

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΗΣ ΚΑΣΤΡΑΚΙΟΥ



Όνοματεπώνυμο: Καραντζή Ελένη, Α.Μ. 7147
Επιβλέπων καθηγητής: Βούρος Ανδρέας Υπότροφος Ακαδ. Εμπειρίας `

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	6
Περίληψη	7
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Αρχή λειτουργίας υδροηλεκτρικού σταθμού	9
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων.....	11
1.3 Υδάτινο δυναμικό	12
1.4 Υδροδυναμικά έργα	14
2. Ταμιευτήρες	17
2.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία ταμιευτήρα	17
2.2 Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα	20
2.3 Κατηγορίες ταμιευτήρα	21
3. Φράγματα	23
3.1 Τύποι φραγμάτων	24
4. Βοηθητικά τεχνικά έργα.....	29
5. Υδροστρόβιλοι.....	37
5.1 Κατηγορίες υδροστροβίλων	37
5.2 Υδροστρόβιλοι δράσης (τύπου Pelton).....	39
5.3 Κύρια μέρη υδροστροβίλων δράσης (τύπου Pelton)	40
5.4 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης (τύπου Kaplan, Francis).....	43
5.5 Κύρια μέρη υδροστροβίλων αντίδρασης (τύπου Francis).....	44
5.6 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης (τύπου Kaplan)	46
5.7 Σύγκριση τύπων υδροστροβίλων	47
5.8 Επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου	50
6. Σπηλαίωση.....	53
6.1 Προσδιορισμός του ύψους αναρρόφησης στο οποίο παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης.....	54
7. Εξοπτισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	59
7.1 Γεννήτριες	59
7.2 Κατηγορίες γεννητριών	60
7.3 Επιλογή τύπου γεννήτριας	61
8. Μετασχηματιστές	63
8.1 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή.....	63
9. Υδροηλεκτρικός σταθμός Καστρακίου	65
9.1 Μελέτη περίπτωσης.....	65
9.2 Πίνακας υπολογισμού ενεργειών και βαθμού απόδοσης.....	66
9.3 Πίνακας εξαγωγής διαγραμμάτων: μέση ειδική κατανάλωση νερού κάθε μήνα, φορτίο συναρτήσει της ισχύος και καμπύλη φορτίου παροχής.....	71
9.4 Υπολογισμός απαιτούμενης παροχής και όγκου υπερχειλίσης	76
9.5 Πίνακας αποτύπωσης του βαθμού απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού.....	78
9.6 Πίνακας εξαγωγής εκμεταλλεύσιμης δυναμικότητας %	80
9.7 Υπολογισμός απωλειών	82
9.8 Υπολογισμός απωλειών κατά μήκος της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.....	87
9.9 Διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων για τις ενεργειακές απώλειες	89
9.10 Υπολογισμός παραμέτρων σπηλαίωσης	93
9.11 Υπολογισμός παραμέτρων κινητών πτερυγίων υδροστροβίλων.....	95
9.12 Εξαγωγή του ειδικού αριθμού στροφών n_s και της παραμέτρου σπηλαίωσης σ_{KR}	97



10. Γενικό συμπέρασμα και ανακεφαλαίωση.....99



ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Υδροηλεκτρικός Σταθμός (πηγή: βιβλιοθήκη ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)	10
Εικόνα 1.2: Υδρολογικός κύκλος (πηγή: Βικιπαίδεια «Ο κύκλος του νερού»)	14
Εικόνα 2.1 Ανάλυση όγκων ταμιευτήρα (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	17
Εικόνα 2.2: Καμπύλες σύνδεσης υψομέτρου, επιφάνειας και όγκου νερού (πηγή: Τμήμα Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων, ΤΕΙ Λάρισας).....	19
Εικόνα 2.3: Υδατικό Ισοζύγιο ταμιευτήρα (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	20
Εικόνα 3.1: Φράγμα Λούρου, Πρέβεζα (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων).....	24
Εικόνα 3.2: Φράγμα Ταυρωπού, Καρδίτσα (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων).....	25
Εικόνα 3.3: Φράγμα Καστρακίου, Αιτωλοακαρνανία (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων).....	27
Εικόνα 4.1: Μετωπικός Υπερχειλιστής (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	29
Εικόνα 4.2: Πλευρικός Υπερχειλιστής, Φράγμα Καστρακίου (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	30
Εικόνα 4.3: Πλευρικός Υπερχειλιστής, Φράγμα Καστρακίου (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	30
Εικόνα 4.4: Φρεατοειδής υπερχειλιστής (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο).....	31
Εικόνα 4.5: Σιφωνοειδής Υπερχειλιστής (πηγή: Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).....	32
Εικόνα 4.6: Υδροηλεκτρικό Εργοστάσιο (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	36
Εικόνα 5.1: Υδροστρόβιλος Pelton (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης).....	40
Εικόνα 5.2: Απεικόνιση σκαφιδίου και ακροφυσίου υδροστροβίλου Pelton (πηγή: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης).....	41
Εικόνα 5.3: Απεικόνιση σκαφιδίου υδροστροβίλου Pelton (πηγή: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης).....	42
Εικόνα 5.4: Υδροστρόβιλος Pelton (πηγή: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, ΑΤΕΙ Πειραιά).....	43
Εικόνα 5.5: Υδροστρόβιλος Kaplan (πηγή: Αποθετήριο «Κάλλιπος»).....	44
Εικόνα 5.6: Υδροστρόβιλος Francis (πηγή: CINK HYDRO ENERGY).....	44
Εικόνα 5.7: Υδροστρόβιλος Francis (πηγή: MF RURAL).....	45
Εικόνα 5.8: Δρομέας υδροστροβίλου Francis (πηγή: Mechanical Engineering).....	46
Εικόνα 5.9: Δρομέας υδροστροβίλου Francis (πηγή: HTE Engineering).....	46
Εικόνα 5.10: Υδροστρόβιλος Kaplan (πηγή: SlidePlayer).....	48
Εικόνα 5.11: Διάγραμμα επιλογής κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου (πηγή: wikiwand).....	53
Εικόνα 6.1: Μεταβολή της πίεσης των υδρατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	55
Εικόνα 6.2: Ανύψωση στην αναρρόφηση (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	56



