννήτριες που θα δούμε τις βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Στο τέλος της εργασίας μας, θα επιλύσουμε το πρόβλημα το οποίο μας έχει δοθεί και θα κάνουμε μια παρουσίαση των βασικότερων σημείων που παρουσιάσαμε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ.....	4
1.1 Φάσεις της μελέτης μικρού υδροηλεκτρικού έργου.....	4
1.2 Αναγνωριστική μελέτη ή προμελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας.....	5
1.3 Προκαταρκτική μελέτη ή οριστική μελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας.....	7
1.4 Μελέτη εφαρμογής.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ.....	13
2.1 Ιστορική αναδρομή των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.....	14
2.2 Χαρακτηριστικά Μικρών Υδροηλεκτρικών Σταθμών.....	15
2.3 Ταξινόμηση Υδροηλεκτρικών Σταθμών.....	18
2.4 Διαμόρφωση μικρού υδροηλεκτρικού έργου.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ.....	27
3.1 Μέθοδοι ελάττωσης τριβών.....	27
3.2 Χαρακτηριστικά ύδατος σε αγωγούς.....	28
3.3 Ύψος υδατόπτωσης μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.....	30
3.4 Απώλειες ύψους υδατόπτωσης.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	52
4.1 Ταξινόμηση Υδροστροβίλων.....	53
4.2 Είδη υδροστροβίλων.....	54
4.3 Επιλογή υδροστροβίλου.....	69
4.4 Σπηλαίωση υδροστροβίλων.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.....	82
5.1 Ισχύς μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.....	84
5.2 Εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας.....	88
5.3 Πρακτική εφαρμογή – Μελέτη.....	92
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

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.

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

1. Την αναγνωριστική μελέτη ή προμελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας (reconnaissance/pre-feasibility study).
2. Την προκαταρκτική μελέτη ή οριστική μελέτη τεχνικής εφικτότητας και οικονομικής βιωσιμότητας (feasibility study).
3. 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

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 προκαταρκτική 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 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 υπάρχοντων 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:

- 1ο. 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 πτώση 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.
- 2ο. 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.
- 3ο. 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.
- 4ο. 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 η περισσότερων υδροστροβίλων.
- 5ο. 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.
- 6ο. 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.

7ο. Προτάσεις χρηματοδότησης του έργου.

8ο. Καταγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

9ο. 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.

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

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 τεchnοοικονομικών 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:

- i. 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.
- ii. 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 υδροστροβίλο και να καταδεικνύει την πιθανή χρήση του ύδατος από τρίτους φορείς
- iii. 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.
- iv. 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.
- v. Εγκατεστημένη ισχύς και παραγόμενη ενέργεια: Ο προσδιορισμός της εγκατεστημένης ισχύος της εγκατάστασης και της 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.
- vi. 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 υδροστροβίλου, οι απώλειες ύψους πτώσης ύδατος στους αγωγούς και η ποσότητα του ύδατος φυγής ως ποσοστό της παροχής του στροβίλου.
- vii. 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.

- viii. 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.
- ix. 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.
- x. 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 υδροστροβίλου, το μήκος του αγωγού πτώσης ύδατος, το ύψος της υδατόπτωσης, το υψόμετρο του σταθμού παραγωγής κτλ.
- xi. 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.
- xii. 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 οφέλους σε παρούσες τιμές, τον υπολογισμό

του συνολικού λόγου οφέλους προς το κόστος της εγκατάστασης και τον προσδιορισμό λοιπών οικονομικών χαρακτηριστικών της τελευταίας.

- xiii. 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.
- xiv. 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.
- xv. Τελικές νομικές απαιτήσεις: Η προετοιμασία του τελικού πλάνου για την ικανοποίηση των αντίστοιχων νομικών απαιτήσεων κρίνεται αναγκαία.
- xvi. 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.
- xvii. 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.
- xviii. 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.
- xix. 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.
- xx. 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.

- xxi. 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 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: ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

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. 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.

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 χρησιμοποίηση της κρίνεται αναγκαία και συνδυάζεται με παράλληλες δραστηριότητες εκμετάλλευσης όπως ύδρευση, ιχθυοκαλλιέργειες, τουρισμό κτλ.

2.1 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. 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 19ου αιώνα, των πρώτων μηχανών που θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως υδροστρόβιλοι. Ο πρώτος παγκόσμιος υδροηλεκτρικός σταθμός κατασκευάστηκε το 1882 στο του η παραγωγή του οποίου 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 .

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.

Στην Ευρώπη τουλάχιστον οι δυοτρείς 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 η κάθε μία. Σε σύγκριση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, τα παλαιάς τεχνολογίας μικρά υδροηλεκτρικά έργα που ήδη υπήρχαν αποδείχτηκαν αντισυμβατικά και σταδιακά εγκαταλείφθηκαν.

Το μέσο του 20ου 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.

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.

2.2 Χαρακτηριστικά Μικρών Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Τα πλεονεκτήματα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών παρουσιάζονται σύμφωνα με τον πρώην διευθυντή του Αμερικανικού Γραφείου Αναμόρφωσης. 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.
- Είναι δυνατό να σχεδιασθούν και να κατασκευαστούν 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 () 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 υδροστροβίλων να αγγίζουν τιμές της τάξης του 90%. Οι εγκαταστάσεις μικρού μεγέθους ισχύος από μερικά έως αρκετά 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, 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 διακοπτόμενης 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.

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

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 πτώσης 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 ενεργειακής οικονομίας:

- Αυτόνομοι/μεμονωμένοι σταθμοί, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα, χωρίς να συμμετέχουν σε ένα ευρύτερο δίκτυο και παρέχουν την παραγόμενη ενέργεια αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο.
- Διασυνδεδεμένοι 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 6080%.
- 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 1015% ως 4050% ανάλογα με τις συνθήκες εκμετάλλευσης.

5. Ο διαχωρισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών με κριτήριο την εγκατεστημένη ισχύ τους παρουσιάζει διαφορές μεταξύ των χωρών. Ωστόσο, λαμβάνοντας ως οδηγό τις γενικές συνθήκες της Ευρώπης, οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ταξινομούνται ως:

- Μίνι και μικρο σταθμοί με ισχύ έως περίπου το 1.
- Μικροί σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ από 1 ως 10.
- Μεσαίας ισχύος σταθμοί με ισχύ από 10 ως 100.
- Μεγάλης ισχύος από 100 και άνω.

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

6. Με κριτήριο την οικονομία ύδατος ταξινομούνται:

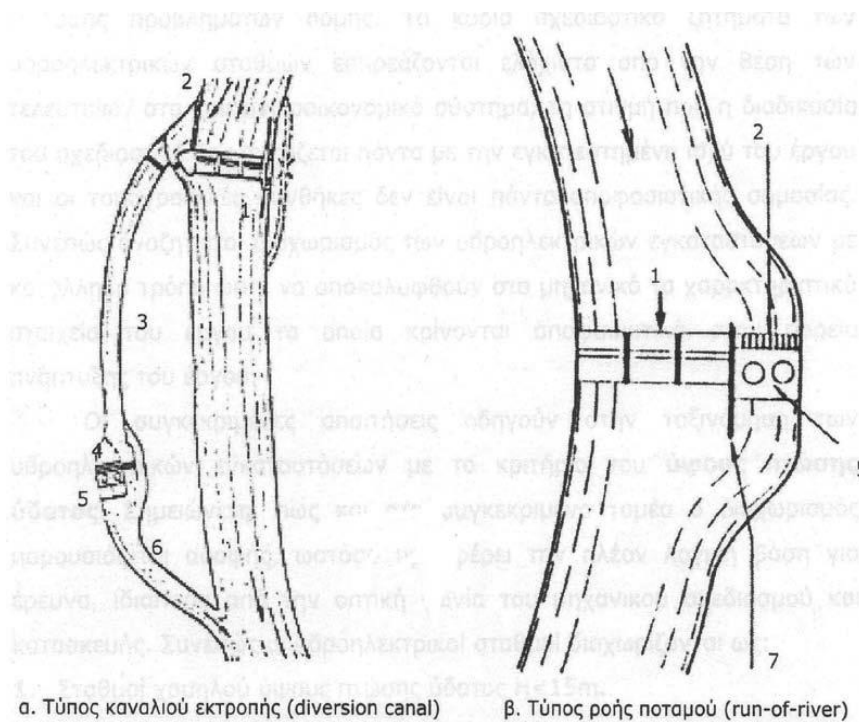
- Σταθμοί αποκλειστικά για παραγωγή ενέργειας.

- 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.

Οι συγκεκριμένοι τύποι διάταξης παρουσιάζονται στο Σχ. 2.1



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. Υποστώλιμα διαχωρισμού εξόδου σταθμού και φυσικής κούτης ποταμού.

8. Ταξινόμηση με κριτήριο τα τοπογραφικά στοιχεία:

- Σταθμοί σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου.
- 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
- Σταθμοί μέσου ύψους όταν $20 < H < 150$
- Σταθμοί μεγάλου ύψους όταν $H > 150$

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

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

Μια ακόμα ταξινόμηση που συναντάται στην βιβλιογραφία είναι η εξής:

- Σταθμοί μικρού ύψους όταν $2 < H < 30$

- Σταθμοί μέσου ύψους όταν $30 \ll 100$
- Σταθμοί μεγάλου ύψους όταν > 100

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.

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

2.4 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, 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:

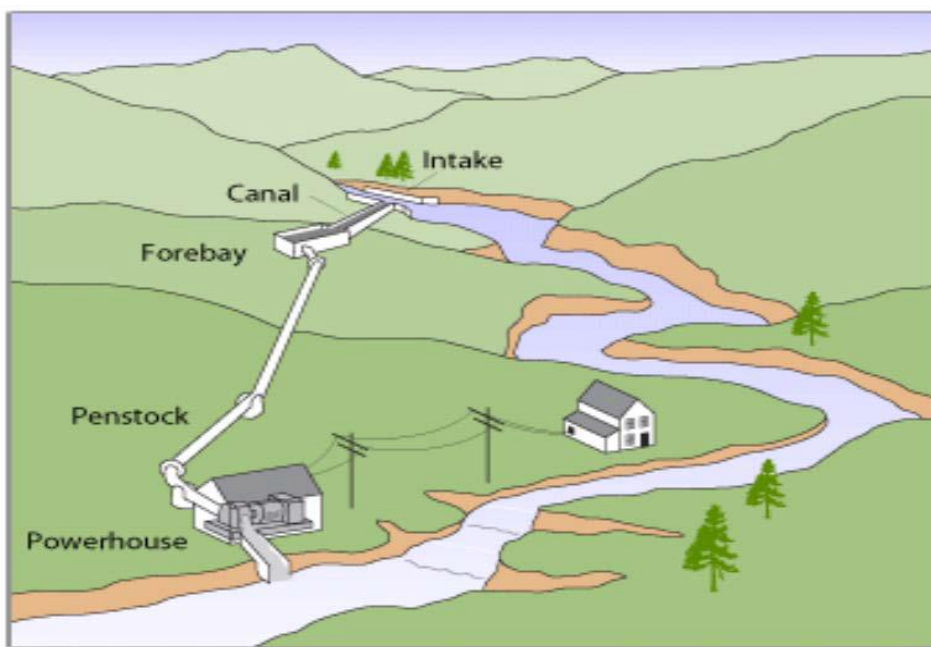
1. Δομικά έργα τα οποία αποτελούν αντικείμενο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ύψος της επένδυσης. Τα κύρια μέρη των έργων πολιτικού μηχανικού ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι:

- Το φράγμα 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.
- Ο εκχειλιστής 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 μέσω των οποίων διοχετεύεται η φυσική παροχή κατά την διάρκεια κατασκευής της τελευταίας φάσεως του φράγματος
- Ο εκκενωτής πυθμένος 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, 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, για την προστασία των υδροστροβίλων από τα φερτά αντικείμενα του ποταμού (ξύλα, πάγος κτλ.), συνοδευόμενες από μηχανισμούς καθαρισμού και συντήρησης τους.

- Θυροφράγματα και βαλβίδες (),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, για την εξασφάλιση σταθερής ταχύτητας περιστροφής του άξονα, ανεξάρτητα από την ζήτηση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Πολλαπλασιαστές στροφών, για την προσαρμογή των στροφών περιστροφής του άξονα του υδροστροβίλου στις αντίστοιχες στροφές της γεννήτριας.
- Αντλίες, 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, 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.
- Κινητήριες μηχανές (engines).
- Συστήματα ρύθμισης διέγερσης και τάσης.

- Μετασχηματιστές, 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 , 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: ΡΟΗ ΥΔΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟ

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.

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

3.1 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 φράσσοντάς 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:

$$\eta_m = \frac{H}{H_0}$$

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.

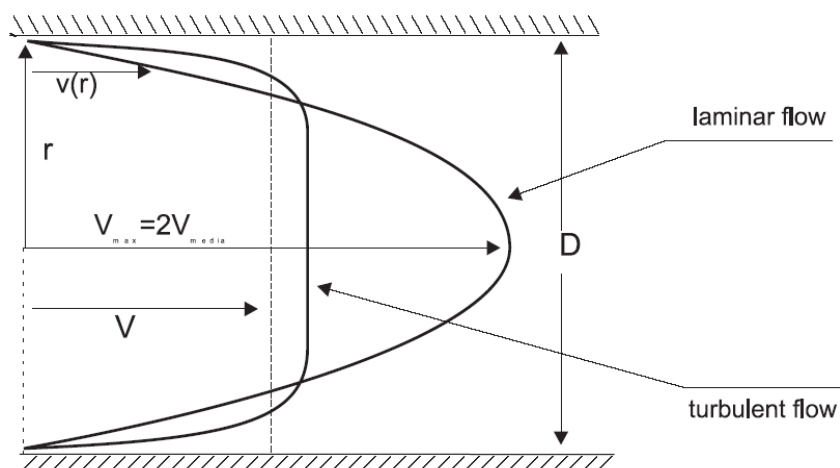
Με την εκτροπή του ποταμού, συντομεύοντας την πορεία του, μέσω μιας τεχνητής διώρυγας ή σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε ικανοποιητική υψομετρική διαφορά, ιδίως αν η κοιλάδα του ποταμού χαρακτηρίζεται από πολλές απότομες ή πεταλοειδείς στροφές.

3.2 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:

- 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.

Η κατανομή ταχυτήτων του ρευστού έχει μορφή παραβολής και η μέση ταχύτητα αποτελεί το 50% της αντίστοιχης μέγιστης κεντρικής. Οι συγκεκριμένες καταστάσεις ροής παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1.



Σχήμα 3.1: Κατανομή ταχυτήτων ρευστού για την στρωτή και για την τυρβώδη ροή.

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).

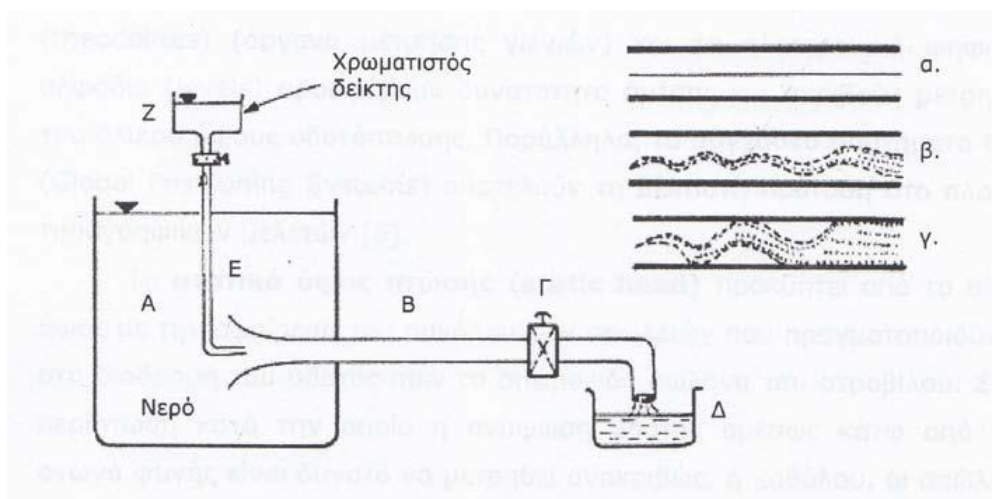
Ο Osborne Reynolds μετά από πειράματα που διεξήγαγε, βρήκε ότι η μετάβαση από την στρωτή ροή στην τυρβώδη εξαρτάται, όχι μόνο στην ταχύτητα, επίσης από την διάμετρο του αγωγού και στο ιξώδες του ρευστού, και είναι ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς την δύναμη ιξώδους. Αυτός ο λόγος, είναι γνωστός ως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

$$Re = \frac{uV}{\nu}$$

όπου u η μέση ταχύτητα ροής (m/sec), D η διάμετρος του αγωγού (m) και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m²/sec). Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι τιμές του κινηματικού ιξώδους ν του ύδατος για διάφορες θερμοκρασίες.

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

Πίνακας 3.1 Κινηματικό ιξώδες νερού.



Σχήμα 3.2 Συσκευή Reynolds και μορφές ροής.

3.3 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:

$$P = \rho g Q H$$

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

ρ : είναι η πυκνότητα του υγρού (1000 kg/m^3 για το καθαρό νερό).

Q : είναι η ροή ή η παροχή του νερού (m^3/sec) και H : είναι το ύψος υδατόπτωσης (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.

