



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΠΡΩΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΚΡΟΥ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΠΕΙΡΟ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΖΑΜΑΛΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην ενεργειακή μελέτη για την εγκατάσταση μικρού υδροηλεκτρικού έργου στον ποταμό Πείρο.

Σε μία εποχή, όπου η χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας αποτελεί ανησυχία λόγω περιβαλλοντολογικής ρύπανσης, φτάνουμε στην ανάγκη για εναλλακτικές μορφές ενέργειας, τις ανανεώσιμες. Αυτό το γεγονός με παρακίνησε να ασχοληθώ με την εργασία αυτή, για την παραγωγή ενέργειας, με σκοπό τον εκμηδενισμό των περιβαλλοντολογικών ρύπων. Η Ελλάδα είναι μια χώρα, η οποία διαθέτει το κατάλληλο και απαραίτητο γεωγραφικό ανάγλυφο για τις απαιτήσεις υδροηλεκτρικών έργων.

Τα υδροηλεκτρικά είναι, συνήθως, έργα πολλαπλού σκοπού. Είναι μία μεγάλη επένδυση για την οικονομική ανάπτυξη της χώρας. Η χρήση του έργου συνδυάζεται και με την τοπική ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, την αλιεία και την αναψυχή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «Σχεδιασμός μικρού υδροηλεκτρικού έργου στον ποταμό Πείρο» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου το έτος 2020 και εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασία αυτής. Τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Παναγόπουλο Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της πτυχιακής αυτής εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια, καθώς και για τις υποδείξεις και τις διορθώσεις του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδελφό μου Ιωάννη Τζαμαλή για τις συμβολές του, τον τρόπο ανάπτυξης και εκφραστικότητας ως φοιτητής φιλολογίας που είναι.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη, συμπαράσταση και πίστη που μου προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου βήμα και απόφαση.

| | |
|--|-----------|
| Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗΚΑ..... | 10 |
| 1.1 Πρόλογος..... | 10 |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή..... | 10 |
| 1.3 Χαρακτηρισμός και διάταξη μικρού ΥΗΕ..... | 11 |
| 1.4 Τυποποιημένοι ηλεκτρομηχανολογικοί εξοπλισμοί..... | 12 |
| 1.5 Πρόγραμμα εκμετάλλευσης και συνέπειες στην σύλληψη του μικρού ΥΗΕ..... | 12 |
| 1.6 Μελέτη των μικρών ΥΗΕ..... | 13 |
| Κεφάλαιο 2: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 14 |
| 2.1 Υδρολογικός κύκλος..... | 14 |
| 2.2 Λεκάνη απορροής..... | 15 |
| 2.3 Καμπύλη διάρκειας παροχής..... | 16 |
| Κεφάλαιο 3: ΤΕΧΝΙΚΑ ΜΕΡΗ..... | 17 |
| 3.1 Μικρό φράγμα | 17 |
| 3.2 Ταμιευτήρας..... | 19 |
| 3.3 Υδροληψία Εσχαρισμός..... | 19 |
| 3.4 Υπερχειλιστείς..... | 20 |
| 3.5 Εκκενωτής πυθμένα..... | 20 |
| 3.6 Σήραγγα εκτροπής..... | 20 |
| 3.7 Διώρυγα-σήραγγα προσαγωγής..... | 21 |
| 3.8 Εξαμωτής- Δεξαμενή φόρτισης..... | 22 |
| 3.9 Αγωγός πτώσεως στους στροβίλους..... | 22 |
| 3.10 Πύργος ανάπλασης..... | 24 |
| 3.11 Θυροφράγματα και βάνες..... | 24 |
| Κεφάλαιο 4: ΡΟΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..... | 26 |
| 4.1 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2 Ενεργειακός ισολογισμός από θέση E (άνω ταμειυτήρα) στην θέση e (είσοδος υδροστρόβιλου)..... | 27 |
| 4.2.1 Ενεργειακός ισολογισμός από την θέση a (έξοδος υδροστρόβιλου) και A (κάτω ταμειυτήρας)..... | 28 |
| 4.2.2 Ενεργειακός ισολογισμός από την θέση e (είσοδος υδροστρόβιλου) και a (έξοδος υδροστρόβιλου)..... | 28 |
| 4.2.3 Υδροστρόβιλος δράσης..... | 29 |
| 4.2.4 ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αντίδρασης..... | 29 |
| 4.3 Οι συνολικές απώλειες είναι τριών ειδών..... | 30 |
| 4.3.1 Υδραυλικές απώλειες..... | 30 |
| 4.3.2 Ογκομετρικές..... | 30 |
| 4.3.3 Μηχανικές..... | 30 |
| 4.4 Σημείο λειτουργίας ΗΥΣ..... | 30 |
| 4.5 Ενεργειακή ανάλωση μικρού ΥΗΕ..... | 32 |
| Κεφάλαιο 5: ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ..... | 34 |
| 5.1 Ιστορική ανάδρομη υδροστρόβιλων..... | 34 |
| 5.2 Υδροστρόβιλος Francis..... | 35 |
| 5.2.1 Εισαγωγή του υδροστρόβιλου Francis..... | 35 |
| 5.2.2 Λειτουργία του υδροστρόβιλου Francis..... | 35 |
| 5.3 Υδροστρόβιλος Pelton..... | 39 |
| 5.3.1 Εισαγωγή του Υδροστρόβιλου Pelton..... | 39 |
| 5.3.2 Λειτουργία του Pelton..... | 39 |
| 5.4 Υδροστρόβιλος Kaplan..... | 42 |
| 5.4.1 Εισαγωγή του υδροστρόβιλος Kaplan..... | 42 |
| 5.4.2 Περιγραφή του υδροστρόβιλου Kaplan..... | 43 |
| 5.5 Τρίγωνο ταχυτήτων..... | 44 |
| 5.6 Ομοιογένεια υδροστρόβιλων..... | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 5.7 Ειδικός αριθμός στροφών..... | 45 |
| 5.8 Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικής πτώσης ειδικού αριθμού στροφών και βαθμού απόδοσης..... | 46 |
| 5.9 Υπολογισμός της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής..... | 46 |
| Κεφάλαιο 6: ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ..... | 48 |
| 6.1 Γενικά..... | 48 |
| 6.2 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Francis..... | 48 |
| 6.3 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Pelton..... | 53 |
| Κεφάλαιο 7: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ..... | 54 |
| 7.1 Γενικά..... | 54 |
| 7.2 Ηλεκτρικές γεννήτριες..... | 54 |
| 7.2.1 Εισαγωγή..... | 54 |
| 7.3 Αρχή λειτουργίας γεννητριών..... | 54 |
| 7.4 Σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος..... | 58 |
| 7.5 Τριφασικές γεννήτριες..... | 58 |
| 7.6 Απώλειες και βαθμός απόδοσης..... | 58 |
| 7.7 Εκκίνηση και σύνδεση με το δίκτυο..... | 59 |
| 7.8 Τυποποίηση και διαστάσεις γεννητριών..... | 59 |
| 7.9 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός για σταθεροποίηση της παραγόμενης συχνότητας..... | 62 |
| 7.10 Μετασχηματιστές ισχύος..... | 62 |
| Κεφάλαιο 8: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΥΗΕ..... | 64 |
| 8.1 Εισαγωγή..... | 64 |
| 8.2 Προσέγγιση υπολογισμού κόστους..... | 65 |
| 8.2.1 Το κόστος του φράγματος ή του εκχειλιστή..... | 65 |

| | |
|---|-----------|
| 8.2.2 Το Κόστος του έργου υδροληψίας..... | 65 |
| 8.2.3 Το κόστος της διώρυγας προσαγωγής..... | 66 |
| 8.2.4 Ο κόστος της δεξαμενής φόρτισης..... | 67 |
| 8.2.5 Το κόστος του αγωγού πτώσεως..... | 67 |
| 8.2.6 Το κόστος του υδροηλεκτρικού σταθμού..... | 68 |
| 8.2.7 Το κόστος της διόδου ψαριών..... | 69 |
| 8.2.8 Το κόστος οδού προσπέλασης..... | 69 |
| 8.2.9 Το κόστος του υδροστρόβιλου..... | 69 |
| 8.2.10 Το κόστος της γεννήτριας..... | 70 |
| 8.2.11 Κόστος του μετασχηματιστή..... | 71 |
| 8.2.12 Το κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων..... | 71 |
| 8.2.13 Το κόστος της ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς..... | 72 |
| 8.2.14 Το κόστος μελετών, αδειοδοτήσεων και επίβλεψης..... | 72 |
| Κεφάλαιο 9: ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΠΕΙΡΟ..... | 73 |
| 9.1 Γεωγραφική θέση του σταθμού παράγωγης του ΥΗΣ Πείρο..... | 73 |
| 9.2 Βασικά χαρακτηριστικά του έργου..... | 74 |
| 9.2.1 Τεχνικά μέρη..... | 74 |
| 9.3 Ενεργειακή Μελέτη..... | 75 |
| 9.3.1 Χαρακτηριστικά 21 σημείων..... | 75 |
| 9.3.2 Απώλειες συστήματος..... | 77 |
| 9.3.3 Υδροστρόβιλοι..... | 79 |
| 9.3.4 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια..... | 83 |
| Κεφάλαιο 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 85 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

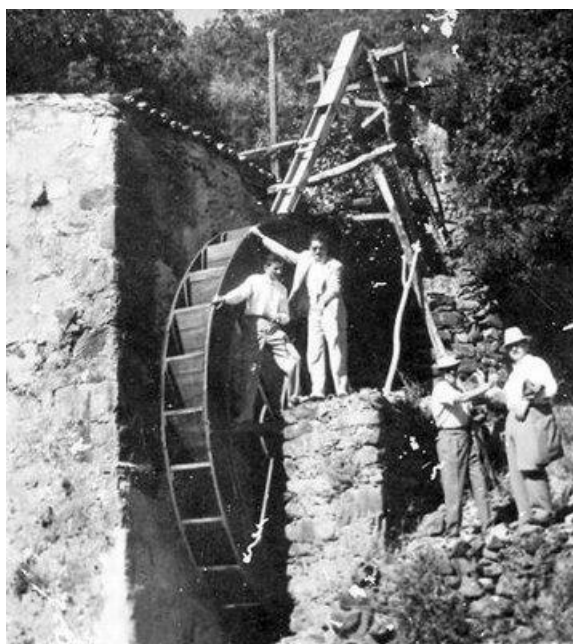
1.1 Πρόλογος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επεξεργάστηκαν υδρολογικά δεδομένα παροχής του ποταμού Πείρου με στόχο τη διαστασιολόγηση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου, την μελέτη του απαιτούμενου ηλεκτρο-μηχανολογικού εξοπλισμού, την προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας καθώς και την οικονομοτεχνική αξιολόγηση του έργου.

Ως υδροστρόβιλος καλείται η μηχανή μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια που εκφράζεται ως κινητήρια ροπή στην περιστροφική άτρακτο μιας περωτής. Το εργαζόμενο μέσο είναι το νερό και η ενέργεια που διαθέτει είναι η δυναμική, λόγω της στάθμης του σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας ως αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Από τις πρακτικές στην τεχνολογική εξέλιξη ήταν η εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού μέσω υδροδυναμικών έργων, όπως στην άρδευση, μετέπειτα η βιοτεχνική/βιομηχανική παραγωγή και τέλος η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα, οι νερόμυλοι, κατασκευές μεγάλου μεγέθους και μικρής ισχύος, εξακολουθούσαν να χρησιμοποιούνται για τις διάφορες ανθρώπινες ανάγκες, όπως η άλεση έως τις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Τα έργα που κατασκευαστήκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ήταν μικρής ισχύος και μεγάλου όγκου μιας κι αυτό επέτρεπαν τα τεχνικά έργα της εποχής.



Εικόνα 1.1 Νερόμυλος

Σταδιακά, η αύξηση των αναγκών σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα μέσα επέτρεψαν την κατασκευή όλο και μεγαλύτερων έργων μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Σημαντικό ρόλο έπαιξε και η ανάπτυξη των εφαρμογών της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μια ενέργεια, η όποια μεταθέτεται σχετικά εύκολα από την θέση παράγωγης στην θέση κατανάλωσης. Από τότε η αξιοποίηση της υδραυλικής

ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται «υδροηλεκτρικό», δηλαδή η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική μέσω του υδροστρόβιλου και σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο αποδεσμεύεται ο τόπος της μηχανικής ενέργειας από τον τόπο της κατανάλωσης ενέργειας.

Με την εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακή χρήση (στο τέλος του 19^{ου} αιώνα - αρχές του 20^{ου}) οι παλαιοί νερόμυλοι μετατράπηκαν σταδιακά σε υδροηλεκτρικά έργα μικρής ισχύος που κάλυπταν τις ανάγκες μιας περιοχής ή μιας βιομηχανίας. Αυτές οι μονάδες υπήρχαν στην Ελλάδα πριν το 1954, όταν η ΔΕΗ εξαγόρασε όλα αυτά τα έργα. Η ΔΕΗ είχε αποκλειστικό δικαίωμα παράγωγης και μεταφοράς ενέργειας σε ολόκληρη την χώρα. Έτσι, είχε αναλάβει όλη την ηλεκτρική ενέργεια της Ελλάδας και είχε στην κατοχή της όλα τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα αμφίβολης ποιότητας και αξιοπιστίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να κλείσουν τα περισσότερα και διατήρησε τα σημαντικά, όπως για παράδειγμα αυτό του Γλαύκου. Έριξε, επίσης, την προσοχή της σε μεγάλες λιγνιτικές μονάδες και ταμειυτήρες των μεγάλων ΥΗΕ. Σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες τα μικρά υδροηλεκτρικά παρέμειναν στα χέρια ιδιωτών, παρά την δημιουργία της εθνικής εταιρείας ηλεκτρισμού. Έτσι, ο τοπικός πληθυσμός ήταν εξοικειωμένος με την φυσική εξέλιξη των νερόμυλων σε ιδιωτικά μικρά υδροηλεκτρικά. Στο χρόνο αυτό, η Ελλάδα είχε μια παύση. Οι γενιές, οι οποίες δεν ήταν εξοικειωμένες με τα μικρά ΥΗΕ το 1999, όταν ήταν δυνατή η κατασκευή των έργων αυτών από ιδιοκτήτες, αντέδρασαν λόγω δυσπιστίας προς τον 'ξένο' επενδυτή και λόγω του φόβου των όποιων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Θα μπορούσε να εξηγηθεί έτσι η καθυστέρηση των μικρών ΥΗΕ στην Ελλάδα σε σχέση με τις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες.

1.3 Χαρακτηρισμός και διάταξη μικρού ΥΗΕ

Ως μικρός χαρακτηρίζεται ένα υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη από 10 MW, χωρίς αυτό να είναι αποδεκτό σε όλες τις χώρες. Η διάκριση μεταξύ μεγάλου και μικρού ορίζεται στα 5 MW ενώ σε άλλες χώρες στα 15 MW. Μια βασική παράμετρος μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ είναι στην επιλογή και εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στην περίπτωση μικρών ΥΗΕ. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τυποποίηση μικρού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τα μικρά ΥΗΕ είναι έως και 10MW (αν και ορισμένες εταιρείες προσφέρουν τυποποιημένο εξοπλισμό ισχύος έως 15MW). Η τιμή αυτή είναι η πλέον αποδεκτή από όλες τις ευρωπαϊκές χώρες. Το όριο διακύμανσης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΕ έχει σημασία από πλευράς διαδικασιών και δανειοδοτήσεων αφού για τα μικρά ΥΗΕ είναι απλούστερη.

1.4 Τυποποιημένοι ηλεκτρομηχανολογικοί εξοπλισμοί

Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός των μικρών ΥΗΕ, κυρίως οι υδροστρόβιλοι, οι γεννήτριες και οι ρυθμιστές στροφών, διατυπώνεται ως «τυποποιημένος» από πολλούς κατασκευαστές. Η τυποποίηση των υδροστρόβιλων εμπεριέχει όλους τους τύπους (FRANCIS, PELON, KLAPTAN και βολβοειδές). Το βασικό πλεονέκτημα είναι το κόστος, δεδομένου ότι δεν επιβαρύνεται με κόστος ανάπτυξης (υδραυλική χάραξη, δοκιμές σε μοντέλο κλπ.) και κατά συνέπεια στον χρόνο παράδοσης, σημαντικό σημείο, γιατί ο χρόνος παράδοσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα δύο χρόνια, σε αντίθεση με τα μεγάλα, στα οποία ο χρόνος για την ολοκλήρωση του έργου είναι 5 με 10 έτη. Φυσικά υπάρχουν και μειονεκτήματα από την επιλογή τυποποιημένου υδροστρόβιλου. Αυτό συμβαίνει διότι ο εξοπλισμός δεν είναι κατάλληλα προσαρμοσμένος στις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου.

Όσον αφορά τις γεννήτριες είναι δυνατόν η επιλογή ασύγχρονων γεννητριών το οποίο είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο, διατηρεί τη συχνότητα ρεύματος σταθερή και παρέχει την απαραίτητη άεργη ισχύ. Για μεγάλη ισχύ επιλέγονται σύγχρονες τυποποιημένες γεννήτριες (δεν απαιτείται άεργος ισχύς), οι οποίες έχουν υψηλό κόστος και αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης.

1.5 Πρόγραμμα εκμετάλλευσης και συνέπειες στην σύλληψη του μικρού ΥΗΕ

Ο κύριος ρόλος των μεγάλων ΥΗΕ είναι η κάλυψη των αιχμών ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου. Εξαιρούνται τα μεγάλα ΥΗΕ σε μεγάλους ποταμούς που λειτουργούν κατά το ρου του ποταμού και τα οποία λειτουργούν ως μονάδες βάσης. Για την αύξηση παρέμβασης και κάλυψης της ενέργειας στα μεγάλα ΥΗΕ διαμορφώνονται ταμειυτήρες μεγάλης χωρητικότητας. Με την δημιουργία μεγάλου ταμειυτήρα αξιοποιείται πλήρως η ποσότητα της υδραυλικής ενέργειας του νερού (απώλεια υπάρχει μόνο στην περίπτωση μεγάλων πλημμυρικών παροχών, όταν η περίσσεια ποσότητα υπερχειλίζει). Τέλος, για την πλήρη κάλυψη των ωρών αιχμής τα μεγάλα ΥΗΕ υπερδιαστασιολογούνται. Αυτό σημαίνει, ότι διογκώνονται τα έργα του πολιτικού μηχανικού και επιβαρύνεται το κόστος του έργου, το οποίο καλύπτεται από το γεγονός ότι παράγεται ενέργεια αιχμής. Η αξία της ενέργειας αιχμής είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτήν της βάσεως. Και εδώ είναι το ενδιαφέρον για τις αναστρέψιμες ΥΗΕ μόνο στην περίπτωση μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος.

Αντίθετα, ένα μικρό ΥΗΕ δεν έχει την δυνατότητα ανακούφισης των ωρών αιχμής ισχύος και για αυτό το λόγω η διαστασιολόγηση γίνεται με βάση την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Σαν ταμειυτήρας το μικρό ΥΗΕ περιορίζεται σε μια δεξαμενή που εξυπηρετεί τις ανάγκες της υδροληψίας και μόνο. Η διαμόρφωση αυτή αντιστοιχεί σε μικρότερες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον και επομένως μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο υδροστρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει μέσα σε ένα εύρος γύρω από το ονομαστικό σημείο

λειτουργίας του, το πρόγραμμα εκμετάλλευσης του μικρού ΥΗΕ θα πρέπει να είναι ως εξής:

- Όταν η φυσική εισροή κυμαίνεται μεταξύ της μέγιστης και της ελαχίστης επιτρεπομένης για την ομαλή λειτουργία του υδροστρόβιλου, τότε η μονάδα λειτούργει και παράγει ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιώντας την διαθέσιμη παροχή.
- Όταν η φυσική εισροή είναι μικρότερη της ελαχίστης επιτρεπομένης παροχής του υδροστρόβιλου η μονάδα παραμένει κλειστή και η φυσική παροχή υπερχειλίζει και διαφεύγει αναξιοποίητη
- Όταν η φυσική εισροή είναι μεγαλύτερη της μέγιστης επιτρεπομένης παροχής του υδροστρόβιλου η μονάδα λειτουργεί με την μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή ενώ η περίσσεια υπερχειλίζει και διαφεύγει αναξιοποίητη.

1.6 Μελέτη των μικρών ΥΗΕ

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ μεγάλων και μικρών ΥΗΕ είναι ο χρόνος μελετών (υδρολογικών, γεωλογικών και τοπογραφικών αποτυπώσεων) που απαιτούνται για την κατάρτιση των μελετών (αναγνωριστική μελέτη, προμελέτη και μελέτη εφαρμογής). Λόγω της σημασίας των μεγάλων ΥΗΕ οι υδρολογικές μετρήσεις θα πρέπει να είναι αξιόπιστες (τουλάχιστον 20 ετών). Στα μικρά δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα και οι μετρήσεις είναι βάσει συσχέτισης γειτονικών λεκανών απορροής ή με την εφαρμογή αριθμητικών προσομοιώσεων από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Το αναπόφευκτο σφάλμα έχει ως συνέπεια τη διαμόρφωση της καμπύλης διάρκειας παροχής με αποτέλεσμα την επιλογή μεγαλύτερου υδροστρόβιλου. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται κάποιος μικρότερος, ώστε να μην υπάρχει διόγκωση του κόστους χωρίς την αντίστοιχη ανταπόδοση από την ηλεκτρική ισχύ.

Στη μελέτη του μικρού ΥΗΕ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απόσταση της παραγωγής έως την διανομή στην ΔΕΗ, η οποία έχει σημαντικό κόστος στο ολικό έργο.

Το κόστος λειτουργίας στα ΥΗΕ είναι μικρό και συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Αν και στα μικρά το κόστος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσω συστημάτων αυτοματισμού.

Όπως όλα τα έργα έτσι και των μικρών χωρίζονται σε τρεις φάσεις. Αυτές είναι: η αναγνωριστική, η προκαταρκτική μελέτη και η μελέτη εφαρμογής. Θα πρέπει να έχουν μια προοδευτική εμφάνιση με σωστές εκτιμήσεις και να εκτιμούν μια ισορροπία ανάμεσα στο χαμηλό κόστος και την εξασφάλιση της ασφάλειας και την βέλτιστη αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας.

Στην μελέτη ενός μικρού ΥΗΕ θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνον ότι κρίνεται απαραίτητο, ενώ, αντίθετα, στα μεγάλα υιοθετείται το καλύτερο δυνατόν.

2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος και το ανάγλυφο μια περιοχής μπορεί να δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για την κίνηση και δυναμική ενέργεια του ύδατος. Το νερό φτάνει στην επιφάνεια της γης ως βροχόπτωση ή ως χιονόπτωση. Ένα μέρος εξατμίζεται, ένα μέρος απορροφάται από το έδαφος και το υπόλοιπο, λόγω βαρύτητας συσσωρεύεται στο χαμηλότερο ύψος, δηλαδή στα ποτάμια, τις λίμνες και τις θάλασσες.



Εικόνα 2.1 Υδρολογικός κύκλος

Κατά την διάρκεια αυτής της ροής η δυναμική ενέργεια του νερού συνεχώς μειώνεται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Αυτό συμβαίνει λόγω απωλειών τριβής τυρβώδους ροής και απωλειών ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά φερτών υλικών.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη υδροδυναμικού είναι η ύπαρξη απορροής του νερού και κλίσεως του εδάφους, ώστε να σχηματίζεται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά. Το ΥΗΕ αξιοποιεί μέρος της δυναμικής ενέργειας του νερού, το οποίο, υπό την επίδραση της βαρύτητας, ρέει μέχρι να φτάσει στην χαμηλότερη στάθμη, που είναι η στάθμη της θάλασσας.

Το βασικό δεδομένο που απαιτείται κατά την μελέτη ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι η διακύμανση της παροχής του υδατορεύματος στη θέση της υδροληψίας του έργου, δεδομένου ότι επηρεάζει την επιλογή του μεγέθους της μονάδας παραγωγής ενέργειας, την διαστασιολογηση, άρα και το κόστος. Μια υπερεκτίμηση των μονάδων

θα οδηγήσει σε αποτυχία λόγω μικρής παραγωγής ενέργειας και μια υποεκτίμηση της παροχής θα αντιστοιχεί σε μικρά αποτελέσματα, που θα αποτελέσει απώλεια εσόδων της επένδυσης. Για τις ανάγκες μελέτης υδροηλεκτρικής εγκατάστασης θα πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις ημερήσιων (ή μηνιαίων) παροχών του υδατοστρώματος επί 20 χρονιά για το μικρό ΥΗΕ, προκειμένου να είναι ασφαλής η διαστασιολόγηση του έργου.

Μελέτη του υδατικού δυναμικού αποτελεί το πρώτο και βασικό στάδιο για την εγκατάσταση του, το οποίο κατηγοριοποιείται σε θεωρητικό, διαθέσιμο τεχνολογικό και οικονομικά εκμεταλλεύσιμο.

Η εκμετάλλευση του υδατικού δυναμικού για την παράγωγή ισχύος μπορεί να γίνει στα σημεία όπου η παροχή του νερού είναι ικανή, δηλαδή υπάρχει κινητική ενέργεια κατά μήκος ενός ποταμού.

Για την εκτίμηση της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας ενός ποταμού θα πρέπει να υπάρχει η χρονοσειρά της μέσης ημερήσιας ροής του ποταμού για μεγάλη χρονική περίοδο, ικανή να αναπαραστήσει την πραγματική ποσότητα της φυσικής ροής και να μειωθούν τα σφάλματα στους υπολογισμούς λόγω μεταβλητότητας. Επειδή σπάνια υπάρχουν μακροχρόνιες μετρήσεις, θα πρέπει να γίνονται αναγωγές από τα σημεία των ποταμών όπου υπάρχουν μετρήσεις τουλάχιστον 20 ετών. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν και δεδομένα από περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (κλίμακα, γεωλογία, βλάστηση, ανθρώπινη δραστηριότητα, κ.λ.π.).

2.2 Λεκάνη απορροής

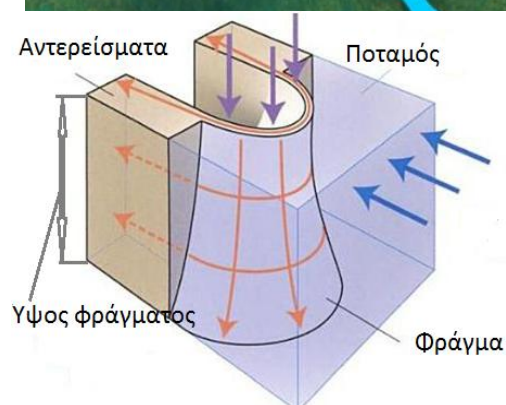
Η λεκάνη απορροής είναι μια κλειστή επιφάνεια δεδομένου εμβαδού που συνεισφέρει στην παράγωγή επιφανειακής απορροής, ο υδροκρίτης της οποίας διέρχεται από τη θέση του φράγματος (ο ταμιευτήρας αναπτύσσεται στο κατάντη τμήμα της λεκάνης).



Εικόνα 2.2 Λεκάνη απορροής

Η στέγη του φράγματος είναι το ανώτερο υψομετρικά τμήμα του αναχώματος.

Εικόνα 2.3 Φράγμα



Ύψος φράγματος θεωρείται η κατακόρυφη απόσταση από το βαθύτερο σημείο της θεμελίωσης μέχρι την στέψη.

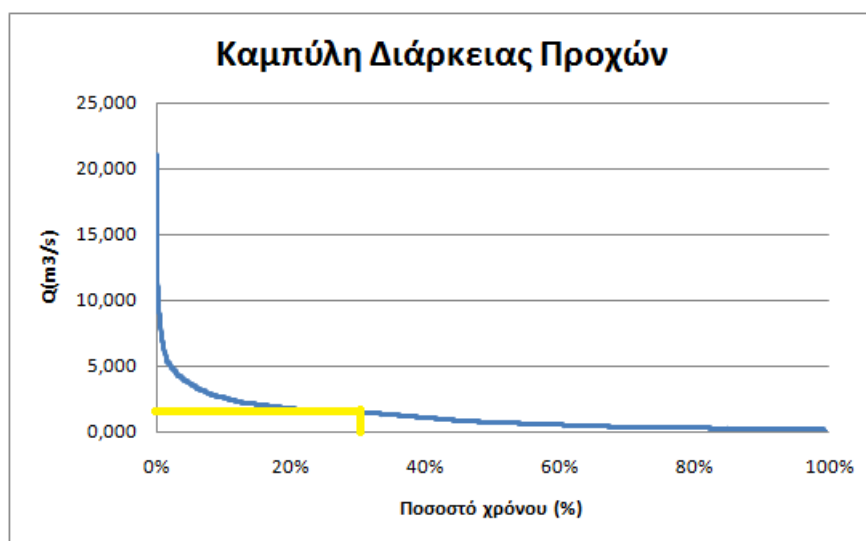
Στην λεκάνη απορροής τα κατακρημνίσματα μπορούν να μετρηθούν και με τα βροχομετρικά όργανα, τα οποία όσο πιο πυκνά εγκατεστημένα είναι, τόσο οι τιμές των κατακρημνισμάτων προσεγγίζει την πραγματική κατανομή. Οι μετρήσεις των βροχόμετρων αξιοποιούνται για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στην λεκάνη απορροής. Η ποσότητα αυτή προκύπτει από την ολοκλήρωση των διαφόρων σημείων που είναι εγκατεστημένα στην λεκάνη.

Με τις μετρήσεις και την χρήση μοντέλων είναι δυνατών να παραχθούν αντιπροσωπευτικές τιμές της μέσης ημερήσιας ροής ενός ποταμού σε συγκεκριμένο σημείο. Η γραφική παράσταση της χρονοσειράς ονομάζεται ετήσιο υδρογράφημα.

Από το υδρογράφημα μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη διάρκειας παροχής, το οποίο είναι σημαντικό στοιχείο για την εκτίμηση του δυναμικού, αλλά και για τον πραγματικό σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού.