Εικόνα 6.3: Τοποθέτηση αντλίας κάτω από την επιφάνεια του νερού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	58
Εικόνα 6.4: Διάγραμμα προσδιορισμού του απαιτούμενου ύψους αναρρόφησης $NPSH_r$ (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	59
Εικόνα 7.1: Σύγχρονη γεννήτρια (πηγή: Τμήμα Ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Πειραιά).....	62
Εικόνα 7.2: Ασύγχρονη γεννήτρια (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	63
Εικόνα 8.1: Περιελίξεις μετασχηματιστών (πηγή: Άρθρα μετασχηματιστών).....	64
Εικόνα 8.2: Μονοφασικός Μετασχηματιστής με φορτίο (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	66
Εικόνα 9.1: Υδροηλεκτρικός Σταθμός Καστρακίου (πηγή: Mapio.net).....	66
Εικόνα 9.2: Διάγραμμα Moody (πηγή: Owlcation).....	88
Εικόνα 9.3: Πίνακας εξαγωγής συντελεστή K (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	90
Εικόνα 9.4: Διαδρομή ρευστού κατά μήκος του υδροηλεκτρικού σταθμού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).....	91



Πρόλογος

Το παρόν τεύχος αποτελεί διπλωματική εργασία η οποία εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου. Η διπλωματική εργασία αναφέρεται στην δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από έναν υδροηλεκτρικό σταθμό με ταμειυτήρα και παρατίθεται η μελέτη του υδροηλεκτρικού σταθμού Καστρακίου

Η μελέτη αυτή έχει ως σκοπό την ουσιαστική κατανόηση των δεδομένων λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού και την εξαγωγή συμπερασμάτων με σκοπό την βελτίωση αυτής. Σε πρώτο στάδιο γίνεται η ανάλυση της αρχής λειτουργίας ενός υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και η ανάλυση των επιμέρους τμημάτων αυτού. Έπειτα, παρουσιάζονται τα στοιχεία λειτουργίας της περίπτωσης που εξετάζουμε και συνάγονται συμπεράσματα με βάση τους υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ανδρέα Βούρο για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου έδειξε στο διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς και τους κοντινούς μου ανθρώπους για την υπομονή και την βοήθειά τους σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Καραντζή Ελένη
Ιούλιος 2022

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτήτριας: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο με ταμιευτήρα. Γενικότερα, ο ταμιευτήρας εξασφαλίζει την αποθήκευση νερού με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ακόμα και σε περιόδους στις οποίες η ζήτηση είναι ιδιαίτερα αυξημένη και ο όγκος νερού που εισέρχεται στο υδροηλεκτρικό είναι μειωμένος. Κάτι τέτοιο συμβαίνει κυρίως στην καλοκαιρινή περίοδο η οποία χαρακτηρίζεται και ως ξηρή περίοδος καθώς δεν υπάρχει μεγάλη εισροή νερού στο υδροηλεκτρικό.

Η διπλωματική εργασία αναλύεται σε δέκα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται η αρχή λειτουργίας του υδροηλεκτρικού καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα για την κατασκευή αυτού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι ταμιευτήρες ως προς τα χαρακτηριστικά τους, την χρησιμότητά τους καθώς και τις κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται ανάλογα με τα στοιχεία λειτουργίας τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φράγματα καθώς και οι κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται με κριτήριο τα στοιχεία λειτουργίας τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τεχνικά έργα τα οποία χρησιμεύουν για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία του υδροηλεκτρικού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι υδροστρόβιλοι οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι άλλωστε και ο αρχικός σκοπός δημιουργίας του υδροηλεκτρικού. Παρουσιάζονται οι κατηγορίες στις οποίες εντάσσονται οι υδροστρόβιλοι ανάλογα με τα στοιχεία λειτουργίας τους καθώς και τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται ο κατάλληλος υδροστρόβιλος για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του.

Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρεται ο παράγοντας της σπηλαίωσης ο οποίος μπορεί να προκαλέσει ζημιές στους υδροστροβίλους με αποτέλεσμα την διακοπή λειτουργίας του υδροηλεκτρικού.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η σημασία των γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο όγδοο κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται η μελέτη του υδροηλεκτρικού σταθμού Καστρακίου. Στην μελέτη αυτή υπολογίζονται στοιχεία όπως οι παραγόμενες ενέργειες κάθε υδροστροβίλου, οι βαθμοί απόδοσης αυτών καθώς και συνολικά για το υδροηλεκτρικό, η εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα, οι απώλειες ενέργειας που παρουσιάζονται κατά μήκος των αγωγών, ο ωφέλιμος όγκος νερού και ο όγκος υπερχείλισης καθώς και οι παράμετροι της σπηλαίωσης αλλά και οι παράμετροι των κινητών πτερυγίων των υδροστροβίλων. Σε καθένα από τα αποτελέσματα που υπολογίζονται, εξάγονται και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Στο δέκατο κεφάλαιο αποτυπώνεται ένα γενικό συμπέρασμα με βάση την μελέτη περίπτωσης και γίνεται μια σύντομη ανακεφαλαίωση επί του θέματος.



Διπλωματική εργασία «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδροηλεκτρικά Έργα – Μελέτη Περίπτωσης του ΥΗΣ Καστρακίου».
ΚΑΡΑΝΤΖΗ ΕΛΕΝΗ, Α.Μ. 7147



1. Εισαγωγή

Από αρχαιοτάτων χρόνων έγινε επιτακτική η ανάγκη της εκμετάλλευσης της ενέργειας του νερού μέσω υδροδυναμικών έργων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούσαν οι νερόμυλοι (υδρομηχανές) οι οποίοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, πχ άλεση. Με την πάροδο του χρόνου έγινε κατανοητή η ανάγκη μετατροπής της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική (περιστροφική) ενέργεια με την βοήθεια ενός υδροστροβίλου με τελικό σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την βοήθεια μια ηλεκτρικής γεννήτριας. Το συνολικό έργο που περιγράφει τον παραπάνω σκοπό ονομάζεται υδροηλεκτρικό σύστημα ή υδροηλεκτρικό εργοστάσιο.

Γενικά, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια θεωρούνται ότι ανήκουν στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας λόγω της μη έκλυσης ρύπων κατά την λειτουργία τους. Ωστόσο, η κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών εργοστασίων προϋποθέτει μεγάλες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον με αποτέλεσμα την αλλοίωσή του. Παρόλα αυτά, με την κατάλληλη μελέτη μπορούμε να περιορίσουμε την αλλοίωση αυτή.

1.1 Αρχή λειτουργίας υδροηλεκτρικού σταθμού.