Ολικό ύψος πτώσης (gross head) ονομάζεται η υψομετρική διαφορά μεταξύ της ελεύθερης στάθμης ύδατος του ταμιευτήρα και της ελεύθερης στάθμης της διώρυγας φυγής (έξοδος του σταθμού).

Οι μετρήσεις του ολικού ύψους πτώσης πραγματοποιούνται συνήθως χρησιμοποιώντας τοπογραφικές μεθόδους. Η ακρίβεια που απαιτείται στις μετρήσεις

περιορίσει 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 τους ψηφιακούς θεοδολίχους, 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.

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. Διαφορετικά, στην περίπτωση κατά την οποία ο δρομέας του στροβίλου βρίσκεται βυθισμένος στον αγωγό φυγής, προστίθενται και οι απώλειες του αγωγού εκτόνωσης. Συνεπώς το στατικό ύψος υδατόπτωσης εκτιμάται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$H_{sta} = H_{gross} - \Sigma \Delta h$$

όπου, H_{sta} : το στατικό ύψος πτώσης (m).

H_{gross} : το ολικό ύψος υδατόπτωσης (m).

$\Sigma \Delta h$: 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:

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

όπου, H_{net} : είναι το καθαρό ή ωφέλιμο ύψος πτώσης (m).

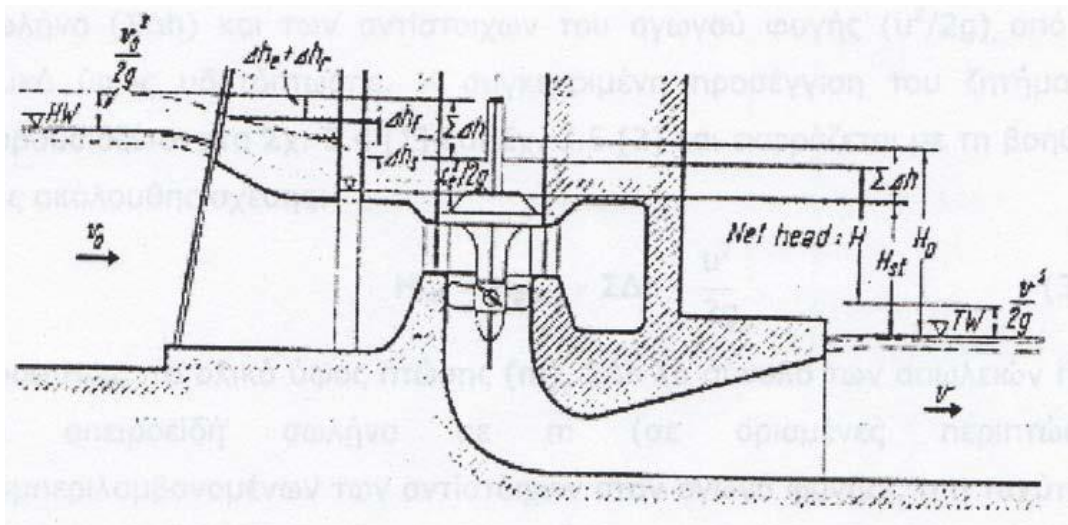
H_{gross} : είναι το ολικό ύψος πτώσης (m).

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).

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

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



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. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ολικό ύψος πτώσης δίνεται από την σχέση:

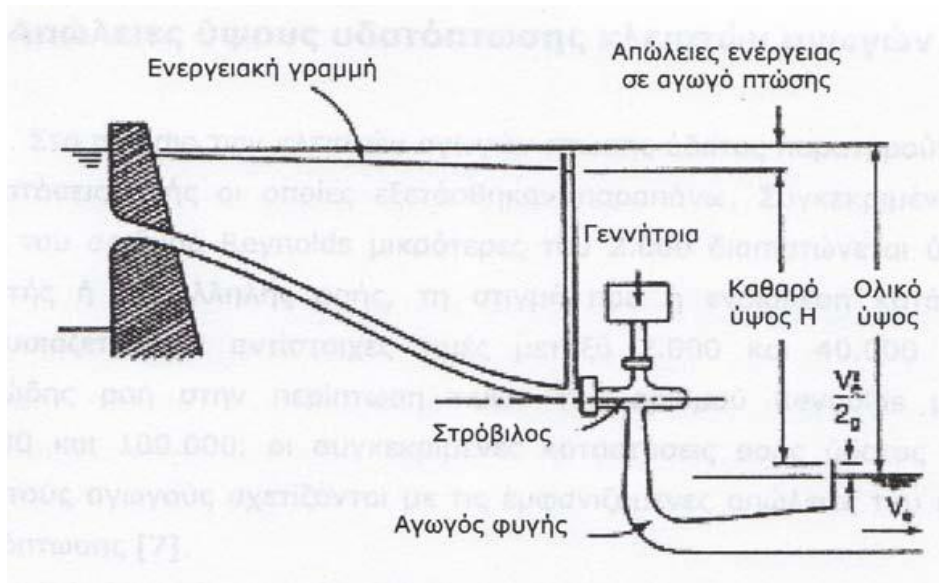
$$H_{gross} = H_{sta} + \frac{u_o^2}{2g} - \frac{u^2}{2g}$$

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,

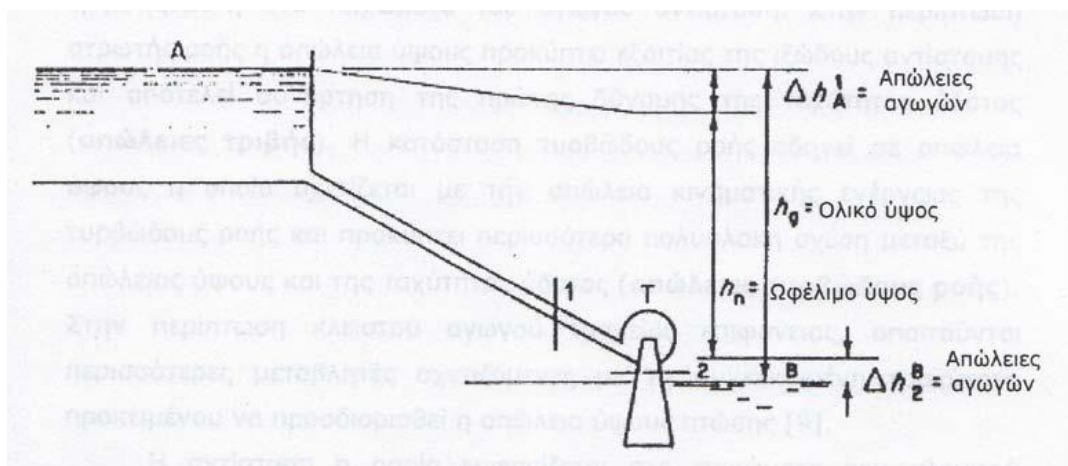
u_o : και u η ταχύτητα ύδατος κατά την είσοδο και την έξοδο από την εγκατάσταση αντίστοιχα (m/sec) και

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

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.

3.4 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 εξετάστηκαν 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.

Απώλειες ύψους υδατόπτωσης κλειστών αγωγών

Στο πλαίσιο των κλειστών αγωγών πτώσης ύδατος παρατηρούνται οι καταστάσεις ροής που εξετάστηκαν 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.

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.

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:

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

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.

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

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

$$f = \frac{64 \cdot \nu}{u \cdot D} = \frac{64}{Re}$$

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 έχουμε:

$$h_f = \frac{64 \cdot \nu}{u \cdot D} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot u}{g \cdot D^3}$$

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 .

Όταν η ροή είναι σχεδόν τυρβώδης ($Re > 2000$), ο συντελεστής τριβής f γίνεται λιγότερο εξαρτώμενος από τον αριθμό Reynolds και περισσότερο εξαρτώμενος από τη σχετική τραχύτητα ks/D , όπου ks 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.

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 υπόστρωμα στρωτής ροής. Όταν ο αριθμός Re αυξάνεται, το πάχος του υποστρώματος στρωτής ροής μειώνεται. Στις περιπτώσεις όπου η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας άμμου είναι ιδιαίτερα χαμηλότερη του πάχους του αντίστοιχου υποστρώματος, ο αγωγός θεωρείται υδραυλικά λείος.

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.

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 :

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

Για υψηλές τιμές του αριθμού Reynolds, το πάχος του υποστρώματος γίνεται πολύ μικρό και ο συντελεστής τριβής f γίνεται ανεξάρτητος από το 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:

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

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 :

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

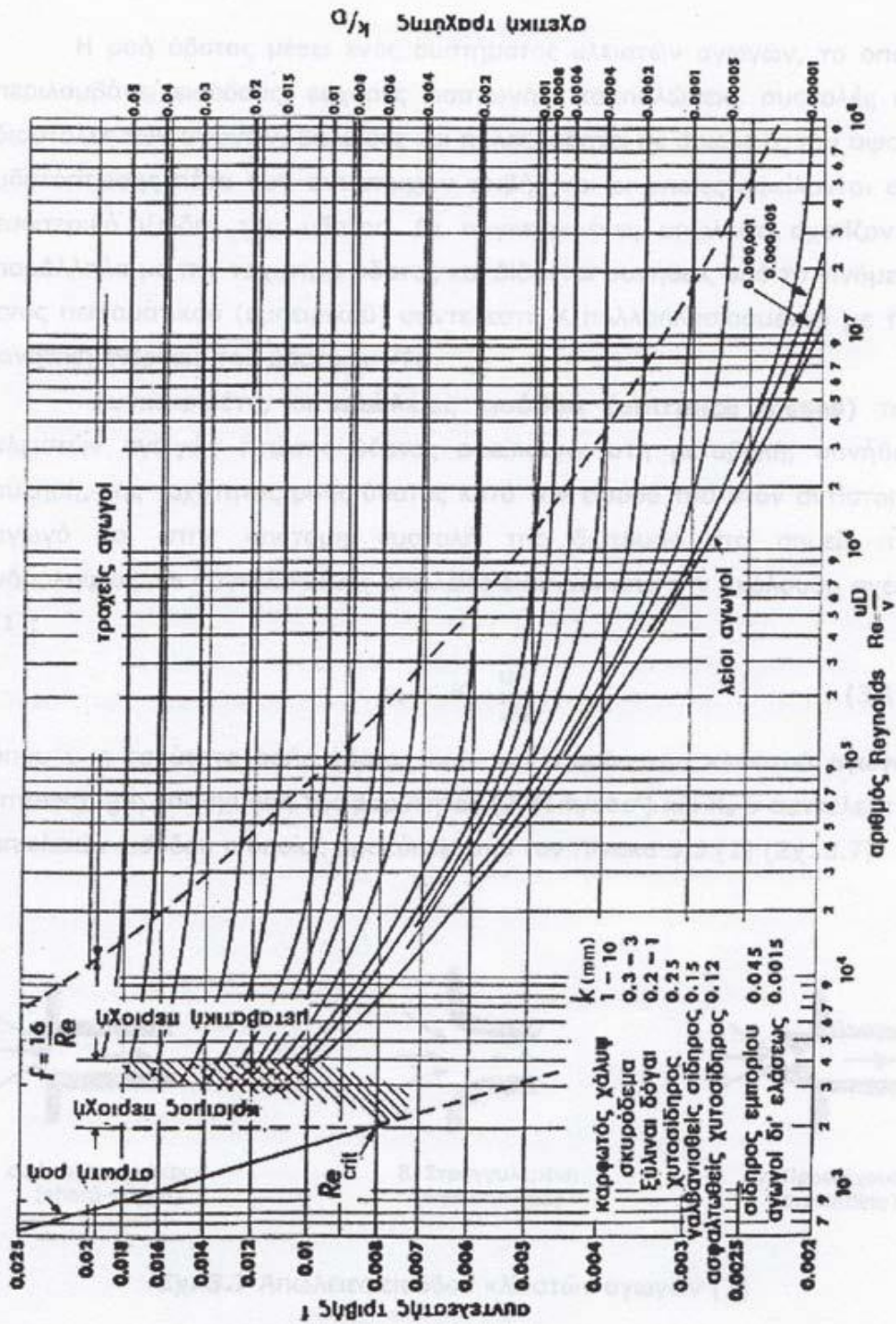
Με δεδομένο ότι οι εξισώσεις παρουσιάζουν δυσκολίες επίλυσης, προκειμένου να προσδιορισθεί η τιμή του συντελεστή τριβής f των κλειστών αγωγών, χρησιμοποιείται το διάγραμμα που αναπτύχθηκε από τον Moody και το οποίο

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(Re).
- Η δύσκολα ορισμένη κρίσιμη περιοχή (σκιασμένη περιοχή).
- Η μεταβατική περιοχή, η οποία ξεκινά με τους λείους αγωγούς και καταλήγει στην περιοχή διακεκομμένης γραμμής, όπου ο συντελεστής τριβής f εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds(Re) και τη σχετική τραχύτητα k .
- Η περιοχή πλήρους τυρβώδους ροής, όπου ο συντελεστής τριβής f εξαρτάται αποκλειστικά από τη σχετική τραχύτητα ks/D .

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:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{k_s}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα Moody

Απώλειες τυρβώδους ροής κλειστών αγωγών

Εκτός από τις απώλειες τριβής, η ροή ύδατος μέσω ενός συστήματος κλειστών αγωγών, το οποίο περιλαμβάνει εισόδους, εσχάρεις 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:

$$h_e = K_1 \frac{u^2}{2g}$$

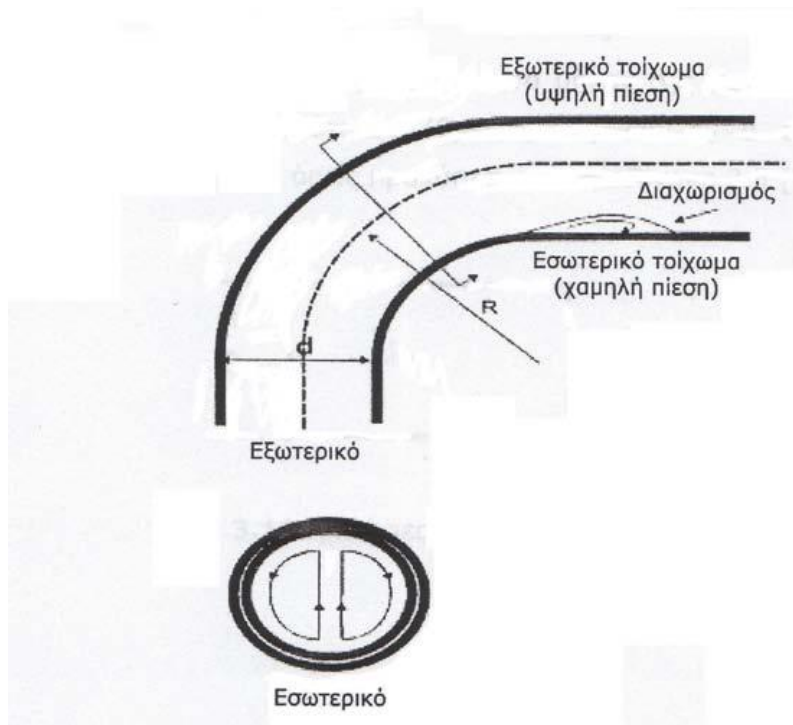
Όπου u : η ταχύτητα ροής ύδατος πριν την είσοδο του κλειστού αγωγού (m/sec).

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

K_1 : ο συντελεστής απωλειών εισόδου οι τιμές του οποίου δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Τύπος εισόδου	K_1
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.



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:

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

όπου $K_t = 2,3$.

t: το πάχος των ράβδων της εσχάρας (cm).

b: η απόσταση των ράβδων (cm).

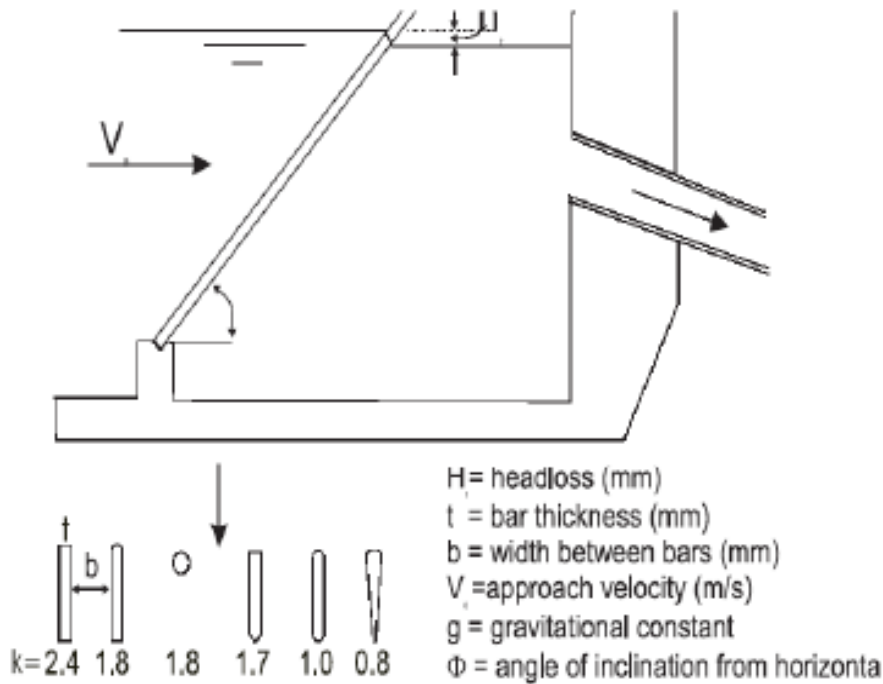
ϕ : η γωνία κλίσης της εσχάρας από το οριζόντιο επίπεδο.

u: η ταχύτητα ροής ύδατος διαμέσου της εσχάρας (m/sec).