2.3 Καμπύλη διάρκειας παροχής

Η καμπύλη διάρκειας παροχής δίνει την ποσότητα του χρόνου t του έτους, όπου η παροχή Q ισούται ή υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή της ροής. Η μορφή της καμπύλης μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την προτεινομένη εγκατεστημένη ισχύ, τον αριθμό των μονάδων, καθώς και ενδείξεις για την οικονομική βιωσιμότητα του σταθμού παραγωγής ισχύος. Για παράδειγμα, αν μεγάλη παροχή εμφανίζεται σε μικρό χρονικό διάστημα (πλημυρική παροχή), ή αν η παροχή είναι σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Με τον όρο Q_{30} συμβολίζεται η τιμή της παροχής, που είναι τέτοια, έτσι ώστε κατά το 30% του συνολικού χρόνου, η παροχή να είναι μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή.



Εικόνα 2.4 Καμπύλη διάρκειας παροχών

3 ΤΕΧΝΙΚΑ ΜΕΡΗ

3.1 Μικρό φράγμα

Το φράγμα κατασκευάζεται εγκάρσια στην κοίτη του ποταμού και έχει σκοπό την τροφοδοσία του σταθμού μέσω του αγωγού προσαγωγής και την συγκέντρωση ποσότητας νερού με τον σχηματισμό ενός ταμιευτήρα. Βασικά κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης θέσης για την εγκατάσταση του είναι ο σχηματισμός μεγάλου ταμιευτήρα η ευκολία κατασκευής του (μικρό ύψος και άνοιγμα , καλή δυνατότητα έδρασης), ο σχηματισμός μεγάλης υψομετρικής διαφοράς με ελαχιστοποίηση του μήκους του αγωγού προσαγωγής. Η επιλογή της θέσης του φράγματος καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά προκύπτουν ως αποτέλεσμα οικονομοτεχνικής μελέτης, η οποία συνήθως εξετάζει μια σειρά εναλλακτικών λύσεων. Επιπλέον κριτήρια επιλογής είναι: γεωλογία, υδρογεωλογία, τοπογραφία, σεισμικότητα , κόστος υλικών (συλλογή, παρασκευή, μεταφορά), περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Οι τύποι φραγμάτων κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, με τις υποκατηγορίες τους:

Ακαμπτα (από σκυρόδεμα ή συναφές υλικό)

Βαρύτητα: συμπαγή από:

- συμβατικό σκυρόδεμα
- κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (RCC)
- κυλινδρούμενο σκληρό επίχωμα (συνήθως αξονομετρικά)

Αντηριδωτά: ειδική περίπτωση φράγματος βαρύτητας με μειωμένο όγκο

τοξωτά: από σκυρόδεμα

Εύκαμπτα (γεωφράγματα με στεγανό στοιχείο κεντρικά ή σε ανάντη πορεία).

i) Χωμάτινα (εδαφικό υλικό)

- με πυρήνα (διαζωνισμένο φράγμα)
- με ανάντη ασφαλική μεμβράνη η γεωμεμβράνη

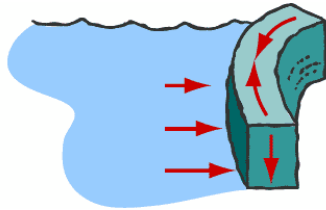
ii) Λιθόρριπτα (βραχώδες υλικό)

- με αργιλικό η ασφάλτιο πυρήνα
- με ανάντη πλάκα σκυροδέματος
- με ανάντη ασφαλική μεμβράνη η γεωμεμβράνη

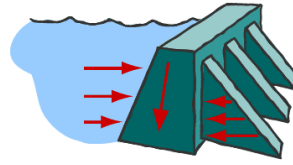
Τα τοξωτά φράγματα χρησιμοποιούνται σε στενές κοιλάδες με απότομες κλίσεις. Η καμπυλότητα του φράγματος παραλαμβάνει την πίεση στην ανάντη πλευρά του.

Τα αντηριδοτά φράγματα χρησιμοποιούν στηρίγματα για την παραλαβή της πίεσης.

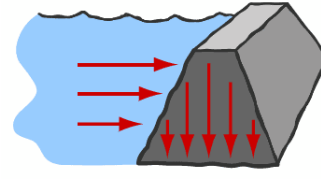
Τα φράγματα βαρύτητας χρησιμοποιούν το ίδιο το βάρος τους για να συγκρατήσει την θέση του.



Τοξωτά φράγματα
Εικόνα 3.1

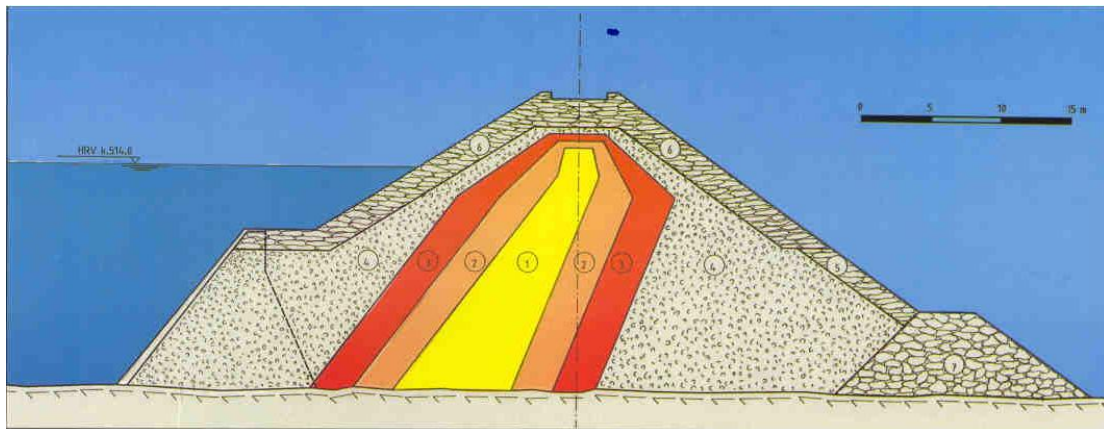


Αντηριδοτά φράγματα



Φράγματα βαρύτητας

Τα εύκαμπτα φράγματα χρησιμοποιούν κι αυτά το βάρος τους για να συγκρατήσουν τη θέση τους. Είναι ο πιο κοινός τύπος φράγματος. Το υλικό μπορεί να είναι σκυρόδεμα, χώμα ή πέτρα. Ο πυρήνας του είναι από αδιαπέραστο υλικό. Τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα φράγματα διαθέτουν υδατοστέγη. Τα χωμάτινα φράγματα προτιμώνται σε περιπτώσεις που δεν απαιτείται μεγάλο ύψος και μήκος φραγμάτων και σε περιπτώσεις μη καλού εδάφους θεμελίωσης. Εκεί ενδείκνυται η εύκαμπτη κατασκευή από γαιώδη υλικά που μπορούν να παραμορφωθούν και να κάνουν μικρές μετακινήσεις της θεμελίωσης, χωρίς να διαταραχτεί η συνοχή τους.



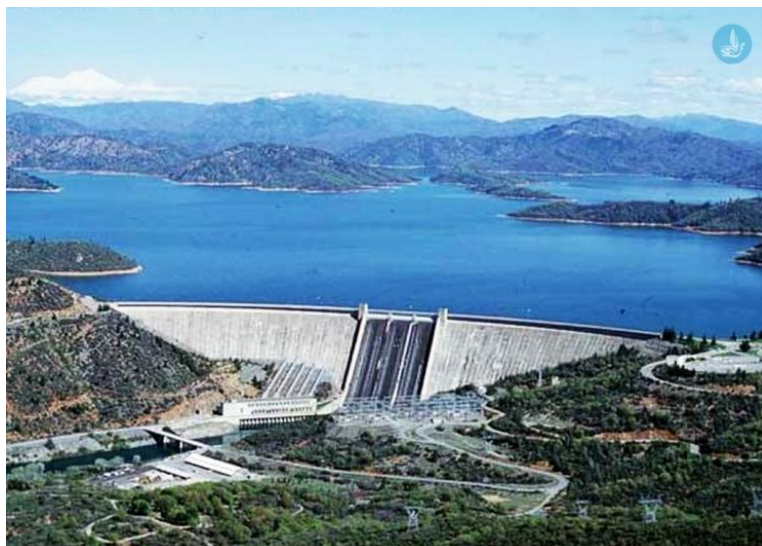
Εικόνα 3.2 Φράγμα βαρύτητας

Τα γαιώδη υλικά από τα οποία αποτελείται ένα χωμάτινο φράγμα παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα. Η στεγανότητα του φράγματος επιτυγχάνεται με την κατασκευή του αδιαπέραστου:

- 1) πυρήνα από άργιλο (λεπτόκοκκο χαμηλής διαπερατότητας),
- 2) το φίλτρο (αμμοχάλικο),
- 3) το σφραγιστήριο (διαβαθμισμένο υλικό από χαλίκια ή κροκάλες) και
- 4) το κέλυφος (αμμοχάλικα, κορήματα, κερματισμένος βράχος).

3.2 Ταμιευτήρας

Ταμιευτήρας είναι μια λεκάνη κατάκλισης που δημιουργείται ανάντη του φράγματος, της οποίας τα όρια μεταβάλλονται ανάλογα με την αποθηκευμένη ποσότητα νερού. Με τον ταμιευτήρα επιτυγχάνεται ευελιξία στη λειτουργία του έργου που αποσυνδέει την παράγωγή ενέργειας από την φυσική ροή. Ανεξαρτητοποιεί εν μέρει τη λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού από τις αυξομειώσεις της παροχής του ποταμού.



Εικόνα 3.3 Ταμιευτήρας

3.3 Υδροληψία Εσχαρισμός

Το σημείο όπου το νερό εισέρχεται στον αγωγό προσαγωγής. Η υδροληψία είναι ένα τεχνικό έργο που παίρνει νερό από το υδατόρευμα και το παροχετεύει στους υδροστρόβιλους μέσω αγωγού για την παράγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Το άνοιγμα της εισόδου βρίσκεται χαμηλότερα από τον ταμιευτήρα υδατορεύματος και προστατεύεται από σχάρα για την απομάκρυνση φερτών υλικών, τα μπορεί να προκαλέσουν πρόωρη φθορά στον αγωγό και τον στρόβιλο.



Εικόνα 3.4 Υδροληψία Εσχαρισμός

3.4 Υπερχειλιστής

Ο υπερχειλιστής βρίσκεται παράλληλα με την υδροληψία και ο σκοπός του είναι να εξέρχεται το νερό που πλεονάζει καθώς και η οικολογική παροχή. Η διάσταση του υπερχειλιστή εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και την μέγιστη πλημμυριακή παροχή. Το υλικό είναι συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα, μιας και είναι η πιο οικονομική λύση. Η ικανότητα του υπερχειλιστή πρέπει να προσδιοριστεί κατά τρόπο σαφή με βάση τη δυνατότητα παροχέτευσης της μέγιστης δυνατής πλημμύρας. Ο προσδιορισμός αυτός της πλημμυρικής παροχής του ποταμού προκύπτει από το υδρογράφημα του ποταμού.

3.5 Εκκενωτής πυθμένα

Χρησιμοποιείται για την εκκένωση του ταμιευτήρα σε περίπτωση ανάγκης ή συντήρησης.



Εικόνα 3.5 Εκκενωτής πυθμένα

3.6 Σήραγγα εκτροπής

Χρησιμοποιείται για την διοχέτευση της παροχής της φυσικής ροής κατά τη διάρκεια της τελευταίας φάσης του φράγματος.



Εικόνα 3.6 Σήραγγα εκτροπής

3.7 Διώρυγα-Σήραγγα προσαγωγής

Σκοπός της είναι η μεταφορά του νερού σε σημείο για την βέλτιστη κλίση του αγωγού από την δεξαμενή φόρτισης στο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο. Το νερό περνά από εκεί παρέχοντας λεπτόκοκκα φερτά διαμέτρου $<12\text{mm}$



Εικόνα 3.7 Σήραγγα προσαγωγής



Εικόνα 3.8 Δεξαμενή φόρτισης

3.8 Εξαμμωτής- Δεξαμενή φόρτισης

Στον εξαμμωτή καθιζάνουν τα λεπτόκοκκα φερτά. Τα επιπλέοντα εμποδίζονται από σχάρες για να μην φτάσουν στη δεξαμενή φόρτισης. Το καθαρό νερό υπερχειλίζει στην δεξαμενή φόρτισης.

3.9 Αγωγός πτώσης στους στροβίλους

Το νερό μεταφέρεται υπό πίεση μέσω του αγωγού πτώσης στους στροβίλους. Ο αγωγός είναι χαλύβδινος με διάμετρο που έχει καθοριστεί από οικονομοτεχνικά κριτήρια. Μικρή διάμετρος συνεπάγεται μικρό αρχικό κόστος, αλλά μεγαλύτερες απώλειες λόγω τριβής, άρα μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος. Όταν ο αγωγός προσαγωγής είναι μεγάλου μήκους προτείνεται μονός και να τροφοδοτεί ταυτόχρονα όλους του στροβίλους του ΥΗΕ, ενώ, όταν είναι μικρότερου μήκους, κάθε υδροστρόβιλος τροφοδοτείται από ανεξάρτητο αγωγό.



Εικόνα 3.9 Αγωγός πτώσεως

Η επιλογή της διαμέτρου του αγωγού γίνεται παίρνοντας υπόψη την μέση ταχύτητα της ροής που αντιστοιχεί στην παροχή λειτουργίας της μονάδας. Η επιλογή της μέσης ταχύτητας επιλέγεται έτσι ώστε:

1) να μην υπερβεί μια τιμή που λαμβάνεται από πίνακες ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση, ανάλογα το υλικό και την περιεκτικότητα στα διάφορα φερτά. Για παράδειγμα, σε χαλυβοσωλήνα και νερό που περιέχει πυριτικό άμμο η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα ροής είναι $4(m/s)$

2) να ικανοποιεί τα οικονομοτεχνικά κριτήρια από την οποία προκύπτει μια βέλτιστη τιμή της διαμέτρου: υδραυλικές απώλειες και κόστος κατασκευής.

3) να μην αναπτύσσονται μεγάλες υπερπίεσεις και υποπίεσεις κατά την διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων και κυρίως στην απόρριψη φορτίου.

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται παράλληλα δύο ή περισσότεροι υδροστρόβιλοι, είναι δυνατή η επιλογή ενός αγωγού πτώσης, ο οποίος διακλαδίζεται ανάντη του υδροηλεκτρικού σταθμού η ενός αγωγού πτώσεως ανά υδροστρόβιλο. Η συμφερόμενη λύση θα προκύψει από την οικονομοτεχνική σύγκριση των δύο αυτών περιπτώσεων.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια οι Gordon και Penman προτείνουν την ακόλουθη σχέση για την επιλογή της διαμέτρου D του αγωγού:

$$D = 0.72 * Q^{0.5}$$

Ο υπολογισμός του πάχους γίνεται έτσι ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη του υλικού και επιλέγεται το αμέσως επόμενο μεγαλύτερο τυποποιημένο πάχος. Στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψιν η μείωση αντοχής κατά την ραφή συγκόλλησης των σωλήνων. Η τιμή που προκύπτει προσαυξάνεται για τις ενδεχόμενες διαβρώσεις του σωλήνα αναλόγως των συνθηκών του ρευστού από ξένα σώματα και της συντήρησης. Το απαιτούμενο πάχος υπολογίζεται από την σχέση:

$$e = e_0 + e_1 + e_2$$

Όπου e_0 το ελάχιστο πάχος που απαιτείται, ώστε η αναπτυσσόμενη μορφή τάσης της πίεσης του ρευστού να μην υπερβεί την τάση του υλικού $\sigma_{\varepsilon\pi}$

$$e_0 = \frac{d_2}{2k_2 \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{k_1}}$$

k_1 : συντελεστής ασφάλειας της τάσης του αγωγού

k_2 : συντελεστής ασφάλειας της ραφής (για συγκολλητούς σωλήνες $k_2 = 0,7 - 0,9$ ενώ χωρίς ραφή $k_2 = 1$)

d_2 : η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα

p : η σχετική ολική πίεση του νερού

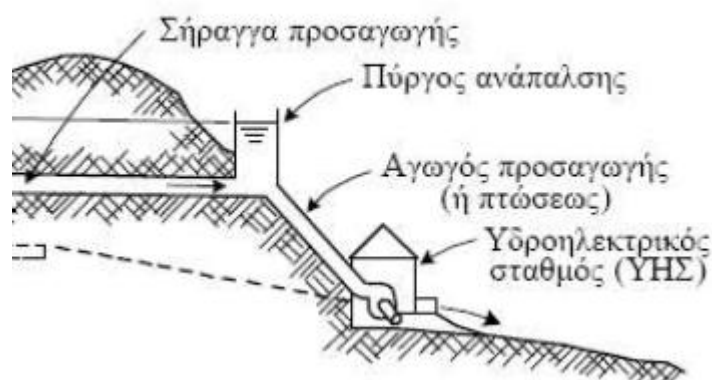
Η σχέση αυτή δεν ισχύει όταν η πίεση του νερού είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής.

e_1 : συμβολίζεται η ανοχή για την ανομοιομορφία του πάχους του ελάσματος από το οποίο κατασκευάζεται ο σωλήνας και

e_2 : η ανοχή για την ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση (συνήθως $e_2 = 1mm$)

3.10 Πύργος ανάπλασης

Ο πύργος ανάπλασης κατασκευάζεται για την προστασία των αγωγών από υπερπίεσεις και υποπέσεις που μπορεί να εμφανιστούν κατά την απότομη εκκίνηση ή διακοπή των υδροστρόβιλων. Κατασκευάζονται συνήθως στην είσοδο ή κατά μήκος του αγωγού πτώσης. Είναι μια διάταξη (μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού) απόσβεσης υψηλών πιέσεων που έχει σκοπό να απορροφά μέσα σε αυτή νερό από την μεγάλη πίεση που εμφανίζεται κατά το απότομο κλείσιμο (σε περίπτωση ανάγκης) των βανών. Η πίεση αυτή ρυθμίζει την παροχή στον υδροστρόβιλο. Έτσι αποφεύγεται το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος.



Εικόνα 3.10 Πύργος ανάπλασης

3.11 Θυροφράγματα και βάνες

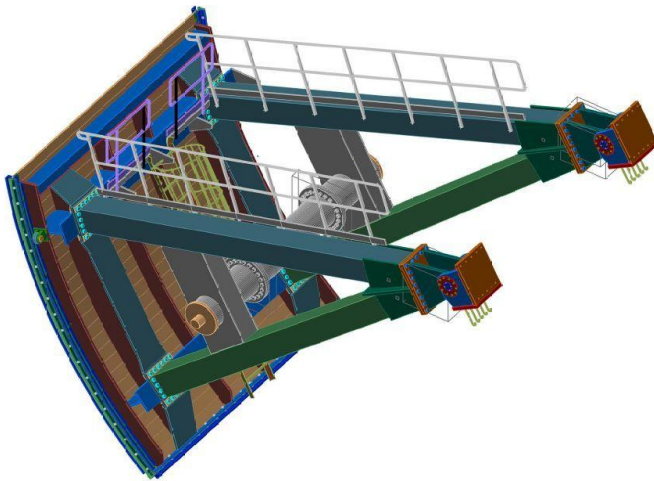
Για τις ανάγκες κατασκευής και συντήρησης του έργου τοποθετούνται θυροφράγματα και βάνες διακοπής έναντι και κατάντη υδροστρόβιλων.

Τύποι θυροφραγμάτων:

- ακτινικού τύπου (radial gates)
- κύλισης (wheel gates)
- ολίσθησης (slide gatew)
- τύπου πτερυγίου (flap gates)
- κυκλικής διατομής (circular gatew)
- ελαστικού τύπου (rubber gates)

Τύποι βαλβίδων:

- σφαιρική βαλβίδα
- βάνια συρτού τύπου
- κοίλες βαλβίδες jet
- βαλβίδα πεταλούδα



Εικόνα 3.11



Εικόνα 3.12 Μια συνολική εικόνα των τεχνικών μερών για την υδροληψία

4 ΡΟΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση

Ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ρευστού σε μηχανική μέσω του στροβίλου. Σε ένα ΥΗΕ η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας είναι η δυναμική ενέργεια, ίση προς την υδραυλική πτώση:

$$h = Z_E - Z_A$$

Z_E η στάθμη του ταμιευτήρα, εκτός αν διατίθεται και δεξαμενή φόρτισης και Z_A η στάθμη του νερού κατάντη του έργου, με μηδενική κινητική ενέργεια, όπου οδηγείται στην φυσική ροή του ποταμού. Η υδραυλική ισχύς που διατίθεται για μετατροπή σε μηχανική ενέργεια είναι ίση:

$$N_h = (\rho * g) * Q * h = \gamma * Q * h$$

Όπου Q (m^3/sec) η παροχή όγκου που διέρχεται στον υδροστρόβιλο, ρ (kg/m^3) και γ (N/m^3) η πυκνότητα και το ειδικό βάρος του νερού και g (m/sec^2) η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Όμως, η μηχανική ισχύς που ανακτάται είναι μικρότερη της N_h , λόγω των απωλειών του αγωγού προσαγωγής και από τον ίδιο τον υδροστρόβιλο. Οι υδραυλικές απώλειες

$$\delta h_{fEe} = k_e * Q^2$$

όπου ο δείκτης f (friction) αναφέρεται στις τριβές από την ελεύθερη επιφάνεια του άνω ταμιευτήρα E , έως την είσοδο e (entrance) του υδροστρόβιλου και k ο ολικός συντελεστής τριβής (coefficient of total friction losses). Ο συντελεστής k είναι άθροισμα δύο απωλειών λόγω τριβών στα τοιχώματα κατά μήκος του αγωγού (μείζονες) και των τοπικών απωλειών που προέρχονται από τις διακλαδώσεις, γωνίες, βάνες κ.λ.π. (ελάσσονες) και δίνεται από την σχέση:

$$k = \sum_i f_i \frac{1}{d_i} \left(\frac{4}{\pi * d_i} \right)^2 + \sum_j J_j \left(\frac{4}{\pi * d_j} \right)^2$$

Όπου i τα διάφορα τμήματα των σωληνώσεων με συντελεστή τριβής f_i και j είναι τα διάφορα τοπικά τμήματα τοπικών απωλειών J_j . Ο συντελεστής f όπως είναι γνωστός από την μηχανική ρευστών, εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds (Re) και την σχετική τραχύτητα του αγωγού ϵ/d .

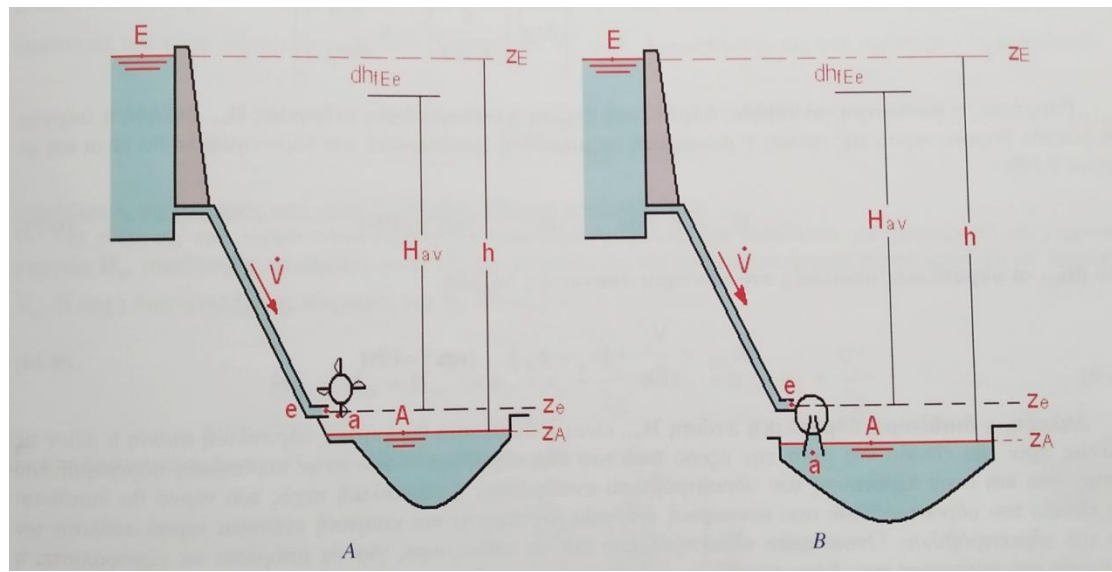
Για την στρωτή ροή: $f = \frac{64}{Re}$, ενώ για την τυρβώδη ροή $f = \frac{0.3086}{\left[\log \left(\left(\frac{\epsilon}{3.7d} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right) \right]^2}$

Δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού την οποία θα μετατρέψει ο υδροστρόβιλος σε μηχανική είναι ίση:

$$H_{av} = h - \delta h_{fEe} - \delta h_{fAa}$$

Άρα η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H_{av} (available) είναι μικρότερη κατά τις υδραυλικές απώλειες πριν την είσοδο του υδροστρόβιλου, οι οποίες αυξάνονται με το τετράγωνο της παροχής για δεδομένη εγκατάσταση και διαστάσεις έργου και οι απώλειες μετά την έξοδο του υδροστρόβιλου. Η διαστασιολόγηση των έργων είναι ξεκάθαρα οικονομοτεχνικό πρόβλημα, όσο αυξάνονται οι διαστάσεις των έργων (π.χ. η διάμετρος του αγωγού προσαγωγής), αυξάνεται και το κόστος εγκατάστασης, αλλά μειώνονται οι υδραυλικές απώλειες. Συνεπώς αξιοποιείται μεγαλύτερο μέρος ενεργειάς ανά μονάδα μάζας ύδατος, αυξάνεται δηλαδή η μηχανική ενέργεια και τα έσοδα του έργου. Μία άλλη παράμετρος που σχετίζεται με την διαστασιολόγηση είναι η υπερπήδηση και υποπίεση που αναπτύσσονται κατά τα μεταβατικά φαινόμενα (υδραυλικό πλήγμα).

4.2 Ενεργειακός ισολογισμός από θέση E (άνω ταμιευτήρα) στην θέση e (είσοδος υδροστρόβιλου)



Εικόνα 4.1 Ύψος πτώσης ύδατος

Η ολική ενέργεια στην είσοδο του υδροστρόβιλου H_{oe} προερχόμενη από τις υδραυλικές απώλειες. Μέσω αρχής διατήρησης της ενέργειας (εξίσωση Bernoulli) για σταθερή ροή στα σημεία E και e:

$$H_{oE} = H_{oe} + \delta h_{fEe} \Rightarrow h_E + z_E + \frac{V_E^2}{2g} = h_e + z_e + \frac{V_e^2}{2g} + \delta h_{fEe} \quad (1)$$

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (2)$$

από την σχέση (1) αντικαθιστώντας την σχέση (2) προκύπτει:

$$\frac{P_E}{\rho g} + z_e + \frac{V_E^2}{2g} = \frac{P_e}{\rho g} + z_e + \frac{V_e^2}{2g} + \delta h_{fEe}$$

Η σχετική στατική πίεση της επιφάνειας του πάνω ταμιευτήρα θέση (E) είναι μηδέν, γιατί είναι ανοικτή στην ατμόσφαιρα (ελεύθερη): $P_E = 0$. Η ταχύτητα του νερού στη θέση E είναι μηδέν λόγω μεγάλου εμβαδού της επιφάνειας: $V_E \approx 0$. Με βάση τις παραπάνω επισημάνσεις η σχέση γράφεται:

$$z_E - z_e = \frac{V_e^2}{2g} + \frac{P_e}{\rho g} + \delta h_{fEe}$$

4.2.1 Ενεργειακός ισολογισμός από την θέση a (έξοδος υδροστρόβιλου) και A (κάτω ταμιευτήρας)

Όμοια γράφουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας (εξίσωση Bernoulli) για μια σταθερή ροή για τα σημεία a και A:

$$H_{oa} = H_{oA} + \delta h_{faA} \Rightarrow h_a + z_a + \frac{V_a^2}{2g} = h_A + z_A + \frac{V_A^2}{2g} + \delta h_{faA} \quad (3)$$

Στα σημεία a και A το νερό είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα, άρα η σχετική στατική πίεση θα είναι μηδέν:

$$h_a = \frac{P_a}{\rho g} \approx 0 \quad \text{και} \quad h_A = \frac{P_A}{\rho g} \approx 0.$$

Θεωρούμε επίσης αμελητέα την υψομετρική διαφορά των σημείων a και A: $z_a \approx z_A$. Η ταχύτητα του νερού στην θέση A είναι περίπου μηδέν λόγω της μεγάλης επιφάνειας του κάτω ταμιευτήρα, δηλαδή $V_A \approx 0 \Rightarrow V_A^2 = 0$. Με αντικατάσταση των σχέσεων στην σχέση (3) προκύπτει:

$$\delta h_{faA} = \frac{V_a^2}{2g}$$

4.2.2 Ενεργειακός ισολογισμός από την θέση e (είσοδος υδροστρόβιλου) και a(έξοδος υδροστρόβιλου)

Η ενέργεια του νερού στην είσοδο (e) του υδροστρόβιλου H_{oe} διατίθεται για την μετατροπή σε μηχανική ενέργεια H_{av} στον υδροστρόβιλο και το υπόλοιπο σε κινητική ενέργεια απορροή του νερού από τον υδροστρόβιλο με ταχύτητα V_a . Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας για τις θέσεις e και a γράφεται:

$$H_{oe} = H_{av} + H_{oa} \Rightarrow h_e + z_e + \frac{V_e^2}{2g} = H_{av} + h_a + z_a + \frac{V_a^2}{2g} \quad (4)$$

Όπου $H_{av} = H_{oe} - \frac{V_a^2}{2g}$ (5) η διαθέσιμη ενέργεια του υδροστρόβιλου και $\frac{V_a^2}{2g}$ η κινητική ενέργεια του νερού στην έξοδο του υδροστρόβιλου.

$$H_{oe} = z_E - z_e - \delta h_{fEe} \rightarrow H_{oe} = z_E - z_e - k * V^2 \quad (6)$$

Από τον συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων (4), (5) και (6) έχουμε:

$$H_{av} = z_E - z_e - k * V^2 - \frac{V_a^2}{2g}$$

Λόγω της μικρής διαφοράς μεταξύ των σημείων e και a: $z_e \approx z_a$ και με

$h_a = \frac{P_a}{\rho g} \approx 0$, εάν το ακροφύσιο είναι εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα (υδροστρόβιλος δράσης

ή $z_a \approx z_A$ (υδροστρόβιλος αντίδρασης), οπότε ισχύει: $P_a = P_A \approx 0$. Αντικαθιστώντας στην σχέση (4) προκύπτει:

$$h_e + \frac{V_e^2}{2g} = H_{av} + \frac{V_a^2}{2g} \Rightarrow V_a = \sqrt{V_e^2 + 2gh_e - 2gH_{av}} \quad (7)$$

Για τα δυο είδη υδροστρόβιλων διακρίνουμε τις αντίστοιχες υποπεριπτώσεις:

4.2.3 Υδροστρόβιλος δράσης:

Στην θέση e το νερό βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση, άρα:

$$P_e = 0 \Rightarrow \frac{P_e}{\rho g} = 0 \Rightarrow h_e = 0$$

Οπότε η σχέση (7) στην περίπτωση αυτή παίρνει την μορφή:

$$V_a = \sqrt{V_e^2 - 2gH_{av}}$$

4.2.4 ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αντίδρασης

Ομοίως στην περίπτωση αυτή θα έχουμε από την σχέση (7) και με $V_e \approx 0$, επειδή η διατομή του αγωγού προσαγωγής είναι αρκετά μεγάλη οπότε:

$$V_a = \sqrt{V_e^2 + 2gh_e - 2gH_{av}} \Rightarrow V_a = \sqrt{2gh_e - 2gH_{av}}$$

Επίσης στον υδροστρόβιλο αντίδρασης ισχύει ότι $P_e \neq 0 \Rightarrow \frac{P_e}{\rho g} \neq 0 \Rightarrow h_e \neq 0$

4.3 Οι συνολικές απώλειες είναι τριών ειδών:

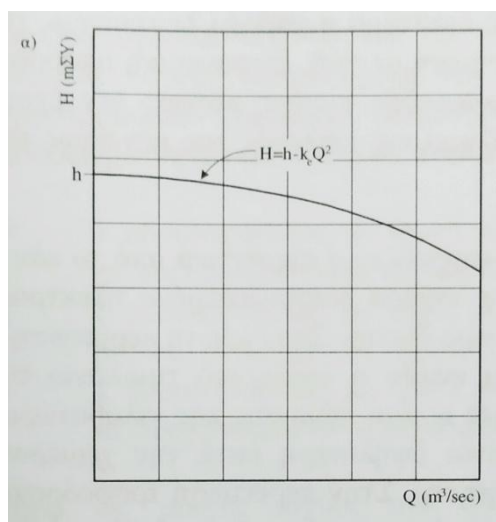
4.3.1 Υδραυλικές απώλειες, κατά μήκους των τοιχωμάτων από την διατομή άοσμου (ε) μέχρι την έξοδο (α) και στις απώλειες κρούσης που οφείλεται στη διαφορά των γωνιών πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια, οι οποίες είναι λιγότερο σημαντικές.