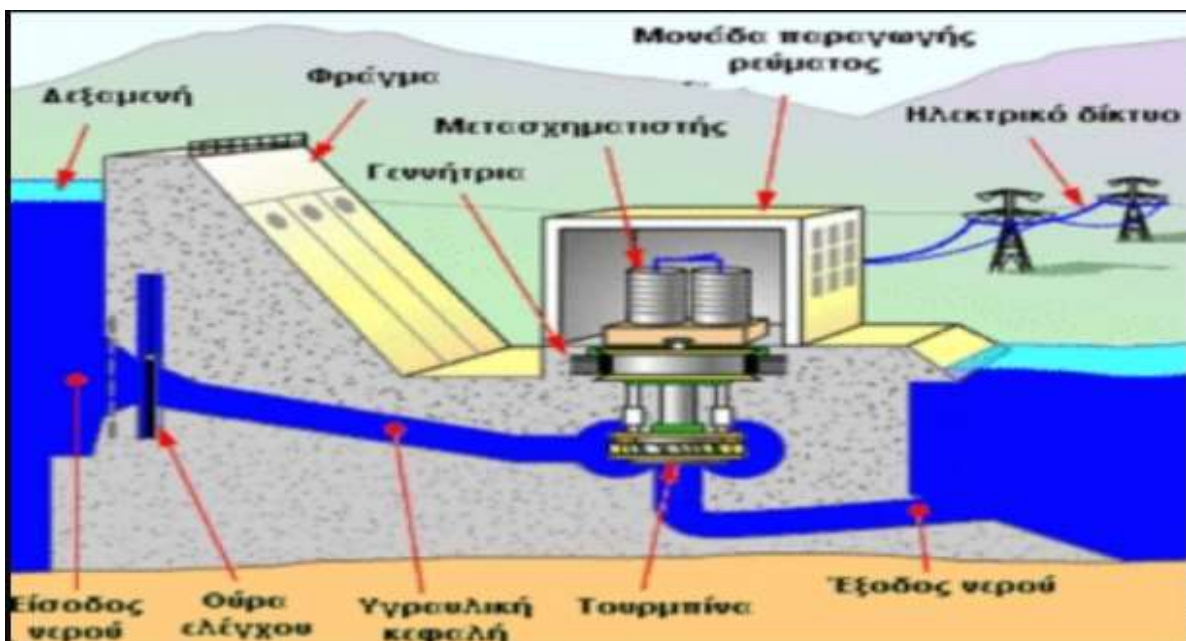
Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός έχει ως σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης της δυναμικής και κινητικής ενέργειας του νερού. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούν ένα φράγμα με σκοπό την συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας νερού σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία ονομάζεται ταμιευτήρας. Το νερό αυτό πρέπει να ρέει προς τα κάτω έτσι ώστε να αποκτήσει κινητική ενέργεια και γι' αυτό τα φράγματα κατασκευάζονται σε σημεία με σχετικά απότομες κλίσεις της κοίτης των ποταμών. Με την ροή αυτή η δυναμική ενέργεια του νερού του ταμιευτήρα μετατρέπεται σε κινητική. Στο κάτω μέρος του φράγματος υπάρχουν υδροφράκτες όπου με την βοήθειά τους ρυθμίζεται η ποσότητα της ροής του νερού που θα ρεύσει από τον ταμιευτήρα προς τον υδροστρόβιλο μέσω του αγωγού. Η κινητική ενέργεια του νερού μεταφέρεται μέσω των πτερυγίων του υδροστροβίλου στον υδροστρόβιλο περιστρέφοντας τον άξονά του.

Η περιστροφική κίνηση του άξονα του υδροστροβίλου μεταφέρεται στην γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη με τον υδροστρόβιλο μέσω του άξονα. Η περιστροφή του άξονα επιτυγχάνει την περιστροφή του δρομέα της γεννήτριας. Καθώς το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου περιστρέφεται μέσα στο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται στα άκρα του τυμπάνου ηλεκτρεργετική δύναμη ή αλλιώς τάση εξ επαγωγής. Η τάση αυτή είναι ημιτονοειδούς μορφής και άρα εναλλασσόμενη. Η τάση αυτή δύναται να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο λαμβάνει ο μετασχηματιστής και το μετατρέπεται σε ρεύμα υψηλής τάσης έτσι ώστε να μπορεί το ρεύμα να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με το μικρότερο δυνατό κόστος για να μπορέσει να τροφοδοτήσει ενεργειακά τους

διάφορους νομούς της χώρας. Η μεταφορά αυτή του ρεύματος επιτυγχάνεται με την βοήθεια τεσσάρων καλωδίων που υπάρχουν έξω από κάθε υδροηλεκτρική μονάδα, εκ των οποίων τα τρία καλώδια αναφέρονται στις τρεις φάσεις του ρεύματος και το τέταρτο που αναφέρεται στην γείωση.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι προκειμένου να μεταβάλλουμε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την υδροηλεκτρική μονάδα, θα πρέπει να μεταβάλλουμε τον όγκο του νερού που ρέει και την ποσότητα της υδραυλικής κεφαλής. Με τον όρο υδραυλική κεφαλή εννοούμε την απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του νερού και του υδροστροβίλου. Έτσι λοιπόν, όσο αυξάνεται ο όγκος του νερού και της υδραυλικής κεφαλής τόσο αυξάνεται και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Το μέγεθος της υδραυλικής κεφαλής εξαρτάται από την ποσότητα του νερού της δεξαμενής.

Οι περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες λειτουργούν με αυτό τον τρόπο. Ωστόσο, υπάρχουν υδροηλεκτρικά συστήματα τα οποία είναι γνωστά ως υδροηλεκτρικά αμφίδρομης λειτουργίας. Τα υδροηλεκτρικά αυτά διαθέτουν δύο ταμιευτήρες, έναν στο άνω μέρος του υδροηλεκτρικού στον οποίο αποθηκεύεται το νερό που με τη βοήθεια της δυναμικής ενέργειας παράγεται η κινητική ενέργεια του νερού και έναν στον κάτω μέρος του υδροηλεκτρικού όπου καταλήγει το νερό το οποίο εξέρχεται από τον υδροστρόβιλο. Σκοπός των υδροηλεκτρικών αυτών είναι να μεταφερθεί το νερό το οποίο καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα στον άνω ταμιευτήρα. Η μεταφορά αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλή και ουσιαστικά αναφερόμαστε στις βραδινές ώρες. Επιπλέον, η μεταφορά αυτή έχει ως στόχο την χρήση της αποθηκευμένης δυναμικής ενέργειας του νερού κατά την διάρκεια της ημέρας όπου υπάρχει μεγάλη ζήτηση. Τέλος, για να γίνει εφικτή η όλη διαδικασία ο υδροστρόβιλος λειτουργεί ως στροβιλοαντλία, πραγματοποιώντας δηλαδή την αντίστροφη λειτουργία από αυτή που έχει συνήθως, ή υπάρχουν ξεχωριστές αντλίες οι οποίες αναλαμβάνουν αυτή την μεταφορά του νερού.