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 β με τη ροή του νερού (το β θα έχει μια μέγιστη τιμή 90° για μια εσχάρα που βρίσκεται στο πλευρικό τοίχωμα ενός καναλιού), θα υπάρξει

μια πρόσθετη απώλεια ύψους υδατόπτωσης. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης πρέπει να πολλαπλασιαστεί με έναν συντελεστή διόρθωσης k που δίνεται στον πίνακα 3.4.



Σχήμα 3.8 Απώλειες εσχάρας εισαγωγής κλειστών αγωγών.

- 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 μεγάλης 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:

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

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

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

K_c : ο συντελεστής απωλειών συστολής.

Ορισμένες τιμές του συντελεστή απωλειών συστολής δίνονται στον Πίνακα 3.5. Για ένα λόγο μεγαλύτερο από

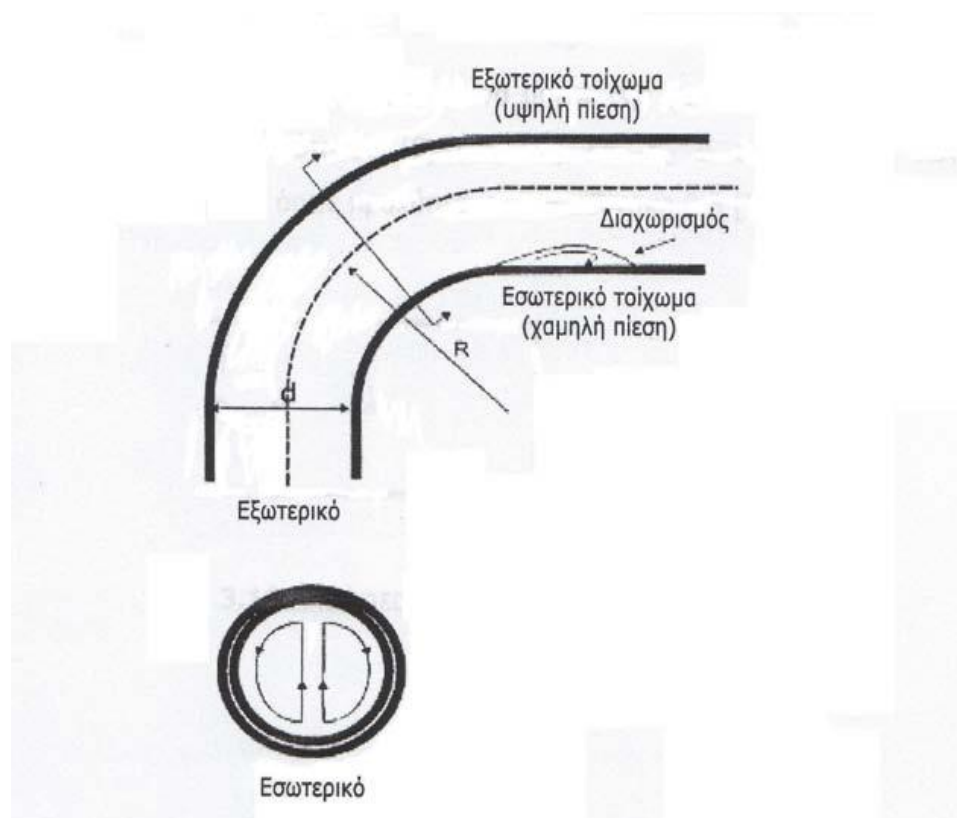
$$\frac{A_1}{A_2} = 0,76$$

ο συντελεστής K_c ακολουθεί περίπου τον τύπο:

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

όπου A_1 : είναι το εμβαδόν διατομής αγωγού πριν την συστολή.

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_e
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 πτώσης ύδατος προκαλείται μείωση της ταχύτητας ύδατος και εμφάνιση τυρβώδους ροής κατά τη ροή ύδατος. Συνεπώς προκαλούν απώλειες που υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

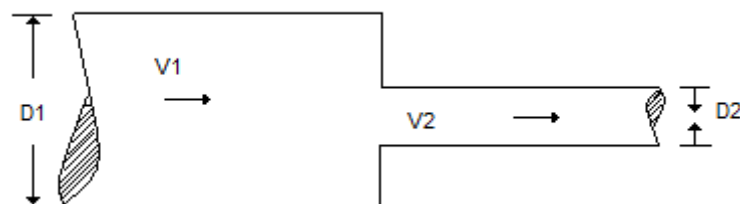
$$h_{exp} = K_{exp} \left(\frac{u^2}{2g} \right)$$

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

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

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

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

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

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

K_b : ο συντελεστής απωλειών καμπυλώσεως.

Ορισμένες τιμές του συντελεστή καμπυλώσεως φαίνονται στον Πίνακα 3.6.

Λείες καμπυλώσεις		Καμπυλώσεις ένωσης αγωγών	
r/D	K_b	θ	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, θ : 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 ανοιχτές. Η απώλεια ύψους υδατόπτωσης που παράγεται από το νερό που διατρέχει μια ανοικτή βαλβίδα εξαρτάται από τον τύπο και την κατασκευή της βαλβίδας. Οι απώλειες αυτές δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

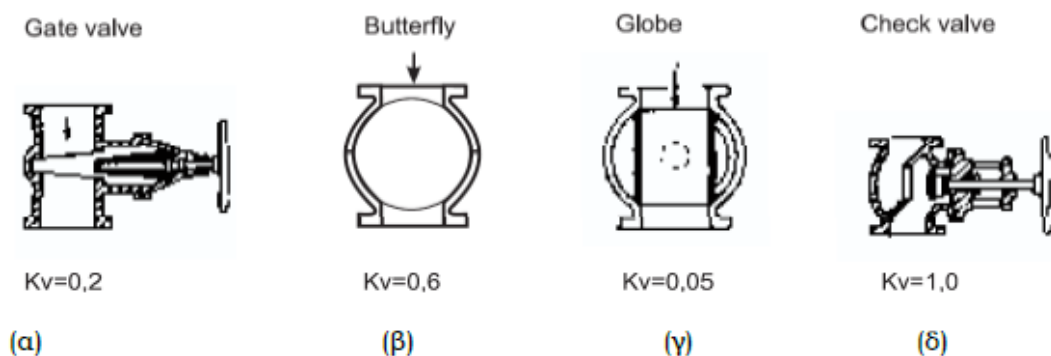
$$h_v = K_v \left(\frac{u^2}{2g} \right)$$

όπου, u : είναι η ταχύτητα ροής ύδατος διαμέσου της βαλβίδας (m/sec).

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec).

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.



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

Βαλβίδα πύλης		Βαλβίδα περιστρεφόμενου δίσκου	
Κατάσταση	K_v	t/D	K_v
Πλήρως ανοικτή	2,3	0,1	0,3
½ ανοικτή	4,3	0,2	0,3
¼ 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 αντίστοιχων με τα εμφανιζόμενα στις απότομες διαστολές και τα οποία οδηγούν στην ανάπτυξη απωλειών οι οποίες δίνονται από την παρακάτω σχέση:

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

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

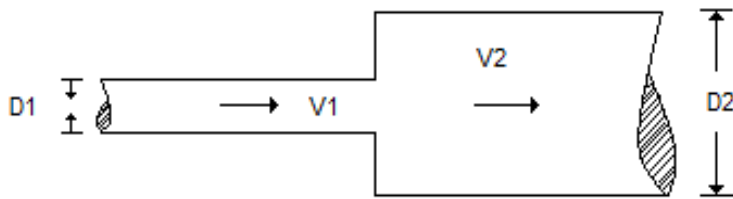
g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/sec}^2$).

K_{ge} : ο συντελεστής απωλειών σταδιακής διαστολής.

Οι τιμές του συντελεστή απωλειών σταδιακής διαστολής δίνονται στον Πίνακα 3.8.

	K_{ge}		
	θ		
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, θ : γωνία σταδιακής διαστολής (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13 Απώλειες σταδιακών διαστολών κλειστών αγωγών.

Απώλειες ύψους υδατόπτωσης ανοιχτών αγωγών

Ένας αγωγός που μεταφέρει νερό ονομάζεται ανοιχτός 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.

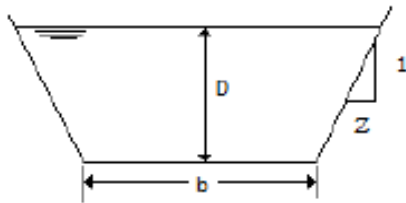
Οι ανοιχτοί αγωγοί διακρίνονται σε **φυσικούς αγωγούς** και σε **τεχνητούς**, ανάλογα με την αρχική τους διαμόρφωση. Η ροή σε έναν ανοιχτό αγωγό ονομάζεται σταθερή ή μόνιμη όταν καμία μεταβλητή της (ταχύτητα, βάθος κτλ.) δεν μεταβάλλεται με το χρόνο· στην αντίθετη περίπτωση η ροή ονομάζεται ασταθής ή μη μόνιμη. 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 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 παραπάνω εξίσωση με τη μεταβλητή D να είναι το διπλάσιο της υδραυλικής ακτίνας. Ως υδραυλική ακτίνα (R_u) ορίζεται το πηλίκο του εμβαδού της υγρής διατομής προς το μήκος της βρεχόμενης περιμέτρου του αγωγού σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

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

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

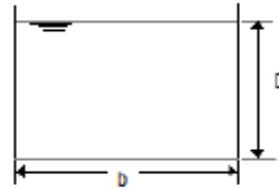


$$X = b + 2(1 + Z^2)^{1/2} D$$

$$Y = D(b + DZ)$$

$$R = \frac{Y}{X} = \frac{D(b + DZ)}{b + 2(1 + Z^2)^{1/2} D}$$

α. Τραπεζοειδές κανάλι



$$X = b + 2D$$

$$Y = bD$$

$$R = \frac{Db}{b + 2D}$$

β. Ορθογωνικό κανάλι

Σχήμα 3.15 Υδραυλική ακτίνα τυπικών ανοιχτών καναλιών.

Απώλειες τριβής ανοιχτών καναλιών

Οι απώλειες τριβής ανοιχτών καναλιών δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$h_f = LS$$

όπου, L: το μήκος του ανοιχτού καναλιού (m).

S: η κλίση του αντίστοιχου τμήματος ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

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. Τα διάφορα είδη απωλειών που οφείλονται στην τυρβώδη ροή υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Απώλειες εσχάρων εισαγωγής (trash rack losses)

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

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

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).

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

- Απώλειες εισόδου

Οι απώλειες εισόδου των ανοιχτών καναλιών δίνονται από την σχέση:

$$h_e = 0,05 \frac{u^2}{2g}$$

όπου, u: η ταχύτητα ροής ύδατος πριν την είσοδο του κλειστού αγωγού (m/sec).

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

- Απώλειες καμπυλώσεων

Οι απώλειες καμπυλώσεων υπολογίζονται με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης:

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

όπου, S: η διαμήκης κλίση του καναλιού.

L_b : το αξονικό μήκος της καμπύλωσης (m).

r : η ακτίνα της καμπύλωσης (m).

u: η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της καμπύλωσης (m/sec).

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

- Απώλειες συστολών

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

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

Τύπος συστολής	K _c
Κυλινδρικό τεταρτημόριο (cylinder quadrant)	0,1
Γωνία (wedge)	0,2
Συνεστραμμένο τοίχωμα(warped wall)	0,1

Πίνακας 3.9 Τιμές συντελεστή απωλειών συστολής ανοιχτών καναλιών για διαφορετικούς τύπους συστολής.

- Απώλειες διαστολών

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

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

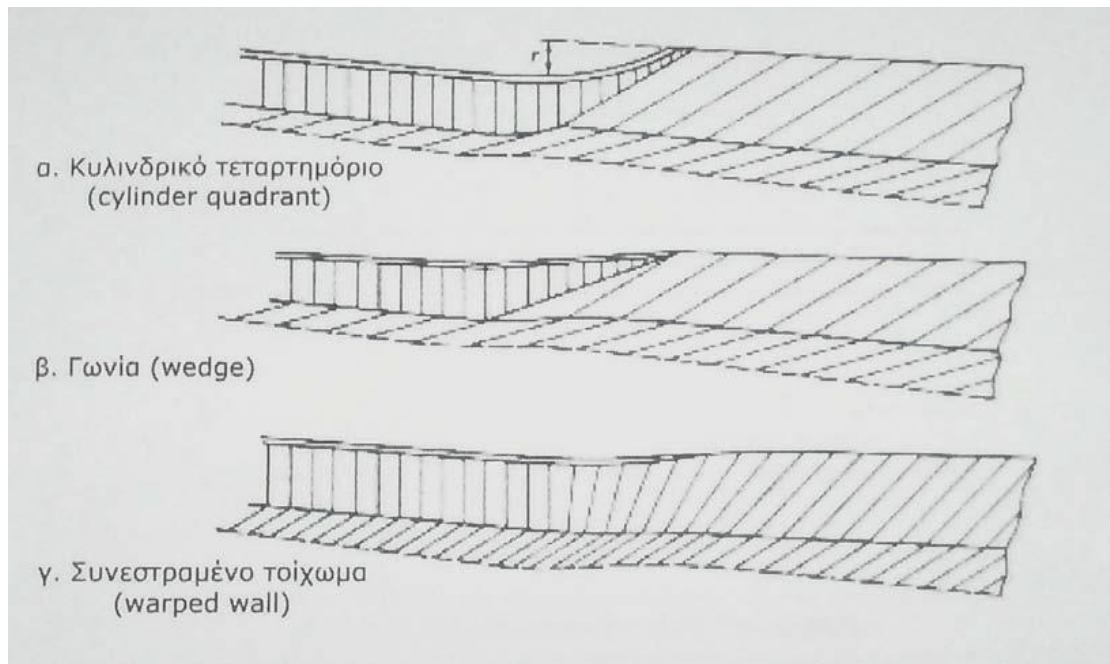
όπου, u: είναι η ταχύτητα ροής ύδατος κατά μήκος της διαστολής (m/sec).

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/sec²).

K_{exp}: ο συντελεστής απωλειών διαστολής, ο οποίος προκύπτει από τον Πίνακα 3.10.

Τύπος διαστολής	K _{exp}
Κυλινδρικό τεταρτημόριο (cylinder quadrant)	0,5
Γωνία (wedge)	0,5
Συνεστραμμένο τοίχωμα(warped wall)	0,3

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



Σχήμα 3.16 Απώλειες συστολών και διαστολών ανοιχτών αγωγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Στο πλαίσιο της λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας ύδατος σε μηχανική περιστροφική ενέργεια πραγματοποιείται με την βοήθεια των υδροστροβίλων. Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του νερού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. 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.

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. Σε 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.

Οι διατάξεις οι οποίες συνθέτουν τα συστήματα υδροστροβίλων περιλαμβάνουν:

- Το **δρομέα**, 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**, είναι το τμήμα εισόδου του ύδατος στον υδροστροβίλο στο οποίο, με τη μορφή συνήθως ακροφυσίων, προσπαθούμε να προσδώσουμε στο νερό την απαιτούμενη ταχύτητα.
- Τον **αγωγό εκτόνωσης**, 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.

4.1 Ταξινόμηση Υδροστροβίλων

Οι υδροστροβίλοι 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.
- **Εφαπτομενικούς** στροβίλους που χαρακτηρίζονται από εφαπτομενική κίνηση ύδατος.