4.3.2 Ογκομετρικές, οφείλονται στις απώλειες παροχής διακένου που σχηματίζεται στους μεν φυγοκεντρικούς αντίδρασης, μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της στεφάνης και του εξωτερικού κελύφους του υδροστρόβιλου, στην αξονική ροή αντίδρασης μεταξύ των ακροπτερυγίων του στροφείου και του εξωτερικού κελύφους. Οι υδροστρόβιλοι δράσεως δεν παρουσιάζουν ογκομετρικές απώλειες λόγω της ισοθλιπτικής λειτουργίας του στροφείου.

4.3.3 Μηχανικές, οι οποίες είναι οι απώλειες των εδράνων και οι απώλειες του στρεφόμενου δίσκου.

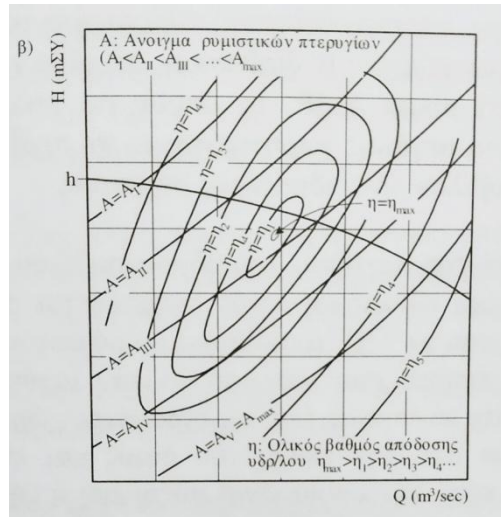
4.4 Σημείο λειτουργίας ΗΥΣ

Σύμφωνα με όσα προαναφερθήκαν ο υδροστρόβιλος έχει να μετατρέψει την διαθέσιμη υδραυλική πτώση H σε μηχανική. Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση εκφράζεται ως συνάρτηση της παροχής Q , η οποία στο διάγραμμα (Q,H) έχει την μορφή παραβολής



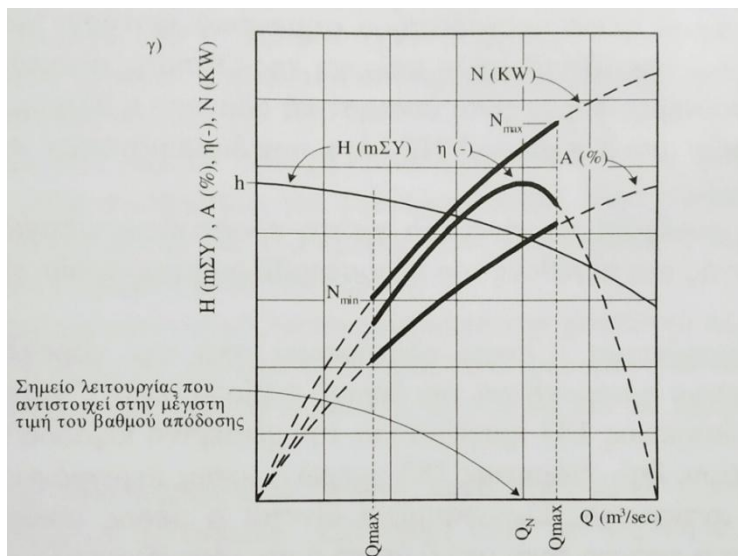
Διάγραμμα 4.1 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση συνάρτηση παροχής

Η λειτουργία ενός υδροστρόβιλου, υπό σταθερή ταχύτητα περιστροφής περιγράφεται στο διάγραμμα παροχής (H,Q) , από ένα πλέγμα καμπύλων, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί η αντίστοιχη κλίση των πτερυγίων.



Διάγραμμα 4.2 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση συνάρτηση παροχής και αντίστοιχη απόδοση του υδροστρόβιλου με την αντίστοιχη κλίση πτερυγίων

Εάν ο υδροστρόβιλος, του οποίου οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας περιγράφονται από αυτές του διαγράμματος 4.2 εγκατασταθεί σε υδραυλική πτώση του διαγράμματος 4.1, τα μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας είναι αυτά της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H της εγκατάστασης. Εάν χαραχτεί η καμπύλη της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροστρόβιλου, προκύπτουν τα χαρακτηριστικά των δυνατών σημείων λειτουργίας. Για την συγκεκριμένη τιμή της υδραυλικής πτώσης h , από τις τιμές του διαγράμματος 4.2 μπορεί να σχεδιάσει ένα τρίτο διάγραμμα 4.3 στο οποίο φαίνεται η αντιστοιχία των διαφόρων μεγεθών:



Διάγραμμα 4.3 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση συνάρτησης παροχής και αντίστοιχη λειτουργία του υδροστρόβιλου

δηλαδή της παροχής(Q) της υδραυλικής πτώσης(H) του ολικού βαθμού απόδοσης (η) της παραγόμενης μηχανικής ισχύος (W) και του ανοίγματος (A) των ρυθμιστικών περιέγμων. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η λειτουργία του συγκεκριμένου υδροστρόβιλου στη συγκεκριμένη υδραυλική εγκατάσταση έχει ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας από την ελάχιστη τιμή Q_{\min} έως την μέγιστη τιμή Q_{\max} , που αντιστοιχεί στην μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Στην πράξη, για λόγους ασφαλής λειτουργίας, το εύρος του υδροστρόβιλου είναι πολύ πιο περιορισμένο.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι είναι επιθυμητή η λειτουργία του υδροστρόβιλου σε περιοχές λειτουργίας όπου ο ολικός βαθμός απόδοσης (η) έχει υψηλές τιμές, προκύπτει η ανάγκη επιλογής του υδροστρόβιλου σε λειτουργία στην γειτονιά του σημείου μέγιστου βαθμού απόδοσης.

4.5 Ενεργειακή ανάλωση μικρού ΥΗΕ

Με δεδομένο την καμπύλη διάρκειας παροχής υδατορεύματος σε συγκεκριμένη διατομή μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που θα παραχθεί ετησίως, καθώς και το μέγεθος του υδροστρόβιλου. Το πρόβλημα στα ΜΥΗΕ είναι ότι δεν περιέχουν μεγάλους ταμιευτήρες για λόγους οικονομίας με αποτέλεσμα το μεγάλο εύρος παροχών, ενώ ο υδροστρόβιλος έχει μικρό εύρος παροχής λειτουργίας. Συνεπώς υπάρχει πρόβλημα της επιλογής του μεγέθους του υδροστρόβιλου. Επομένως είναι ανάγκη να γυρίζουμε εξ αρχής τη συμπεριφορά της παροχής (Q) στο χρόνο, δηλαδή το $Q(t)$. Ειδικότερα, θα θέλαμε να γνωρίζουμε και κάθε τιμή που μπορεί να λάβει η παροχή, το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο η παροχή διατηρείται σε μεγαλύτερες τιμές παροχής. Γνωρίζοντας αυτό, μπορούμε να προσδιορίσουμε την παροχή σχεδιασμού του έργου.

Η παροχή Q είναι μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κάποια κατανομή. Την κατανομή αυτή προσεγγίζουμε με την καμπύλη διάρκειας παροχής. Οι παράμετροι της κατανομής παραμένουν σταθερές στο χρόνο και επομένως, σταθερή παραμένει και η καμπύλη διάρκειας παροχής. Η παροχή ως μεταβλητή παρουσιάζει ετήσιο μοτίβο. Για τον λόγο αυτό, η καμπύλη διάρκειας εφαρμόζεται πάντα σε ακέραιο πλήθος περιόδων (ετών) και ποτέ κάτω του ενός έτους. Στην καμπύλη διάρκειας παροχής υπάρχουν τρεις παραδοχές οι οποίες είναι:

- Η υπέρβαση μικρότερης του 10% εμφανίζονται κυρίως πλημμυρικές παροχές λόγω του γεγονότος ότι ο υδροστρόβιλος δεν μπορεί να την αξιοποιήσει ολόκληρη.
- Στο διάστημα πιθανοτήτων 15% με 25% βρίσκεται συνήθως η τιμή παροχής που θα επιλέξουμε ως σχεδιαστικό μέγεθος, όπου θα είναι και το εύρος λειτουργίας του στρόβιλου.
- Η λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου στις χαμηλές παροχές με πιθανές υπερβάσεις μεγαλύτερης του 80% μένει αναξιοποίητο, λόγω της μηδενικής απόδοσης του υδροστρόβιλου.

Όταν στη διαμόρφωση της παροχής ενός ρεύματος η πηγαία συνεισφορά είναι σημαντική και παραμένουν υψηλές οι τιμές παροχής για μεγάλες πιθανότητες υπέρβασης, ο σχεδιασμός του έργου σε αυτή την θέση με τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οικονομικός και κερδοφόρος. Αντίθετα, όπου η καμπύλη διάρκειας παροχής εμφανίζει σημαντικό μέρος του συνολικά διερχόμενου όγκου σε μικρές πιθανότητες υπέρβασης, οδηγεί σε αντιοικονομικό έργο.

Για λόγους αξιοποίησης του πόρου υπάρχει η οικολογική εκμετάλλευση του 75% του διερχόμενου όγκου (Βαθμός Ενεργειακής Αξιοποίησης BEA) και η απελευθέρωση 30% της μέσης παροχής Ιουνίου-Ιουλίου-Αύγουστου ή το 50% του Σεπτεμβρίου (το μεγαλύτερο από τα δυο).

Τηρώντας την υποχρέωση του BEA επιλεγούμε την Q_{MAXt} δηλαδή την μέγιστη διερχόμενη παροχή στους υδροστρόβιλους. Βάσει των στροβίλων που θα επιλέξουμε ορίζεται και η ελάχιστη παροχή λειτουργίας ως ποσοστό της Q_{MINt} . Ο προς εκμετάλλευση όγκος νερού που είναι ο διαθέσιμος μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής μετά βεβαία την αφαίρεση της οικολογικής παροχής.

5 ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

5.1 Ιστορική αναδρομή υδροστρόβιλων

Η ιστορία ανάπτυξης του υδροστρόβιλου είναι μεγάλη. Απλούστερη μορφή είναι ο υδραυλικός τροχός για παράγωγη μηχανικού έργου. Δεν είναι ξεκάθαρο πότε και πού χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά. Εφαρμογές υδραυλικών τροχών απαντώνται στην ιστορία σχεδόν όλων των αρχαίων πολιτισμών. Με την μορφή του υδρόμυλου καταγράφεται η χρήση του για πρώτη φορά στην αρχαία Ελλάδα. Ο Ρωμαίος μηχανικός Βιτρούβιος είναι ο πρώτος που περιγράφει πλήρως την τεχνολογία ενός υδρόμυλου.

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν διάφοροι τύποι υδροστρόβιλων, λόγω, όμως, της χαμηλής απόδοσής τους δεν χρησιμοποιούνται πλέον. Αυτοί που έχουν επικρατήσει για την εφαρμογή σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι τρεις: Peloton, Francis και Kaplan.

Οι υδροστρόβιλοι ανάλογα του τρόπου παραλαβής της ενέργειας του νερού διακρίνονται σε:

Υδροστρόβιλος δράσης ή ισοθλιπτικούς (Pelton). Η δυναμική κυρίως ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική, μέσω ακροφύσιου εξόδου του αγωγού προσαγωγής. Το νερό εισέρχεται μόνο με κινητική ενέργεια πάνω στα σκαφίδια, χωρίς να τα γεμίζει και βγαίνει με άλλη κατεύθυνση, μιας και ακολουθεί το σχήμα αυτών. Τα σκαφίδια είναι περιμετρικά πακτωμένα στο στροφέιο του υδροστρόβιλου, το οποίο περιστρέφεται λόγω της κρούσης του ύδατος στα σκαφίδια με τη στατική πίεση να παραμένει σταθερή στο χώρο του στροφείου.

Υδροστρόβιλος αντίδρασης (Francis, Kaplan) στους οποίους το νερό κατέχει κυρίως δυναμική ενέργεια. Μέρος της δυναμικής ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, όταν περάσει μέσα από τα οδηγία πτερύγια στο εσωτερικό σώμα του κελύφους, όπου μέρος της διαθέσιμης πίεσης μετατρέπεται σε ταχύτητα και στην συνέχεια πέφτει πάνω στα πτερύγια του στροφείου. Εκεί, στον ενδιάμεσο χώρο των πτερυγίων του στροφείου, το νερό λόγω της υπερπίεσης που έχει αρχικά, επιταχύνεται εξερχόμενο από τα πτερύγια του στροφείου με μεγαλύτερη ταχύτητα και βεβαία μικρότερη πίεση. Έτσι το εξερχόμενο από τα πτερύγια του στροφείου νερό παράγει εξ αντιδράσεως μια συνιστώσα δύναμη εφαπτομένης διεύθυνσης. Στο είδος αυτό των υδροστρόβιλων μέρος μόνο της δυναμικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενεργεία, ενώ το υπόλοιπο παραμένει σαν δυναμική ενέργεια. Έτσι, το νερό κατά τη διεύθυνσή του μέσα από τα κινητά και σταθερά πτερύγια περνά με πίεση καταλαμβάνοντας ολόκληρο το διαθέσιμο χώρο χωρίς να αφήνει κενά.

Δηλαδή στους υδροστρόβιλους αντίδρασης η παραγωγή ισχύος οφείλεται κυρίως στην δυναμική ενέργειας και λιγότερο στην κινητική που διαθέτει το νερό, ενώ στους υδροστρόβιλους δράσης γίνεται εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας.

Αναλόγως τη διεύθυνση ροής του νερού στον υδροστρόβιλο διακρίνονται σε:

Σε έναν στρόβιλο, όταν η ροή του νερού στην είσοδο και στην έξοδο είναι παράλληλη με τον άξονα και λέγεται αξονικής ροής Kaplan, ενώ όταν η είσοδος του νερού είναι κάθετη προς τον άξονα του στροφείου ονομάζεται ακτινικής ροής Francis και ο Pelton και είναι εφαπτόμενης ροής.

Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής του, οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα περιστροφής.

5.2 Υδροστρόβιλος Francis

5.2.1 Εισαγωγή του υδροστρόβιλου Francis

Ο Francis σχεδιάστηκε από τον Βρετανό μηχανικό James Francis το 1849. Ήταν ο πρώτος υδροστρόβιλος ακτινικής εισόδου και αξονικής εξόδου. Στην είσοδο του νερού από το κέλυφος του στροφείου υπάρχουν οδήγα πτερύγια για την οδήγηση της ροής, ενώ υπάρχουν και στρεφόμενα ρυθμιζόμενα πτερύγια, τα όποια βελτιώνουν τις γωνίες εισόδου ανάλογα με την παροχή εισόδου.

5.2.2 Λειτουργία του υδροστρόβιλου Francis

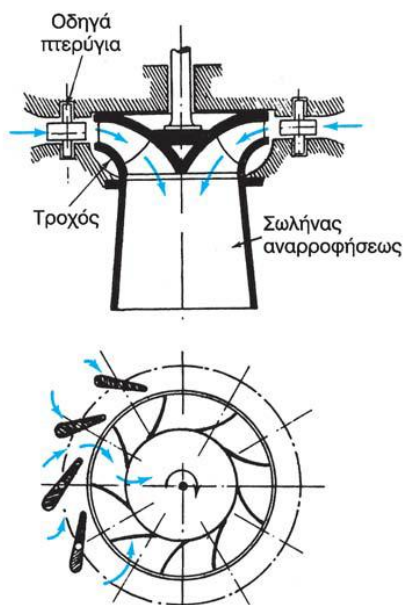
Ο υδροστρόβιλος καλύπτεται πλήρως από το νερό, στρόβιλος ολικής προσβολής και μπορεί να περιστραφεί σε υψηλές ταχύτητες ανά λεπτό. Το σπειροειδές κέλυφος επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή του νερού στον δρομέα, τον οποίο περιβάλλει πλήρως. Ένα μέρος προχωρά στον υδροστρόβιλο και το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του στο σπειροειδές κέλυφος. Η διάμετρος του κελύφους μειώνεται κατά μήκος της ροής, διατηρώντας έτσι σταθερή την ταχύτητα του νερού. Η μείωση της διαμέτρου είναι αντίστοιχη με την ποσότητα παροχής νερού στον δρομέα από το συγκεκριμένο σημείο. Για ύψη πτώσεως μεγαλύτερα από 25mΣΥ το σπειροειδές κέλυφος κατασκευάζεται από χαλυβοελάσματα και οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το νερό από το σπειροειδές κέλυφος εισέρχεται στον υδροστρόβιλο περνώντας μέσα από τα σταθερά οδήγα πτερύγια που βρίσκονται στο δακτύλιο του κελύφους και περνά ακτινικά με φορά από την περίμετρο προς το κέντρο. Στην συνάχια εισέρχεται μέσα από τα κατευθυντήρια οδήγα πτερύγια. Τα κατευθυντήρια πτερύγια διατάσσονται περιμετρικά σε στεφάνι πριν τον δρομέα και μετά τα σταθερά πτερύγια. Τα κατευθυντήρια πτερύγια μπορούν να περιστραφούν γύρω από τον άξονά τους και έτσι διαμορφώνουν την τελική κλίση και ταχύτητα. Η κλίση είναι τέτοια, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση με την αντίστοιχη παροχή του ύδατος και συνεπώς ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος. Κατασκευάζονται συνήθως από χυτοχάλυβα ή

σφυρήλατο χάλυβα. Ο αριθμός των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι ο πλησιέστερος ακέραιος, πολλαπλάσιος του 4 ή του 2 και προκύπτει από τη προσεγγιστική σχέση:

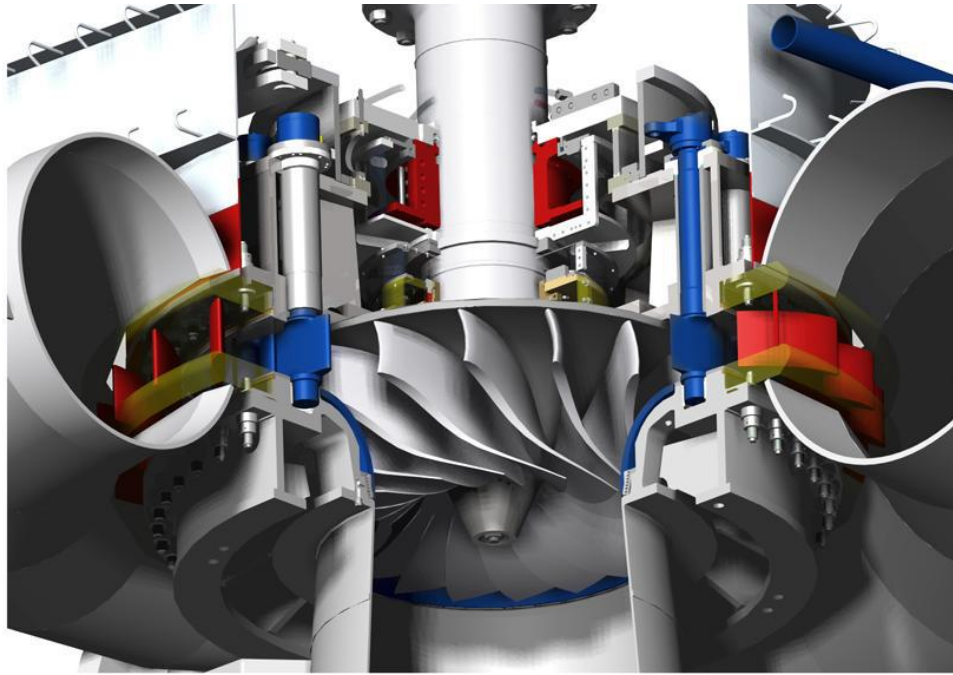
$$n = 17 * \sqrt[3]{R_v}$$

Όπου R_v η ακτίνα του κυκλικών αξόνων περιστροφής των ρυθμιστικών πτερυγίων.



Εικόνα 4.2 Τομή και κάτοψη υδροστρόβιλου Francis

Στην συνέχεια το νερό εισέρχεται στον δρομέα όπου εκεί γίνεται η μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Ο δρομέας αποτελείται από μια σειρά καμπύλων πτερυγίων, τα όποια είναι συμμετρικά κατανεμημένα και προσαρμοσμένα στην περιφέρεια. Κατασκευάζεται συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα, συγκολλημένος, ενώ για τα μικρά μεγέθη μπορεί να κατασκευαστεί χυτός από μπρούντζο νικέλιο-αλουμίνιο. Εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης, στην όποια είναι πακτωμένα. Αυξάνεται έτσι η μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και η αντοχή στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια από τις τάσεις του ρευστού. Τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα έτσι ώστε το νερό να εισέρχεται στο δρομέα ακτινικά και στο ύψος της εξωτερικής περιφέρειας και να εξέρχεται από αυτόν κατά την αξονική διεύθυνση και στο ύψος της εσωτερικής περιφέρειας. Ο αριθμός των ρυθμιστικών πτερυγίων επιλέγεται περιττός (συνήθως 11, 13, 15), ώστε να μην επιτευχθεί κίνδυνος συγχρονισμού και ταλαντώσεων λόγω του αναγκαστικού άρτιου αριθμού των πτερυγίων.



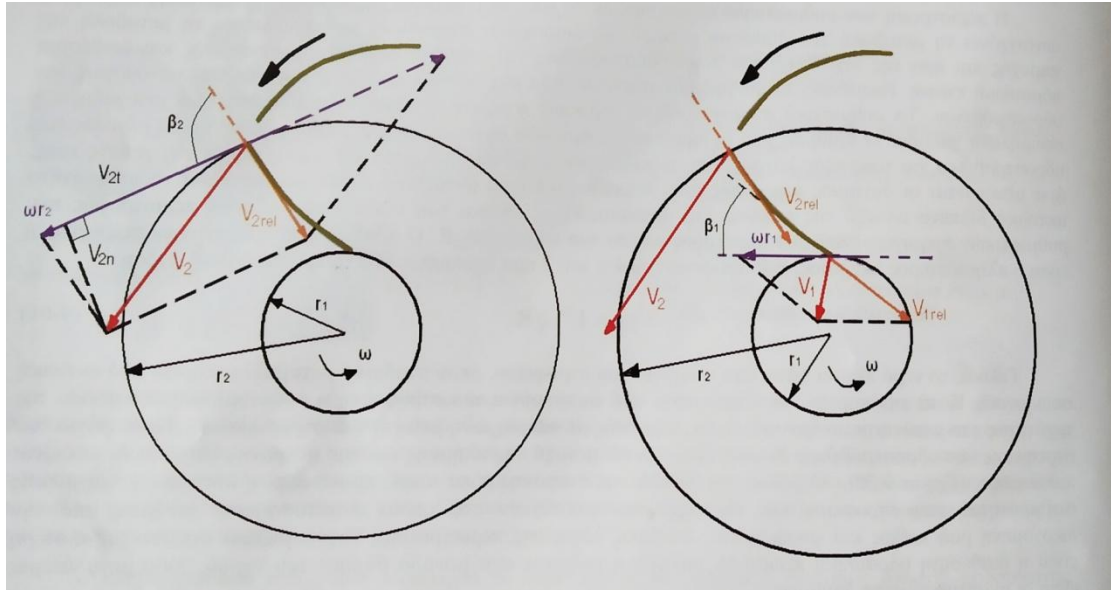
Εικόνα 4.2 Πλήρη εικόνα του υδροστρόβιλου Francis

Στον αγωγό απαγωγής είναι το τελικό στάδιο του υδροστρόβιλου από το οποίο διέρχεται το νερό με μικρή κινητική ενέργεια, η οποία θεωρείται απώλεια. Η μέση ταχύτητα το ρευστού κυμαίνεται 6-10(m/s), η οποία είναι σημαντική όταν έχουμε μικρό ύψος πτώσης H . Για τον λόγο αυτό, ο αγωγός απαγωγής οδηγεί το νερό σε διώρυγα απαγωγής ή στον κάτω ταμιευτήρα με ταυτόχρονη επιβράδυνση μέσω διαχύτη. Η ταχύτητα του τότε μειώνεται στα 1-2.5(m/s). Η γωνία του διαχύτη είναι $<7^\circ$ για την αποφυγή αποκόλλησης. Σε μεγάλου μεγέθους υδροστρόβιλους ο αγωγός απαγωγής κατασκευάζεται από χαλυβοελάσματα και περιβάλλεται από σκυρόδεμα τουλάχιστον, όσο η ταχύτητα της ροής είναι μεγαλύτερη από 5(m/s).

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός και η ανάλυση του στροβίλου (ροπή ατράκτου και ισχύος στροβίλου), προκύπτει χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ταχύτητας της εξίσωσης Euler για στροβιλομηχανές. Για την ανάλυση πρώτης τάξης θεωρούμε τα πτερύγια ως απείρως λεπτά. Επίσης υποθέτουμε πως, τα πτερύγια είναι ευθυγραμμισμένα, ώστε η ροή να είναι πάντα εφαπτόμενη στην επιφάνεια της πτέρυγας και αγνοούμε τις επιδράσεις του ιξώδους (οριακό στρώμα) στην επιφάνεια.

Η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα των περιστρεφόμενων πτερυγίων: r_2 r_1

Στο σχήμα σχεδιάζουμε διανύσαντα ταχύτητας για το απόλυτο σύστημα αναφοράς και το σχετικό που περιστρέφεται με το στροφέιο.



Εικόνα 4.3 Τρίγωνο ταχυτήτων υδροστροβίλου Francis

Τα στατικά περύγια οδηγούν την ροή, έτσι ώστε να προσκρούει στο περύγιο του στροφείου με απόλυτη ταχύτητα V_2 . Αλλά το περύγιο στροφείου περιστρέφεται αριστερόστροφα και σε ακτίνα r_2 κινείται εφαπτόμενα με ταχύτητα ωr_2 . Για να το μετατρέψουμε στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, δημιουργούμε το διανυσματικό άθροισμα της V_2 με το αντίθετο της ωr_2 . Το αποτέλεσμα είναι το διάνυσμα V_{2rel} , το οποίο είναι παράλληλο στην ακμή προσβολής του περυγίου στροφείου (γωνία β_2 από την εφαπτόμενη γραμμή του κύκλου r_2). Η εφαπτόμενη συνιστώσα V_{2t} , του διανύσματος απόλυτης ταχύτητας V_2 υπολογίζεται, μετά από πράξεις γεωμετρίας, ότι είναι:

$$V_{2t} = r_2\omega - \frac{V_{2n}}{\tan\beta_2}$$

Ακολουθώντας την ροή κατά μήκος του περυγίου του στροφείου στο σχετικό (περιστρεφόμενο) σύστημα αναφοράς, βλέπουμε πως η ροή στρέφεται ώστε να εκρέει παράλληλα με την ακμή εκφυγής του περυγίου του δρομέα (γωνία β_1 από την εφαπτόμενη γραμμή του κύκλου r_1). Τέλος, για να επιστρέψουμε στο απόλυτο σύστημα αναφοράς προσθέτουμε διανυσματικά τα V_{1rel} και την ταχύτητα του περυγίου ωr_1 και προκύπτει το διάνυσμα απόλυτης ταχύτητας V_1 . Αφού η μάζα πρέπει να διατηρείται, οι κάθετες συνιστώσες των διανυσμάτων απόλυτης ταχύτητας V_{1n} και V_{2n} σχετίζονται μέσω της σχέσης (6-5) όπου αξονικό περύγιο πάχους b_1 και b_2 είναι το ύψος των περιστρεφόμενων περυγίων στην είσοδο και έξοδο της ροής. Μετά από πράξεις γεωμετρίας (οι οποίες προκύπτει πως είναι ίδιες με αυτές της ακμής προσβολής), δημιουργούμε έκφραση για την εφαπτόμενη συνιστώσα V_{1t} :

$$V_{2t} = r_2\omega - \frac{V_{2n}}{\tan\beta_2}$$

Η ισχύος εξόδου της ατράκτου προκύπτει με χρήση της εξίσωσης Euler για στροβιλομηχανές

$$W = \omega M = \omega T$$

$$\sum M = T = m(r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t})$$

$$\Rightarrow W = \rho \omega V (r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t})$$

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι καλύτερη απόδοση υπάρχει, όταν ο στροβιλισμός στην ροή είναι ομόρροπος με την περιστροφή του στροφείου. Αυτό βελτιώνει την απόδοση του σωλήνα εκροής. Σε μεγάλες ποσότητες στροβιλισμού ομόρροπης ή αντίρροπης ροής προκαλούν μεγάλες απώλειες.