Εικόνα 1.1: Υδροηλεκτρικός Σταθμός (πηγή: βιβλιοθήκη ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)



1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια θεωρούνται ότι ανήκουν στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας δεδομένου ότι χρησιμοποιούν ως μέσο παραγωγής ενέργειας το νερό. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας τα οποία συνοψίζονται ως εξής:

- **Ενεργειακά:** τα υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούν να αποδώσουν την μέγιστη ονομαστική ισχύ σε ελάχιστο χρόνο, λειτουργώντας ως συστήματα κάλυψης φορτίου αιχμής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περιόδους αιχμής η παροχή στο ηλεκτρικό σύστημα μιας χώρας είναι πολύ δύσκολη και κατά συνέπεια πολύ ακριβή. Οι υδροστρόβιλοι παρέχουν ισχύ σταθερά και χωρίς διακυμάνσεις. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής της δυναμικής και κατ' επέκταση της κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι από τους μεγαλύτερους σε σχέση με άλλα συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας τα υδροηλεκτρικά είναι αρκετά αξιόπιστα. Τα παραπάνω οφέλη πολλαπλασιάζονται με την λειτουργία των λεγόμενων υδροηλεκτρικών αμφίδρομης λειτουργίας.
- **Οικονομικά:** το κόστος εγκατάστασης των υδροηλεκτρικών συστημάτων είναι αρκετά μεγάλο. Ωστόσο, το κόστος λειτουργίας τους είναι πολύ μικρό καθώς δεν χρειάζεται μεγάλος αριθμός εργαζομένων (20 εργαζόμενοι για κάθε σταθμό ισχύος 300MW) και το κόστος συντήρησης τους είναι περιορισμένο (προγραμματισμένη συντήρηση κάθε 5000h). Επιπλέον, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής η οποία για μεγάλα υδροηλεκτρικά προσδιορίζεται στα 50 – 60 χρόνια και για τα μεσαία υδροηλεκτρικά στα 25 – 35 χρόνια. Τέλος, είναι αρκετά σημαντική η συμβολή τους στην τοπική ανάπτυξη της περιοχής καθώς η εγκατάσταση των υδροηλεκτρικών είναι δυνατό να προϋποθέτει την διάνοιξη δρόμων ή την κατασκευή γεφυρών κ.λπ.
- **Περιβαλλοντικά:** τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια εκλύουν μηδενικές εκπομπές ρύπων με εξαίρεση τις εκπομπές ρύπων που εκλύονται κατά την κατασκευή τους. Κατά την λειτουργία του υδροηλεκτρικού, ο φυσικός πόρος του νερού δεν υποβαθμίζεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες ανάγκες εκτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ένας υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να είναι ένα έργο απλής σκοπιμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μπορεί να είναι και ένα έργο πολλαπλής σκοπιμότητας που να εξυπηρετεί άλλες δραστηριότητες όπως αρδεύσεις καλλιεργειών, ύδρευση των πόλεων, αντιπλημμυρική προστασία, δημιουργία υδροβιότοπων, αλιεία, ναυσιπλοΐα κ.λπ. Τέλος, η ύπαρξη μεγάλων φυσικών ή τεχνητών ταμιευτήρων παρέχει ρυθμιστική ικανότητα στο υδροδυναμικό μιας χώρας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ σε συνδυασμό με τα μεγάλα ύψη πτώσεως λόγω του έντονου ανάγλυφου το καθιστά κατάλληλο για την ενεργειακή κάλυψη των μεγάλων φορτίων αιχμής.

Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια όμως έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα:



- Είναι σύνηθες το φαινόμενο διακύμανσης της ποσότητας του νερού μεταξύ της υγρής και ξηρής περιόδου, κάτι που όμως έχει άμεση επίδραση στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, ιδιαίτερα στους υδροστροβίλους χωρίς ταμιευτήρα.
- Υπάρχει περιορισμένη ειδική ενεργειακή πυκνότητα νερού (kW/kg νερού) γεγονός που επιβάλλει μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης νερού (πχ φράγματα, υδαταγωγούς κ.λπ.) και απαιτεί μεγάλο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης.
- Για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι αναγκαία η συνεργασία διαφορετικών ειδικοτήτων καθώς είναι απαραίτητη η επίλυση πολλαπλών τεχνικών προβλημάτων κατά την διάρκεια της κατασκευής του. Έτσι λοιπόν έχουμε τα έργα του πολιτικού μηχανικού για την στεγανότητα των φραγμάτων, εκτροπές ποταμών κ.λπ. και τα έργα του μηχανολόγου/ηλεκτρολόγου μηχανικού για την διασύνδεση με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο κ.λπ.
- Ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή του υδροηλεκτρικού είναι μεγάλος και κυμαίνεται από 3 έως 8 έτη.
- Στην περίπτωση της κατασκευής φραγμάτων για την δημιουργία ταμιευτήρα, γίνεται κατανοητό ότι πραγματοποιούνται μεγάλες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εκτός από την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος, και την μετεγκατάσταση κοινωνικών και επαγγελματικών δραστηριοτήτων προκαλώντας κοινωνική δυσaréσκεια.

1.3 Υδάτινο δυναμικό.

Το υδάτινο δυναμικό μιας περιοχής εκφράζει την δυνατότητα παραγωγής έργου από ρέοντα ύδατα. Η γνώση του υδάτινου δυναμικού μιας περιοχής είναι αναγκαία για την καλύτερη αξιοποίηση του υδροδυναμικού με την κατασκευή των απαραίτητων έργων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας περιοχής.