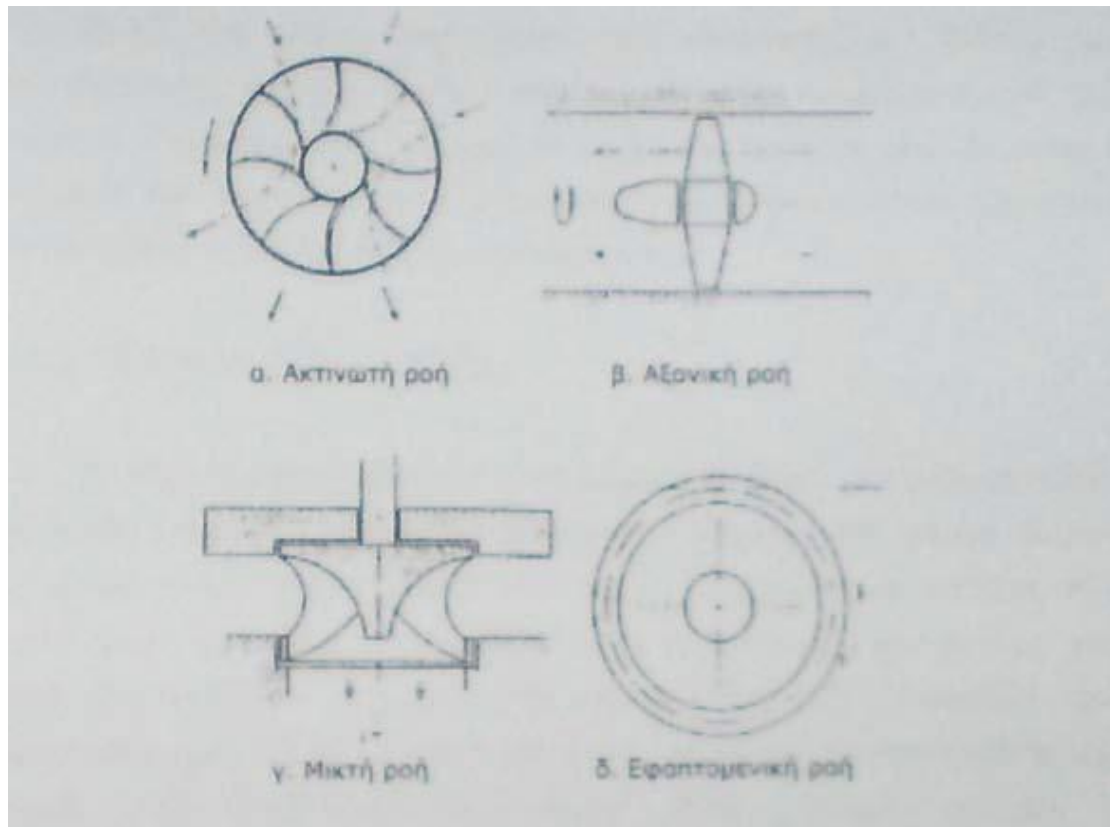
Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται οι περιπτώσεις των τύπων αυτών. Με κριτήριο την τοποθέτηση των υδροστροβίλων ταξινομούνται:

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

Ένας ακόμη διαχωρισμός των υδροστροβίλων είναι:

- Υδροστροβίλοι **μερικής έγχυσης**, στους οποίους πραγματοποιείται έγχυση ύδατος σε τμήμα της περιμέτρου του δρομέα.
- Υδροστροβίλοι **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 υδροστροβίλοι οι οποίοι αξιοποιούν αποκλειστικά την κινητική ενέργεια του ύδατος χαρακτηρίζονται ως **δράσης**. Οι υδροστροβίλοι οι οποίοι αξιοποιούν συνδυασμό των ενεργειών κίνησης και πίεσης του ύδατος χαρακτηρίζονται ως **αντίδρασης**. Παρακάτω περιγράφονται διεξοδικά οι υδροστροβίλοι δράσης και αντίδρασης.



Σχήμα 4.1 Ταξινόμηση υδροστροβίλων βασισμένη στην κίνηση του ύδατος σε σχέση με τον δρομέα.

4.2 Είδη υδροστροβίλων

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.

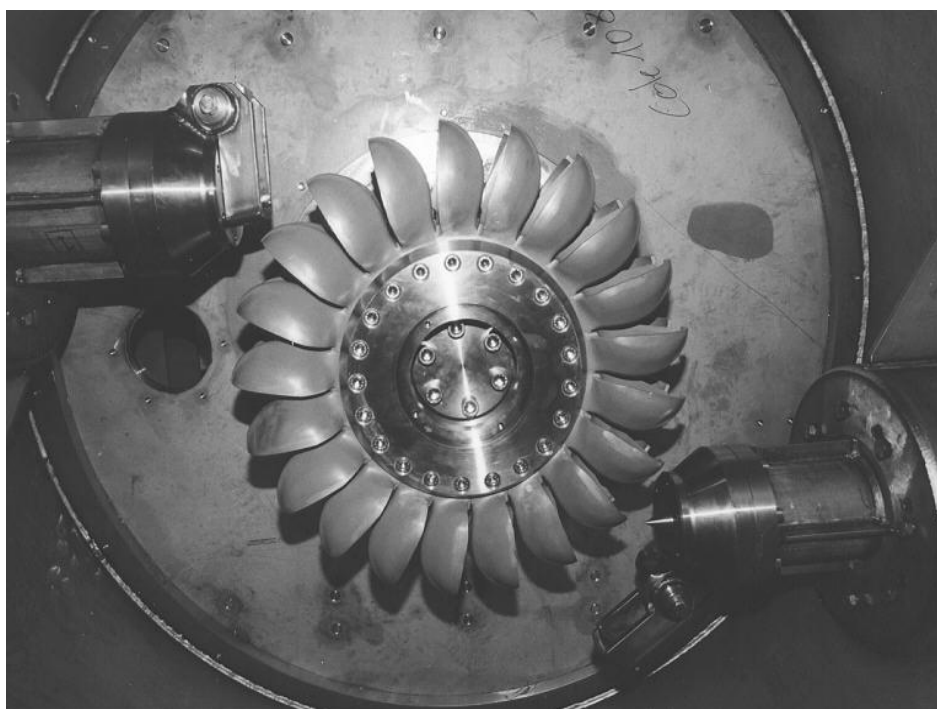
Παράλληλα, στο πλαίσιο της χρήσης των υδροστροβίλων δράσης δεν χρησιμοποιείται αγωγός φυγής, καθώς ο δρομέας λειτουργεί υπό την αναγκαία ατμοσφαιρική πίεση και το ύψος της μονάδας από την λεκάνη απορροής δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθεί. Οι διαφορετικοί τύποι των υδροστροβίλων δράσης παρουσιάζονται παρακάτω.

Υδροστρόβιλος Pelton

Ο στρόβιλος είναι μεταξύ των αποδοτικότερων τύπων υδροστροβίλων. Εφευρέθηκε από τον Lester Allan Pelton 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 νερό ρέει εφαπτομενικά κατά μήκος του δρομέα (Σχήμα 4.2). Τα ακροφύσια (Σχήμα 4.3) κατευθύνουν ισχυρά ρεύματα νερού αντίθετα σε μια σειρά σκαφιδιών 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.

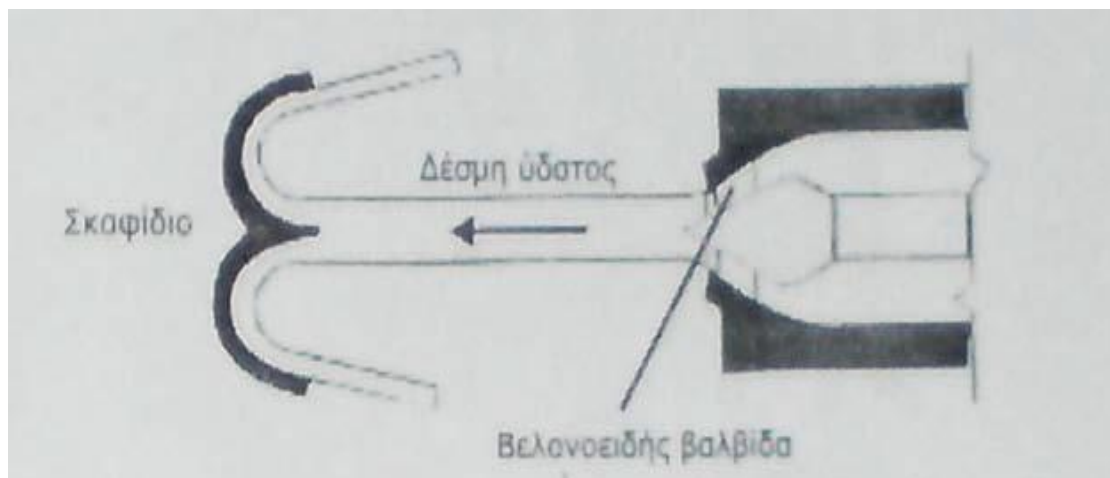
Για μέγιστη ισχύ και απόδοση, το σύστημα του στροβίλου σχεδιάζεται έτσι ώστε η ταχύτητα του πίδακα ύδατος να είναι διπλάσια της ταχύτητας των σκαφιδιών. Ένα πολύ μικρό ποσοστό της αρχικής κινητικής ενέργειας του ύδατος παραμένει ακόμα στο νερό, εντούτοις αυτό επιτρέπει στο σκαφίδιο να εκκενωθεί στον ίδιο βαθμό που αυτό γεμίζει, επιτρέποντας κατά συνέπεια την αδιάκοπη ροή του νερού.



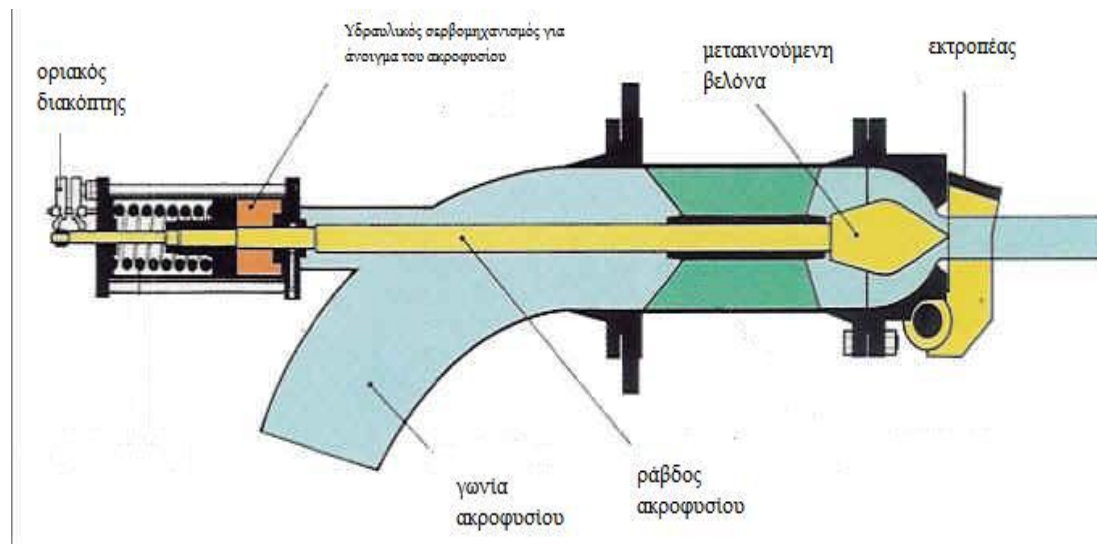
Σχήμα 4.2 Δρομέας Pelton.

Συχνά τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα σαν δίδυμα δοχεία ώστε το νερό να 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 $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ και ο αριθμός των ακροφυσίων εξαρτάται από τις διαθέσιμες ποσότητες νερού. Η παρεχόμενη ροή ρυθμίζεται με βελονοειδής βαλβίδες (Σχήμα 4.4). 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.

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 παρόλο που θεωρητικά δεν υπάρχει όριο. 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).

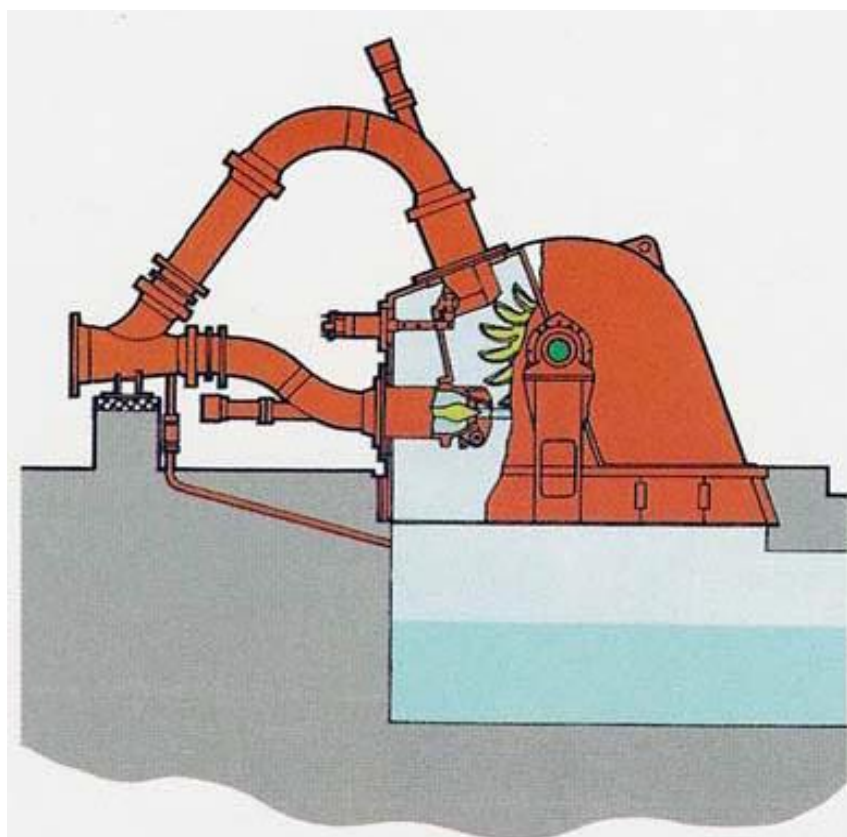


Σχήμα 4.3 Ακροφύσιο υδροστρόβιλου Pelton.



Σχήμα 4.4 Βελονοειδής βαλβίδα και εκτροπέας.

Ο δρομέας ενός στροβίλου είναι συνήθως απευθείας συνδεδεμένος στον άξονα της γεννήτριας και μπορεί να βρίσκεται πάνω στην κατεύθυνση του ρεύματος. Τέτοιου τύπου στρόβιλοι λειτουργούν με μεγάλο αριθμό στροφών περίπου 3000 ανά λεπτό και έχουν βαθμό απόδοσης 90%.



Σχήμα 4.5 Άποψη υδροστροβίλου Pelton δύο ακροφυσίων.

Υδροστρόβιλος Turgo

Ο στρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσης σχεδιασμένος για εφαρμογές μεσαίων υψών υδατόπτωσης. Οι λειτουργούντες υδροστρόβιλοι επιτυγχάνουν αποδόσεις περίπου 87%. Σε εργοστασιακές και εργαστηριακές 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.

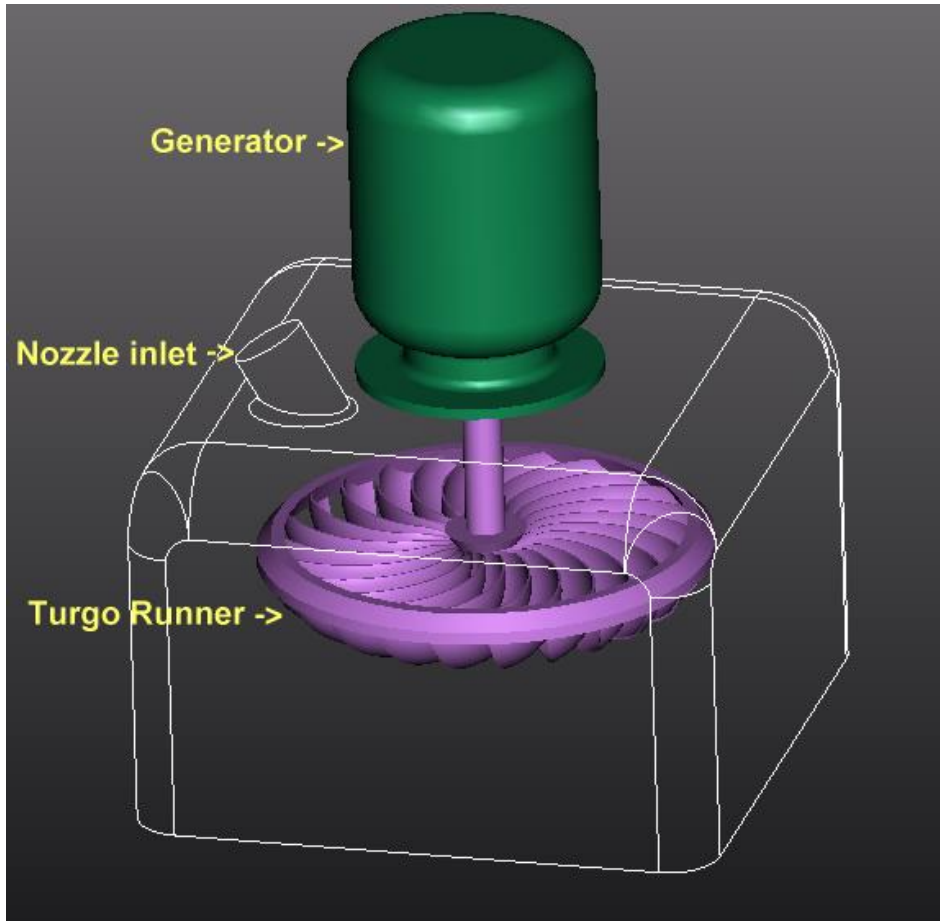
Από την άλλη πλευρά, τα σκαφίδια ενός δρομέα Turgo δεν είναι τόσο στιβαρά όπως τα σκαφίδια του Pelton. Οι Turgo λειτουργούν σε μια κλίμακα υψών υδατόπτωσης όπου οι Francis και Pelton επικαλύπτονται. Ενώ πολλές μεγάλες εγκαταστάσεις με στροβίλους Turgo υπάρχουν, είναι επίσης δημοφιλείς για μικρά υδροηλεκτρικά 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.