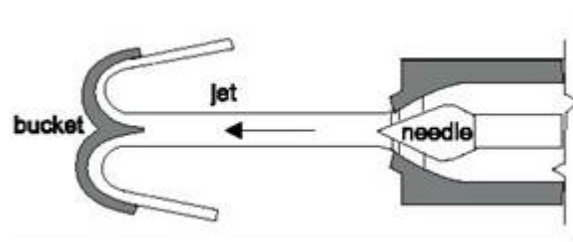
5.3 Υδροστρόβιλος Pelton

5.3.1 Εισαγωγή του Υδροστρόβιλου Pelton

Το 1890 ο Αμερικανός μηχανικός Lester Allan Pelton σχεδίασε τον υδροστρόβιλο Pelton. Ο υδροστρόβιλος Pelton ανήκει στην κατηγορία των στροβίλων δράσεων. Αποτελείται από τον τροχό και τα πτερύγια, τα όποια είναι βιδωμένα στην περιφέρειά του.

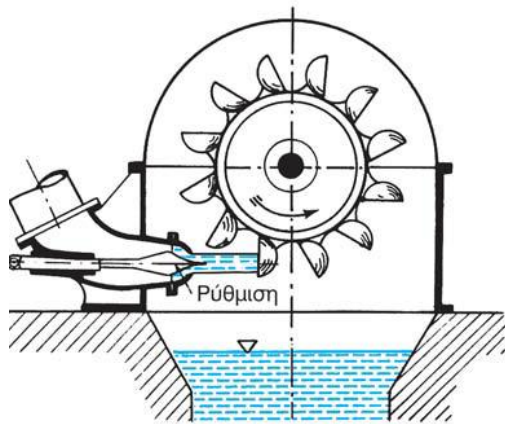
5.3.2 Λειτουργία του Pelton

Το νερό κατέρχεται από τον αγωγό προσαγωγής και διερχόμενο από το ακροφύσιο εξέρχεται με την μορφή jet με μεγάλη ταχύτητα, ο οποίος είναι τοποθετημένος οριζόντια, είναι στραμμένος εφαπτόμενα του στροβίλου και τον αναγκάζει σε περιστροφική κίνηση του τροχού. Στον αγωγό είναι τοποθετημένο ακροφύσιο το οποίο αυξάνει την ταχύτητα του νερού. Το νερό εισέρχεται πάνω στα σκαφίδια και εξέρχεται με αντίθετη κατεύθυνση λόγω της καμπυλότητάς τους και στην συνέχεια οδεύει προς τον αγωγό απαγωγής.



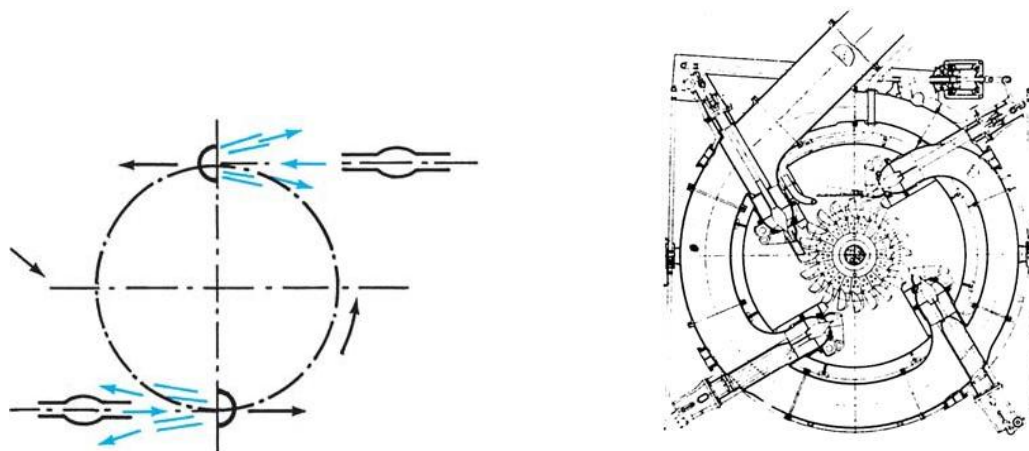
Εικόνα 4.4 Τομή jet και πτερυγίου

Το ακροφύσιο περιέχει εσωτερική βελονοειδή βαλβίδα. Με αυτήν ρυθμίζεται η διατομή της φλέβας του νερού, δηλαδή η παροχή από την οποία εξαρτάται η ισχύς του υδροστρόβιλου. Κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα, ενώ το άκρο της ακίδας από ανοξείδωτο χάλυβα αντικαθίσταται μετά από κάποιες ώρες λειτουργίας, λόγω μηχανικής διάβρωσης που υφίσταται από την υψηλή ταχύτητα. Το στροφέιο κατασκευάζεται ολόσωμο ή συναρμολογούμενο. Στην δεύτερη περίπτωση τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και δεμένα στο στροφέιο με κοχλίες. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και των διαβρώσεων που υφίσταται από τη ροή, κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο αριθμός των σκαφιδιών εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου και των σκαφιδιών και είναι περίπου 20 με 26.



Εικόνα 4.5 Τομή υδροστρόβιλου Pelton

Ο υδροστρόβιλος Pelton κατασκευάζεται με οριζόντιο ή κατακόρυφο άξονα. Στους οριζόντιους στροβίλους τοποθετούνται συνήθως δυο ακροφύσια που είναι μεταξύ τους παράλληλα και με αντίθετη διεύθυνση, ώστε να μην δημιουργούν κάμψη στον άξονα. Στους κατακόρυφους άξονες τοποθετούνται από 2 έως 6 ακροφύσια κατανεμημένα ομοιόμορφα στην περιφέρεια του τροχού.



Εικόνα 4.6 Κάτοψη υδροστρόβιλου Pelton

Η μέγιστη απόδοση του στροβίλου επιτυγχάνεται όταν η εφαπτόμενη ταχύτητα του στροβίλου είναι ίση με το μισό της ταχύτητας του νερού μετά την έξοδο του ακροφυσίου. Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι Pelton που κατασκευάζονται παράγουν από λίγη μόνο ισχύς έως και περισσότερο από 120MW. Η απόδοση του ανέρχεται στο 90% περίπου.

Μια έκφραση του βαθμού απόδοσης του στροβίλου pelton είναι:

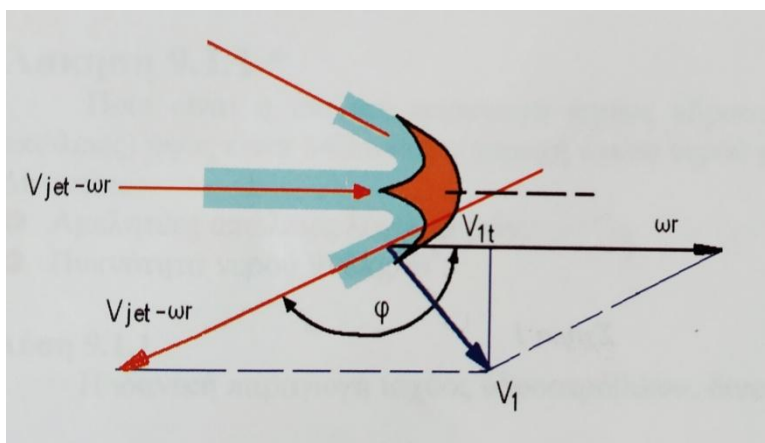
Η ισχύος εξόδου της ατράκτου είναι ίση με:

$$W = \omega M = \omega T \quad (8)$$

$$\Sigma M = T = m(r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (9)$$

$$(8)(9) \Rightarrow W = \rho \omega V (r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (10)$$

Στο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ταχυτήτων του νερού στην είσοδο και έξοδο των πτερυγίων του στροφείου. Η ταχύτητα εκροής από το κινούμενο σημείο αναφοράς μετατρέπεται σε απόλυτο προσθέτοντας την ταχύτητα περιστροφής του πτερύγιου (ωr) προς τα δεξιά.



Εικόνα 4.7 Τρίγωνο ταχυτήτων υδροστρόβιλου Pelton

Συνήθως στους υδροστρόβιλους ορίζεται το σημείο 2 στην είσοδο και το σημείο 1 στην έξοδο. Το κέντρο του πτερύγιου κινείται με εφαπτόμενη ταχύτητα ωr , (σχήμα). Η ανάλυση απλοποιείται, αφού η διάσταση του πτερυγίου είναι αμελητέα σε σχέση με την διάμετρο του υδροστροβίλου. Έτσι λοιπόν η πρόσκρουση του νερού γίνεται στο κατώτερο τμήμα του τροχού. Επιπλέον, η διάμετρος της δέσμης του νερού είναι μικρή, άρα λέμε ότι r_1 είναι ίσο με το r . Τέλος, κάνουμε μια προσέγγιση πως το νερό στρέφεται κατά γωνία ϕ χωρίς απώλειες ταχύτητας στο σχετικό σύστημα αναφοράς που κινείται με το πτερύγιο, η σχετική ταχύτητα εξόδου είναι επομένως $V_{jet} - \omega r$ (η ίδια με την σχετική ταχύτητα εισόδου). Η εφαπτόμενη ταχύτητα στην είσοδο είναι

ίση με την ταχύτητα της δέσμης, δηλαδή $V_{jet} = V_{2t}$. Από το σχήμα και γνωρίζοντας ότι $\sin(\varphi - 90) = -\cos \varphi$ προκύπτει:

$$V_{1t} = r\omega + (V_{jet} - r\omega) \cos \varphi \quad (11)$$

$$(10)(11) \Rightarrow W = \rho r \omega V (V_{jet} - (r\omega + (V_{jet} - r\omega) \cos \varphi)) \Rightarrow$$

$$W = \rho r \omega V (V_{jet} - r\omega)(1 - \cos \varphi) \quad (12)$$

Από την σχέση (12) προκύπτει ότι η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται θεωρητικά στις $\varphi = 180^\circ$. Όμως σε αυτή την περίπτωση το νερό που εκρέει από το ένα πτερύγιο θα προσέκρουε στο πίσω του επόμενου, μειώνοντας έτσι την παραγόμενη ροπή και ισχύ. Αποδεικνύεται πως στην πράξη, η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται μειώνοντας το φ στο περίπου 165° με 160° . Ο συντελεστής απόδοσης, λόγω του φ που είναι μικρότερου του 180° , είναι:

$$\eta = \frac{W_{real}}{W_{ideal}} = \frac{1 - \cos \varphi}{1 - \cos 180^\circ}$$

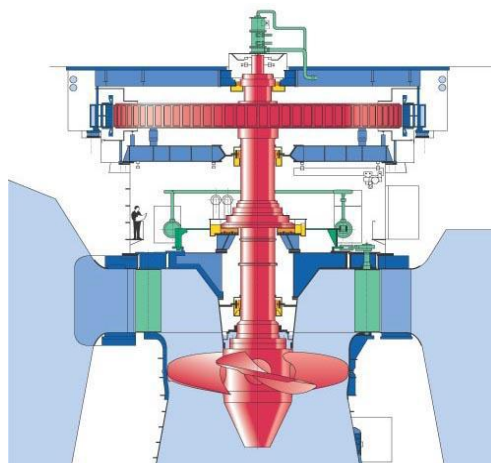
Συνήθως η γωνία στροφής των πτερυγίων είναι $\varphi = 160^\circ$ άρα η απόδοση του υδροστρόβιλου Pelton είναι $\eta \approx 0,97$.

Συνήθως ο άξονας του στρόβιλου Pelton συνδέεται κατευθείαν με την γεννήτρια χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Ο υδροστρόβιλος έχει διάμετρο που μπορεί να ξεπεράσει τα 6m και ζυγίζει μέχρι 40 tns. Η μεγαλύτερη αποδιδόμενη ισχύς ανέρχεται στα 400WM. Ο υδροστρόβιλος είναι μερικής προσβολής μιας και ένα σκαφίδι κάθε φορά έρχεται σε επαφή με το νερό.

5.4 Υδροστρόβιλος Kaplan

5.4.1 Εισαγωγή στον υδροστρόβιλος Kaplan

Ο υδροστρόβιλος Kaplan κατασκευάστηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από τον Αυστραλό καθηγητή Victor Kaplan. Ο υδροστρόβιλος Kaplan αποτελείται από το σπειροειδές κέλυφος εισόδου, τα σταθερά οδηγά πτερύγια τον τροχό και το σωλήνα αναρροφήσεως. Το στροφείο



Εικόνα 4.7 Τομή υδροστρόβιλου Kaplan

έχει μορφή προπέλας. Τα πτερύγια του στροφείου είναι 3 έως 8 και είναι στερεωμένα πάνω στην πλήμνη με την όποια περιστρέφονται για την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική.

5.4.2 Περιγραφή του υδροστρόβιλου Kaplan

Τα πτερύγια αυτά μπορεί να είναι μόνιμα επάνω στον τροχό ή περιστρεφόμενα γύρω από τον άξονα του μεταβλητού βήματος. Η ρύθμιση των πτερυγίων γίνεται αυτόματα ανάλογα με την παροχή την συγκεκριμένη στιγμή. Ο τύπος αυτός είναι πιο αποδοτικός, μιας και διατηρεί την απόδοση του σταθερή και για μικρές παροχές. Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα χρησιμοποιούνται υδροστρόβιλοι με σταθερά πτερύγια με σκοπό την μείωση του κόστους.

Πριν από το στροφείο υπάρχουν τα σταθερά και μεταβαλλόμενα οδηγικά πτερύγια. Η χρησιμότητα τους είναι ίδια με αυτήν του Francis. Την κύρια καταπόνηση την παίρνουν τα σταθερά πτερύγια.

Ο άξονας του στροφείου μπορεί να είναι οριζόντιος κατακόρυφος ή κεκλιμένος.

Ο υδροστρόβιλος περιστρέφεται με πολύ μεγάλο αριθμό στροφών και, σε μικρά έως μεσαία ύψη <80m, είναι πολύ αποδοτικός.

Το σπειροειδές κέλυφος για ύψη μικρότερο των 25mΣΥ κατασκευάζεται συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα και με ορθογώνιες διατομές. Η ταχύτητα της ροής υπολογίζεται να είναι τρεις φορές περίπου μικρότερη από την μετρική κατασκευή για την μείωση των απωλειών και της μηχανικής διάβρωσης, που υπέστη το υλικό.

Για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H < 10\text{m}\Sigma\text{Y}$), αντί της κλασικής αξονικής διαμόρφωσης, υπάρχει και ο βολβοειδής (bulb), ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό αξονομετρικού βολβού που περιστρέφεται από την ροή και ο σωληνωτός (tube). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι η ροή στο τμήμα εισόδου γίνεται κατά την αξονική ροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού όγκου των υδραυλικών απωλειών και του κόστους του έργου. Από την άλλη, υπάρχει κατασκευαστικό πρόβλημα το οποίο είναι ότι ο άξονας στον βολβοειδή υδροστρόβιλο θα πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό της ροής. Ενώ στον σωληνωτό υδροστρόβιλο ο άξονας περιστροφής εξέρχεται από το σώμα της μηχανής μέσω καμπύλης που διαμορφώνονται ανάντη ή κατάντη του στροβίλου, για να κουμπώσει με την γεννήτρια που βρίσκεται στο εξωτερικό του αγωγού. Οι σωληνωτοί υδροστρόβιλοι κατασκευάζονται για ισχύ μέχρι 10MW, όμως, λόγω της κλίσης του αγωγού, έχει μικρότερο ολικό βαθμό απόδοσης, ενώ οι βολβοειδείς έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

Η σύνδεση στα μεγάλα έργα του στροβίλου με την γεννήτρια γίνεται με απευθείας σύνδεση, ενώ στα μικρά υπάρχει το κιβώτιο για την αύξηση των στροφών, ώστε να μειωθεί ο όγκος της γεννήτριας και το κόστος της.

Οι μεγαλύτεροι υδροστρόβιλοι έχουν διάμετρο στροφείου μεγαλύτερη των 12 μέτρων και η ισχύς τους ξεπερνά τα 150MW.

5.5 Τρίγωνο ταχυτήτων

Ροή κατά την διέλευση της δια μέσου μιας στροβιλομηχανής που είναι τρισδιάστατη και μη μόνιμη. Παρ' όλα αυτά, η ροή αυτή μπορεί να αναλυθεί με την βοήθεια των διαγραμμάτων που ονομάζεται «τρίγωνο ταχυτήτων». Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται τα τρία διανύσματα ταχυτήτων στην έξοδο του δρομέα και τα τρία διανύσματα στην έξοδο του στροβίλου. Οι ταχύτητες είναι:

\vec{U} : Η γραμμική ταχύτητα σε ένα σημείο του δρομέα

\vec{V} : Η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού και

\vec{W} : Η σχετική ταχύτητα του ως προς τον δρομέα

Ισχύει η διανυσματική σχέση $\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$

Η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων U και V συμβολίζεται με α ενώ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων U και W συμβολίζεται με β . Επίσης, το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας σε ένα σημείο του δρομέα δίνεται από την εξίσωση:

$$U = \omega r$$

ω : γωνιακή ταχύτητα του στροφείου και

r : η ακτινική απόσταση από τον άξονα περιστροφής

το διανύσματα W_1 και W_2 είναι εφαπτομενικά στο περύγιο στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα διότι το ρευστό εκρέει ομαλά από τα κατευθυντικά οδηγικά περύγια. Επιπλέον τα διανύσματα U_1 και U_2 έχουν ίδιο μέτρο μιας και τα σημεία 1 και 2 ισαπέχουν κατά απόσταση r από τον άξονα περιστροφής του δρομέα ($U_1 = U_2 = \omega r$). Τέλος, το ρευστό εισέρχεται με ταχύτητα V_1 , η οποία έχει μόνο αξονική συνιστώσα, ενώ εξέρχεται από το περύγιο με ταχύτητα V_2 , η οποία έχει αξονική και εφαπτόμενη συνιστώσα. Η εφαπτόμενη συνιστώσα του διανύσματος V_2 έχει φορά προς την αρνητική εφαπτόμενη διεύθυνση, διότι το ρευστό ωθεί το περύγιο του υδροστρόβιλου και ενέργεια μεταφέρεται από το ρευστό στον υδροστρόβιλο.

5.6 Ομοιογένεια υδροστρόβιλων

Ο κάθε κατασκευαστής για την επίτευξη οικονομικότερης μελέτης κατασκευάζει σειρές γεωμετρικών όμοιων υδροστρόβιλων. Αυτό σημαίνει ότι, αν D' και D'' , οι διάμετροι των δρομέων δυο όμοιων υδροστρόβιλων, τότε ο λόγος $\lambda = D'/D''$ θα είναι ο λόγος ομοιότητας, όλων των αντίστοιχων γεωμετρικών μεγεθών, των δύο μηχανών. Αυτό συνεπάγεται, ότι οι χαρακτηριστικές καμπύλες μιας σειράς γεωμετρικών όμοιων υδροστρόβιλων σε οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής παριστάνονται από το ίδιο διάγραμμα.

5.7 Ειδικός αριθμός στροφών

Η έννοια του ειδικού αριθμού στροφών εισάγεται ως ένα αριθμητικό μέγεθος που είναι ενδεικτικό για της μορφής των γεωμετρικών όμοιων υδροστρόβιλων.

Έστω υδροστρόβιλος, του οποίου στο κανονικό σημείο λειτουργίας η παροχή είναι ίση προς Q_K , το ύψος πτώσεως H_K και η ισχύς N_K με ταχύτητα περιστροφής n (RPM). Ως ειδικός αριθμός στροφών, ως προς την παροχή n_q του υδροστρόβιλου, ορίζεται η ταχύτητα περιστροφής ιδεατού γεωμετρικά όμοιου, με αυτόν, υδροστρόβιλου, ο οποίος στο κανονικό σημείο λειτουργίας του θα έχει $Q'_K = 1$ και $H'_K = 1$. Μέσα από μια διαδικασία εξίσωσης ομογένειας προκύπτει η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών ως προς την παροχή, η όποια εκφράζεται ως:

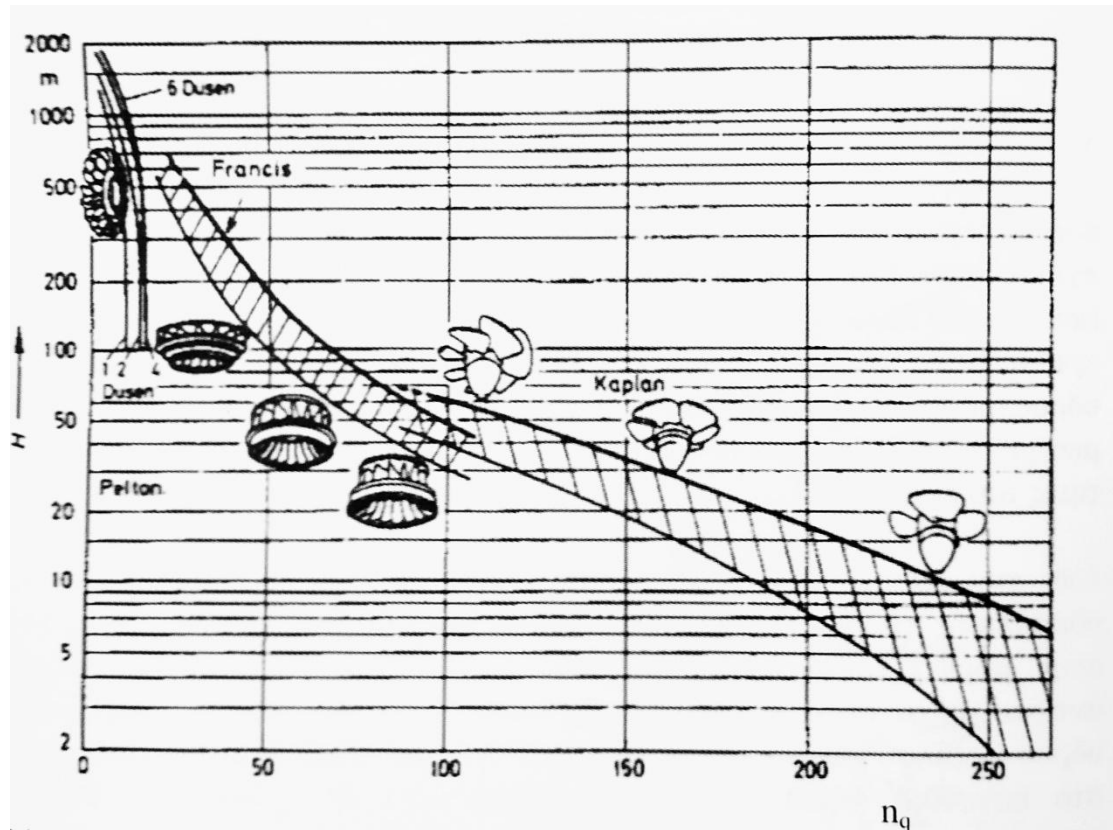
$$n_q = n \frac{Q_K^{1/2}}{H_K^{3/4}}$$

Μια άλλη ειδική ταχύτητα που χρησιμοποιείται στους υδροστρόβιλους είναι ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ, η όποια εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής όμοιου υδροστρόβιλου ισχύος N_K και ύψους πτώσεως H_K με ταχύτητα περιστροφής n (RPM). Ως ειδικός αριθμός στροφών, ως προς την ισχύ n_N , του υδροστρόβιλου ορίζεται η ταχύτητα περιστροφής ιδεατού γεωμετρικά όμοιου προς αυτόν υδροστρόβιλου, ο οποίος στο κανονικό σημείο λειτουργίας του θα έχει $N'_K = 1$ και $H'_K = 1$ και εκφράζεται ως:

$$n_N = n \frac{N_K^{1/2}}{H_K^{3/4}}$$

5.8 Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικής πτώσης ειδικού αριθμού στροφών και βαθμού απόδοσης.

Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει τις περιοχές εφαρμογής των διαφόρων τύπων υδροστρόβιλων, συνάρτηση του ειδικού αριθμού στροφών n_q (N σε KW, H σε mΣΥ) καθώς και ενδεικτικές τιμές του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης η_K .



Εικόνα 4.8 διάγραμμα εφαρμογής υδροστρόβιλων συνάρτηση ειδικού αριθμού στροφών

5.9 Υπολογισμός της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής

Στα υδροηλεκτρικά έργα, οι ηλεκτρικές γεννήτριες είναι σύγχρονες η ασύγχρονες. Στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι σύγχρονη, θα πρέπει ο ειδικός αριθμός του υδροστρόβιλου να είναι ίσος με αυτήν. Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι:

$$n_{\sigma} = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Όπου f (Hertz) η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (50 Hertz στην Ευρώπη)

p το πλήθος των ζευγών των πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Η επιλογή της ταχύτητας περιστροφής του υδροστρόβιλου με δεδομένα τα H και Q στο κανονικό σημείο λειτουργίας γίνεται κάνοντας χρήση των τιμών του διαγράμματος (πάνω). Από την τιμή του H_K επιλέγεται μια αρχική τιμή περιστροφής n_q (RPM). Από την εξίσωση ορισμού του n_q προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής n . Το πιθανό είναι η τιμή αυτή να βρίσκεται μεταξύ δυο σύγχρονων τιμών. Ο μελετητής εκεί έχει να επιλέξει ανάμεσα σε αυτές τις δύο βάσει οικονομοτεχνικής μελέτης.

6 Τυποποίηση μικρών υδροστρόβιλων

6.1 Γενικά

Το βασικό πλεονέκτημα της τυποποίησης είναι η μείωση του κόστους καθώς τα έξοδα ανάπτυξης και δοκιμών μοιράζονται σε μια σειρά υδροστρόβιλων. Επίσης, με την τυποποίηση επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου παράδοσης, δεδομένου ότι η μελέτη και η διαδικασία παράγωγης προϋπάρχουν. Ο χρόνος είναι σημαντικός επειδή δεν μπορεί να υπερβαίνει το χρόνο κατασκευής του έργου, ο οποίος είναι της τάξης των 1 έως 2 ετών. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι, ότι αυξάνεται η αξιοπιστία του εξοπλισμού μιας και γίνονται συνεχείς βελτιώσεις και είναι πιο εύκολη η παραγγελία ανταλλακτικών. Όμως, η τυποποίηση δεν μπορεί να έχει μόνο πλεονεκτήματα. Το μειονέκτημα είναι να μην υπάρχει τυποποίηση που να ανταποκρίνεται στα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός έργου.

Κάθε κατασκευαστική εταιρία έχει ένα πρόγραμμα παράγωγης το οποίο καλύπτει ένα μέρος ή ολόκληρη την περιοχή των μικρών υδροστρόβιλων από μερικά KW μέχρι 10 ή 15 MW. Η περιοχή αυτή καλύπτεται από όλους του τύπους των υδροστρόβιλων, αν και υπάρχουν και κατασκευαστές που ειδικεύονται σε έναν ή στους βασικούς τύπους υδροστρόβιλων. Υπάρχουν και κατασκευαστές, οι οποίοι ειδικεύονται σε πολύ μικρή ισχύ, της τάξεως 0,1 έως 100 KW.

Η τάση των συγχρόνων κατασκευαστών είναι η μικρή τροποποίηση των δρομέων στους υδροστρόβιλους, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη προσαρμογή στα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου έργου.

6.2 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Francis

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis καλύπτουν το ευρύτερο πεδίο στο διάγραμμα παροχή-υδραυλικής πτώσης. Κατασκευάζονται από πολλούς κατασκευαστές και καλύπτει το εύρος από 100KW μέχρι 15WM. Επίσης προσφέρεται σε διάφορες διατάξεις, όσον αφορά τον άξονα περιστροφής και το τμήμα εισόδου.

Όσον αφορά την διάταξη του άξονα, αυτός μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην οριζόντια διάταξη ο υδροστρόβιλος εδράζεται σε δικά του έδρανα. Έτσι, η γεννήτρια είναι τυποποιημένη και απλή κατασκευή. Η άτρακτος είναι ελαστική ελάσματος, όπου τα συνδέει είναι και αυτή τυποποιημένη. Στην κατακόρυφη περίπτωση, ο στρόβιλος εδράζεται πάνω σε έδρανα της γεννήτριας, η οποία είναι ειδικής κατασκευής. Η άτρακτος δεν είναι ελαστική. Αυτό όμως έχει ως συνέπεια την ακρίβεια που χρειάζεται για την εγκατάσταση στην ευθυγράμμιση τους.

Με σκοπό την διαστασιολόγηση και την διάταξη του υδροηλεκτρικού σταθμού, δίνονται στοιχειά από την σειρά τυποποιημένου υδροστρόβιλου με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba (ιαπωνική). Οι υδροστρόβιλοι αυτοί καλύπτουν την

περιοχή $Q=1-27m^3/sec$, $H=30-200m\Sigma Y$ και $N=1-10MW$ με γεωμετρικά 10 όμοιες σειρές υδροστροβίλων (δηλαδή 10 διαφορετικές τιμές του ειδικού αριθμού στροφών), κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από τα γράμματα Β (υψηλής τιμής ειδικού αριθμού στροφών, δηλαδή δρομέα έντονα μεικτής ροής) έως και Κ (χαμηλού ειδικού αριθμού στροφών, ήτοι σε δρομέα έντονα ακτινικής ροής).