Για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου και την εκτίμηση της ηλεκτρικής ισχύος που αυτό μπορεί να παράγει, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του υδάτινου δυναμικού. Αυτό γίνεται με την συλλογή των υδρολογικών δεδομένων της περιοχής η οποία είναι υποψήφια για την κατασκευή του υδροηλεκτρικού. Τα υδρολογικά δεδομένα θα πρέπει να περιλαμβάνουν την μέση ημερήσια ροή του ποταμού για μεγάλη χρονική περίοδο (τουλάχιστον 20 χρόνων) καθώς και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η εκτίμηση του υδάτινου δυναμικού το οποίο θα βοηθήσει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός πιθανού υδροηλεκτρικού. Ωστόσο, σπάνια υπάρχουν τέτοιες μακροχρόνιες μετρήσεις για τις υποψήφιες περιοχές για την εγκατάσταση υδροηλεκτρικών και για τον λόγο αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα που προέρχονται από περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά (κλίμα, γεωλογία, βλάστηση, ανθρώπινη δραστηριότητα κ.λπ.) ή γίνονται αναγωγές από τα σημεία των ποταμών στα οποία υπάρχουν οι μετρήσεις με βάση στοιχεία από την γεωγραφία της περιοχής.

Για την αναπαράσταση της μέσης ημερήσιας ροής ενός ποταμού σε ένα συγκεκριμένο σημείο γίνεται η χρήση μιας γραφικής παράστασης που ονομάζεται υδρογράφημα. Από το υδρογράφημα μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα



διάρκειας παροχής που αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την εκτίμηση του υδροδυναμικού μιας περιοχής καθώς και για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός υδροηλεκτρικού έργου. Η καμπύλη διάρκειας παροχής εκφράζει το χρόνο που απαιτείται για να έχουμε μία συγκεκριμένη παροχή νερού. Η μορφή της καμπύλης μπορεί να μας δώσει σημαντικές πληροφορίες για την προτεινόμενη εγκατεστημένη ισχύ, τον αριθμό των μονάδων καθώς και τις ενδείξεις για την οικονομική βιωσιμότητα του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα, η καμπύλη διάρκειας παροχής μπορεί να φανερώσει αν το μεγαλύτερο ποσοστό παροχής εμφανίζεται για μικρό χρονικό διάστημα ή αν η παροχή του ποταμού είναι σχετικά σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Σημαντικό ρόλο για την καλύτερη εκμετάλλευση του υδάτινου δυναμικού παίζει και ο υδρολογικός κύκλος και το ανάγλυφο της περιοχής. Το νερό της ατμόσφαιρας φτάνει στην επιφάνεια της Γης ως βροχόπτωση ή χιονόπτωση. Ένα μέρος του νερού αυτού εξατμίζεται, ενώ το μεγαλύτερο μέρος απορροφάται από το έδαφος ή συσσωρεύεται επιφανειακά σε θάλασσες, λίμνες ή ποτάμια. Η εξάτμιση από την θάλασσα και την υγρασία της ξηράς δημιουργεί τα σύννεφα και έτσι κλείνει ο υδρολογικός κύκλος. Γίνεται κατανοητό ότι ο ρόλος του ήλιου είναι καθοριστικός για την δημιουργία του υδρολογικού κύκλου.

Το υδάτινο δυναμικό χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- Ολικό θεωρητικό υδροδυναμικό: είναι η συνολική μέση ενέργεια που μπορεί να παραχθεί σε μία περιοχή (υδρολογική λεκάνη) χωρίς να υπολογισθούν οι απώλειες λόγω εξάτμισης, το ωφέλιμο φορτίο υπολογίζεται με σύστημα αναφοράς τον τελικό αποδέκτη (συνήθως την θάλασσα) και θεωρείται ότι το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο εκτελεί συνεχή λειτουργία και έχει βαθμό απόδοσης 100%. Η σχέση που δίνει την παραγόμενη ισχύ του συστήματος με βάση το θεωρητικό υδροδυναμικό είναι

$$I_{\theta} = 9.81 \cdot \sum (Q_m \cdot H_m) \text{ (kW)} \quad (1.1)$$

όπου:

- Q_m = το ολικό ύψος πτώσης μεταξύ της λεκάνης απορροής και της ελάχιστης επιφάνειας αναφοράς (συνήθως της θάλασσας)
- H_m = ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης 100%.

Η παραγόμενη ετήσια ενέργεια δίνεται από την σχέση

$$E_{\theta} = 8760 \cdot I_{\theta} \text{ (kWh)} \quad (1.2)$$

Επειδή $Q_m = \frac{V}{8760 \cdot 3600}$ τότε η σχέση για την ετήσια παραγόμενη ενέργεια διαμορφώνεται ως εξής:

$$E_{\theta} = \sum \frac{V_m \cdot H_m}{367} \text{ (kWh)} \quad (1.3)$$

Το θεωρητικό υδροδυναμικό για την Ελλάδα είναι περίπου 84 TWh.

- Τεχνικώς εκμεταλλεύσιμο δυναμικό: είναι το δυναμικό το οποίο προκύπτει αν αφαιρεθούν από το ολικό θεωρητικό υδροδυναμικό οι απώλειες στις λεκάνες

απορροής και στην υδροδυναμική εγκατάσταση καθώς και το υδροδυναμικό μικρών παραπτώμων που δεν είναι εύκολο να αξιοποιηθούν. Για το υδροδυναμικό των υδατορρευμάτων της Ελλάδας ισχύει:

$$E_T \approx (0.20 - 0.30) \cdot E_\theta \text{ (kWh)} \quad (1.4)$$

- Οικονομικώς εκμεταλλεύσιμο δυναμικό: πρόκειται για το τεχνικώς εκμεταλλεύσιμο δυναμικό το οποίο είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με την κατασκευή των αντίστοιχων έργων εφόσον η δαπάνη κατασκευής των έργων αυτών είναι οικονομικά συμφέρουσα. Η σχέση του οικονομικώς εκμεταλλεύσιμου δυναμικού και του τεχνικώς εκμεταλλεύσιμου ή ολικού θεωρητικού δυναμικού δίνεται από την σχέση

$$E_o \approx (0.20 - 0.80) \cdot E_T \approx (0.10 - 0.25) \cdot E_\theta \text{ (kWh)} \quad (1.5)$$



Εικόνα 1.2: Υδρολογικός κύκλος (πηγή: Βικιπαίδεια «Ο κύκλος του νερού»)

1.4 Υδροδυναμικά έργα.

Υδροηλεκτρικά συστήματα ονομάζονται τα υδροδυναμικά συστήματα που παράγουν ηλεκτρική ισχύ εκμεταλλευόμενα την μηχανική (κινητική και δυναμική) ενέργεια του νερού.



Τα υδροηλεκτρικά συστήματα διακρίνονται σε κατηγορίες με βάση την ονομαστική παραγόμενη ισχύ του υδροστροβίλου, το ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης, την ύπαρξη του ταμιευτήρα, την σκοπιμότητα του έργου και τον βαθμό εκμετάλλευσης του έργου.