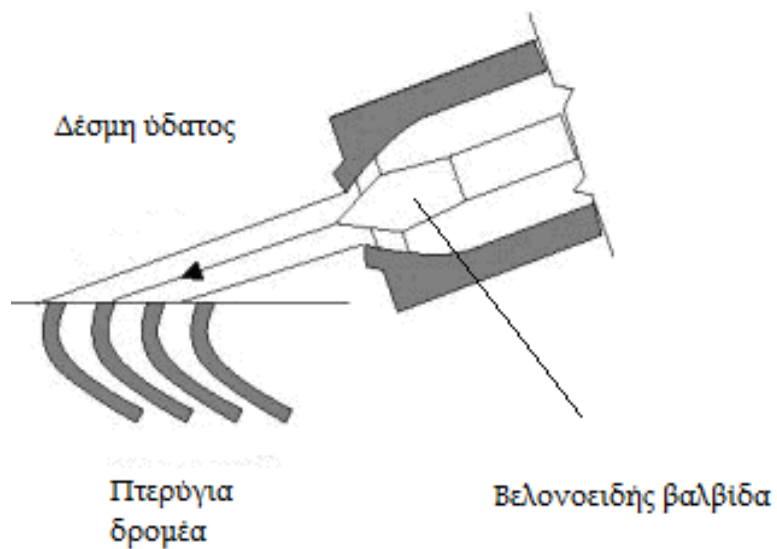
Ένας δρομέας Turgo μοιάζει με έναν δρομέα Pelton, χωρισμένο στην μέση. Για την ίδια ισχύ, ο δρομέας Turgo έχει την μισή διάμετρο από τον Pelton, κι έτσι διπλάσια ειδική ταχύτητα. Ο Turgo μπορεί να χειριστεί μεγαλύτερη ροή ύδατος από ότι ο Pelton επειδή το εξερχόμενο νερό δεν συγκρούεται με τα παράπλευρα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

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



Σχήμα 4.6 Υδροστρόβιλος Turgo.



Σχήμα 4.7 Ακροφύσιο υδροστρόβιλου Turgo.

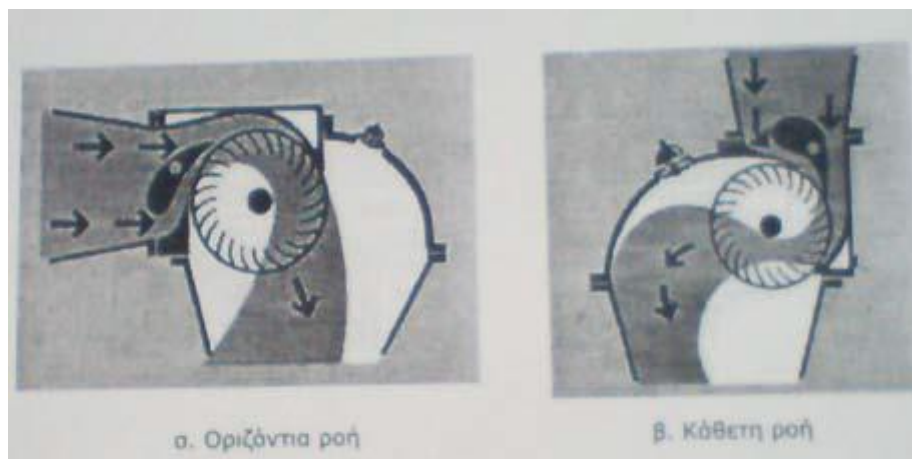
Υδροστρόβιλος Cross-flow

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 πτερύγια καμπύλης κατασκευής. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διάταξης, το νερό εισέρχεται στον υδροστρόβιλο μέσω ενός ή περισσότερων οδηγητικών 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 συμβιαστική ροή. Το συγκεκριμένο φαινόμενο οδηγεί στην εμφάνιση σημαντικών απωλειών πρόσκρουσης. Η παραπάνω διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 4.9

Η μέγιστη απόδοση ενός στρόβιλου 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 στρόβιλου Cross-flow είναι χαμηλή, και διαθέτει καλές ρυθμίσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερο σε μίνι και μικρο υδροηλεκτρικούς σταθμούς λιγότερο των 2.000 και με ύψη υδατόπτωσης μικρότερα των 200 μέτρων.

Η απλή κατασκευή τους καθιστά ευκολότερη την συντήρησή τους σε σχέση με άλλους τύπους στρόβιλων· 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 m³/sec.



Σχήμα 4.8 Λειτουργία υδροστροβίλου Cross-flow.



Σχήμα 4.9 Δρομέας στροβίλου Cross-flow.

Υδροστρόβιλοι αντίδρασης

Η λειτουργία των στροβίλων αντίδρασης 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 πτερυγίων του δρομέα, η οποία εξασθενεί καθώς το νερό ρέει διαμέσου του στροβίλου. 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.

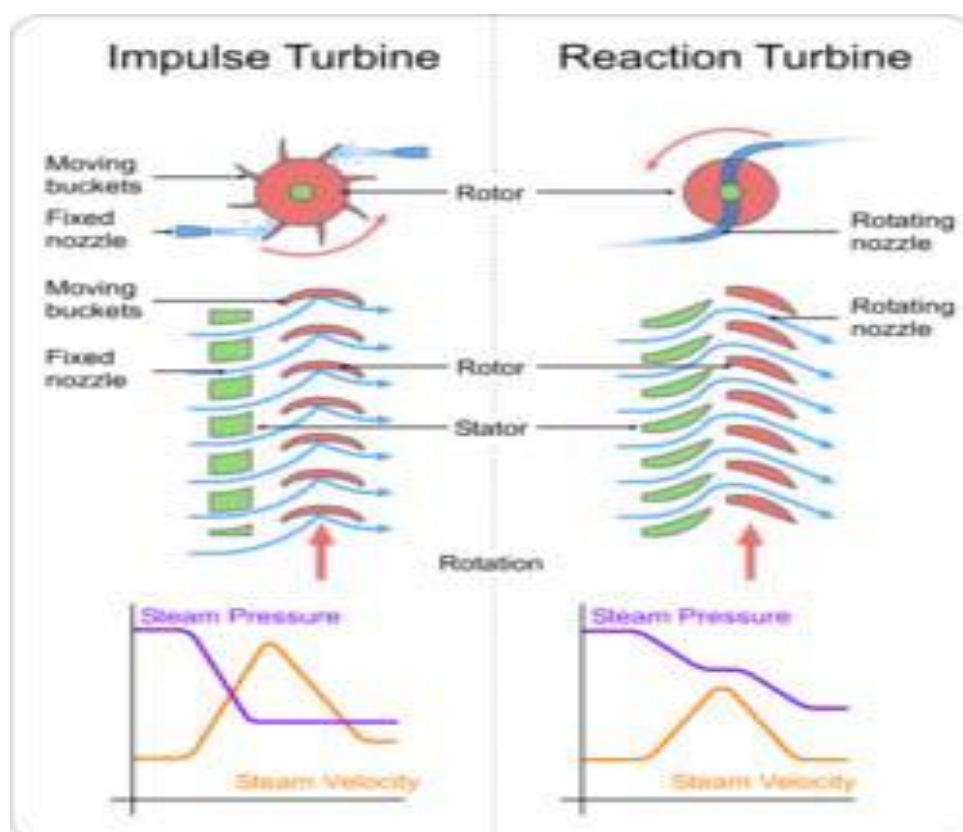
Οι υδροστρόβιλοι τύπου αντίδρασης χαρακτηρίζονται από ακτινωτή, αξονική ή μικτή ροή ύδατος και δεδομένου του γεγονότος ότι τοποθετούνται βυθισμένοι στη ροή του νερού, απαιτούν περίβλημα ισχυρής κατασκευής, ικανό να ανταπεξέλθει στην υψηλή πίεση λειτουργίας.

Οι περισσότεροι υδροστρόβιλοι σε χρήση είναι στρόβιλοι αντίδρασης και χρησιμοποιούνται σε χαμηλά (<30) και μεσαία (30300) ύψη υδατόπτωσης, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικούς στο πλαίσιο μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η σύγκριση των στροβίλων δράσης και των στροβίλων αντίδρασης. Οι διαφορετικοί τύποι υδροστροβίλων αντίδρασης παρουσιάζεται διεξοδικά παρακάτω.

Υδροστρόβιλος Francis

Ο στρόβιλος είναι ένας τύπος υδροστροβίλου που δημιουργήθηκε από τον James 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 4.11 και συνήθως περιλαμβάνει 8 ως 15 περύγια. Κατά την λειτουργία των υδροστροβίλων Francis, το νερό εισέρχεται στο στρόβιλο από το σπειροειδές κέλυφος 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 4.12 ένας τέτοιος στρόβιλος έχει κινητά οδηγητικά περύγια, 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.



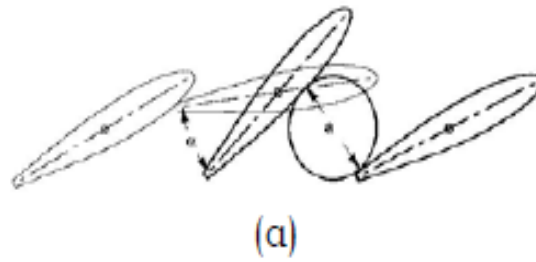
Σχήμα 4.10 Σύγκριση στροβίλων δράσης και στροβίλων αντίδρασης.

Περιστρέφονται γύρω από τους άξονες τους μέσω συνδετικών 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 στην είσοδο του στροβίλου. Ο δρομέας

μετασχηματίζει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική και το νερό επιστρέφει ακτινικά στον αγωγό φυγής.



Σχήμα 4.11 Δρομέας στροβίλου Francis.



Σχήμα 4.12 (α) Αρχή λειτουργίας οδηγητικών περυγίων, (β) Οδηγητικά περύγια υδροστροβίλου Francis.

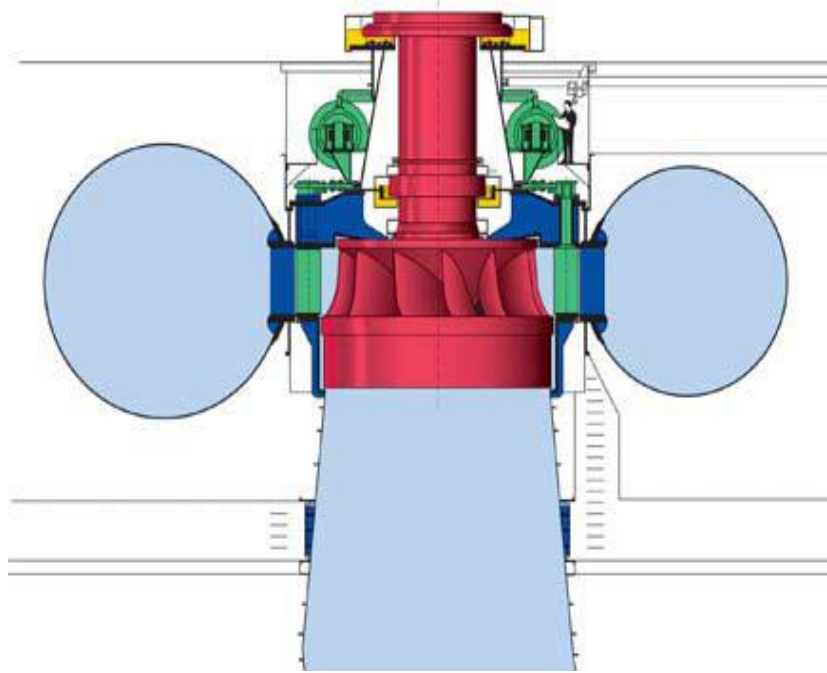
Προκειμένου να περιορισθεί η παραμένουσα κινητική ενέργεια στην ποσότητα ύδατος η οποία απομακρύνεται από το δρομέα, καθίσταται αναγκαία η χρήση αγωγού φυγής μεταξύ του στρόβιλου και της λεκάνης απορροής. Ο προσεκτικός σχεδιασμός του συγκεκριμένου αγωγού επιτρέπει εντός ορισμένων ορίων, την τοποθέτηση του στρόβιλου 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, 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° , η οποία είναι δυνατόν να αυξηθεί ως τις 15° προκειμένου να περιορισθεί το μήκος του και συνεπώς το κόστος του. 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 αλουμίνιουχαλκού 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.



Σχήμα 4.13 Υδροστρόβιλος Francis κάθετης τοποθέτησης.

Υδροστρόβιλος Kaplan

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

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 πτερύγια. Αν και οι λεπίδες και τα οδηγητικά πτερύγια είναι ρυθμιζόμενα περιγράφεται ως στρόβιλος «διπλής ρύθμισης ενώ αν τα οδηγητικά πτερύγια είναι σταθερά είναι στρόβιλος «απλής ρύθμισης». 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 πτερυγίων 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.

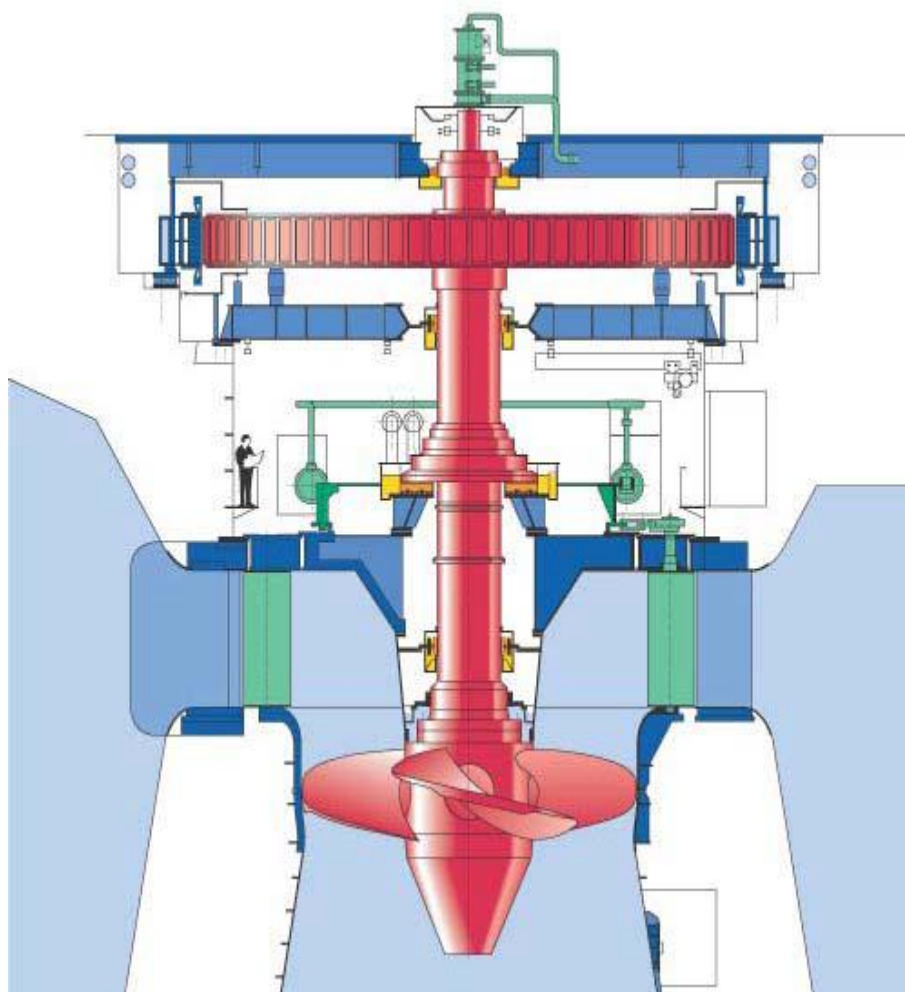
Ο Kaplan μονής ρύθμισης επιτρέπει καλή προσαρμογή στην ποικίλα διαθέσιμη ροή αλλά είναι λιγότερο ευέλικτος στην περίπτωση σημαντικών αλλαγών στο ύψος υδατόπτωσης. Μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ 30% ως 100% της μέγιστης σχεδιαζόμενης παροχής.

Ο στρόβιλος Kaplan διπλής ρύθμισης είναι μια μηχανή κάθετου άξονα με ένα σπειροειδές κέλυφος και ένα σύνολο ακτινωτών οδηγητικών περυγίων. Η ροή εισέρχεται εσωτερικά με ακτινωτό τρόπο και κάνει δεξιόστροφη γωνία πριν εισέλθει στο δρομέα σε μια αξονική κατεύθυνση. Η κατασκευή των περυγίων του δρομέα αποσκοπεί στην διατήρηση της αξονικής ροής ύδατος και ο αριθμός τους κυμαίνεται μεταξύ 4 και 10. 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 στρόβιλου.

Οι υδροστρόβιλοι Kaplan παρουσιάζουν απόδοση της τάξης του 80-90% και χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις παροχής ύδατος μεταξύ 5-100 m³/sec και χαμηλού ύψους υδατόπτωσης από 2 ως 40 μέτρα.



Σχήμα 4.14 Δρομέας στρόβιλου Kaplan.



Σχήμα 4.15 Υδροστρόβιλος Kaplan κάθετης τοποθέτησης.

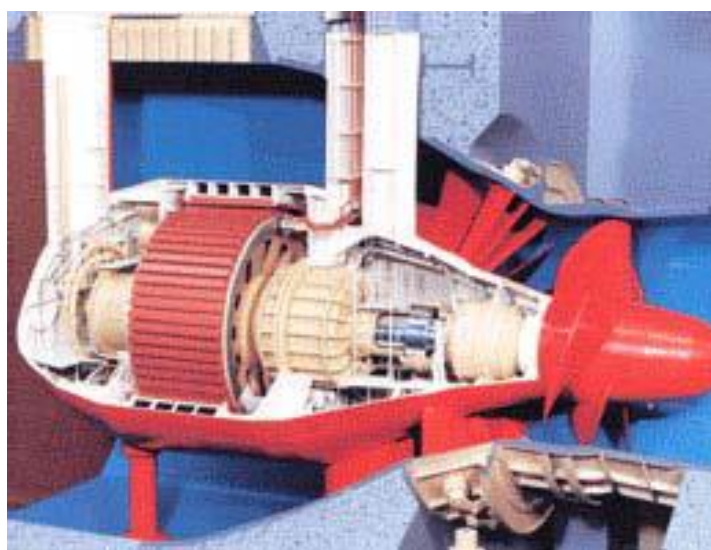
Υδροστρόβιλοι τύπου βολβού (bulb turbines)

Ο δρομέας των υδροστροβίλων τύπου βολβού δεν παρουσιάζει διαφορές από τον αντίστοιχο των υδροστροβίλων Kaplan. Η ιδιαιτερότητα των συγκεκριμένων διατάξεων έγκειται στο γεγονός ότι ο στρόβιλος 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.