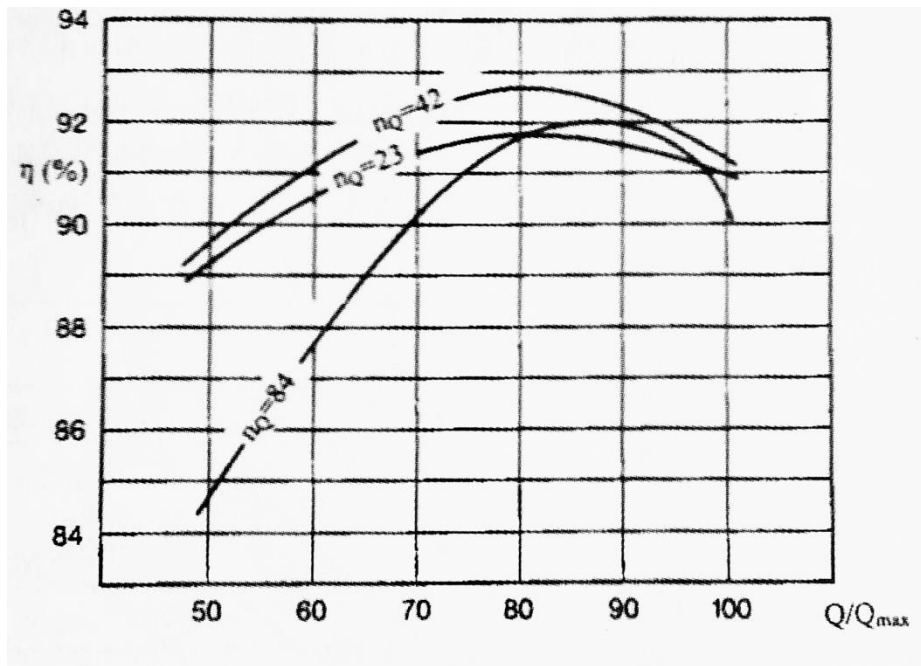
| Σειρά | n_s | D_1 | RR | D_s | Rh | BB | DA | DB | CL | DD | $\sigma_{κρ}$ |
|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| B | 275 | 1000 | 1730 | 1540 | 2050 | 2710 | 7130 | 1390 | 3630 | 2730 | 0,2 |
| C | 240 | 1000 | 1610 | 1400 | 1910 | 2480 | 6520 | 1310 | 3530 | 2530 | 0,17 |
| D | 208 | 1000 | 1510 | 1280 | 1780 | 2260 | 5980 | 1250 | 3450 | 2340 | 0,14 |
| E | 181 | 1000 | 1420 | 1160 | 1670 | 2070 | 5520 | 1190 | 3380 | 2040 | 0,12 |
| F | 157 | 1000 | 1350 | 1060 | 1570 | 1910 | 5100 | 1160 | 3320 | 2000 | 0,1 |
| G | 137 | 1000 | 1280 | 880 | 1460 | 1770 | 4750 | 1090 | 3260 | 1780 | 0,08 |
| H | 119 | 1000 | 1215 | 850 | 1390 | 1630 | 4440 | 1050 | 3210 | 1650 | 0,07 |
| I | 104 | 1000 | 1185 | 770 | 1340 | 1530 | 4180 | 1050 | 3180 | 1520 | 0,06 |
| J | 90 | 1000 | 1155 | 690 | 1310 | 1420 | 3950 | 1050 | 3160 | 1420 | 0,05 |
| K | 78 | 1000 | 1155 | 670 | 1300 | 1330 | 3730 | 1050 | 3160 | 1300 | 0,04 |

Πίνακας 6.1 διαστάσεις και κύρια χαρακτηριστικά τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis (διαστάσεις σε χιλιοστά (mm))

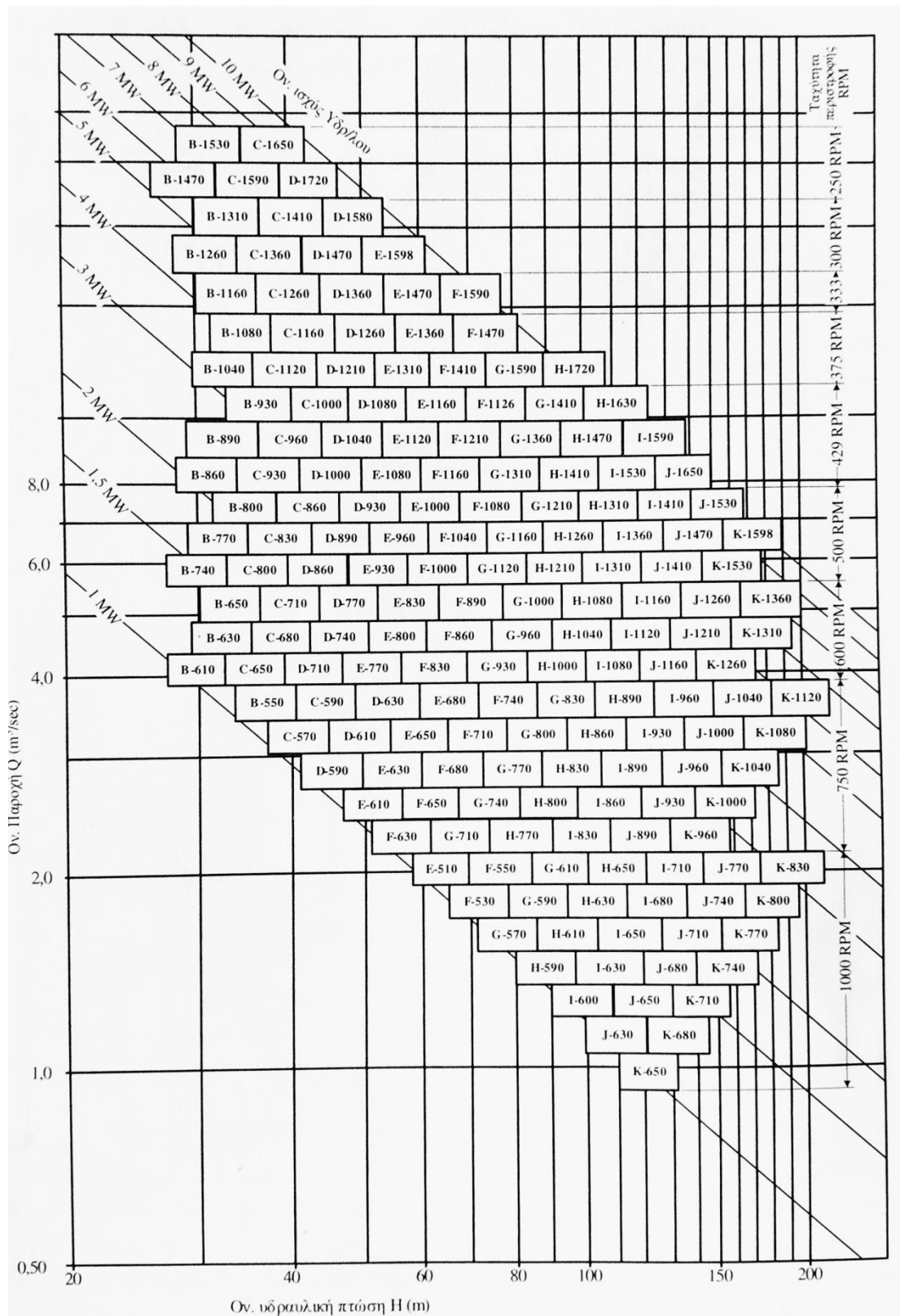
Σε κάθε σειρά κατατάζονται σε 16 διαφορετικά μεγέθη που χαρακτηρίζονται από την διάμετρο $D1$ στην διατομή εισόδου του δρομέα. Στο σχήμα, δίνεται το διάγραμμα επιλογής των υδροστροβίλων. Για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας (παροχή Q και υδραυλική πτώση H στο σημείο λειτουργίας), προκύπτει η σειρά και η διάμετρος $D1$ του δρομέα (π.χ. C-930 σημαίνει υδροστροβίλος σειράς C με διάμετρο δρομέα $D1=930mm$.) καθώς και η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής που αντιστοιχεί.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνονται οι κύριες διαστάσεις της κάθε σειράς υδροστροβίλου και για διάμετρο $D1=1000mm$, η ειδική τιμή του αριθμού στροφών n_s (H σε m και N σε KW) και η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου σπηλαίωσης κλπ.

Στο διάγραμμα φαίνεται ο ολικός βαθμός απόδοσης τυποποιημένου υδροστροβίλου Francis, συνάρτηση του φορτίου για τρεις διαφορετικούς ειδικούς αριθμούς στροφών. Επιπλέον, γίνεται φανερό ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται με μια μέση τιμή ειδικών στροφών· και όσο μεγαλύτερος είναι ο ειδικός αριθμός στροφών, τόσο πιο απότομη είναι η καμπύλη της ολικής απόδοσης.



Διάγραμμα 6.1 Μεταβολή του βαθμού απόδοσης του υδροστρόβιλου Francis για τρεις διαφορετικές τιμές ειδικού αριθμού στροφών



Πίνακας 6.2 Περιοχή λειτουργίας τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis, οριζόντιου άξονα της εταιρείας Toshiba.

6.3 Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton

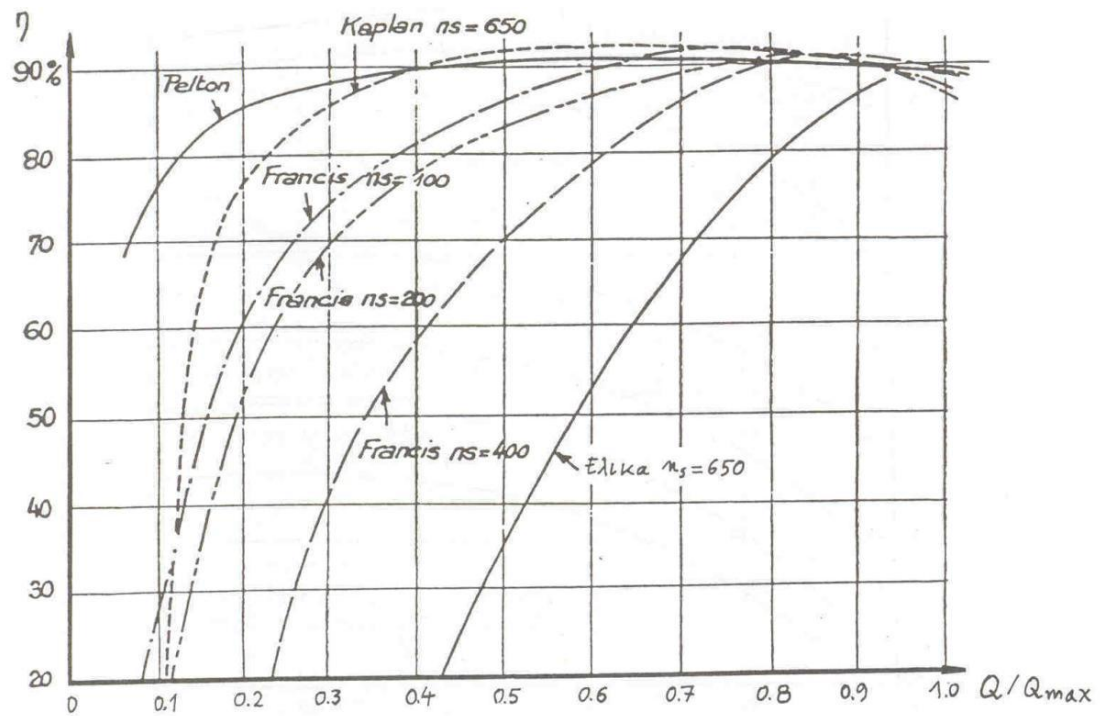
Οι υδροστροβίλοι τύπου pelton είναι κατάλληλοι για μεγάλες τιμές υδραυλικής πτώσης. Υπάρχουν και μικροί υδροστροβίλοι pelton, οι όποιοι κατασκευάζονται, επειδή είναι οικονομικότεροι για τα μικρά έργα. Κατασκευάζονται τυποποιημένοι πολύ μικρής ισχύς (50W για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ορεινών κατοικιών) μέχρι και 10 με 15MW. Οι υδροστροβίλοι μέχρι 70KW κατασκευάζονται με κατάκορφο άξονα και ένα ακροσφήνιο και με την γεννήτρια πακτωμένη πάνω στο κέλυφός του. Στους μεγάλους υδροστροβίλους, ο άξονας τοποθετείται οριζόντια για την διευκόλυνση της εγκατάστασης και της συντήρησης με τα ακροφύσια να είναι το πολύ δύο. Για περισσότερα ακροφύσια ο άξονας θα πρέπει να τοποθετηθεί κατακόρυφα, για μην υπάρχει επίδραση από τα απόνερα. Στα μικρά υδροηλεκτρικά κατασκευάζονται μέχρι δύο ακροφύσια για οικονομικούς λόγους.

Στη περιοχή πολύ μικρής ισχύος (από 50W έως 60KW) κατασκευάζονται τυποποιημένοι υδροστροβίλοι pelton κατακόρυφου άξονα από την εταιρία IREM(ιταλική), η όποια κατασκευάζει 8 διαφορετικά μεγέθη, όπου καλύπτει την περιοχή από 10 έως 150m υδραυλικής πτώσης και παροχής $Q= 0.2$ έως 90 l/sec.

Στο σχήμα φαίνονται οι διαστάσεις τυποποιημένων υδροστροβίλων pelton από την γαλλική εταιρία Bouvier, καθώς και το πλήθος των ακροφυσίων τους j.

Στο σχήμα αυτό δίνεται το διάγραμμα επιλογής (συνάρτηση παροχής και υδραυλικής πτώσης) τυποποιημένων υδροστροβίλων της εταιρίας Bouvier η όποια καλύπτει την περιοχή πτώσης H από 30 έως 200m και παροχής Q από 0,003 έως $0,80m^3/sec$ και ισχύος N από 40 έως 500KW με 4 διαφορετικούς διαμέτρους του δρομέα (300, 450, 560 και 670mm). Από το διάγραμμα για δεδομένη παροχή προκύπτει ο κωδικός του υδροστροβίλου που αντιστοιχεί (π.χ. P45-2 750 σημαίνει υδροστροβίλος με διάμετρος δρομέα 450mm, εφοδιασμένος με δύο δέσμες και ταχύτητα περιστροφής 750rpm). Οι μαυρισμένες περιοχές είναι καλό να αποφεύγονται λόγω του γεγονός ότι εκεί οι υδροστροβίλοι έχουν πολύ μικρή απόδοση.

Στο σχήμα φαίνεται η όψη και οι κύριες διαστάσεις των τυποποιημένων μικρών υδροστροβίλων pelton από την γερμανική εταιρία Voith. Η εταιρία κατασκευάζει με κατακόρυφο άξονα έως δυο ακροφύσια και οριζόντια με τέσσερα ακροφύσια. Η σειρά των υδροστροβίλων καλύπτει την περιοχή υδραυλικής πτώσης H από 80 έως 700mΣΥ παροχής Q από 0,1 έως $2 m^3/sec$ και ισχύος N από 100 KW έως 10MW με δέκα διαφορετικά μεγέθη που χαρακτηρίζονται από τους αριθμούς 1 έως 10 κάθε ένα από τα όποια κατασκευάζεται από διαφορετικούς τύπους (που χαρακτηρίζονται από τα γράμματα a,b,c,d και e). Από το διάγραμμα επιλογής, για δεδομένη υδραυλική πτώση H και παροχής Q προκύπτει το κατάλληλο μέγεθος του υδροστροβίλου, καθώς και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Στον πίνακα δίνονται οι κύριες διαστάσεις των τυποποιημένων υδροστροβίλων pelton, όπως αυτές περιγράφονται από το σχήμα για κάθε τύπο.



Διάγραμμα 6.2 Το σχήμα παριστάνει την μεταβολή του βαθμού απόδοσης διάφορων υδροστρόβιλων, για μεταβολή του φορτίου έχοντας σταθερή την ταχύτητα και το ύψος της υδατόπτωσης

7 ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

7.1 Γενικά

Σε ένα ΥΗΕ η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στην συνέχεια σε ηλεκτρική, μιας και η μεταφορά και αξιοποίηση αυτής της ενέργειας είναι πιο εύκολη και οικονομική. Τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική την αναλάμβανε η ηλεκτρική γεννήτρια. Το ΥΗΣ όμως είναι εφοδιασμένο και με άλλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως τον μετασχηματιστή ισχύος, τους ηλεκτρικούς πίνακες, τον εξοπλισμό σύνδεσης με το δίκτυο, τους αυτοματισμούς ελέγχου και ασφάλειας, το σύστημα γείωσης και τις ιδιοκαταναλώσεις του ΥΗΣ.

7.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

7.2.1 Εισαγωγή

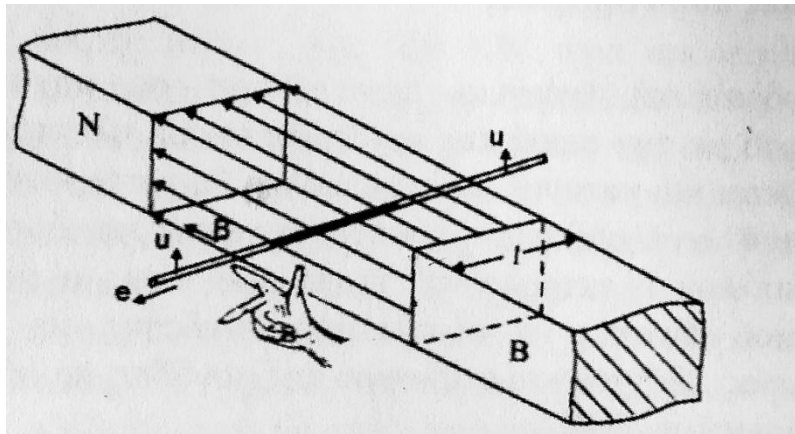
Ως γεννήτρια χαρακτηρίζεται η μηχανή, η οποία μετατρέπει την μηχανική ισχύ (την ροπή της ατράκτου) σε ηλεκτρική.

7.3 Αρχή λειτουργίας γεννητριών

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών βασίζεται στο νόμο του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο σε κινούμενο αγωγό που τέμνει ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή. Το μέγεθος e (σε Volt) της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι ανάλογο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου, του μήκους l και της ταχύτητας u του αγωγού κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο, δηλαδή:

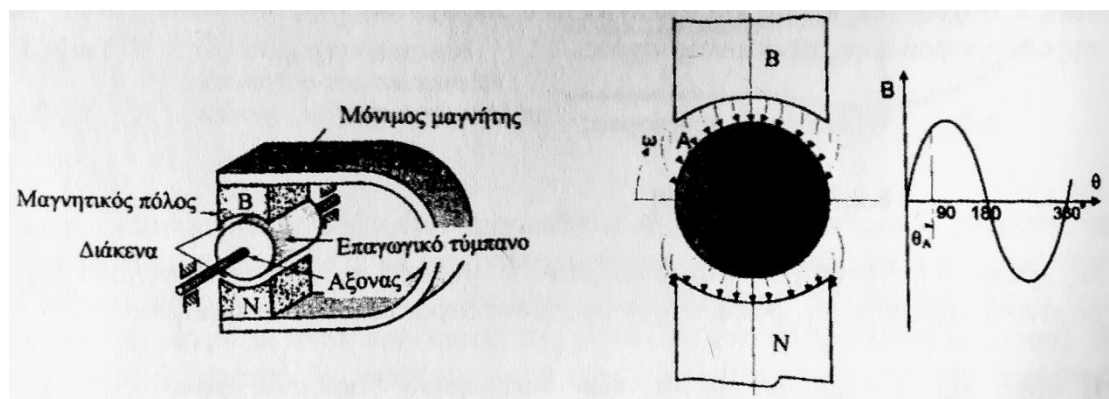
$$e = B \cdot l \cdot u$$

Η φορά της ηλεκτρεγερτικής δύναμης δίνεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού. Άρα, η πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης αλλάζει όταν αλλάξει η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου, ή όταν αντιστραφεί η ταχύτητα του αγωγού.



Εικόνα 7.1 Αρχή ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Συμφώνα με τα παραπάνω, μια στοιχειώδης γεννήτρια μπορεί να δημιουργηθεί από έναν μόνιμο πεταλοειδή μαγνήτη και ένα κυλινδρικό τύμπανο από σιδηρομαγνητικό υλικό που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, μεταξύ πόλων του μαγνήτη. Το κυλινδρικό τύμπανο, μαζί με τους αγωγούς που φέρει, ονομάζεται επαγωγικό τύμπανο. Η ένταση B του μαγνητικού πεδίου είναι μέγιστη στο μέσο των πόλων και μειώνεται προς την ουδέτερη ζώνη, όπου και μηδενίζεται. Στο σχήμα φαίνεται η ένταση B της μαγνητικής επαγωγής, συνάρτηση της γωνίας θ , με θετικό νούμερο όταν οι γραμμές του μαγνητικού φορτίου κατευθύνονται προς το τύμπανο και αρνητικό όταν απομακρύνονται από αυτό.



Εικόνα 7.2 Στοιχειώδη ηλεκτρική γεννήτρια και μαγνητικό πεδίο στο διάκενο

Αν σε δύο αντιδιαμετρικές οδοντώσεις του τύμπανου, τοποθετηθούν δύο αγωγοί, κ-λ και ν-μ, οι οποίοι ενώνονται στο πίσω μέρος, σχηματίζεται μια σπείρα του τυλίγματος της μηχανής. Καθώς το τύμπανο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , κάθε αγωγός της σπείρας τέμνει κάθετα τις μαγνητικές γραμμές του διάκενου. Έτσι, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, η οποία σε κάθε χρονική στιγμή, είναι της ίδιας έντασης και στους δυο αγωγούς, αφού η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ήδη σε απόλυτη τιμή. Συμφώνα με τον κανόνα του δεξιού

χειριού, οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις του αγωγού κ-λ και μ-ν είναι αντίθετης φοράς, άρα και ομόρροπα στο ίδιο τύμπανο όποτε αθροίζονται. Συνεπώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη της σπείρας σε κάθε χρονική στιγμή t θα δίνεται από την σχέση:

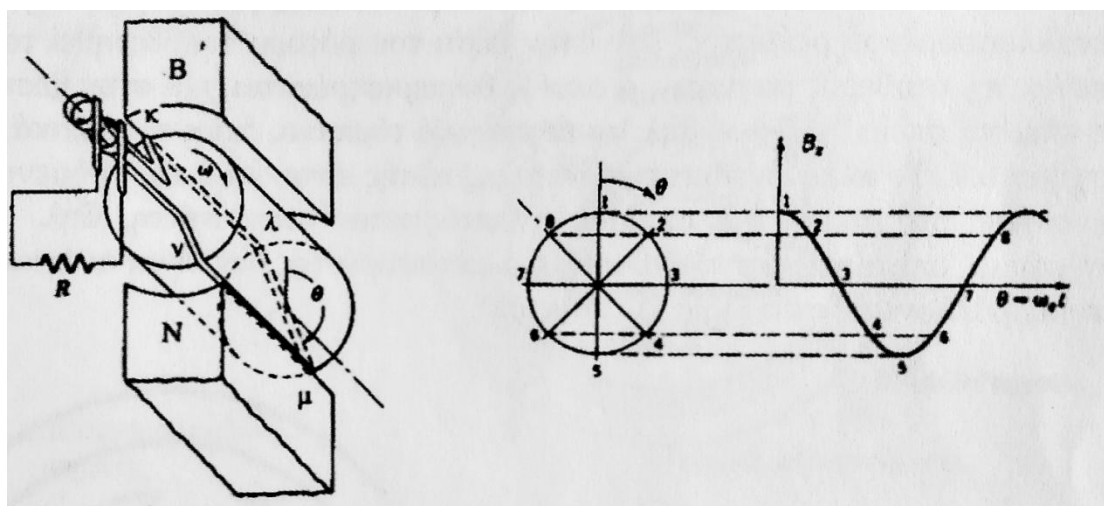
$$e(t) = 2 \cdot B(t) \cdot l \cdot u$$

Όπου:

u : η περιφερική ταχύτητα της σπείρας $u = \omega \cdot r$

l : το μήκος του τυμπάνου

από τον τύπο συμπεραίνουμε ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου B .



Εικόνα 7.3 Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σπείρα

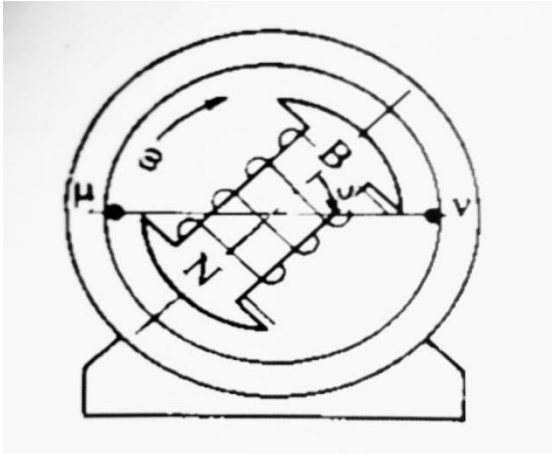
Εάν στα άκρα της σπείρας συνδέσουμε μια ωμική αντίσταση R η όποια αποτελεί το φορτίο, μέσω δακτυλίων και ψηκτρών μονωμένων μεταξύ τους, τότε θα έχουμε την ροή εναλλασσόμενου ρεύματος έντασης:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R}$$

Έτσι, προκύπτει μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος περιόδου T_a , ίσης προς την περίοδο της σπείρας. Η γεννήτρια αυτή χαρακτηρίζεται ως σύγχρονη, καθώς η ηλεκτρεγερτική δύναμη έχει ίδια συχνότητα με την συχνότητα του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου. Το τύμπανο χαρακτηρίζεται ως ρότορας και οι σταθεροί μαγνήτες ως στάτης.

Είναι γνωστό ότι σε έναν αγωγό διερχόμενος από ηλεκτρικό ρεύμα, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο ασκείται δύναμη. Στην περίπτωση μας, για την στοιχειώδη γεννήτρια προκύπτει εφραπτόμενα με φορά αντίθετου προς την φορά

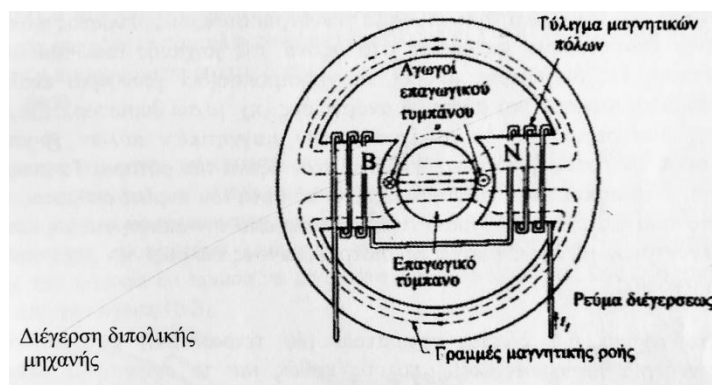
περιστροφής. Άρα οι δυνάμεις αντιστοιχούν στην ανάπτυξη ροπής και με την ταχύτητα περιστροφής εκφράζει την μηχανική ισχύ $N=M\omega$, που πρέπει να εμφανιστεί στον ρότορα, ώστε να περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω .



Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να συμβεί σε μια σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, αν στην θέση του ρότορα τοποθετήσουμε το μαγνητικό πεδίο και στην θέση του στητή βάλουμε την κλειστή σπείρα κ-λ-μ-ν, δηλαδή το επαγωγικό τύμπανο. Το πλεονέκτημα σε αυτή την διάταξη είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που αναπτύσσεται σε ακίνητο σύστημα, οπότε δεν υπάρχει η ανάγκη για δακτυλίδια και ψήκτρες.

Εικόνα 7.4 Στοιχειώδη σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος

Στις γεννήτριες, το μαγνητικό πεδίο δεν δημιουργείται μόνο από τους μόνιμους μαγνήτες, αλλά και από τους πόλους. Κάθε μαγνητικός πόλος αποτελείται από τον πυρήνα και το τυλίγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από πολλά σιδερένια ελάσματα, ενώ το τυλίγμα από πολλές σπείρες από μονωμένο χάλκινο σύρμα, που περιβάλλει τον πυρήνα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη των σπειρών και της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Στο σχήμα φαίνεται η διπολική ηλεκτρική μηχανή της οποίας τα δύο τυλίγματα των πόλων έχουν συνδεθεί εν σειρά και τροφοδοτούνται από ηλεκτρικό ρεύμα. Δημιουργείται, έτσι, ένα μαγνητικό πεδίο, του οποίου οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν την πορεία του σχήματος. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται διέγερση, το σύνολο των τυλιγμάτων τυλίγμα διέγερσης και το ρεύμα που το διαρρέει ρεύμα διέγερσης.



Εικόνα 7.5 Διέγερση διπολικής μηχανής

7.4 Σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος

Οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε αυτές με εσωτερικούς πόλους και σε αυτές με εξωτερικούς. Οι πρώτοι πόλοι χρησιμοποιούνται σε σχετικά μεγάλη ισχύ και μικρή ταχύτητα περιστροφής (όπως στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών έργων) και οι εξωτερικοί χρησιμοποιούνται σε μικρές ισχύς και τάσεις.

Στο σχήμα φαίνεται μια τετραπολική μονοφασική σύγχρονη γεννήτρια με εσωτερικούς πόλους. Τα άκρα U και V του τυλίγματος συνδέονται με τους ακροδέκτες της μηχανής και το μονοφασικό φορτίο εναλλασσόμενης τάσης. Ο εναλακτήρας του σχήματος παριστάνεται σε κάθε πολικό βήμα (αντί των ομάδων 01 και 02), το τύλιγμα των οποίων συνδέεται σε σειρά. Τα δυο ελεύθερα άκρα συνδέονται με τους ακροδέκτες της μηχανής.

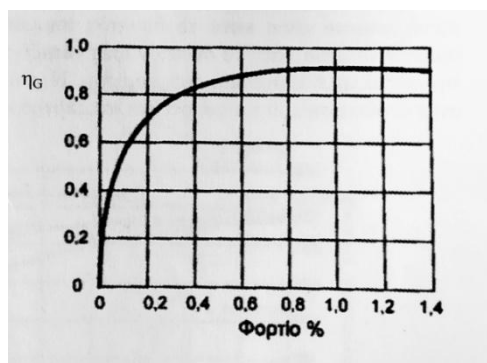
7.5 Τριφασικές γεννήτριες.

Οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες έχουν στο επαγωγικό τύμπανο τρία όμοια ανεξάρτητα μεταξύ τους τυλίγματα, τις τρεις φάσεις, όμοια κατανομημένες, δηλαδή ανά $360/60=60$, όπως φαίνεται στο σχήμα. Κάθε τύλιγμα έχει δυο άκρα, άρα διακρίνονται σε τρεις αρχές που συμβολίζονται U, V και W και τρία άκρα, όπου συμβολίζονται X, Y και Z. Επομένως, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη σε τρεις φάσεις, που έχουν το ίδιο μέγεθος και συχνότητα και διαφέρουν μεταξύ τους κατά $360/3=120$ ηλεκτρικές μοίρες. Η διάφορα αυτή χαρακτηρίζεται ως φυσική απόκλιση.

7.6 Απώλειες και βαθμός απόδοσης.

Κατά την λειτουργία της γεννήτριες αναπτύσσονται απώλειες οι οποίες οφείλονται στις ωμικές απώλειες, στα τυλίγματα του τυμπάνου και τους πόλους, στις μηχανικές απώλειες του άξονα και στις απώλειες του πυρήνα. Αυτές οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορεύματα που αναπτύσσονται στον πυρήνα και τα μεταλλικά μέρη της μηχανής.