Με βάση την ονομαστική παραγόμενη ισχύ του υδροστροβίλου, τα υδροηλεκτρικά συστήματα ταξινομούνται σε:

- Μεγάλα υδροηλεκτρικά με ονομαστική ισχύ του υδροστροβίλου μεγαλύτερη από 15MW.
- Μικρά υδροηλεκτρικά με ονομαστική ισχύ του υδροστροβίλου που κυμαίνεται από 1MW έως 15MW.
- Πολύ μικρά υδροηλεκτρικά με ονομαστική ισχύ του υδροστροβίλου που κυμαίνεται από 0.1MW έως 1MW.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά κατασκευάζονται συνήθως επάνω σε μικρά ποτάμια και υδάτινα ρεύματα με μικρά φράγματα που έχουν ρόλο κυρίως ρυθμιστικό. Από ενεργειακή σκοπιά, μόνο οι δύο τελευταίες κατηγορίες ανήκουν στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας δεδομένου ότι δεν χρειάζονται μεγάλες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον για την κατασκευή τους, κάτι το οποίο θα οδηγούσε στην αλλοίωσή του.

Με βάση το ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης, τα υδροηλεκτρικά συστήματα ταξινομούνται σε:

- Μικρού μήκους με ωφέλιμο ύψος $H_u < 30m$.
- Μέσου ύψους με ωφέλιμο ύψος $30m < H_u < 150m$.
- Μεγάλου ύψους με ωφέλιμο ύψος $H_u > 150m$.

Τα υδροηλεκτρικά συστήματα μικρού ύψους πτώσεως αφορούν υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις με μικρούς ταμιευτήρες με συνέπεια μικρή ικανότητα ρύθμισης και μεγάλες φυσικές παροχές. Είναι συνήθως έργα πολλαπλής σκοπιμότητας. Αντίθετα, τα υδροηλεκτρικά συστήματα μέσου και μεγάλου ύψους πτώσεως χαρακτηρίζονται από μεγάλης χωρητικότητας ταμιευτήρες ετήσιας ή υπερετήσιας ρύθμισης και είναι απλής ή πολλαπλής σκοπιμότητας.

Με βάση την ύπαρξη του ταμιευτήρα, τα υδροηλεκτρικά συστήματα ταξινομούνται σε:

- Συστήματα με ταμιευτήρα
- Συστήματα με μικρό ταμιευτήρα για εξισορρόπηση
- Συστήματα χωρίς ταμιευτήρα

Τα έργα μέσου και μεγάλου ύψους περιλαμβάνουν συνήθως ταμιευτήρες μεγάλης χωρητικότητας. Στα έργα μέσου ύψους ο υδροστροβίλος είναι τοποθετημένος στην βάση του φράγματος του ταμιευτήρα. Εξέλιξη των συστημάτων με ταμιευτήρα αποτελούν τα υδροηλεκτρικά συστήματα αμφίδρομης λειτουργίας, τα οποία είναι τα πιο σύγχρονα τεχνολογικά και τα πιο κατάλληλα για την διαχείριση του φορτίου.

Με βάση την σκοπιμότητα του έργου, τα υδροηλεκτρικά συστήματα ταξινομούνται σε:

- Υδροηλεκτρικά απλής σκοπιμότητας που συνεπάγεται μόνο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Υδροηλεκτρικά πολλαπλής σκοπιμότητας όπως ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία κ.λπ.

Με βάση το είδος της εκμετάλλευσης του έργου, τα υδροηλεκτρικά συστήματα ταξινομούνται σε:



- Παλιρροιακές εγκαταστάσεις, οι οποίες στηρίζονται στην εκμετάλλευση του υδροδυναμικού που οφείλεται στο φαινόμενο της παλίρροιας
- Συμβατικές εγκαταστάσεις αξιοποίησης των παροχών ενός ποταμού
- Εγκαταστάσεις αντλήσεως – ταμιεύσεως με τις οποίες επιτυγχάνεται η μεταφορά του νερού από τον κάτω ταμιευτήρα στον ανάντη ταμιευτήρα μιας υδροδυναμικής εγκατάστασης. Για την επίτευξη αυτής της διαδικασίας οι υδροστρόβιλοι αυτής της εγκατάστασης λειτουργούν ως αντλίες και οι γεννήτριες ως κινητήρες. Το συνολικό κέρδος είναι η δημιουργία δυναμικού για την κάλυψη των φορτίων αιχμής. Τέλος, η καταναλισκόμενη ενέργεια για την άντληση προέρχεται συνήθως από την διαθέσιμη ενέργεια θερμοηλεκτρικού σταθμού ή από δευτερεύουσα ενέργεια άλλων υδροδυναμικών εγκαταστάσεων. Τέτοιες εγκαταστάσεις στην Ελλάδα είναι της Σφηκιάς – Ασωμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα και το συγκρότημα Θησαυρού – Πλατανόβρυσης στον ποταμό Νέστο.



2. Ταμιευτήρες.

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων έχει σαν στόχους την ικανοποίηση της ζήτησης των διαφόρων χρήσεων, την προστασία των υδατικών πόρων από την ρύπανση, την προστασία της περιοχής από τα ακραία υδρολογικά φαινόμενα όπως πλημμύρες ή ξηρασίες και την διατήρηση και αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Η απορροή αποτελεί την βασικότερη υδρολογική παράμετρο, για μια σειρά από έργα τα οποία γίνονται για την αξιοποίηση των υδάτινων πόρων (φράγματα, ταμιευτήρες κ.λπ.).

Η κατασκευή έργων για την καλύτερη αξιοποίηση των υδάτινων πόρων προϋποθέτει την γνώση των μετρήσεων των παροχών αρκετών ετών. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό και για αυτό τον λόγο η εκτίμηση της απορροής προϋποθέτει την επάρκεια στοιχείων βροχομετρικών, απορροής, φυτοκάλυψης, εδαφικών τύπων, ανάγλυφου, γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, στα οποία βασίζεται ο προσδιορισμός των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης.

Η αποθήκευση του νερού έχει ως σκοπό την χρονική ρύθμιση της ροής του νερού. Ένας ταμιευτήρας δηλαδή έχει την δυνατότητα να προσαρμόζει την κατανομή του νερού στις περιόδους περισσειών ή ελλειμμάτων νερού. Για παράδειγμα, κατά την διάρκεια του καλοκαιριού οι αρδευτικές ανάγκες είναι ιδιαίτερα αυξημένες και συνήθως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν, καθώς η φυσική παροχή του νερού του ποταμού είναι αρκετά χαμηλή αυτή την περίοδο. Για τον λόγο αυτό υπάρχει η ανάγκη της κατασκευής ενός ταμιευτήρα ο οποίος θα αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα νερού σε περιόδους υψηλής παροχής και κάνοντας την κατάλληλη ρύθμιση θα κρατάει το νερό για τις αρδευτικές ανάγκες.