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.

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 διαφοροποίησή 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 της με τη βοήθεια ειδικού αδιάβροχου μέσου.



Σχήμα 4.16 Υδροστρόβιλος τύπου βολβού.

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 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 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.

4.3 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.

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. Ο πίνακας 4.1 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 προκειμένου να εξετασθεί η εγκυρότητα της απόδοσης του χρησιμοποιούμενου υδροστροβίλου, όπως προκύπτει από τα στοιχεία του κατασκευαστή.

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

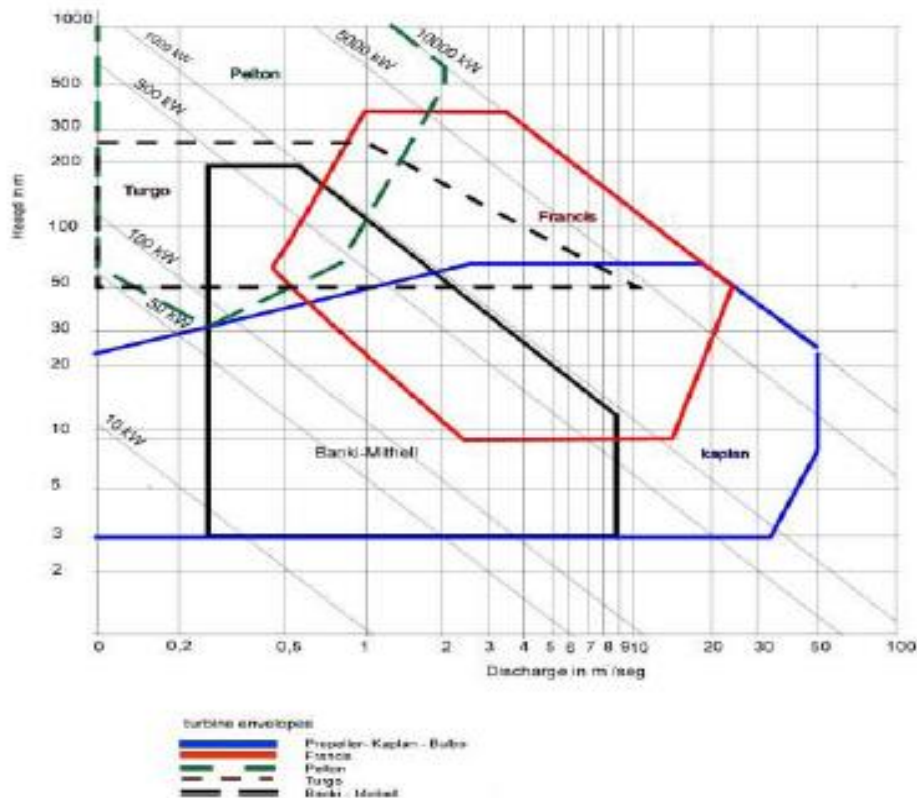
Πίνακας 4.1 Εύρος χρησιμοποιούμενου ύψους υδατόπτωσης για διάφορους τύπους υδροστροβίλων.

Παροχή ύδατος

Η παροχή ύδατος της εξεταζόμενης υδροδυναμικής τοποθεσίας μεταβάλλεται με τον χρόνο και συνήθως αντιπροσωπεύεται από την καμπύλη διάρκειας παροχής. Ο χρησιμοποιούμενος υδροστροβίλος, ωστόσο αξιοποιεί συγκεκριμένη τιμή παροχής, η οποία αποτελεί την παροχή λειτουργίας 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 συναρτήσει της παροχής ύδατος (Σχήμα 4.17), 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.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα εύρους ύψους υδατόπτωσης συναρτήσει παροχής ύδατος λειτουργίας για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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. Η ειδική ταχύτητα 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.

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:

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

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 παραπάνω σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

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

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

$$n_g = \frac{120 f}{p}$$

όπου f η συχνότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Hz) και p ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Στην περίπτωση του Ελληνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας η συχνότητα 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:

$$n = n_g / a$$

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 υδροστροβίλο. 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 υδροστροβίλοι τύπου Pelton χαρακτηρίζονται από μικρή ειδική ταχύτητα, οι αντίστοιχοι τύπου Francis από μεσαίες τιμές ειδικής ταχύτητας και οι Kaplan από μεγαλύτερες τιμές.

Παράλληλα, οι υδροστροβίλοι 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.

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

Πίνακας 4.2 Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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 4.3 Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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

Πίνακας 4.4 Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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

Πίνακας 4.5 Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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

Πίνακας 4.6 Εύρος ειδικής ταχύτητας και ύψους υδατόπτωσης για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

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 δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_h = \frac{h_u}{h_{net}} = \frac{h_{net}}{h_{gross}}$$

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

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

$$n_v = \frac{Q - Q_L}{Q}$$

Όπου, Q η συνολική παροχή που τροφοδοτεί τον υδροστρόβιλο και Q_L η αντίστοιχη διαρροής, 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:

$$n_m = \frac{bp}{bp + fp}$$

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

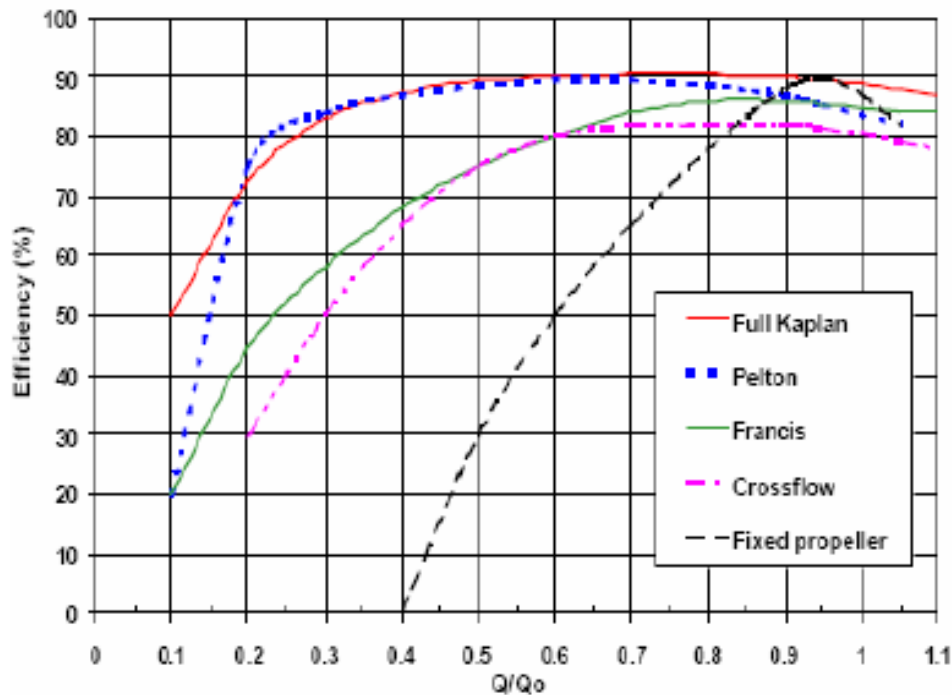
Ως **συνολική απόδοση** ορίζεται ο λόγος της ισχύος που παρέχεται από τον υδροστρόβιλο (μηχανική ισχύς που μεταφέρεται από τον άξονα του στροβίλου) προς την υδραυλική ισχύ (την αντίστοιχη που απορροφάται από τον υδροστρόβιλο), δηλαδή:

$$n = \frac{P_{μηχ.}}{P_{υδρ.}}$$

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

$$n_t = n_h \cdot n_v \cdot n_m$$

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 4.18 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 υψηλό 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.

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.

4.4 Σπηλαίωση υδροστροβίλων

Σπηλαίωση 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 ή του βρασμού. Κατά συνέπεια, η σπηλαίωση 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, 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 (οι οποίες μεταφέρονται από την περιοχή 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 υδροστρόβιλο ηχεί όπως η πρόσκρουση αμμοχάλικου σε αυτόν).



Σχήμα 4.19 Διάβρωση σπηλαιώσης σε στρόβιλο.

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 4.19. 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.

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 (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.

Ο λόγος:

$$\sigma = \frac{H_{\theta}}{H}$$

ονομάζεται συντελεστής σπηλαίωσης Thoma ή παράμετρος σπηλαίωσης της εγκατάστασης, όπου H_{θ} η διαφορά της ολικής πίεσης στην διατομή εξόδου του υδροστροβίλου ως προς την τάση ατμών του υγρού και H το διαθέσιμο ύψος υδατόπτωσης, και χαρακτηρίζει αποκλειστικά την εγκατάσταση του υδροστροβίλου.

Ο συντελεστής σπηλαίωσης Thoma στην περίπτωση υδροστροβίλου υπολογίζεται από την εξής εμπειρική σχέση:

$$\sigma = \frac{n_s}{25.000}$$

Στην περίπτωση υδροστροβίλων η παραπάνω εμπειρική σχέση παίρνει την μορφή:

$$\sigma = \frac{n_s}{20.000}$$

Η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαίωσης εκφράζεται ως:

$$\sigma = \frac{H_{\theta}}{H} > \sigma_{\text{κρ}} = \frac{H_{\text{κρ}}}{H}$$

στην οποία με $\sigma_{\text{κρ}}$ συμβολίζεται η παράμετρος σπηλαίωσης του υδροστροβίλου και $H_{\text{κρ}}$ είναι το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης. Η λειτουργία του υδροστροβίλου θα είναι ασφαλής από πλευράς σπηλαίωσης όταν $H_{\theta} > H_{\text{κρ}}$ ή αντίστοιχα $\sigma > \sigma_{\text{κρ}}$. Η λειτουργία του υδροστροβίλου θα είναι επισφαλής από πλευράς σπηλαίωσης όταν $H_{\theta} \approx H_{\text{κρ}}$, ή αντίστοιχα $\sigma \approx \sigma_{\text{κρ}}$, ενώ για $H_{\theta} < H_{\text{κρ}}$, αντίστοιχα $\sigma < \sigma_{\text{κρ}}$ η λειτουργία του υδροστροβίλου γίνεται με συστηματική ανάπτυξη σπηλαίωσης.

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

Εκτός από αυτή την μορφή σπηλαίωσης στους υδροστροβίλους αναπτύσσονται και άλλες μορφές σπηλαίωσης των οποίων η εμφάνιση είναι σχεδόν ανεξάρτητη της τιμής της παραμέτρου σπηλαίωσης σ και εξαρτάται κύρια από το σημείο λειτουργίας, δηλαδή για καλά σχεδιασμένο υδροστροβίλο αυτές οι μορφές σπηλαίωσης δεν

αναπτύσσονται στην περιοχή του κανονικού σημείου λειτουργίας. Με σκοπό την αποφυγή των άλλων μορφών σπηλαίωσης, 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 σ , δηλαδή την $\sigma_{κρ}$.

Μια μορφή σπηλαίωσης που είναι ανεξάρτητη από την στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου είναι η ανάπτυξη της στήλης σπηλαίωσης κατάντη του κώνου της πλήμνης του δρομέα. Η ανάπτυξη της σπηλαίωσης 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 σπηλαίωσης υπό μορφή στήλης η οποία έχει κωνική μορφή ή ελικοειδή μορφή. Ο όγκος της στήλης σπηλαίωσης είναι τόσο μεγάλος όσο μικρότερη είναι η τιμή της παραμέτρου σ . Η ανάπτυξη της στήλης σπηλαίωσης 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 σπηλαίωσης ή μείωση του όγκου της επιτυγχάνεται με διάφορους εμπειρικούς τρόπους όπως η έγχυση αέρα τον κώνο της πλήμνης, την διαμόρφωση λεπτών πτερυγίων 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. Οι συσχετίσεις αυτές για τον υδροστροβίλο δίνεται από την εμπειρική σχέση:

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

και για τον υδροστροβίλο Kaplan:

$$\sigma_{κρ} = 6.40 \cdot 10^{-5} n_s^{1,46}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

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 προηγηθέντων 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 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 είναι δυνατό να αποτελούν εγκαταστάσεις **ασυνεχούς ή διακοπτόμενης λειτουργίας (intermittent operation)** και μπορούν να παρέχουν ενέργεια όταν οι υδρολογικές συνθήκες το επιτρέπουν.

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 του έργου και συνεπώς στην οικονομική αποτίμηση της σχεδιαζόμενης επένδυσης.

5.1 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:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H$$

όπου P_h είναι η υδροδυναμική ισχύς (W), γ 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 (m^3/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:

$$P_h = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα ύδατος (1.000 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:

$$P_h = 9,81 \cdot Q \cdot H$$

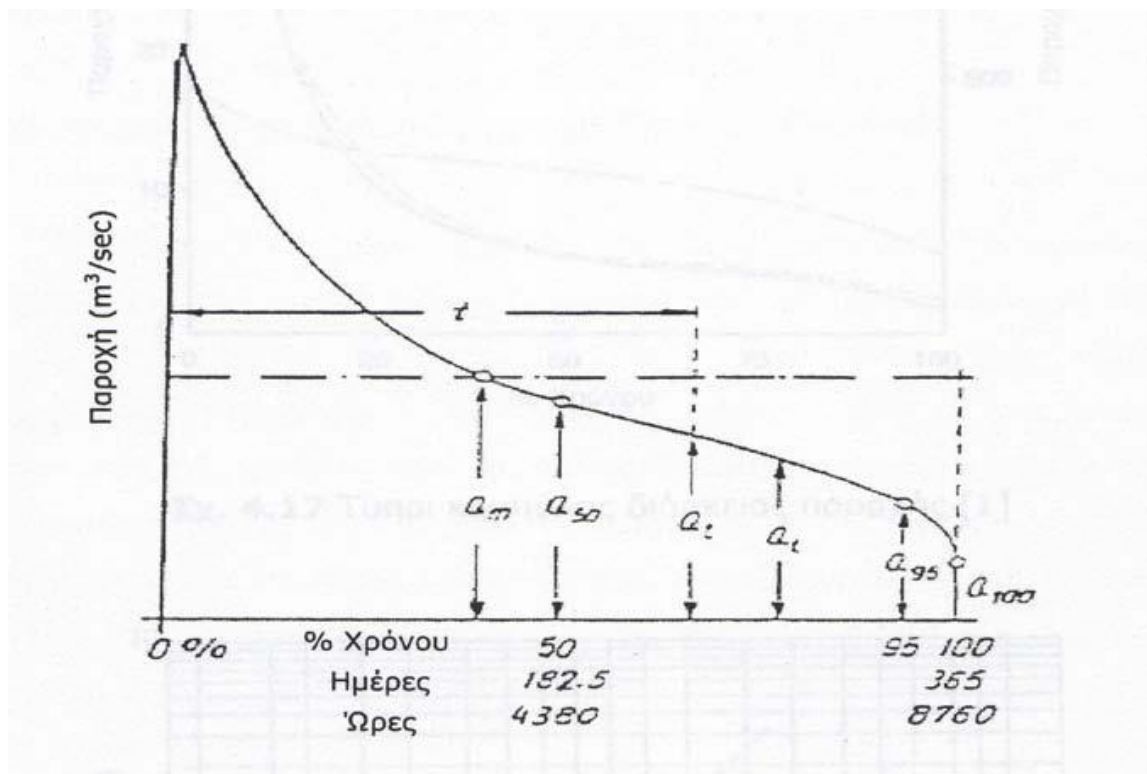
Η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας g παρουσιάζει μεταβολές ανάλογα με το υψόμετρο της εξεταζόμενης τοποθεσίας, με αποτέλεσμα να μειώνεται κατά $0,31 \text{ cm/sec}^2$ κάθε 1000 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά την χρήση των παραπάνω εξισώσεων, κρίνεται αναγκαία η συνεκτίμηση των συγκεκριμένων

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. 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 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.

Οι παραπάνω χρησιμοποιούμενες τιμές παροχής ύδατος παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1 και η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αντίστοιχων υπολογισμών σχετίζεται με την χρονική διάρκεια των υδρολογικών παρατηρήσεων.



Σχήμα 5.1 Παροχές για τον προσδιορισμό της υδροδυναμικής ισχύος μιας υδροηλεκτρικής μονάδας.

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:

$$P_m = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t$$

όπου η_t ο συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου, 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}). Βαθύτερη προσέγγιση του ζητήματος ωστόσο, αποκαλύπτει ότι το ύψος υδατόπτωσης το οποίο αξιοποιείται από τον υδροστροβίλο, είναι το στατικό ύψος, δεδομένου του γεγονότος ότι η διαφορά 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.

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. 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:

$$P_e = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta$$

όπου Q η παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου, H το στατικό ύψος υδατόπτωσης της εγκατάστασης και η ο συνολικός βαθμός απόδοσης του σταθμού, ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_{in} \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr}$$

όπου ο η_t συνολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου (80-90%), η_{in} ο βαθμός απόδοσης του πολλαπλασιαστή στροφών, η_g η απόδοση της γεννήτριας (85-95%) και η_{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.

5.2 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 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.