Συμβολίζοντας με δN το άθροισμα των προηγούμενων απωλειών σε ένα σημείο λειτουργίας της μηχανής, ο ολικός βαθμός απόδοσης η_G της γεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος N_e προς την μηχανική ισχύ, που αποδίδεται στην άτρακτο της μηχανής και είναι ίση προς $N=M\omega$.



Διάγραμμα 7.1 Ενδεικτική καμπύλη βαθμού απόδοσης της σύγχρονης γεννήτριας

$$\eta_G = \frac{N_e}{N} = \frac{N - \delta N}{M \cdot \omega}$$

7.7 Εκκίνηση και σύνδεση με το δίκτυο

Η εκκίνηση της σύγχρονης γεννήτριας γίνεται εν κενώ, δηλαδή αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο. Αρχικά, τίθεται σε κίνηση η κινητήρια μηχανή (υδροστρόβιλος) μέχρι να επιτευχθεί απαραίτητη η συχνότητα περιστροφής. Μετά την επίτευξη της ταχύτητας περιστροφής οι πόλοι τροφοδοτούνται με το ρεύμα διέγερσης, μέχρι να επιτύχει η ονομαστική τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας και να πραγματοποιηθεί η διαδικασία παραλληλισμού. Στην συνέχεια, κλείνει ο διακόπτης που συνδέει την γεννήτρια με το δίκτυο όπου αρχίζει η γεννήτρια να φορτίζεται. Η ένταση της διέγερσης ρυθμίζεται συνεχώς, ώστε η τάση της γεννήτριας να διατηρείται ίση προς την ονομαστική, παρά τις μεταβολές του φορτίου.

Παραλληλισμός της σύγχρονης γεννήτριας είναι η διαδικασία εξίσωσης των στιγμιαίων τιμών τάσεων της γεννήτριας και του δικτύου, η οποία θα πρέπει να διατηρείται σταθερή.

7.8 Τυποποίηση και διαστάσεις γεννητριών

Για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα επιδιώκεται η τυποποίηση των γεννητριών. Η τυποποίηση αυτή καλύπτει ένα μεγάλο εύρος ισχύος, ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του υδροστρόβιλου. Η τυποποίηση συνεισφέρει στον χρόνο παράδοσης και το κόστος. Συνήθως, στην περίπτωση που ο στρόβιλος είναι μικρότερος των 500rpm, θα έχουμε την παρέμβαση ενός πολλαπλασιαστή στροφών, ώστε να αυξάνει η ταχύτητα και να μειώνεται το μέγεθος της γεννήτριας με συνέπεια την περαιτέρω μείωση του κόστους. Μέσω του πολλαπλασιαστή θα συνυπάρξει και μια μείωση της απόδοσης της τάξης 2% λόγω απωλειών.

Οι γεννήτριες των μικρών υδροηλεκτρικών έργων θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένες, έτσι ώστε να αντέχουν την υπερτάχυνση της τάξεως 60% της ονομαστικής ταχύτητας για την περίπτωση που έχουμε πλημμυριακές παροχές.

Στην συνέχεια, δίνονται οι κύριες διαστάσεις τυποποιημένων γεννητριών οριζόντιου άξονα. Η τάση των οποίων ανέρχεται στα 400 volt, κατάλληλα για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, και συχνότητα δικτύου 50Hz.

| KVA | (RPM) | A(mm) | B(mm) | KVA | (RPM) | A(mm) | B(mm) |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1000 | 1000 | 4200 | 2500 | 7000 | 1000 | 4820 | 3550 |
| 1500 | 1000 | 4400 | 2500 | | 750 | 4440 | 4750 |
| | 750 | 4320 | 2800 | | 600 | 4640 | 4750 |
| 2000 | 1000 | 4400 | 2800 | | 500 | 4640 | 5000 |
| | 750 | 4520 | 2800 | | 429 | 4690 | 5000 |
| | 600 | 4640 | 2800 | 8000 | 1000 | 3550 | 3550 |
| 3000 | 1000 | 4300 | 3150 | | 750 | 4890 | 4750 |
| | 750 | 4580 | 3150 | | 600 | 4590 | 5000 |
| | 600 | 4700 | 3150 | | 500 | 4640 | 5000 |
| | 500 | 4580 | 3150 | | 429 | 4640 | 5000 |
| 4000 | 1000 | 4640 | 3150 | | 375 | 4910 | 5300 |
| | 750 | 4770 | 3150 | 9000 | 1000 | 4890 | 3550 |
| | 600 | 4640 | 3150 | | 750 | 4640 | 5000 |
| | 500 | 4770 | 3150 | | 600 | 4640 | 5000 |
| 5000 | 1000 | 4960 | 3150 | | 500 | 4740 | 5000 |
| | 750 | 4890 | 3150 | | 429 | 4960 | 5000 |
| | 600 | 5040 | 3150 | | 375 | 4960 | 5300 |
| | 500 | 4890 | 3550 | 1000 | 1000 | 4960 | 4000 |
| | 429 | 5060 | 3550 | | 750 | 4690 | 5000 |
| 6000 | 1000 | 4820 | 3550 | | 600 | 4740 | 5000 |
| | 750 | 4440 | 4750 | | 500 | 4980 | 5000 |
| | 600 | 4490 | 4750 | | 429 | 5080 | 5000 |
| | 500 | 4590 | 5000 | | 375 | 5080 | 5300 |
| | 429 | 4590 | 5000 | | 333 | 5080 | 5600 |

Πίνακας 7.1 Ενδεικτικές διαστάσεις σύγχρονων γεννητριών μικρών ΥΗΕ κατακόρυφου άξονα

| KVA | (RPM) | L(mm) | H(mm) | KVA | (RPM) | L(mm) | H(mm) |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1000 | 1000 | 3570 | 1180 | 6000 | 750 | 7000 | 1750 |
| | 750 | 3840 | 1180 | | 600 | 7000 | 2060 |
| | 600 | 3840 | 1180 | | 500 | 6050 | 2240 |
| 1500 | 1000 | 3840 | 1180 | | 429 | 5800 | 2430 |
| | 750 | 3900 | 1320 | | 375 | 6050 | 2430 |
| | 600 | 3960 | 1320 | | 333 | 6050 | 2430 |
| | 500 | 4140 | 1320 | | 300 | 6320 | 2430 |
| 2000 | 1000 | 3840 | 1320 | | 250 | 6250 | 2720 |
| | 750 | 4080 | 1320 | 7000 | 750 | 7000 | 2060 |
| | 600 | 4270 | 1600 | | 600 | 7400 | 2240 |
| | 500 | 4270 | 1600 | | 500 | 6150 | 2240 |
| | 429 | 4610 | 1600 | | 429 | 6050 | 2430 |
| 3000 | 1000 | 4210 | 1600 | | 375 | 6050 | 2430 |
| | 750 | 4330 | 1600 | | 333 | 6320 | 2430 |
| | 600 | 4610 | 1600 | | 300 | 6320 | 2720 |
| | 500 | 4610 | 1750 | | 750 | 6500 | 2720 |
| | 429 | 5380 | 2060 | 8000 | 600 | 7400 | 2240 |
| | 375 | 5380 | 2060 | | 500 | 7400 | 2430 |
| 4000 | 750 | 4460 | 1750 | | 429 | 6050 | 2430 |
| | 600 | 5620 | 1750 | | 375 | 6320 | 2430 |
| | 500 | 5450 | 2960 | | 333 | 6250 | 2720 |
| | 429 | 5700 | 2060 | | 300 | 6320 | 2720 |
| | 375 | 5900 | 2240 | | 250 | 6500 | 2720 |
| | 333 | 4770 | 2240 | 9000 | 600 | 7120 | 2430 |
| 5000 | 750 | 6900 | 1750 | | 500 | 7400 | 2430 |
| | 600 | 5700 | 2060 | | 429 | 6320 | 2430 |
| | 500 | 5700 | 2060 | | 375 | 6250 | 2720 |
| | 429 | 5900 | 2240 | | 333 | 6320 | 2720 |
| | 375 | 6000 | 2240 | | 300 | 6500 | 2720 |
| | 333 | 5700 | 2430 | | 250 | 6500 | 2900 |
| | 300 | 5900 | 2430 | 10000 | 500 | 7400 | 2430 |
| | | | | | 429 | 6320 | 2430 |
| | | | | | 375 | 6320 | 2720 |
| | | | | | 333 | 6500 | 2720 |
| | | | | | 300 | 6500 | 2720 |
| | | | | | 250 | 6600 | 2900 |

Πίνακας 7.2 Ενδεικτικές διαστάσεις σύγχρονων γεννητριών μικρών ΥΗΕ
οριζόντιου άξονα

Παρατηρούμε ότι στις γεννήτριες με κατακόρυφο άξονα το μήκος της γεννήτριας είναι μικρότερο και έχει μεγαλύτερη διάμετρο κατά μήκος του άξονα για την ίδια ισχύ και ταχύτητα περιστροφής, ώστε να μειώνεται το ύψος του υδροηλεκτρικού σταθμού.

7.9 Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός για σταθεροποίηση της παραγόμενης συχνότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απαγομένη συχνότητα της γεννήτριας μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή. Στον άξονα της γεννήτριας μεταφέρονται αυτές οι στροφές τον στιγμιαίων μεταβολών. Το δίκτυο, στο οποίο θα παρέχεται η ενέργεια είναι σταθερής συχνότητας $f=50\text{Hz}$. Για τον λόγο αυτό, παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας (converter) AC-DC και DC-AC, μέσα από το οποίο επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση. Η λειτουργία του είναι να μετατρέπει τις διακυμάνσεις του εναλλασσόμενου ρεύματος της γεννήτριας σε συνεχές και στην συνέχεια να το προσαρμόζει στην εναλλασσόμενη συχνότητα του δικτύου.

7.10 Μετασηματιστές ισχύος

Η τάση των γεννητριών μπορεί να είναι χαμηλή, 400volt για σχετικά μικρές ισχύς ή μέση 3,5KV ή 6,3KV για μεγαλύτερες ισχύς.

Εάν η ισχύς του μικρού υδροηλεκτρικού εργοστασίου είναι μικρότερη από 100KW, τότε η μονάδα μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αν η ισχύς του υδροηλεκτρικού ξεπεράσει αυτή την ισχύ, τότε θα πρέπει να συνδεθεί στο δίκτυο μέσης τάσης, δηλαδή 15 η 20 KV. Συνεπώς, μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου θα πρέπει να παρέμβει τριφασικός μετασηματιστής ισχύος, ο οποίος θα εξασφαλίσει την κατάλληλη τάσης.

Το πλήθος των μετασηματιστών αποτελεί αντικείμενο οικονομοτεχνικής μελέτης μιας και ένας μετασηματιστής για όλες της μονάδες θα λειτουργεί για μεγαλύτερο χρόνο. Άρα, θα έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και θα καταλαμβάνει μικρότερο χώρο και θα είναι φθηνότερος από δυο ισοδύναμες ισχύς. Αντίθετα, σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης του μετασηματιστή βαίνει όλη η μονάδα εκτός λειτουργίας. Έτσι, μειώνεται η ευελιξία και η αξιοπιστία του έργου.

Στον πίνακα 7.3 δίνονται ενδεικτικές τιμές του βαθμού απόδοσης η_M καθώς και οι κύριες διαστάσεις τυποποιημένων μετασηματιστών ισχύος μέσης τάσης εξόδου 24KV, για σύνδεση με δίκτυο μέσης τάσης MT 20 KV.

| Ον. Ισχύς (KVA) | | η | | L(mm) | W(mm) | H(mm) |
|--------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | (4/4) | (3/4) | (2/4) | | | |
| 100 | 0,9765 | 0,9792 | 0,9803 | 1300 | 660 | 1150 |
| 200 | 0,9807 | 0,9831 | 0,9841 | 1470 | 735 | 1270 |
| 250 | 0,982 | 0,9842 | 0,9852 | 1480 | 740 | 1390 |
| 400 | 0,9843 | 0,9863 | 0,9872 | 1570 | 880 | 1600 |
| 500 | 0,9854 | 0,9872 | 0,9879 | 1600 | 880 | 1650 |
| 630 | 0,9867 | 0,9883 | 0,989 | 1640 | 890 | 1740 |
| 800 | 0,9887 | 0,989 | 0,9897 | 1700 | 910 | 1900 |
| 1000 | 0,988 | 0,9895 | 0,9901 | 1750 | 1020 | 2050 |
| 1250 | 0,9888 | 0,9902 | 0,9908 | 1820 | 1040 | 2150 |
| 1600 | 0,9892 | 0,9906 | 0,9913 | 1900 | 1050 | 2420 |
| 2000 | 0,9899 | 0,9911 | 0,9914 | 2050 | 1270 | 2500 |
| 2500 | 0,9903 | 0,9914 | 0,9917 | 2200 | 1270 | 2600 |
| 3150 | 0,9914 | 0,9923 | 0,9924 | 2350 | 1300 | 2650 |
| 4000 | 0,9927 | 0,9934 | 0,9835 | 2600 | 1350 | 2700 |
| 5000 | 0,9935 | 0,9941 | 0,9941 | 2800 | 1400 | 2750 |

Πίνακας 7.3 Ενδεικτικές διαστάσεις σύγχρονων γεννητριών μικρών ΥΗΕ κατακόρυφου άξονα.

8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΟΥ ΥΗΕ

8.1 Εισαγωγή

Το συνολικό κόστος ενός ΥΗΕ εξαρτάται σημαντικά από τα διάφορα χαρακτηριστικά και τις τοπικές συνθήκες του κάθε έργου. Αυτές μπορεί να είναι οι υποδομές, οι αποστάσεις από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα και τα λοιπά. Από τα ήδη υπάρχοντα υδροηλεκτρικά υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής μερικών γενικών συμπερασμάτων.

Το κόστος αυτό των υδροηλεκτρικών εργοστασίων διακρίνεται σε τρεις μεγάλες ενότητες:

- το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού
- το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και
- το κόστος μελετών, επιβλέψεων και δανειοδοτήσεων.

Η αναλογία αυτή των τριών συνιστωσών είναι διαφορετική μεταξύ των μεγάλων και μικρών υδροηλεκτρικών έργων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διαφορετική φιλοσοφία λειτουργίας των δύο αυτών έργων. Η φιλοσοφία του μεγάλου είναι η κάλυψη των ωρών αιχμής του δικτύου μέσω αποθήκευσης νερού σε ταμιευτήρες ενώ το μικρό λειτουργεί όσο υπάρχει διαθέσιμη φυσική παροχή. Επίσης, για τα μικρά υδροηλεκτρικά χρησιμοποιείται τυποποιημένος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι, ότι η αναλογία, μεταξύ μεγάλων και μικρών, μεταβάλλεται για τα μεγάλα και μικρά έργα.

Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα ο υπολογισμός της επένδυσης, μέσω μιας τιμής, ειδικού κόστους, λόγω χάρη σε ευρώ ανά εγκατεστημένο KW, είναι ιδιαίτερα εσφαλμένος. Αυτό προκύπτει από την διαμόρφωση του κόστους της υδραυλικής πτώσης ή και της ιδιαιτερότητας της κάθε περίπτωσης. Η επίδραση του ύψους πτώσης για την διαμόρφωση του συνολικού κόστους γίνεται φανερή από την εξίσωση $N = Q \cdot h \cdot \rho g$, όπου εδώ φαίνεται ότι όσο μειώνεται η παροχή αυξάνεται το ύψος πτώσης. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη παροχή, μικρότερο υδροστρόβιλο, αλλά και μακρύτερο αγωγό με μικρότερη διάμετρο ως αποτέλεσμα της αύξησης των στατικών πιέσεων. Από τα υπάρχοντα υδροηλεκτρικά έργα, μια μονάδα θεωρείται αποδοτική, όταν το ειδικό κόστος ανά κιλοβατώρα ανέρχεται περίπου 2000-3500€/KW.

Το κόστος του πολιτικού μηχανικού δεν μπορούν να εκτιμηθούν. Το γεγονός αυτό οφείλεται έντονα από την μέγιστη παροχή λειτουργεί του έργου, έργα προσαγωγή την πλημύρισαν παροχή αλλά και τις τοπικές συνθήκες. Αντίθετα, το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μπορεί να συσχετιστεί με κάποια ανεκτή

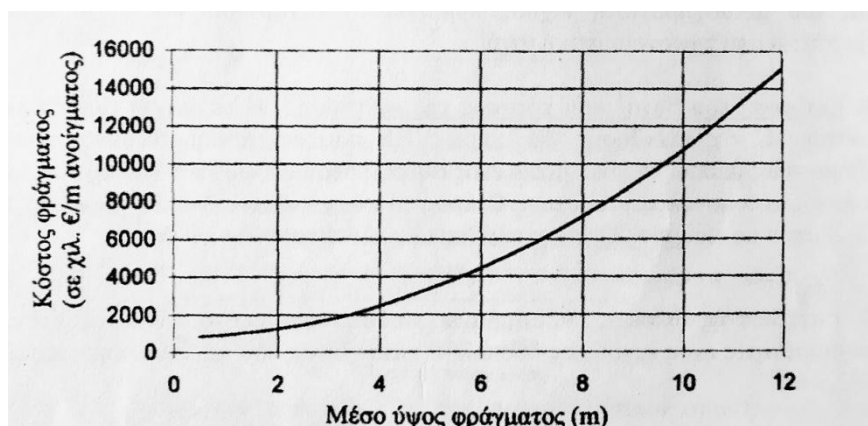
προσέγγιση, με το ονομαστικό σημείο λειτουργίας και το πλήθος των υδροστρόβιλων.

8.2 Προσέγγιση υπολογισμού κόστους

Οι τιμές του από την εφαρμογή θεωρούνται ενδεικτικές, καθώς το πραγματικό κόστος εξαρτάται από μεγάλο πλήθος παραγόντων, όπως η δίμορφος του μικρού υδροηλεκτρικού έργου, ο τύπος και η προέλευση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, οι τοπικές συνθήκες και δυσκολίες. Το σφάλμα της αναγνωριστικής μελέτης αυτής είναι της τάξης $\pm 40\%$. Για την μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται η δαπάνη χρημάτων, η οποία δεν θα αποσοβηθεί, εάν η επένδυση κριθεί ως ασύμφορη.

8.2.1 Το κόστος του φράγματος ή του εκχειλιστεί από σκυρόδεμα συσχετίζεται με το μέσο ύψος h του και δίνεται ανά μέτρο ανοίγματος από την σχέση:

$$C = 97,632 \cdot h^2 \cdot 14,3 \cdot h + 821,75 \quad \text{σε χιλ. €}$$

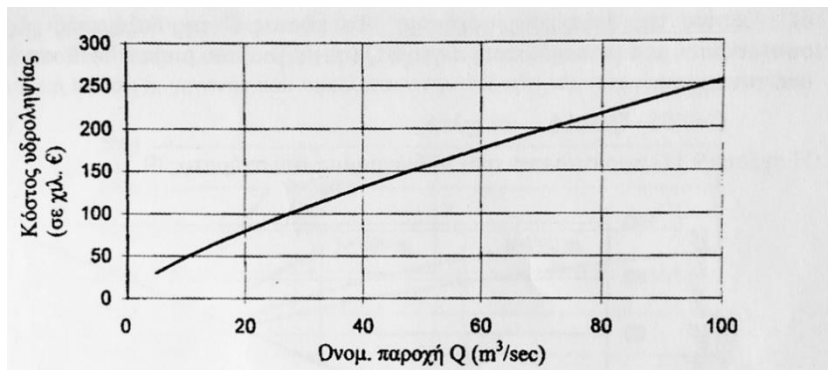


Διάγραμμα 8.1 Κόστος φράγματος σκυροδέματος ανά μέτρο ανοίγματος συνάρτηση του ύψους

Το κόστος του χωμάτινου φράγματος κυμαίνεται μεταξύ $30-90\text{€/m}^3$, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και την διαθεσιμότητα των υλικών.

8.2.2 Το κόστος του έργου υδροληψίας περιλαμβάνει το θυροφράγμα και την εσχάρα καθαρισμού. Το κόστος C του έργου υδροληψίας συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (σε m^3/sec) και δίνεται από την σχέση:

$$C = 9,236 \cdot Q^{0,72} \quad \text{σε χιλ. €}.$$



Διάγραμμα 8.2 Κόστος έργου υδροληψίας συνάρτηση της ονομαστικής παροχής

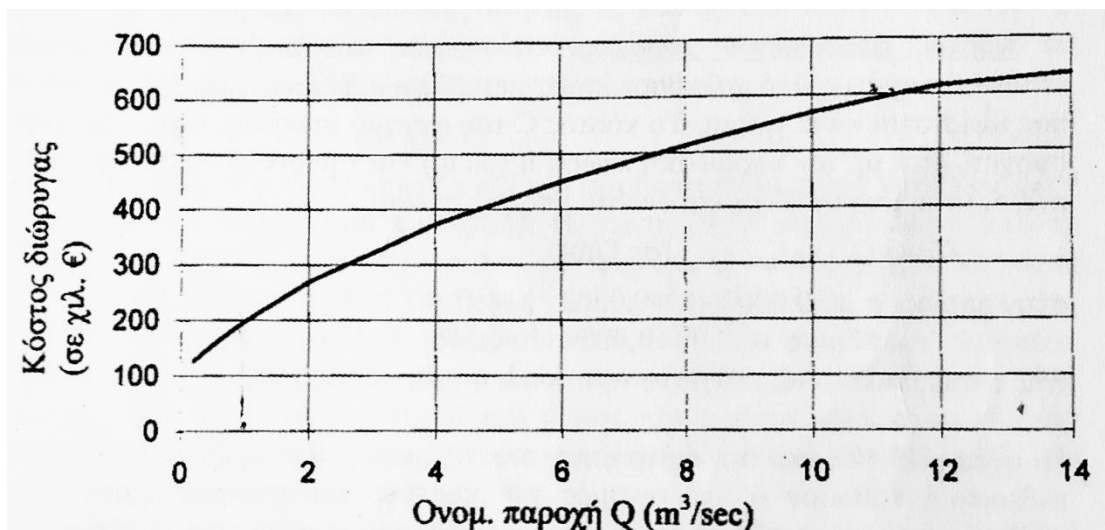
8.2.3 Το κόστος της διώρυγας προσαγωγής C ανά μέτρο μήκους διώρυγας κατασκευασμένης από σκυρόδεμα με σκυρόδεμα τραπεζοειδή διατομή κλίσης πλευρικών τοιχωμάτων 0,25/1 συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (σε m^3/sec) και διακρίνονται δύο περιπτώσεις οι οποίες είναι:

Εκσκαφή σε βραχώδες έδαφος:

$$C = -0,0286 \cdot Q^4 + 0,935 \cdot Q^3 - 12,081 \cdot Q^2 + 17,677 \cdot Q + 105,71 \text{ σε χιλ.€/m}$$

Εκσκαφή σε χώμα:

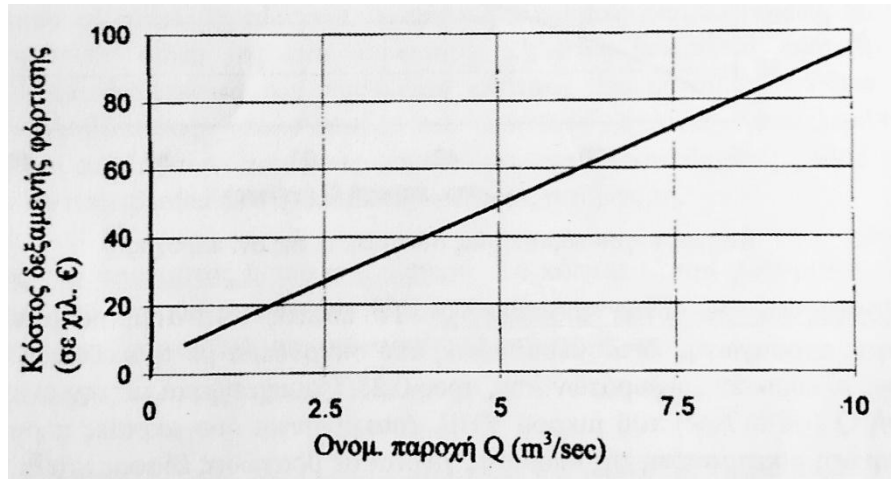
$$C = -0,1782 \cdot Q^2 + 17,677 \cdot Q + 104,71 \text{ σε χιλ.€/m}$$



Διάγραμμα 8.3 Κόστος διώρυγας προσαγωγής ανά μέτρο μήκους συνάρτηση της ονομαστικής παροχής.

8.2.4 Το κόστος της δεξαμενής φόρτισης C σχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (σε m^3/sec) και δίνεται από την σχέση:

$$C = 9,05 \cdot Q + 4,14 \text{ σε χιλ.€}$$



Διάγραμμα 8.4 Κόστος δεξαμενής φόρτισης συνάρτηση της ονομαστικής παροχής

8.2.5 Το κόστος του αγωγού πτώσης.

Ο αγωγός θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένος από χαλυβοσωλήνα, μεταβλητού πάχους, ανάλογα με την πίεση που δέχεται κάθε τμήμα. Το κόστος του αγωγού ανά μέτρο μήκους σχετίζεται με την υδραυλική πτώση και την ονομαστική παροχή του μικρού υδροηλεκτρικού έργου, όπου δίνεται από την σχέση:

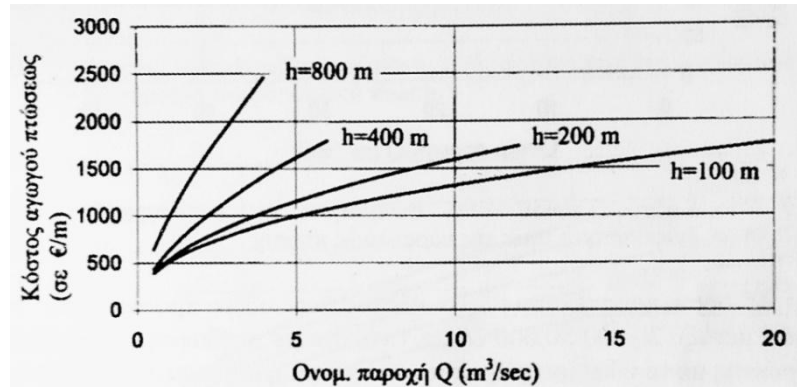
$$C = a \cdot Q^n \text{ (σε €/m)}$$

$$\text{Όπου: } a = 0,0007 \cdot h^2 + 0,0662 \cdot h + 497,6$$

$$n = -6 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 + 0,0009 \cdot h + 0,316$$

Η σχέση αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ενδεικτική αφού στο κόστος του αγωγού προσαγωγής θα πρέπει να γίνει ανάλυση της συνιστώσας του κόστους του υλικού $0,70€/Kg$, του κόστους της επιφανειακής προστασίας του (όταν απαιτείται) $25€/m^2$ και του κόστους εγκατάστασης και δοκιμών $1050€/m$, διαμέτρου και ραφής.

Η σχέση παριστάνεται στο διάγραμμα συνάρτησης της παροχής Q για διάφορες τιμές υδραυλικής πτώσης h . Από το σχήμα γίνεται φανερό η απότομη αύξηση του κόστους, όσο αυξάνεται το ύψος πτώσης. Αυτό προκύπτει λόγω αύξησης του πάχους του αγωγού.

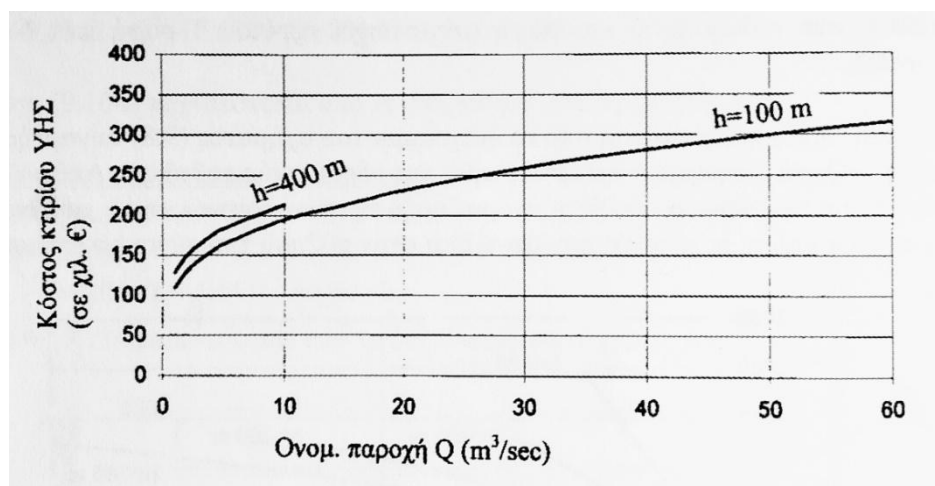


Διάγραμμα 8.5 Κόστος αγωγού πτώσης, συνάρτηση της ονομαστικής παροχής και με παράμετρο το ύψος πτώσης

8.2.6 Το κόστος του υδροηλεκτρικού σταθμού C, το οποίο συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (σε m^3/sec) για το πόσο ογκώδες θα πρέπει να κατασκευαστεί, το ύψος πτώσης h, καθώς εκεί αναβαθμίζονται οι δυνάμεις από του υδροστρόβιλους. Το κόστος αυτό δίνεται από την σχέση:

$$C = a \cdot Q^n$$

Οι τιμές των παραμέτρων a και n εξαρτώνται κυρίως από την υδραυλική πτώση h και την ονομαστική παροχή Q. Σημαντικό ρόλο παίζει και η διάταξη του άξονα. Στον κατακόρυφο απαιτείται περισσότερος όγκος, λόγω της θεμελίωσης. Η σχέση παριστάνεται στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 8.6 Κόστος κτιρίου ΥΗΣ συνάρτηση της ονομαστικής παροχής για δύο διαφορετικά ύψη

8.2.7 Το κόστος της διόδου ψαριών, το οποίο συσχετίζεται με την υψομετρική διαφορά μεταξύ ανάντη και κατόντη της στάθμης του νερού από το φράγμα ή τον υπερχειλιστή και κυμαίνεται μεταξύ 4000-20000€/m ανύψωσης, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

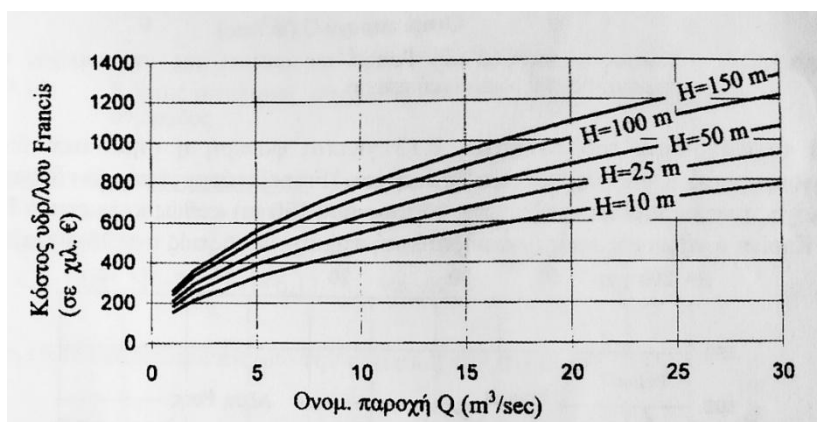
8.2.8 Το κόστος οδού προσπέλασης στα έργα κυμαίνεται μεταξύ 20000-50000€/Km ανάλογα με τις εδαφικές απαιτήσεις, παραδείγματος χάρη διαστρώσεως με υδατορεύματα, οπότε απαιτείται κατασκευή γεφυρών.