Συμπερασματικά ένας ταμιευτήρας είναι συνήθως τεχνητός και έχει ως σκοπό την αποθήκευση νερού, το οποίο επιτυγχάνεται με την δημιουργία ενός φράγματος ή άλλου έργου ανάσχεσης και κύριος σκοπός του συνολικού αυτού έργου είναι η αποθήκευση του νερού, η ρύθμιση των φυσικών παροχών και η εξασφάλιση της επιθυμητής στάθμης για διάφορες χρήσεις όπως υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, αρδεύσεις, υδρεύσεις κ.λπ.

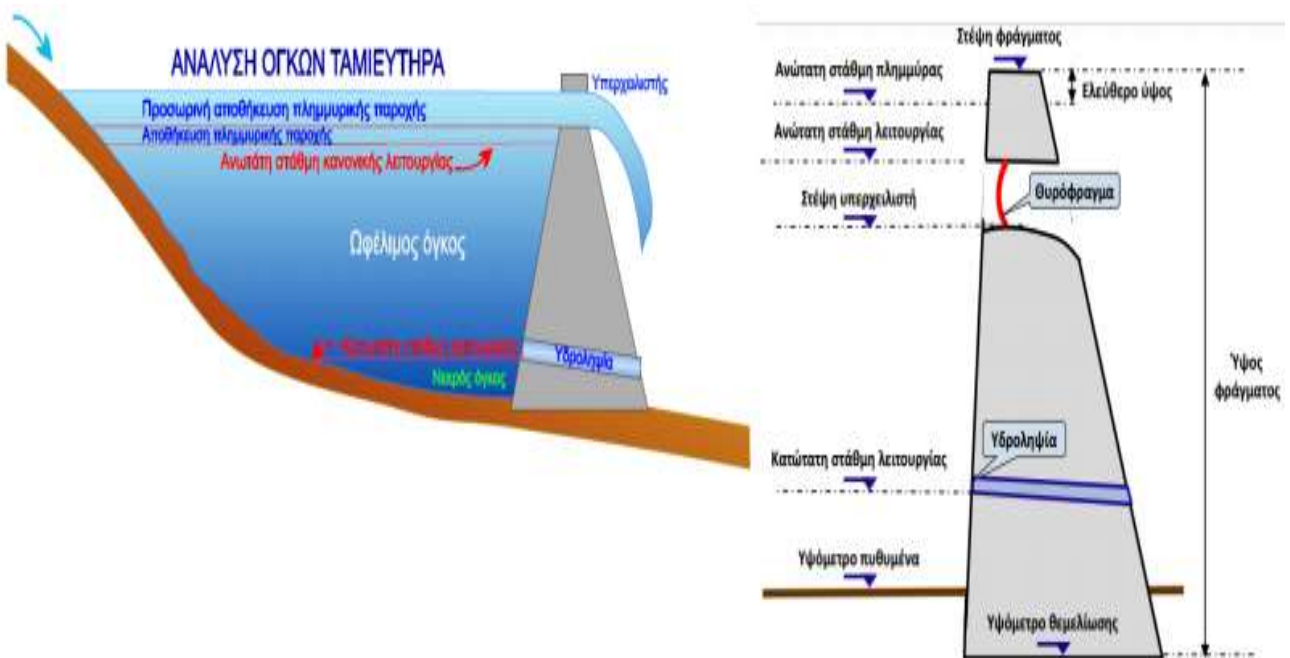
2.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία ταμιευτήρα.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ταμιευτήρα είναι η χωρητικότητά του. Για την κανονική λειτουργία του ταμιευτήρα κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός των παρακάτω χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα:

- Τον ελάχιστο όγκο νερού που μπορεί να έχει ο ταμιευτήρας. Αυτόν τον όγκο καθορίζει η ελάχιστη στάθμη λειτουργίας η οποία με την σειρά της καθορίζεται από την στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα. Όταν αναφερόμαστε στην ελάχιστη στάθμη εννοούμε ότι κάτω από αυτή την στάθμη δεν πρέπει να κατέβει το νερό, διότι σ' αυτή την περίπτωση επηρεάζεται η κανονική λειτουργία του ταμιευτήρα. Ο όγκος αποθήκευσης κάτω από την ελάχιστη στάθμη ονομάζεται νεκρός όγκος V_N (αδρανής χωρητικότητα). Ο νεκρός όγκος

περιλαμβάνει τα φερτά υλικά του ποταμού που εισρέουν στον ταμιευτήρα και εναποτίθενται λόγω της επιβράδυνσης μέχρι μηδενισμού της ταχύτητας ροής.

- Τον όγκο μεταξύ της ελάχιστης και κανονικής στάθμης λειτουργίας ο οποίος ονομάζεται ωφέλιμος όγκος V_{Ω} (ωφέλιμη χωρητικότητα). Όταν αναφερόμαστε στην κανονική στάθμη εννοούμε το μέγιστο υψόμετρο στο οποίο μπορεί να φθάσει το νερό κάτω από συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας του ταμιευτήρα.
- Τον όγκο μεταξύ της κανονικής στάθμης και της στάθμης υπερχειλίσσης που ονομάζεται πλημμυρικός όγκος V_{Π} (χωρητικότητα υπερχειλίσσης). Η στάθμη της υπερχειλίσσης είναι η μέγιστη στάθμη στην οποία προβλέπεται ότι θα φθάσει το νερό κατά την διάρκεια της αναμενόμενης μέγιστης πλημμύρας για την οποία παρέχει ασφάλεια στο έργο ο υπερχειλιστής. Πάνω από την στάθμη υπερχειλίσσης προστίθεται ένα ελεύθερο περιθώριο ασφαλείας (free board) και προκύπτει η στάθμη της στέψης του φράγματος.