Μέθοδος συντελεστή χρησιμοποίησης

Η πρώτη προσέγγιση της παραγόμενης ενέργειας μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού επιτυγχάνεται με τη χρήση του βαθμού ή συντελεστή χρησιμοποίησης. Ως συντελεστής χρησιμοποίησης 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:

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

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.

Μέθοδος καμπύλης διάρκειας παροχής

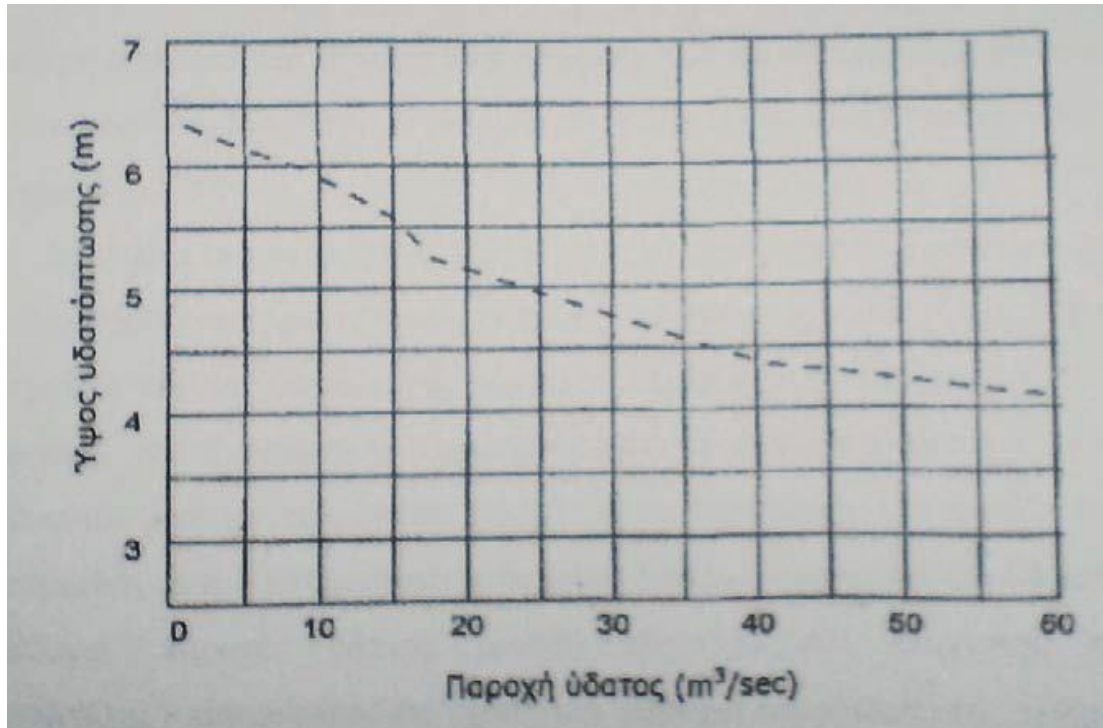
Το ενεργειακό περιεχόμενο κάθε υδροδυναμικής τοποθεσίας καθορίζεται από τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της, τη στιγμή που το σύνολο των υδρομετρικών στοιχείων καταγράφονται με τη βοήθεια της καμπύλης διάρκειας παροχής. Η ακριβής και αξιόπιστη εκτίμηση συνεπώς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μικρού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

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

$$E(kWh) = \int_0^t 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \cdot dt$$

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 5.2. Στις περισσότερες περιπτώσεις ωστόσο, μελέτης μικρών υδροηλεκτρικών 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 αξιοσημείωτο σφάλμα στην ενεργειακή εκτίμηση της εξεταζόμενης εγκατάστασης.



Σχήμα 5.2 Μεταβολή ύψους υδατόπτωσης με παροχή ύδατος.

- Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας μικρής υδροηλεκτρικής εγκατάστασης προκύπτει από το γινόμενο των αντίστοιχων βαθμών του υδροστρόβιλου, του πολλαπλασιαστική στροφών, της γεννήτριας και του χρησιμοποιούμενου μετασχηματιστή. Οι συγκεκριμένες τιμές απόδοσης παραμένουν σταθερές, με εξαίρεση τον υδροστρόβιλο 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 υδροστρόβιλου, 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:

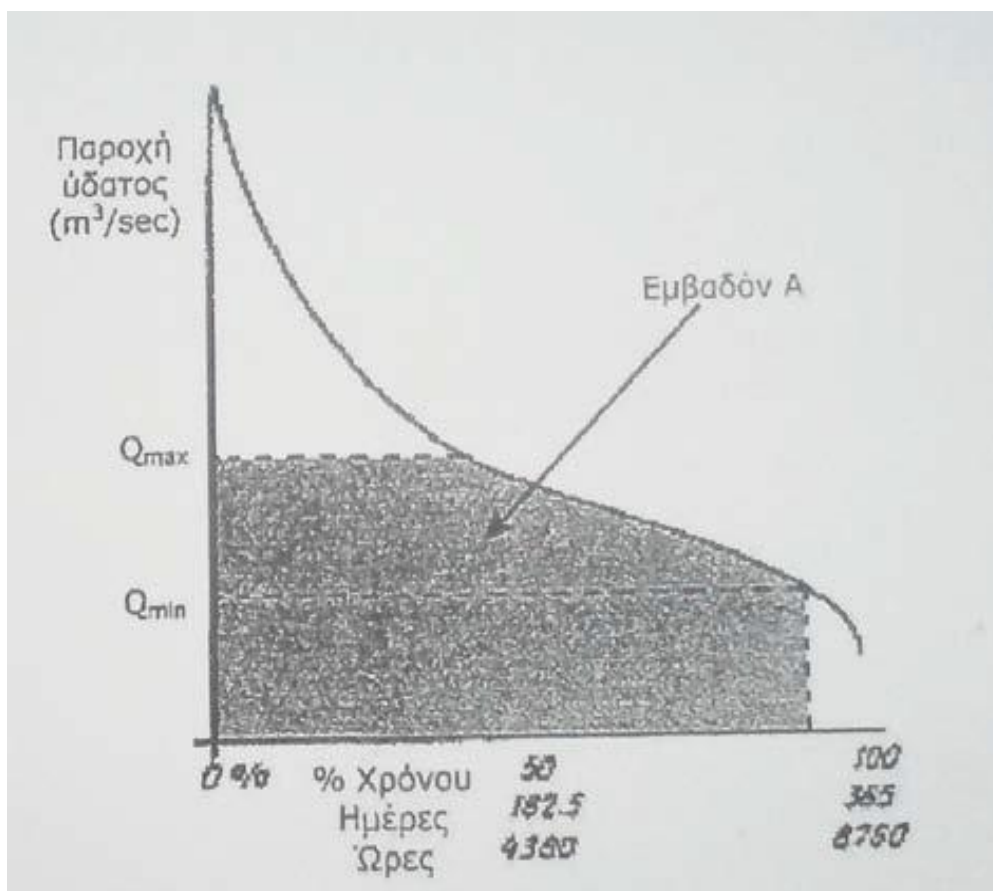
$$E(kWh) = 9.81 \cdot H \cdot \eta \cdot \int_0^t Q \cdot dt$$

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 υδροστροβίλου 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 ζητούμενου ολοκληρώματος προκύπτει ίση με το εμβαδόν της περιοχής A της καμπύλης διάρκειας παροχής του Σχήματος 5.3.

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

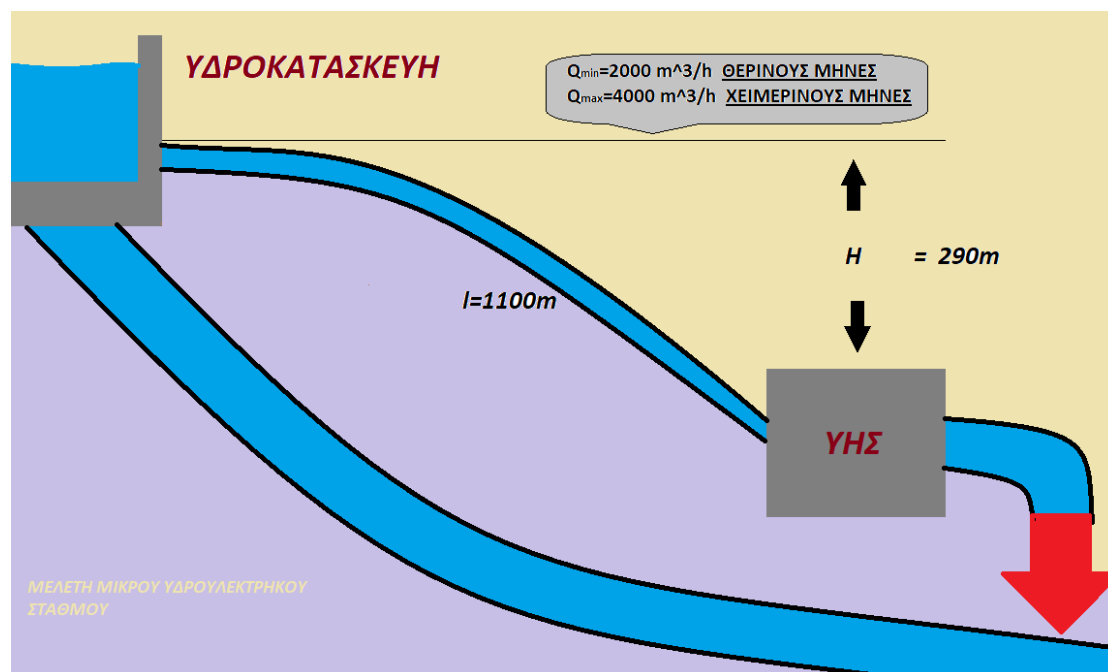
$$E(kWh) = 9,81 \cdot H \cdot n \cdot A$$



Σχήμα 5.3 Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας με χρήση καμπύλης διάρκειας παροχής.

5.3 Πρακτική εφαρμογή – Μελέτη

Αρχικοί υπολογισμοί



Δίνονται τα παρακάτω δεδομένα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού:

$Q_{max}=4000 \text{ m}^3/h$, παροχή νερού τους χειμερινούς μήνες.

$Q_{min}=2000 \text{ m}^3/h$, παροχή νερού τους θερινούς μήνες.

$H=290 \text{ m}$, γεωδαιτικό ύψος.

$l=1100 \text{ m}$, μήκος αγωγού πρόπτωσης.

Στοιχεία προς μελέτη:

1. Ηλεκτρική ισχύς του σταθμού.
2. Τι είδους υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να κατασκευαστεί.
3. Ποιος τύπος υδροστρόβιλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Υπολογισμοί:

1. Με βάση τα δεδομένα και από την σχέση $P=g*Q*H$ βρίσκουμε την ισχύ εισόδου του υδροστρόβιλου ως εξής:

$$Q_{max}=4000\text{m}^3/h=4000/3600=1,11\text{m}^3/\text{sec}$$

$$P_{max}=g*Q_{max}*H=9,81\text{m}/\text{sec}^2*1,11\text{m}^3/\text{sec}*290\text{m}=3,15\text{kW}$$

$$Q_{min}=2000\text{m}^3/h=2000/3600=0,55\text{m}^3/\text{sec}$$

$$P_{min}=g*Q_{min}*H=9,81\text{m}/\text{sec}^2*0,55\text{m}^3/\text{sec}*290\text{m}=1,56\text{kW}$$

2. Με βάση τον παραπάνω υπολογισμό πρόκειται για έναν Μικρό Υδροηλεκτρικό Σταθμό διότι ο ορισμός των Μικρών Υδροηλεκτρικών Συστημάτων διαφέρει από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα σύμφωνα με τη νομοθεσία (Ν.1559/1985 και Ν2244/1994) ως μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται οι σταθμοί με ισχύ μικρότερη των 10 MW ενώ με το καινούργιο νόμο 3851/2010 το όριο ανέβηκε στα 15MW.

Συγκεκριμένα πρόκειται για έναν μικρό όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ Υδροηλεκτρικό Σταθμό και χαρακτηρίζεται ως μεγάλου ύψους λόγω του ύψους υδατόπτωσης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

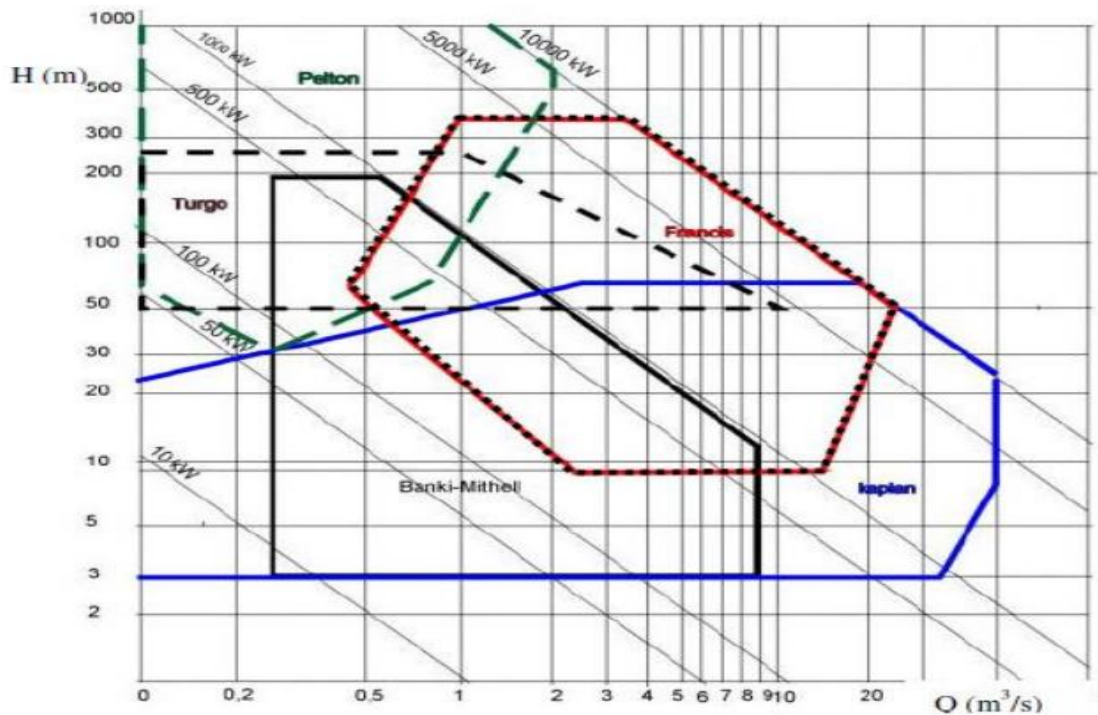
Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	Ύψος υδατόπτωσης (m)		
	Μικρό	Μεσαίο	Μεγάλο
5-50	1,5-15	15-50	50-150
50-500	2-20	20-100	100-250
500-5000	3-30	30-120	120-400

3. Με βάση τα δεδομένα μας και με τη χρήση του παρακάτω διαγράμματος επιλογής υδροστροβίλων για $H=290\text{m}$ και Q

- $Q_{\max}=4000\text{m}^3/\text{h}=4000/3600=1,11\text{m}^3/\text{sec}$
- $Q_{\min}=2000\text{m}^3/\text{h}=2000/3600=0,55\text{m}^3/\text{sec}$

Ταιριάζει και στις δυο περιπτώσεις ο υδροστροβίλος τύπου Pelton διότι καλύπτει και τις δυο παροχές στο συγκεκριμένο υψόμετρο.