8.2.9 Το κόστος του υδροστρόβιλου, το οποίο είναι ανάλογο με την ονομαστική παροχή Q (σε m^3/sec) και την υδραυλική πτώση H (σε m) ή την ονομαστική ισχύ N (σε KW) και την διαθέσιμη υδραυλική πτώση H , θεωρώντας ένα βαθμό απόδοσης $\eta=0,92$. Οι σχέσεις αυτές είναι:

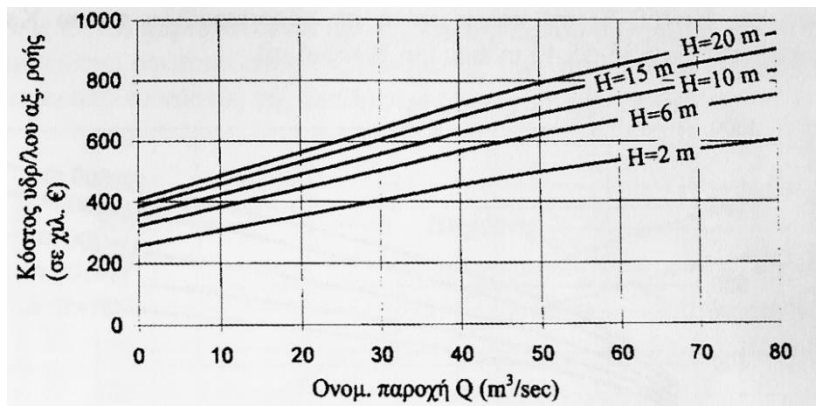
$$C = a \cdot Q^n \cdot H^m \quad \text{ή} \quad C = b \cdot N^n \cdot H^k$$

Οι τιμές των συντελεστών και εκθετών απεικονίζονται στον πίνακα για τους κύριους τύπους υδροστρόβιλων:

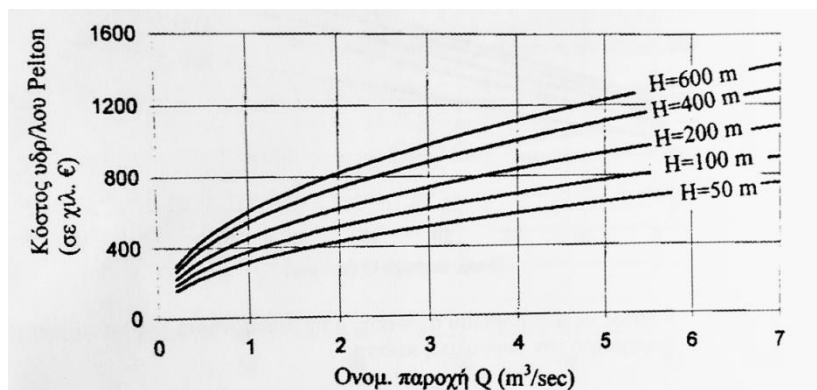
Οι σχέσεις για τους υδροστρόβιλους Francis, Pelton και Kaplan παριστάνονται στα παρακάτω διαγράμματα, αντίστοιχη συνάρτηση της ονομαστικής παροχής για διάφορες ενδεικτικές τιμές της υδραυλικής πτώσης H .



Διάγραμμα 8.7 Κόστος υδροστρόβιλου Francis συνάρτηση της ονομαστικής παροχής για διάφορα ύψη.



Διάγραμμα 8.8 Κόστος υδροστρόβιλου Kaplan συνάρτηση της ονομαστικής παροχής για διάφορα ύψη.



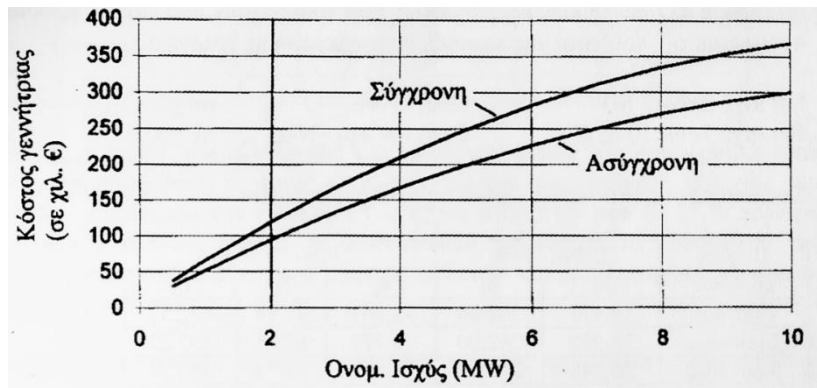
Διάγραμμα 8.9 Κόστος υδροστρόβιλου Pelton συνάρτηση της ονομαστικής παροχής για διάφορα ύψη.

Από το διάγραμμα για κάθε τύπο υδροστρόβιλου προκύπτει για σταθερή ονομαστική ισχύ N , όσο μειώνεται η υδραυλική πτώση, μειώνεται και το κόστος του υδροστρόβιλου.

8.2.10 Το κόστος C της γεννήτριας συσχετίζεται με τον τύπο της γεννήτριας, σύγχρονης ή ασύγχρονης, και της ονομαστικής ισχύος N (σε KW), οι σχέσεις, από την όποια περιγράφονται, είναι:

$$\text{Σύγχρονη γεννήτρια } C = -2,394 \cdot N^2 + 60 \cdot N + 7,865 \text{ σε χιλ.€}$$

$$\text{Ασύγχρονη γεννήτρια } C = -1,811 \cdot N^2 + 47,5 \cdot N + 5,931 \text{ σε χιλ.€}$$

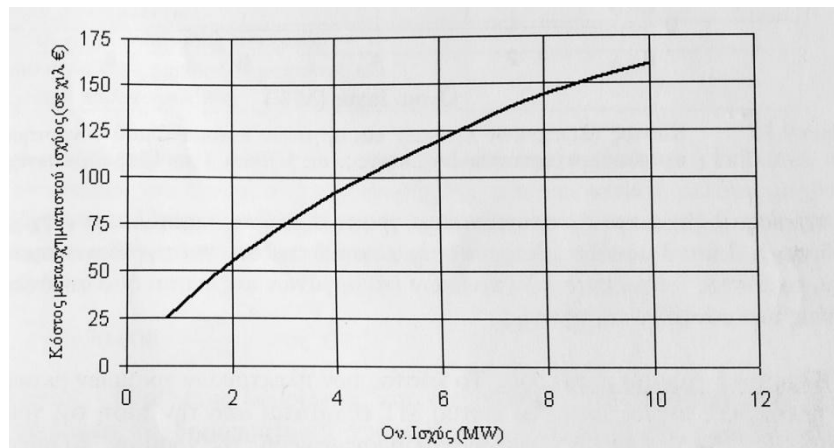


Διάγραμμα 8.10 Κόστος γεννήτριας, σύγχρονης και ασύγχρονης συνάρτησης της ονομαστικής ισχύος.

Στο διάγραμμα παριστάνεται η διαφορά μεταξύ σύγχρονης και ασύγχρονης. Συμπεραίνουμε για την ίδια ισχύ η ασύγχρονη είναι ακριβότερη περίπου κατά 20%

8.2.11 Κόστος του μετασχηματιστή. Το κόστος C του 3-φασικού μετασχηματιστή του ρεύματος ισχύος από την χαμηλή τάση X_T στην μέση τάση M_T των 20KV, συσχετίζεται με την ονομαστική ισχύ N σε MW και περιγράφεται από την σχέση:

$$C = -1,03 \cdot N^2 + 25,2 \cdot N + 6,11 \text{ σε χιλ.€}$$



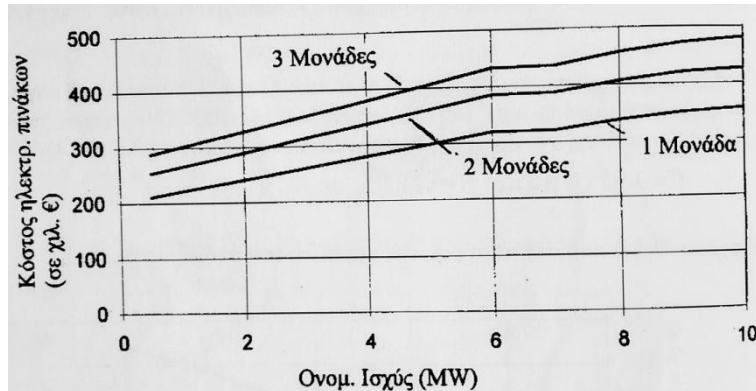
Διάγραμμα 8.11 Κόστος μετασχηματιστή συνάρτησης της ονομαστικής ισχύος

8.2.12 Το κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων συσχετίζεται με την ονομαστική ισχύ N του υδροηλεκτρικού σταθμού σε MW και το πλήθος των μονάδων παραγωγής (υδροστρόβιλων γεννητριών), όπου περιγράφονται από τις σχέσεις:

Για ισχύ $0 < N < 7 \text{ MW}$ $C = a^1 \cdot N + b_1$ σε χιλ.€

Για ισχύ $7 < N < 10 \text{ MW}$ $C = a_2 \cdot N^2 + b_2 \cdot N + c_2$ σε χιλ.€

Στις οποίες, οι συντελεστές έχουν τις ακόλουθες τιμές:



Διάγραμμα 8.12 Κόστος ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων αυτοματισμού συνάρτηση της συνολικής ισχύος για ένα, δύο και τρεις μονάδες παραγωγής

Από το διάγραμμα 8.12 γίνεται φανερό, ότι για την ίδια ονομαστική ισχύ, το κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων αυξάνεται όσο αυξάνεται το πλήθος των μονάδων παράγωγης.

8.2.13 Το κόστος της ηλεκτρικής γραμμής μεταφοράς μέχρι το δίκτυο μέσης τάσης MT εξαρτάται από την γραμμή μεταφοράς (15,20 και 44 KV) την ηλεκτρική ισχύ την δυσκολία κατασκευής και το μήκος της γραμμής. Στον πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές του κόστους της γραμμής μεταφοράς και του υποσταθμού, εάν απαιτείται.

8.2.14 Το κόστος μελετών, αδειοδοτήσεων και επίβλεψης, το οποίο ανέρχεται στο 10-15% περίπου του συνολικού κόστους

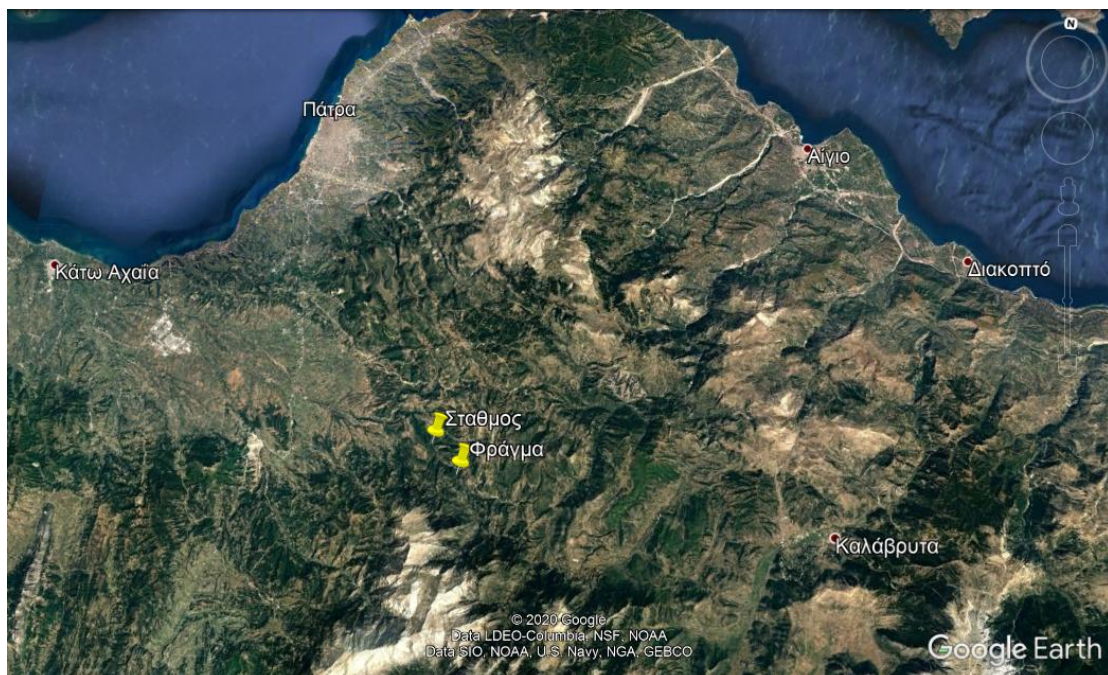
9 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΡΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΠΕΙΡΟ

9.1 Γεωγραφική θέση του σταθμού παράγωγης του ΥΗΣ Πείρο

Το έργο θα κατασκευαστεί στον ποταμό Πείρο, ανάμεσα στους οικισμούς Χρυσοπηγής και Καλάνου, του Δήμου Φαρρών του Νομού Αχαΐας. Η ακριβής γεωγραφική θέση του έργου, στο σύστημα Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς '87 θα είναι η ακόλουθη:

| | X | Y | ΥΨΟΜΕΤΡΟ |
|-----------------|----------|---------|----------|
| Θέση υδροληψίας | 311515,8 | 4213103 | +425m |
| Θέση ΥΗΣ | 309858,4 | 4214839 | +345m |

Πίνακας 9.1 Ακριβής γεωγραφική θέση του φράγματος και του σταθμού



Εικόνα 9.1



Εικόνα 9.2

Η υδροληψία του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού θα ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Βόρειας Πελοποννήσου, στη λεκάνη απορροής Πείρου-Βέργα-Πηνειού, στο ποτάμιο υδατικό σύστημα Πείρος.

9.2 Βασικά χαρακτηριστικά του έργου.

9.2.1 Τεχνικά μέρη

Η υδροληψία θα αποτελείται από μικρό υπερπηδητό φράγμα ορεινού τύπου από σκυρόδεμα, ύψους 3m και μήκους 11m (υψόμετρο κοίτης 425 m και υψόμετρο στένης υπερχειλιστή υδροληψίας 428 m)

Το κτίριο του σταθμού (στροβιλοστάσιο) θα είναι 150m², στα δεξιά κατά τον ρου του ποταμού, σε υψόμετρο 345m.

Στα δεξιά κατά τον ρου του ποταμού, θα βρίσκεται ο εξαμμοτής για τη συγκράτηση των φερτών υλικών από οπλισμένο σκυρόδεμα συνολικού μήκους 22m περίπου, δεξαμενή φόρτισης, καθώς και κατάλληλη διάταξη για την επικοινωνία της ιχθυοπανίδας (ιχθυόδρομος), μέσω της οποίας θα αποδίδεται και η οικολογική παροχή.

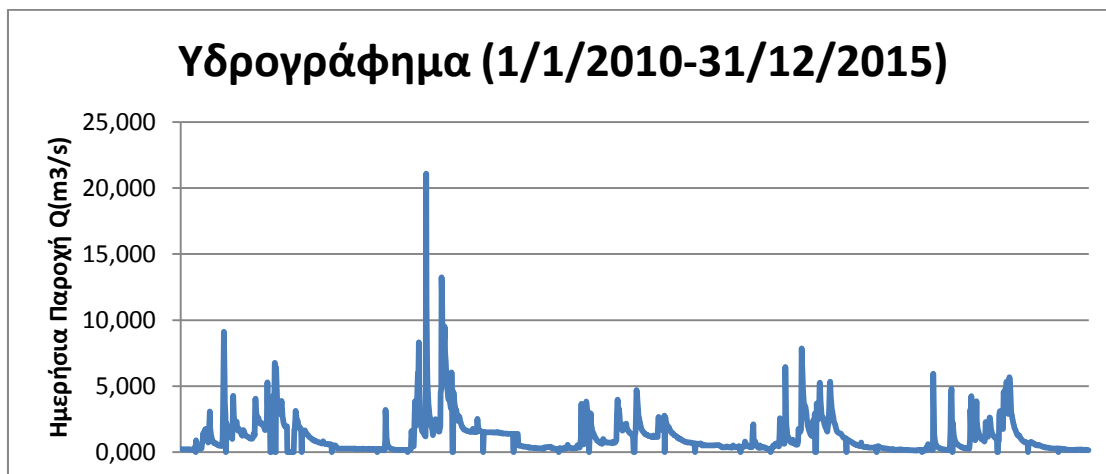
Αγωγός προσαγωγής νερού, θα είναι συνολικού μήκους 2720m, από πλαστικό σωλήνα ενισχυμένο με υαλονήματα (GRP) διαμέτρου Φ1.300 mm για μήκος 1.407 m και διαμέτρου Φ1.200 mm για μήκος 1313 m. Ο αγωγός θα οδεύει σε επιχωματούμενο όρυγμα δεξιά κατά τον ρου του ποταμού. Στα σημεία που ο αγωγός αλλάζει έντονα κλίση θα είναι πακτωμένα με σώματα αγκύρωσης από σκυρόδεμα.

9.3 Ενεργειακή Μελέτη

9.3.1 Χαρακτηριστικά 21 σημείων

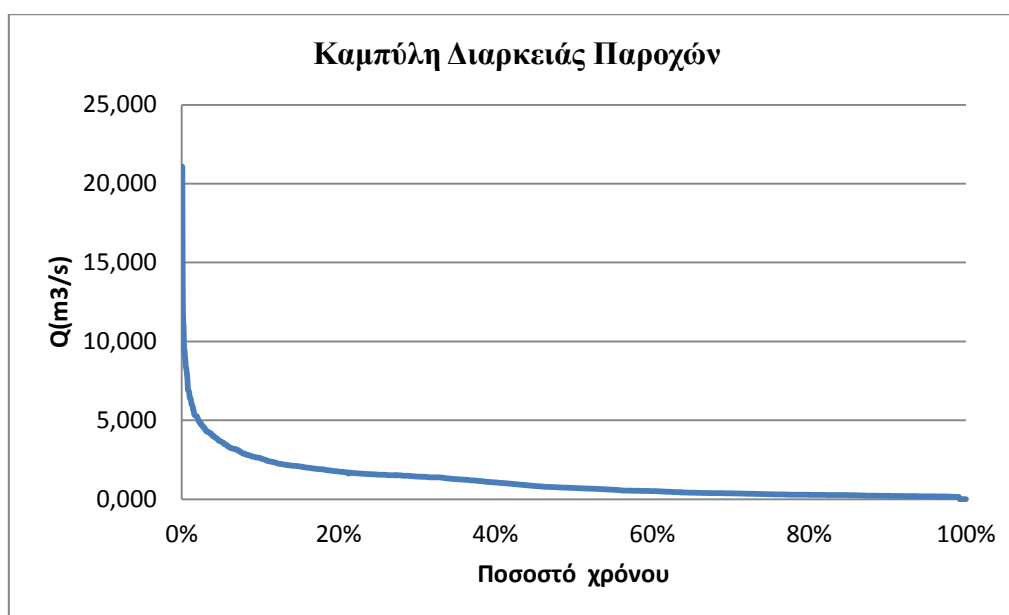
Ο προσδιορισμός της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας στηρίζεται στην επεξεργασία τόσο των υδρολογικών όσο και των τεχνικών δεδομένων.

Το υδρογράφημα είναι ημερήσια απεικόνιση παροχών σε (m^3/s), το οποίο προέκυψε από ημερήσιες μετρήσεις 5 ετών (Διάγραμμα 9.1).



Διάγραμμα 9.1 Υδρογράφημα

Η καμπύλη διάρκειας παροχής προέκυψε βάσει αναγωγής των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη θέση υδροληψίας,. Οι τιμές αυτές κατατάχτηκαν σε αύξουσα σειρά, για την δημιουργία του διαγράμματος παροχής διάγραμμα 9.2.



Διάγραμμα 9.2 Καμπύλη διάρκειας παροχής του ποταμού Πείρου

Από την καμπύλη διάρκειας παροχής επιλέχθηκε το 20% παροχής χρόνου, στην οποία αντιστοιχεί παροχή ίση με $1,77(m^3/s)$.

Χωρίζεται σε 20 ίσα διαστήματα ανά 5% του χρόνου. Σε κάθε ένα από τα 20 διαστήματα αντιστοιχεί μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή παροχής. Παίρνοντας ως αντιπροσωπευτική την μέγιστη τιμή του διαστήματος δημιουργήθηκε η καμπύλη διάρκειας – παροχής 21 σημείων.

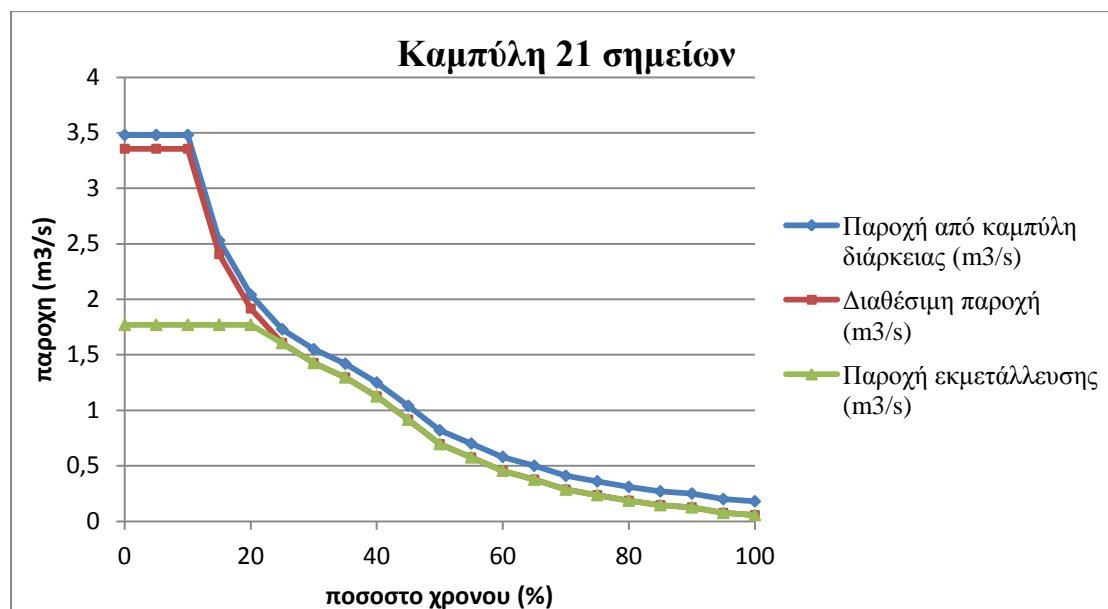
Η οικολογική παροχή πάρθηκε από το μεγαλύτερο από τα ακόλουθα μεγέθη: 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου, ή 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου, ή 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση. Η οικολογική παροχή που θα πρέπει να αποδοθεί, βρέθηκε στα 134 lt/sec, σε ποσότητα τουλάχιστον 124lt/sec. Τα υπολειπόμενα 10lt/sec θα καλύπτονται από τις διαρροές του φράγματος.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαθέσιμη παροχή ανά διάστημα, η οποία ισούται με την παροχή του ποταμού αφαιρώντας την οικολογική παροχή, η οποία προσδιορίστηκε στα 0,124 (m³/s). Σε κάθε ένα διάστημα αντιστοιχεί μία χαρακτηριστική τιμή παροχής προς εκμετάλλευση.

| Διάστημα χρόνου | Παροχή από καμπύλη διάρκειας (m ³ /s) | Οικολογική παροχή (m ³ /s) | Διαθέσιμη παροχή (m ³ /s) | Παροχή εκμετάλλευσης (m ³ /s) |
|-----------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 0 - 0.05 | 21,08 | 0,124 | 3,356 | 1,770 |
| 0.05 - 0.1 | 3,80 | 0,124 | 2,406 | 1,770 |
| 0.1 - 0.15 | 2,04 | 0,124 | 1,916 | 1,770 |
| 0.15 - 0.2 | 1,73 | 0,124 | 1,606 | 1,606 |
| 0.2 - 0.25 | 1,55 | 0,124 | 1,426 | 1,426 |
| 0.25 - 0.3 | 1,42 | 0,124 | 1,296 | 1,296 |
| 0.3 - 0.35 | 1,25 | 0,124 | 1,126 | 1,126 |
| 0.35 - 0.4 | 1,04 | 0,124 | 0,916 | 0,916 |
| 0.4 - 0.45 | 0,82 | 0,124 | 0,696 | 0,696 |
| 0.45 - 0.5 | 0,70 | 0,124 | 0,576 | 0,576 |
| 0.5 - 0.55 | 0,58 | 0,124 | 0,456 | 0,456 |
| 0.55 - 0.6 | 0,50 | 0,124 | 0,376 | 0,376 |
| 0.6 - 0.65 | 0,41 | 0,124 | 0,286 | 0,286 |
| 0.65 - 0.7 | 0,36 | 0,124 | 0,236 | 0,236 |
| 0.7 - 0.75 | 0,31 | 0,124 | 0,186 | 0,186 |
| 0.75 - 0.8 | 0,27 | 0,124 | 0,146 | 0,146 |
| 0.8 - 0.85 | 0,25 | 0,124 | 0,126 | 0,126 |
| .85 - 0.9 | 0,20 | 0,124 | 0,076 | 0,076 |
| 0.9 - 0.95 | 0,18 | 0,124 | 0,056 | 0,056 |
| 0.95 - 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Πίνακας 9.1 Πίνακας παροχών

Οι προαναφερόμενες τιμές αποτυπώνονται στο παρακάτω διάγραμμα 9.3



Διάγραμμα 9.3 Καμπύλες 21 σημείων

Η παροχή εκμετάλλευσης σταθεροποιείται στο $1,77(m^3/s)$, οπού επιλέχτηκε το αντίστοιχο ποσοστό χρόνου.

9.3.2 Απώλειες συστήματος.

Οι απώλειες του συστήματος βρέθηκαν κάνοντας χρήση της εξίσωσης $\Delta h = f \frac{l}{D} \frac{u^2}{2g}$. Ο συντελεστής τραχύτητας f βρέθηκε από το διάγραμμα moody.

Για αριθμό $Re \approx 50.000 > 2300$ άρα έχουμε τυρβώδη ροή και σχετική τραχύτητα

$$\varepsilon/d = 0,000007 \text{ δίνεται } f=0,02.$$

Για κάθε ευθύγραμμο τμήμα αντικαταστήθηκαν οι διαστάσεις του και η κινητική του ενέργεια.

Το άθροισμα των επιμέρους τμημάτων μας έδωσε το ύψος πτώσης του συστήματος.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για δεκαεννέα διαφορετικές παροχές.

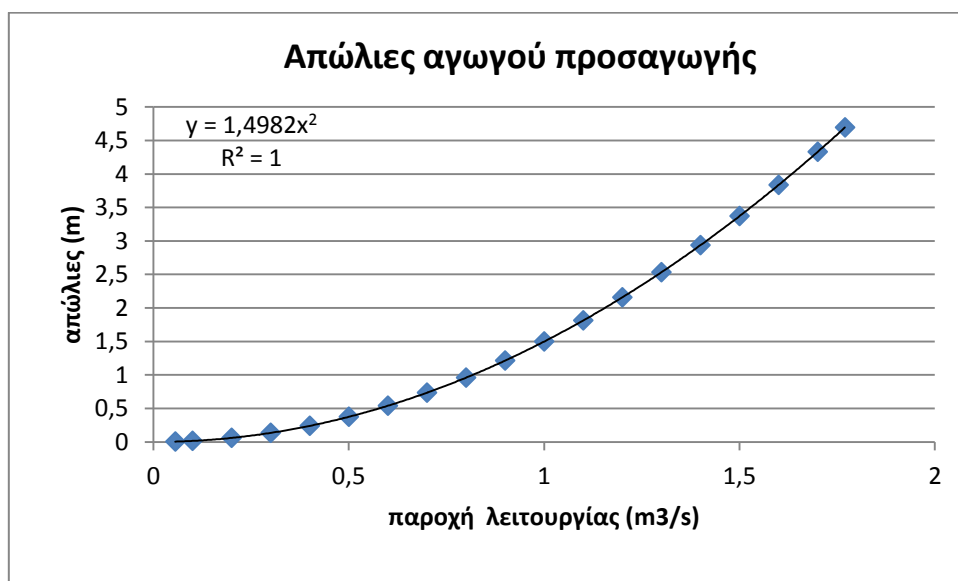
Από το συνολικό ύψος αφαιρέθηκε το ύψος πτώσης για την κάθε παροχή αντίστοιχα.

Οι τιμές αυτές αποτυπώνονται στον ακόλουθο πίνακα.