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



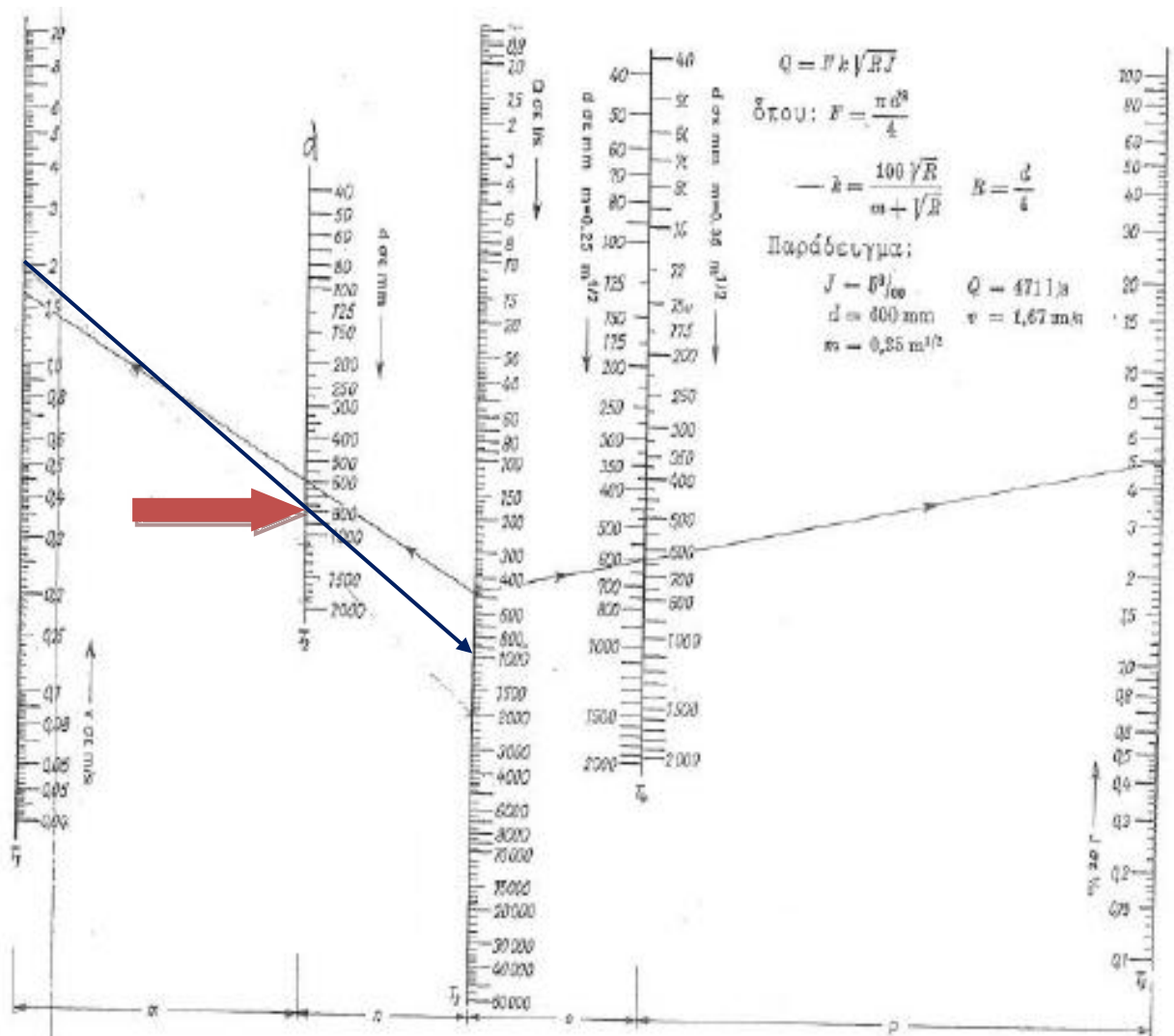
Από την βιβλιογραφική μελέτη προκύπτει ότι για μεγάλες τιμές της υδατόπτωσης, και μικρές σχετικά τιμές της παροχής ενδείκνυται η ανάπτυξη και χρησιμοποίηση υδροστροβίλων μερικής προσβολής, Pelton. Στο συμπέρασμα αυτό οδηγούν κατασκευαστικοί και λειτουργικοί λόγοι. Ο Υδροστρόβιλος τύπου Pelton έχει πολύ απλή και οικονομική κατασκευή. Σταθερή αλλά όχι υψηλή απόδοση σε όλες τις παροχές.

Η μεγάλη πτώση πίεσης μέσα σε στροφέιο ολικής προσβολής συντείνει στην ανάπτυξη πολύ μεγάλης ταχύτητας μεταξύ των πτερυγώσεων του στροφείου. Επειδή παράλληλα και η παροχή είναι μικρή, προκύπτουν μικρές διατομές διέλευσης του νερού διαμέσου του στροφείου. Η μεγάλη ταχύτητα και η μικρή διατομή διέλευσης συντελούν στην ανάπτυξη σημαντικών ενεργειακών απωλειών, λόγω τριβών με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης του στροβίλου.

Επιπλέον υπολογισμοί

Από το παρακάτω νομογράφημα για παροχή νερού $Q=1,11\text{m}^3/\text{sec}=1110\text{l}/\text{sec}$ και εφόσον έχουμε ορίσει την ταχύτητα του νερού $u=2\text{m}/\text{sec}$ βρίσκουμε την διάμετρο του αγωγού $d=800\text{mm}=0,8\text{m}$.

Η διάμετρος αυτή μας καλύπτει και για τους θερινούς μήνες όπου η παροχή νερού είναι μικρότερη και ίση με $Q=0,55\text{m}^3/\text{sec}=550\text{l}/\text{sec}$.



Εικόνα 1. Νομογράφημα υπολογισμού.

Οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση Hazen-Williams ως εξής:

$$\delta h = L \frac{u^{1,85}}{0,147 C^{1,85} D^{1,17}}$$

Όπου:

u =η ταχύτητα του υγρού σε m/sec.

D =η διάμετρος του σωλήνα σε m.

L =το μήκος του σωλήνα σε m.

C =συντελεστής Hazen-Williams για αγωγό κυκλικής διατομής.

Σωλήνας	C
Εξαιρετικά λείος	140
Πολύ λείος	130
Σωλήνας από σκυρόδεμα	120
Νέος σιδηροσωλήνας	110
Κανονικός χυτοσίδηρος σωλήνας, χαλύβδινος 10ετή χρήση ή παλιός ξύλινος	100
Σωλήνας με έντονη φθορά	60

Πίνακας 1. Τιμές συντελεστή C Hazen-Williams για αγωγό κυκλικής διατομής.

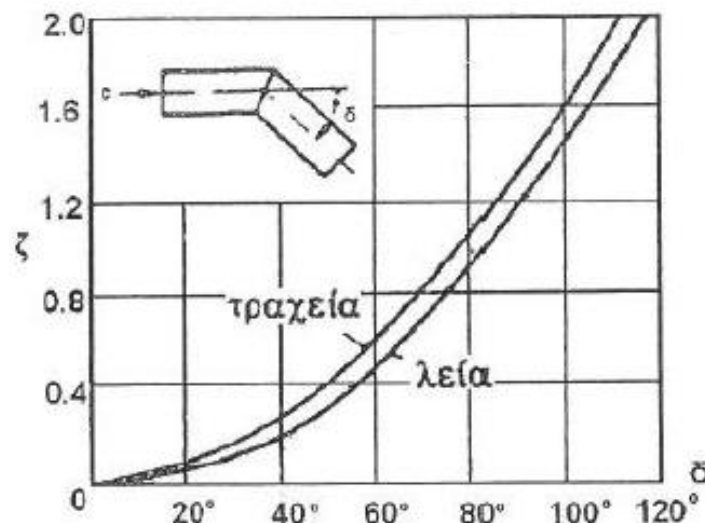
Από τον παραπάνω πίνακα λαμβάνεται η τιμή του $C=130$ θεωρώντας ότι ο αγωγός προσαρμογής είναι πολύ λείος και μπορούμε να υπολογίσουμε τις υδραυλικές απώλειες έχοντας ως δεδομένα το μήκος και την διάμετρο του αγωγού από την παρακάτω σχέση:

$$\delta h = 1100 * 2^{1.85} / 0.147 * 130^{1.85} * 0.8^{1.17} = 4,3\text{m.}$$

Οι απώλειες από ειδικές διαμορφώσεις του σωλήνα ή διάφορα εξαρτήματα δίνονται από τον τύπο:

$$\delta h = j \frac{u^2}{2g}$$

Όπου j = ένας ειδικός συντελεστής ο οποίος δίνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1. Συντελεστής αντίστασης j για αλλαγή κλίσης χωρίς καμπυλότητα.

Θεωρώντας ότι ο αγωγός έχει δυο στροφές με γωνία 60° από το σχήμα 1 λαμβάνεται η τιμή του συντελεστή $j=0.45$. Οι υδραυλικές απώλειες από τις ειδικές διαμορφώσεις του αγωγού είναι:

$$\delta h_2 = 2 * 0,45 * 2^2 / 2 * 9,81 = 0,18 \text{m.}$$

Επιπλέον ο αγωγός έχει άλλη μια γωνία η οποία είναι ορθή προκύπτει $j=1,2$ και οι υδραυλικές απώλειες είναι:

$$\delta h_3 = 1,2 * 2^2 / 2 * 9,81 = 0,24 \text{m.}$$

Οι συνολικές υδραυλικές απώλειες είναι:

$$\delta h_{ολ} = \delta h + \delta h_2 + \delta h_3 = 4,3 + 0,18 + 0,24 = 4,72 \text{m.}$$

Το αρχικό γεωδαιτικό ύψος είναι $H=290 \text{ m}$, το ωφέλιμο ύψος υπολογίζεται ως εξής:

$$h = H - \delta h_{ολ} = 290 - 4,72 = 285,26 = 285 \text{m}$$

Η καθαρή υδραυλική ισχύς είναι:

$$P_{υδρ} = g * Q * h = 9,81 * 1,11 * 285 = 3,103 \text{kW, το χειμώνα}$$

$$P_{υδρ} = g * Q * h = 9,81 * 0,55 * 285 = 1,537 \text{kW, το καλοκαίρι}$$

Για τον υδροστρόβιλο που επιλέξαμε τύπου Pelton δηλαδή, υπολογίσαμε ότι έχει

$P_{υδρ} = 3,103 \text{kW}$, η παροχή είναι $Q_{\max} = 1,11 \text{m}^3/\text{sec}$ και το ωφέλιμο ύψος $h = 285 \text{m}$. Άρα

μπορούμε να υπολογίσουμε τον ειδικό αριθμό στροφών στροβίλου ως προς την

παροχή n_Q από την σχέση:

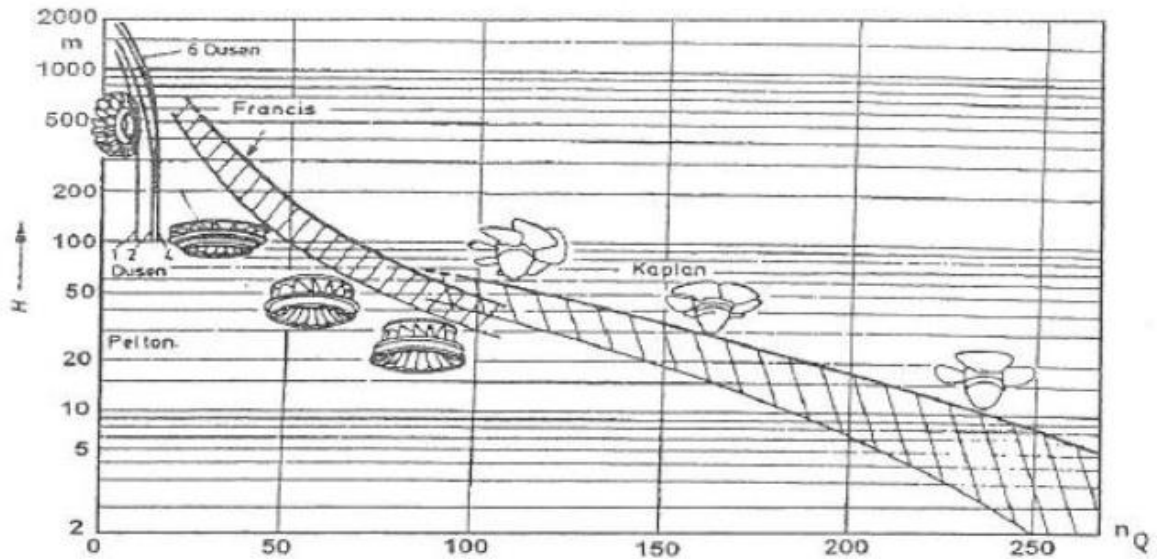
$$n_Q = n \frac{Q_o^{1/2}}{H_o^{3/4}}$$

Όπου n ο αριθμός στροφών του υδροστρόβιλου.

$$n_Q = 600 * 1,11^{1/2} / 285^{3/4} = 9, \text{ το χειμώνα}$$

$$n_Q = 600 * 0,55^{1/2} / 285^{3/4} = 6,4, \text{ το καλοκαίρι}$$

Από το παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι πρόκειται όντως για υδροστρόβιλο τύπου Pelton. Παρατηρούμε ότι ο Pelton χρειάζεται μικρότερη παροχή από άλλους υδροστρόβιλους.



Σχήμα 2. Συσχέτιση του ειδικού αριθμού στροφών n_Q και του τύπου του υδροστροβίλου συναρτήσει της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H .

Ο ειδικός αριθμός στροβίλου ως προς την ισχύ n_s υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_s = n \frac{P_0^{1/2}}{H_0^{5/4}}$$

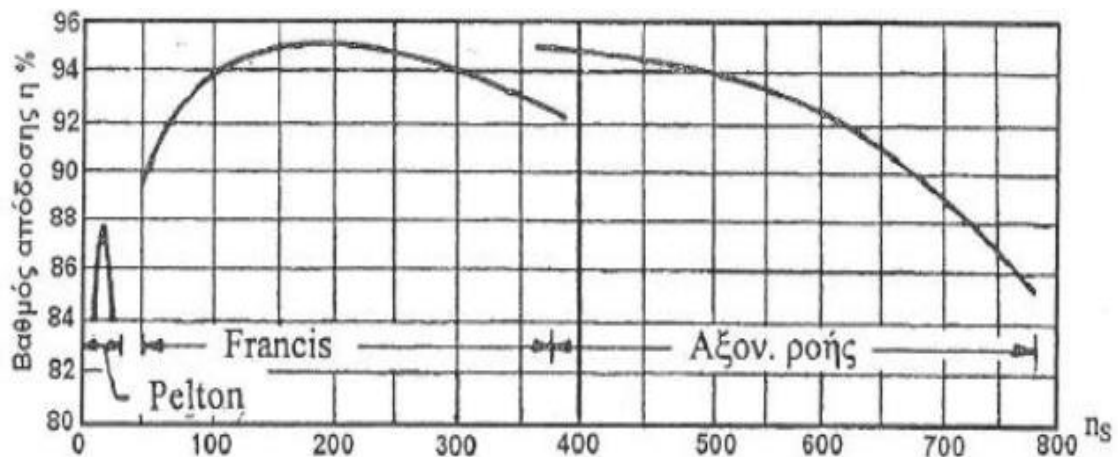
$n_s = 600 \cdot 3.100^{1/2} / 285^{5/4} = 28,5$, το χειμώνα
 $n_s = 600 \cdot 1.537^{1/2} / 285^{5/4} = 20$, το καλοκαίρι

Από το παρακάτω σχήμα για την τιμή αυτή προκύπτει βαθμός απόδοσης $\eta_t = 0,87$, το χειμώνα και $\eta_t = 0,86$ το καλοκαίρι.

Για βαθμό απόδοσης γεννήτριας $\eta_g = 0,85$ η τελική ηλεκτρική ισχύς του υδροστροβίλου Pelton είναι:

$$P_{out} = P_0 \cdot \eta_t \cdot \eta_g = 3100 \cdot 0,87 \cdot 0,85 = 2.292 \text{ kW}, \text{ το χειμώνα}$$

$$P_{out} = P_0 \cdot \eta_t \cdot \eta_g = 1.537 \cdot 0,86 \cdot 0,85 = 1.124 \text{ kW}, \text{ το καλοκαίρι}$$



Σχήμα 3. Μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλου συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροβίλου n_s .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραγωγή του μεγαλύτερου μέρους της ενέργειας που χρησιμοποιείται, βασίζεται στις παραδοσιακές συμβατικές και ρυπογόνες πηγές, όπως είναι του πετρελαίου και των παραγώγων του και του άνθρακα που σύντομα θα εξαντληθούν. Πολλές φορές στο παρελθόν η ανθρωπότητα διήλθε περίοδο ενεργειακής κρίσης, αλλά και πάλι δεν κατάφερε να απεξαρτηθεί από τις προαναφερθείσες συμβατικές πηγές. Παρόλα αυτά έκανε βήματα προόδου και ενέταξε στην ενεργειακή της φαρέτρα νέες μορφές πηγών ενέργειας, τις λεγόμενες ανανεώσιμες.

Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε μία από αυτές και συγκεκριμένα την υδροηλεκτρική, έχοντας ως βασική αναφορά μας την μελέτη ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Παρατηρήσαμε ότι όταν υπάρχουν οι κατάλληλες γεωμορφολογικές συνθήκες υπάρχει η τεχνογνωσία ώστε να κατασκευαστεί ένας τέτοιος σταθμός για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Ελλάδα έχει ανάγκη από υδραυλικά έργα πολλαπλού σκοπού για την διαχείριση των υδάτινων πόρων. Η συμμετοχή της ΔΕΗ στη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι επιβεβλημένη καθώς έχει την ευθύνη εκμετάλλευσης των ΥΗΣ στους ποταμούς της χώρας. Από την πλευρά τους οι ΥΗΣ ως έργα πολλαπλού σκοπού είναι απολύτως αναγκαίοι σε μια χώρα μεσογειακή όπως η Ελλάδα όπου οι βροχές είναι λίγες και η διάρκειά τους περιορίζεται στη χειμερινή περίοδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γαλανού, Α., Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Χρονική εξέλιξη – Σύγκριση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [2] Γκιάλα-Φήκαρη Σ., Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος με υδρογεννήτρια 350 W για αγροτικές εφαρμογές χαμηλού κόστους, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [3] Ευστρατιάδης Α., Μαμάσης Ν. & Κουτσογιάννης, Δ., Γενική διάταξη Υ/Η έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- [4] Καρλής Α., Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί: Τεχνολογία και Εφαρμογές, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΔΠΘ, 2011.
- [5] Κωτσοβίνος Ν., Σύντομες Σημειώσεις για υδροστροβίλους, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2009.
- [6] Λέρης Γ., Εισήγηση «Εκμετάλλευση Υδροηλεκτρικών Σταθμών», ΔΕΗ Α.Ε, HELECO, 2003.
- [7] Μανιάτης Α., Ενεργειακή Μελέτη και Επιλογή Εξοπλισμού για Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο σε Αυτόνομο Δίκτυο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- [8] Παπαντώνης Δ., Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Αθήνα, 2008.
- [9] <http://www.ppcr.gr/>
- [10] <http://www.microhydropower.net>.
- [11] <http://www.renewablesfirst.co.uk/>.
- [12] <http://www.igme.gr>