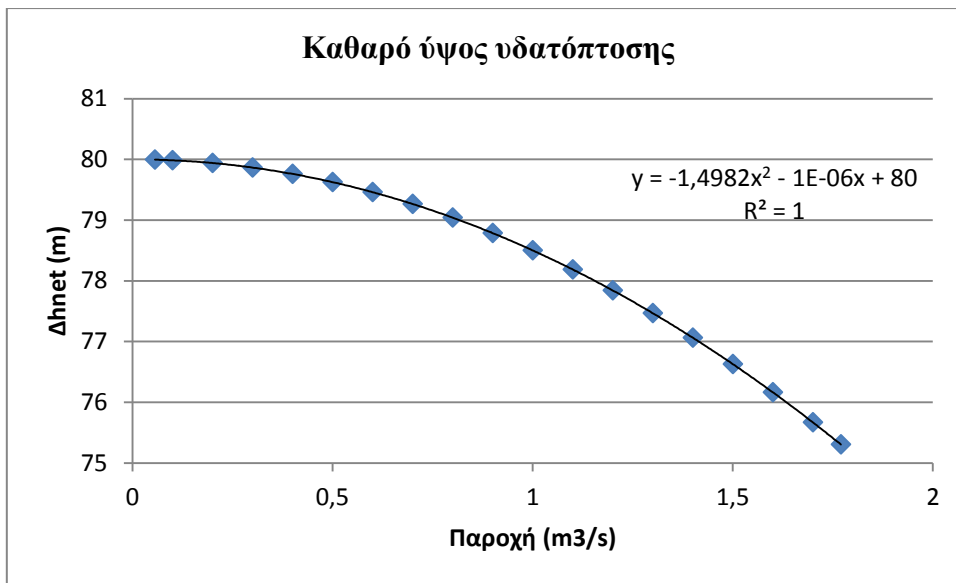
| Q(m ³ /s) | Δh(m) | Δhnet(m) |
|----------------------|-------|----------|
| 1,77 | 4,69 | 75,31 |
| 1,70 | 4,33 | 75,67 |
| 1,60 | 3,84 | 76,16 |
| 1,50 | 3,37 | 76,63 |
| 1,40 | 2,94 | 77,06 |
| 1,30 | 2,53 | 77,47 |
| 1,20 | 2,16 | 77,84 |
| 1,10 | 1,81 | 78,19 |
| 1,00 | 1,50 | 78,50 |
| 0,90 | 1,21 | 78,79 |
| 0,80 | 0,96 | 79,04 |
| 0,70 | 0,73 | 79,27 |
| 0,60 | 0,54 | 79,46 |
| 0,50 | 0,37 | 79,63 |
| 0,40 | 0,24 | 79,76 |
| 0,30 | 0,13 | 79,87 |
| 0,20 | 0,06 | 79,94 |
| 0,10 | 0,01 | 79,99 |
| 0,06 | 0,00 | 80,00 |

Πίνακας 9.2 Παροχής απωλειών

Η χαρακτηριστική καμπύλη παροχών απωλειών του συστήματος προσαγωγής εκφρασμένες σε μέτρα (m) και είναι αυτή του Διαγράμματος 9.4



Διάγραμμα 9.4 Απόλυτες αγωγού προσαγωγής

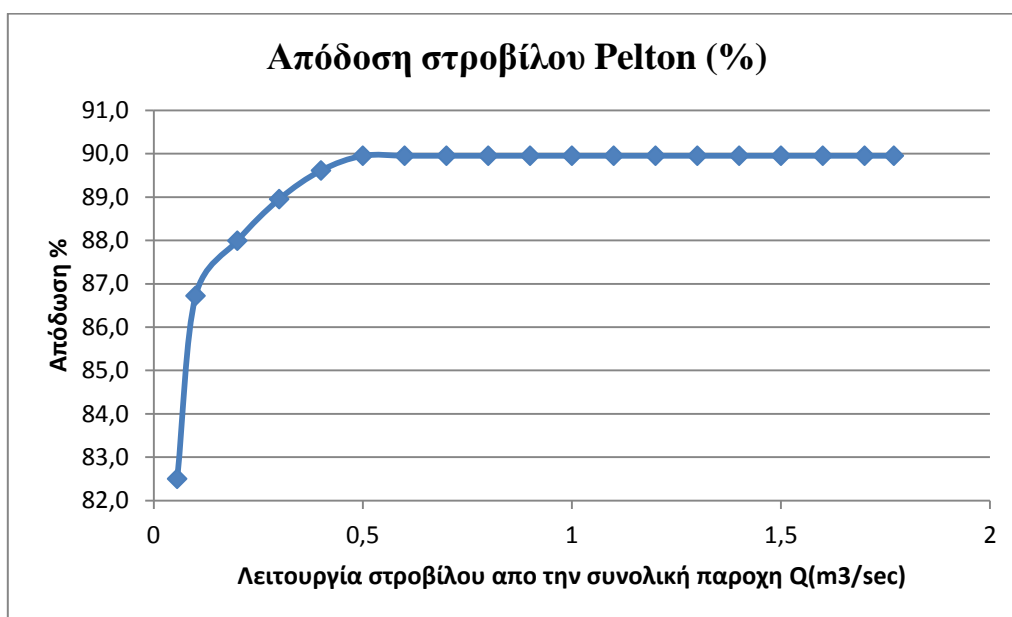


Διάγραμμα 9.5 Καθαρό ύψος υδατόπτωσης

9.3.3 Υδροστροβίλοι

Ακολουθεί η χαρακτηριστική καμπύλη παροχών – βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου τύπου Pelton και Francis

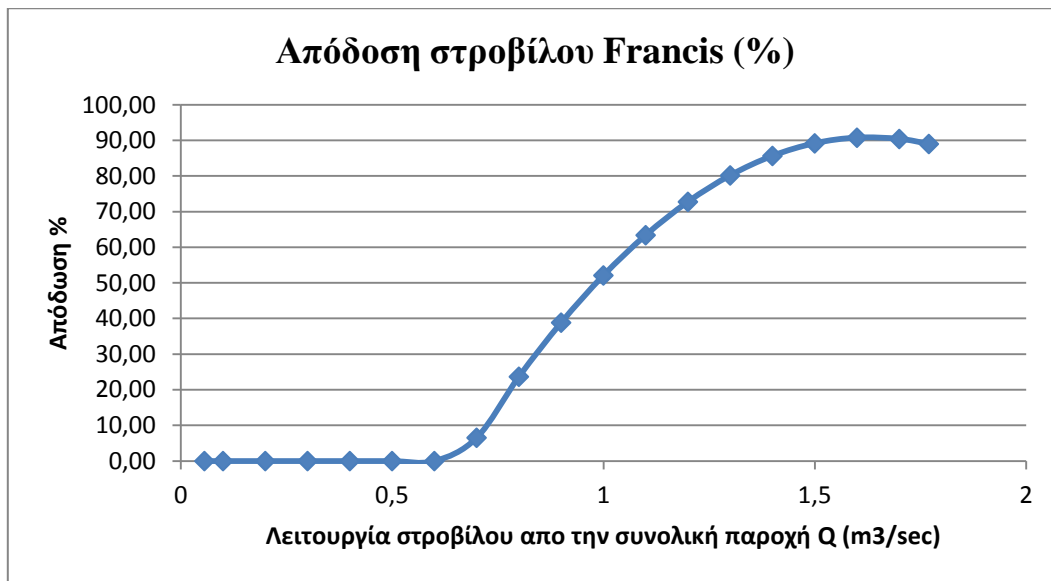
Υδροστροβίλος Pelton



Διάγραμμα 9.6 Απόδοση στροβίλου Pelton

Από το διάγραμμα παρατηρούμε, ότι ο υδροστρόβιλος Pelton παίρνει μια σημαντική τιμή απόδοσης από την παροχή $0,1(m^3/s)$ και από την παροχή $0,5(m^3/s)$ μεγιστοποιείται και διατηρείται σταθερή. Η μέγιστη εκμεταλλεύσιμη παροχή του στροβίλου αυτού διατηρείται στο $0,55(m^3/s)$, για να διατηρείται η απόδοση του και να παρέχει την βέλτιστη ισχύ. Από την παροχή $0,55(m^3/s)$ και έπειτα, συμπλέκεται και ο υδροστροβίλος Francis.

Υδροστρόβιλος Francis



Διάγραμμα 9.7 Απόδοση στροβίλου

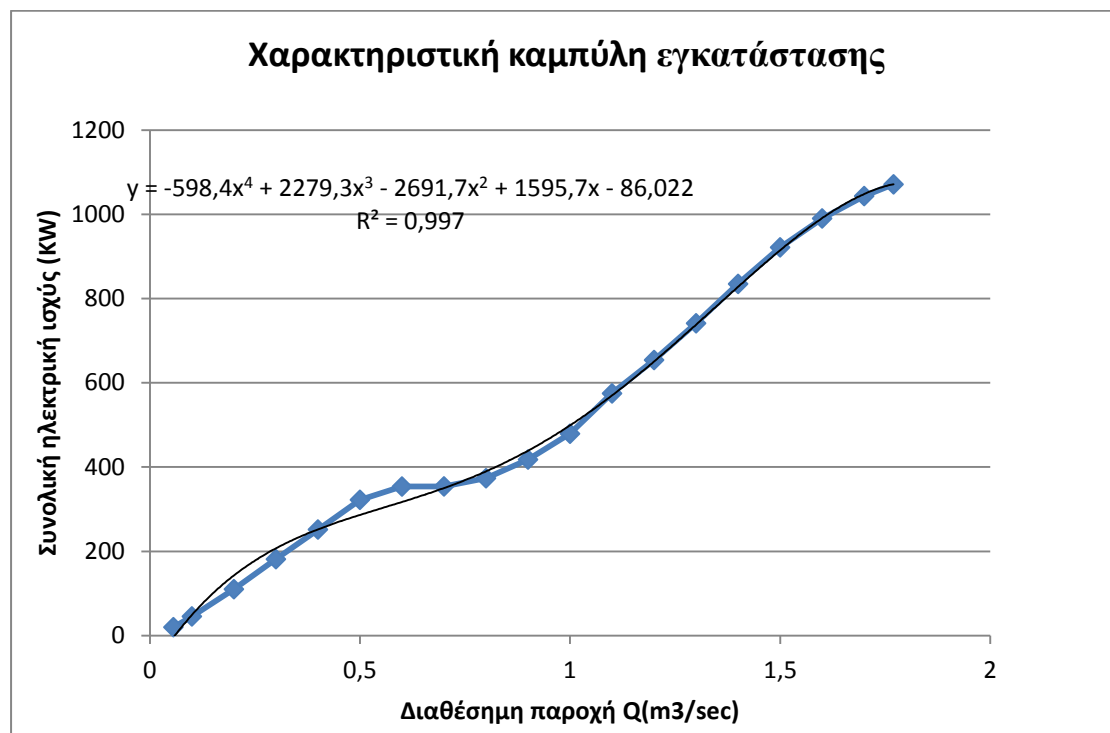
Πίνακας λειτουργίας υδροστροβίλων

Ο υδροστρόβιλος Francis, για παροχή $0,55(m^3/s)$, δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Από εκεί και έπειτα κατά την τροφοδοσία του ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται λογαριθμικά. Η βέλτιστη απόδοση ανέρχεται στο εύρος περίπου $1,3(m^3/s)$ και έπειτα.

| Q | Δh | Δh_{net} | Παροχή στροβίλου Pelton (m ³ /sec) | Παροχή στροβίλου frances (m ³ /sec) | Q/Q _{max} pelton | Q/Q _{max} fransic | Απόδοση στροβίλου Pelton (%) | Απόδοση στροβίλου frances (%) |
|-------|------------|------------------|--|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|
| 1,77 | 4,694 | 75,3 | 0,55 | 1,22 | 1 | 1 | 90,0 | 89,00 |
| 1,7 | 4,330 | 75,7 | 0,55 | 1,15 | 1 | 0,943 | 90,0 | 90,41 |
| 1,6 | 3,835 | 76,2 | 0,55 | 1,05 | 1 | 0,861 | 90,0 | 90,76 |
| 1,5 | 3,371 | 76,6 | 0,55 | 0,95 | 1 | 0,779 | 90,0 | 89,18 |
| 1,4 | 2,936 | 77,1 | 0,55 | 0,85 | 1 | 0,697 | 90,0 | 85,65 |
| 1,3 | 2,532 | 77,5 | 0,55 | 0,75 | 1 | 0,615 | 90,0 | 80,18 |
| 1,2 | 2,157 | 77,8 | 0,55 | 0,65 | 1 | 0,533 | 90,0 | 72,76 |
| 1,1 | 1,813 | 78,2 | 0,55 | 0,55 | 1 | 0,451 | 90,0 | 63,40 |
| 1,0 | 1,498 | 78,5 | 0,55 | 0,45 | 1 | 0,369 | 90,0 | 52,10 |
| 0,9 | 1,214 | 78,8 | 0,55 | 0,35 | 1 | 0,287 | 90,0 | 38,86 |
| 0,8 | 0,959 | 79,0 | 0,55 | 0,25 | 1 | 0,205 | 90,0 | 23,67 |
| 0,7 | 0,734 | 79,3 | 0,55 | 0,15 | 1 | 0,123 | 90,0 | 6,54 |
| 0,6 | 0,539 | 79,5 | 0,55 | 0 | 1 | 0 | 90,0 | 0,00 |
| 0,5 | 0,375 | 79,6 | 0,5 | 0 | 0,909 | 0 | 90,0 | 0,00 |
| 0,4 | 0,240 | 79,8 | 0,4 | 0 | 0,727 | 0 | 89,6 | 0,00 |
| 0,3 | 0,135 | 79,9 | 0,3 | 0 | 0,545 | 0 | 89,0 | 0,00 |
| 0,2 | 0,060 | 79,9 | 0,2 | 0 | 0,364 | 0 | 88,0 | 0,00 |
| 0,1 | 0,015 | 80,0 | 0,1 | 0 | 0,182 | 0 | 86,7 | 0,00 |
| 0,056 | 0,005 | 80,0 | 0,056 | 0 | 0,102 | 0 | 82,5 | 0,00 |

| Μηχανική ισχύς στην έξοδο του Στροβίλου Pelton (kW) | Μηχανική ισχύς στην έξοδο του Στροβίλου francis (kW) | Απόδοση γεννήτριας pelton ηg(%) | Απόδοση γεννήτριας francis ηg(%) | Ηλεκτρική ισχύς από την έξοδο του Στροβίλου Pelton (kW) | Ηλεκτρική ισχύς από την έξοδο του Στροβίλου francis (kW) | Συνολική ηλεκτρική ισχύς |
|---|--|---------------------------------|----------------------------------|---|--|--------------------------|
| 364 | 800 | 0,92 | 0,92 | 335 | 736 | 1071 |
| 366 | 769 | 0,92 | 0,918 | 337 | 706 | 1043 |
| 369 | 710 | 0,92 | 0,917 | 339 | 651 | 990 |
| 371 | 635 | 0,92 | 0,914 | 341 | 580 | 921 |
| 373 | 549 | 0,92 | 0,896 | 343 | 492 | 835 |
| 375 | 456 | 0,92 | 0,87 | 345 | 396 | 741 |
| 377 | 360 | 0,92 | 0,854 | 347 | 308 | 654 |
| 378 | 267 | 0,92 | 0,85 | 348 | 227 | 575 |
| 380 | 180 | 0,92 | 0,72 | 349 | 130 | 479 |
| 381 | 105 | 0,92 | 0,64 | 351 | 67 | 418 |
| 382 | 46 | 0,92 | 0,47 | 352 | 21 | 373 |
| 384 | 8 | 0,92 | 0,15 | 353 | 1 | 354 |
| 384 | 0 | 0,92 | 0 | 354 | 0 | 354 |
| 350 | 0 | 0,92 | 0 | 322 | 0 | 322 |
| 280 | 0 | 0,9 | 0 | 252 | 0 | 252 |
| 208 | 0 | 0,87 | 0 | 181 | 0 | 181 |
| 138 | 0 | 0,8 | 0 | 110 | 0 | 110 |
| 68 | 0 | 0,67 | 0 | 45 | 0 | 45 |
| 36 | 0 | 0,55 | 0 | 20 | 0 | 20 |

Πίνακας 9.3



Διάγραμμα 9.8

Χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης

Στην χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης παρατηρούμε τρία στάδια.

- Το πρώτο στάδιο είναι στο εύρος παροχής από 0 έως $0,55 (m^3/s)$. Σε αυτές της παροχές είναι η λειτουργία του στροβίλου Pelton.
- Το δεύτερο στάδιο είναι στο εύρος $0,55$ έως $0,7(m^3/s)$. Στην παροχή $0,55(m^3/s)$ ο στρόβιλος Pelton βρίσκεται στο μέγιστο σημείο λειτουργίας με την μέγιστη απόδοση. Από αυτό το σημείο και έπειτα ξεκινά και η λειτουργία το υδροστροβίλου Francis. Στο εύρος $0,55$ έως $0,7(m^3/s)$ ο υδροστροβίλος Francis έχει χαμάλη απόδοση με αποτέλεσμα την οριζοντιοποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εγκατάστασης.
- Και το τρίτο στάδιο το οποίο από $0,7(m^3/s)$ και έπειτα η χαρακτηριστική καμπύλη εγκατάστασης είναι γνησίως αύξουσα. Στο σημείο αυτό, έχουν φτάσει και οι δύο υδροστρόβιλοι σε ένα ικανοποιητικό σημείο λειτουργίας.

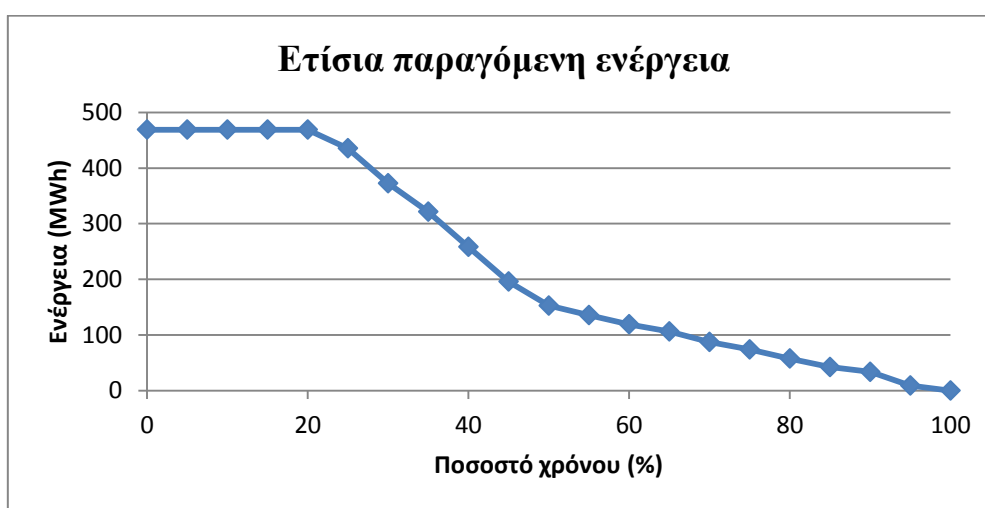
9.3.4 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια

Η χαρακτηριστική καμπύλη σύνθετης λειτουργίας των υδροστρόβιλων περιλαμβάνει τις απώλειες του συστήματος προσαγωγής και συνυπολογίζει τους βαθμούς απόδοσης των στρόβιλων και των γεννητριών. Η εφαρμογή της χαρακτηριστικής εξίσωσης λειτουργίας των υδροστρόβιλων στον Πίνακα αποδίδει την παραγόμενη στιγμιαία ισχύ που αντιστοιχεί στην εκάστοτε παροχή λειτουργίας. Υποθέτοντας σταθερή στιγμιαία ισχύ σε κάθε χρονικό διάστημα, προκύπτει η παραγόμενη ενέργεια σε MWh

| Διάστημα χρόνου | Παροχή (m ³ /s) | στιγμιαία ισχύς εξόδου (kW) | ώρες | MWh |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|------|-----|
| 0 - 0.05 | 1,77 | 1071 | 438 | 469 |
| 0.05 - 0.1 | 1,77 | 1071 | 438 | 469 |
| 0.1 - 0.15 | 1,77 | 1071 | 438 | 469 |
| 0.15 - 0.2 | 1,77 | 1071 | 438 | 469 |
| 0.2 - 0.25 | 1,606 | 994 | 438 | 435 |
| 0.25 - 0.3 | 1,426 | 850 | 438 | 373 |
| 0.3 - 0.35 | 1,296 | 734 | 438 | 321 |
| 0.35 - 0.4 | 1,126 | 590 | 438 | 258 |
| 0.4 - 0.45 | 0,916 | 447 | 438 | 196 |
| 0.45 - 0.5 | 0,696 | 348 | 438 | 153 |
| 0.5 - 0.55 | 0,576 | 310 | 438 | 136 |
| 0.55 - 0.6 | 0,456 | 272 | 438 | 119 |
| 0.6 - 0.65 | 0,376 | 242 | 438 | 106 |
| 0.65 - 0.7 | 0,286 | 199 | 438 | 87 |
| 0.7 - 0.75 | 0,236 | 169 | 438 | 74 |
| 0.75 - 0.8 | 0,186 | 132 | 438 | 58 |
| 0.8 - 0.85 | 0,146 | 96 | 438 | 42 |
| 0.85 - 0.9 | 0,126 | 77 | 438 | 34 |
| 0.9 - 0.95 | 0,076 | 21 | 438 | 9 |
| 0.95 - 1 | 0 | 0 | 438 | 0 |

Πίνακας 9.4

Χωρίζοντας την παραγόμενη ενέργεια σε 20 χρονικά διαστήματα η ετήσια παραγόμενη ενέργεια προβλέπεται στα 4,28GWh



Εικόνα 9.9 Ετήσια παραγόμενη ενέργεια

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την ισχύ για κάθε ποσοστό χρόνου. Από αυτό το εμβαδό του διαγράμματος μπορούμε να πάρουμε την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία υπολογίζεται στα 4,28GWh.

10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παραπάνω μελέτη έγινε ανάλυση των υδρολογικών δεδομένων της λεκάνης απορροής του ποταμού Πείρου, η οποία βρίσκεται στον δήμο Φαρρών του νομού Αχαΐας. Η ανάλυση αυτή έγινε για τα ημερολογιακά έτη 2010 έως 2015. Από αυτή, πρόεκυψαν οι ημερήσιες παροχές του ποταμού Πείρου με την θέση του ανάμεσα στους οικισμούς Χρυσοπηγής και Κάλανου. Από τις παροχές αυτές κατασκευάστηκε το υδρογράφημα. Οι τιμές αυτές κατατάχτηκαν σε φθίνουσα σειρά, ώστε να δημιουργηθεί η καμπύλη διάρκειας παροχής. Από αυτή επιλέχτηκε το 20% ποσοστού χρόνου με αντίστοιχη τιμή σε παροχή $1,77(\text{m}^3/\text{sec})$, αφαιρούμενη από την οικολογική παροχή, η οποία βρέθηκε στα $0,124 (\text{m}^3/\text{sec})$. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε η παροχή ανά διάστημα χρόνου 5% με αντιπροσωπευτική τιμή την ελάχιστη παροχή (πίνακας 9.1). Με βάση τις τιμές αυτές βρέθηκαν οι απώλειες του συστήματος κάνοντας εφαρμογή της εξίσωσης $\Delta h = f \frac{l u^2}{D 2g}$. Οι απώλειες αυτές βρέθηκαν για κάθε αντιπροσωπευτική τιμή παροχής δημιουργώντας έτσι τον πίνακα 9.2. Με αυτόν τον πίνακα κατασκευαστήκαν τα διαγράμματα 9.4 και 9.5. Το διάγραμμα 9.5 παρουσιάζει το τελικό ύψος Δh_{net} από την αντίστοιχη παροχή. Στον πίνακα 9.3 κατατάχτηκαν όλες οι απαραίτητες τιμές για την εύρεση της ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες απεικονίζονται στην τελευταία στήλη του πίνακα.

Στον ποταμό αυτό θα τοποθετηθεί μικρό υπερπηδητό φράγμα ορεινού τύπου, το οποίο θα διατηρεί πιο σταθερή την παροχή. Στο φράγμα θα συνδεθεί με πλαστικό σωλήνα, ενισχυμένος με υαλονήματα (GRP), ο οποίος θα οδεύεται σε επιχωματούμενο όρυγμα δεξιά κατά του ρου του ποταμού για συνολικό μήκος 2720m και θα οδηγεί το νερό στο σταθμό. Το κτίριο του σταθμού, το οποίο θα χτιστεί σε ύψος 345m από την στάθμη της θάλασσας θα εγκατασταθεί ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός που αποτελείται από την συνεργασία ενός υδροστρόβιλου Pelton οριζόντιου άξονα, ισχύος 380 kW (αποδιδόμενη για μέγιστη παροχή $0,55 \text{ m}^3/\text{sec}$ υπό καθαρό ύψος πτώσης 77,44 m) και γεννήτρια τριφασική, ονομαστικής ισχύος 400 kVA σύγχρονη, με τάση λειτουργίας 0,6 kV και έναν υδροστρόβιλο Francis οριζόντιου άξονα, ισχύος 942 kW (αποδιδόμενη για μέγιστη παροχή $1,35 \text{ m}^3/\text{sec}$ υπό καθαρό ύψος πτώσης 77,96 m) και γεννήτρια τριφασική, ονομαστικής ισχύος 1100 kVA, σύγχρονη, με τάση λειτουργίας 0,6 kV. Για την ανύψωση τάσης θα εγκατασταθεί ένας μετασχηματιστής αερόψυκτος, τριφασικός, ελαίου, εξωτερικού χώρου ισχύος 1500 kVA και ένας δευτερεύων μετασχηματιστής τριφασικός, εξωτερικού χώρου, ισχύος 100 kVA. Στον σταθμό θα εγκατασταθούν επίσης υπόλοιπος αναγκαίος ηλεκτρομηχανολογικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός και εγκαταστάσεις όπως: πίνακες, όργανα ρύθμισης και ελέγχου, αυτοματισμοί κλπ.

Μετά την ενεργειακή αξιοποίηση της υδραυλικής ενεργείας θα υπάρξει διώρυγα φυγής για την επαναφορά του ύδατος στην κοίτη του ποταμού.

Από τις λιγνιτικές μονάδες της παράγονται $0,92 (\text{Kg}/\text{KWh})$ διοξείδιο του άνθρακα. Με την εγκατάσταση αυτή θα αποθεθεί δηλαδή $4.280.000\text{KWh} * 0,92(\text{Kg}/\text{KWh}) = 3.937.600\text{Kg}$ ρύπων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημήτριος Ε. Παπαντώνης, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Μικρά υδροηλεκτρικά έργα, Έκδοση Συμμεών Αθήνα 2008

Απόστολος Πολύζακης, Ρευστοδυναμικές Μηχανές Στροβιλομηχανές-Υδροδυναμικές μηχανές, Έκδοση HEAT COOL POWER

Δημήτρης Γ. Παπανίκας, Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, 4^η Έκδοση Πάτρα-Αθήνα 2010

Κινητήρες Μηχανές Π, Γ.Φ. Δανιήλ, Ίδρυμα Ευγενίδου Χρυσόν Μετάλλινο Ακαδημίας Αθηνών, Α' ΕΚΔΟΣΗ 1980

<https://www.ypethe.grnewsta-mikra-ydroilektrika-erga-myie-kai-oi-apaitoymenes-thesmikes-protovoylies>

http://www.e-ecology.gr/DiscView.asp?mid=2463&forum_id=2&

https://www.itia.ntua.gr/el/getfile/1843/3/documents/HW_REN18_SmallHydro.pdf

<https://sohalis.wordpress.com/2011/03/26/%CE%BD%CE%B5%CF%81%CF%8C%CE%BC%CF%85%CE%BB%CE%BF%CE%B9/>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CF%81%CE%BF%CF%87%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%BF>

http://library.tee.gr/digital/m2354/m2354_dimopoulos.pdf

<https://www.dianeosis.org/2017/02/mesochora/>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1_%CE%A0%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%BF%CF%85_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CF%80%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%BF%CF%85

<https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/1843>

<https://fonografos.net/v1/%CE%B7-%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%87%CE%AE-%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%8D-%CF%83%CF%84%CE%BF-%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%81%CF%8C-%CF%85%CE%B4/>

https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1118/1/02_chapter_7.pdf

Διαδρακτική ύλη Πανεπιστήμιου Δυτικής Μακεδονίας, πολυτεχνική σχολή τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Διδάσκων: Δρ. Βαφειάδης Κυριάκος του μαθήματος Υδροστρόβιλοι και Υδροηλεκτρικά έργα.

Διαδρακτική ύλη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία (Υδροηλεκτρική ενέργεια),

Συντάκτης Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ Νίκος Μαμάσης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Διδακτική ύλη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Ανανεώσιμη Ενέργειας και Υδροηλεκτρικά Έργα, Συντάκτες Νίκος Μαμάσης, Α.Ευστρατιάδης και Δ.Κουτσογιάννης, Αθήνα 2018

Διδακτική ύλη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Εργαστήριο, Μηχανολόγων Μηχανικών Θερμικών Στροβιλομηχανών Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης, Ο Φυγοκεντρικός ή Ακτινικός Συμπιεστής, Συντάκτης Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου Καθηγητής ΕΜΠ

Διδακτική ύλη Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης Πολιτικών Μηχανικών Ξάνθης, Υδροδυναμικά Έργα, Συντάκτη Αγγελίδης Π. Αναπληρωτής καθηγητής

Διδακτική ύλη Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης Πολιτικών Μηχανικών Ξάνθης, Υδραυλικές Μηχανές και Ενέργεια, Σκουληκάρης Χαράλαμπος, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Η/Υ, MSc, PhD

Διπλωματική εργασία: <<Ανάλυση Οικονομικής Σκοπιμότητας και Περιβαλλοντικών επιπτώσεων μικρών Υδροηλεκτρικών σταθμών-Εφαρμογή στο νομό Καρδίτσας>> του εκπονητή Κουκοσία Ηλιάνα, Φεβρουάριος 2010

Υπερχειλιστές και εκκενωτές πυθμένα στα τέσσερα παλαιότερα φράγματα της ΔΕΗ από σκυρόδεμα, Συντάκτης Δ. Δημόπουλος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ Ι.Π. Στεφανάκος Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ

Σχεδιασμός Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων, Συντάκτρια: Ιώ Χατζησάββα, Πολιτικός Μηχανικός

Πτυχιακή Εργασία Μελέτη Εγκατάστασης Παράγωγης Ενεργείας Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου Γλαύκου, Εκπονητής Ευαγγελάτος Αθανάσιος, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας Σχολή Τεχνολόγων Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πάτρα 2016

Πτυχιακή Εργασία Μελέτη Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Υης Καστρακίου, Εκπονητές Χαντολιάς Δημήτριος και Γκοτσόπουλος Θεόδωρος ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας Σχολή Τεχνολόγων Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πάτρα 2016

Εισαγωγή στις στροβιλομηχανές Ευάγγελος Π. Φινδανής, Τοπογράφος Μηχανικός MSc:

<https://vfindanis.files.wordpress.com/2018/09/ceb5ceb9cf83ceb1ceb3cf89ceb3ceae-cf83cf84ceb9cf82-cf83cf84cf81cebfcceb2ceb9cebbcebfcebcceb7cf87ceb1cebdceadcf821.pdf>

Νίκος Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα 2018