Εικόνα 2.2 Ανάλυση όγκων ταμιευτήρα (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

Για τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό ενός ταμιευτήρα είναι αναγκαίος ο σχεδιασμός ορισμένων καμπύλων. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη υψόμετρου – επιφανείας αποτυπώνει την έκταση που θα καταλάβει ένας ταμιευτήρας με εμβαδομέτρηση της επιφάνειας που περικλείεται μέσα σε κάθε ισοϋψή. Η μέση επιφάνεια μεταξύ των δύο ισοϋψών, πολλαπλασιαζόμενη με την αντίστοιχη διαφορά υψόμετρου, δίνει τον όγκο που περιλαμβάνεται μεταξύ των δύο αυτών ισοϋψών. Η καμπύλη που δίνει την σχέση όγκου – υψόμετρου λέγεται καμπύλη υψόμετρου – χωρητικότητας. Η χρησιμότητα των παραπάνω καμπύλων είναι μεγάλη για την διερεύνηση του κατά πόσο ένας συγκεκριμένος όγκος νερού μπορεί να αποθηκευτεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή και πιο συγκεκριμένα στον υποψήφιο ταμιευτήρα.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ταμιευτήρα είναι ο προσδιορισμός της απόδοσής του (A) η οποία ορίζεται σαν τον λόγο της ποσότητας του νερού (V_i) που μπορεί ν' αποθηκεύσει ένας ταμιευτήρας κατά την διάρκεια μιας συγκεκριμένης



χρονικής περιόδου προς την συγκεκριμένη αυτή χρονική περίοδο (T). Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι η απόδοση ενός ταμιευτήρα εξαρτάται από την παροχή του ποταμού ο οποίος τροφοδοτεί τον ταμιευτήρα και μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η απόδοση του ταμιευτήρα δίνεται από την σχέση

$$A = \frac{V_j}{T} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \Delta t}{T} \quad (2.1)$$

όπου:

- A = απόδοση ταμιευτήρα
- Z_i = η απελευθέρωση νερού από τον ταμιευτήρα για την ικανοποίηση της ζήτησης
- Δt = χρονικό βήμα (μήνας, έτος κ.λπ.)
- N = το σύνολο των χρονικών βημάτων
- T = χρονική περίοδος ($N \cdot \Delta t$).

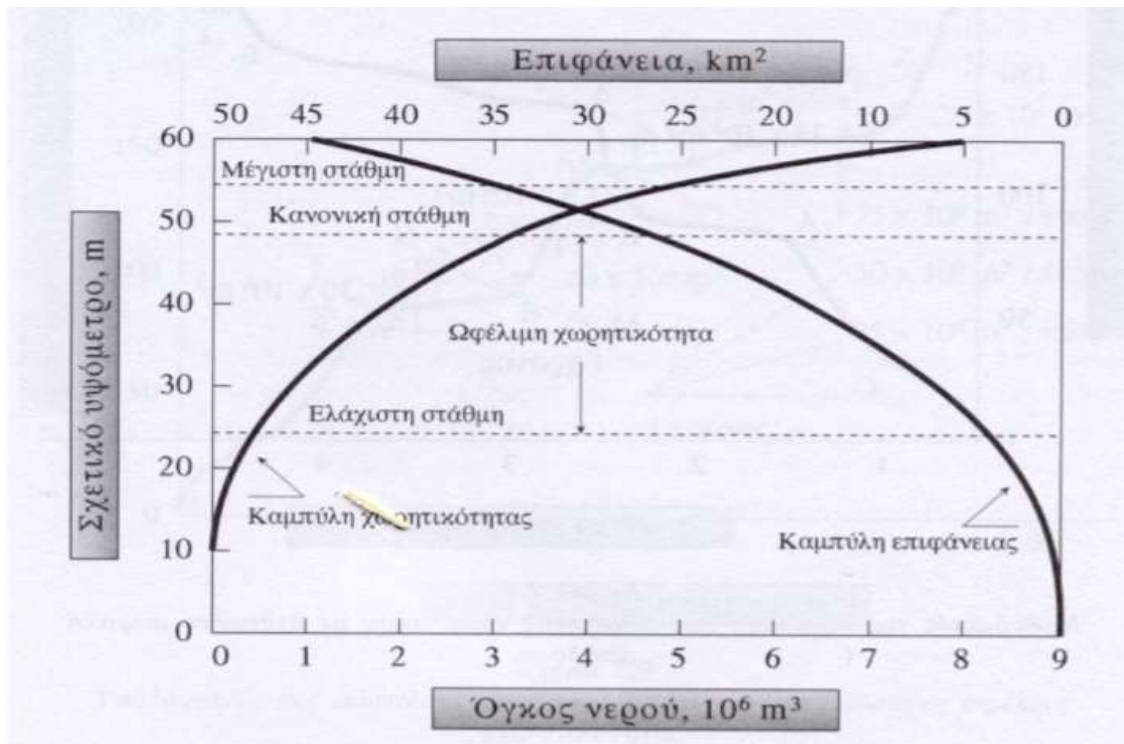
Στην περίπτωση που ένας ταμιευτήρας εξυπηρετεί έργα αρδευτικού σκοπού, μας ενδιαφέρει η ασφαλής απόδοση η οποία προσδιορίζει την μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί ο ταμιευτήρας να παρέχει κατά την διάρκεια μια κρίσιμης περιόδου ξηρασίας.

Τέλος, ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός ταμιευτήρα είναι ο βαθμός εκμετάλλευσης (α) που ορίζεται σαν τον λόγο του συνολικού όγκου ζήτησης (V_j) που μπορεί να προμηθεύσει ο ταμιευτήρας για ένα χρονικό διάστημα T ετών, προς τον συνολικό όγκο εισροής στον ταμιευτήρα (V_ε) για το ίδιο χρονικό διάστημα T ετών, και δίνεται από την σχέση

$$\alpha = \frac{V_j}{V_\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \Delta t}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t} \quad (2.2)$$

όπου:

- α = βαθμός εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα
- Z_i = απελευθέρωση νερού από τον ταμιευτήρα για την ικανοποίηση της ζήτησης
- Q_i = παροχή εισόδου στον ταμιευτήρα (εισροή)
- Δt = χρονικό βήμα (μήνας, έτος κ.λπ.)
- N = το σύνολο των χρονικών βημάτων.



Εικόνα 2.2: Καμπύλες σύνδεσης υψόμετρου, επιφάνειας και όγκου νερού (πηγή: Τμήμα Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων, ΤΕΙ Λάρισας)

2.2 Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα.

Ένας ταμιευτήρας μπορεί να παρουσιάζει απώλειες νερού λόγω εισροών και εκροών από αυτόν. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το ποσό νερού που απομένει στον ταμιευτήρα από τις διάφορες εισροές και εκροές ορίζουμε το υδατικό ισοζύγιο το οποίο δίνεται από την σχέση

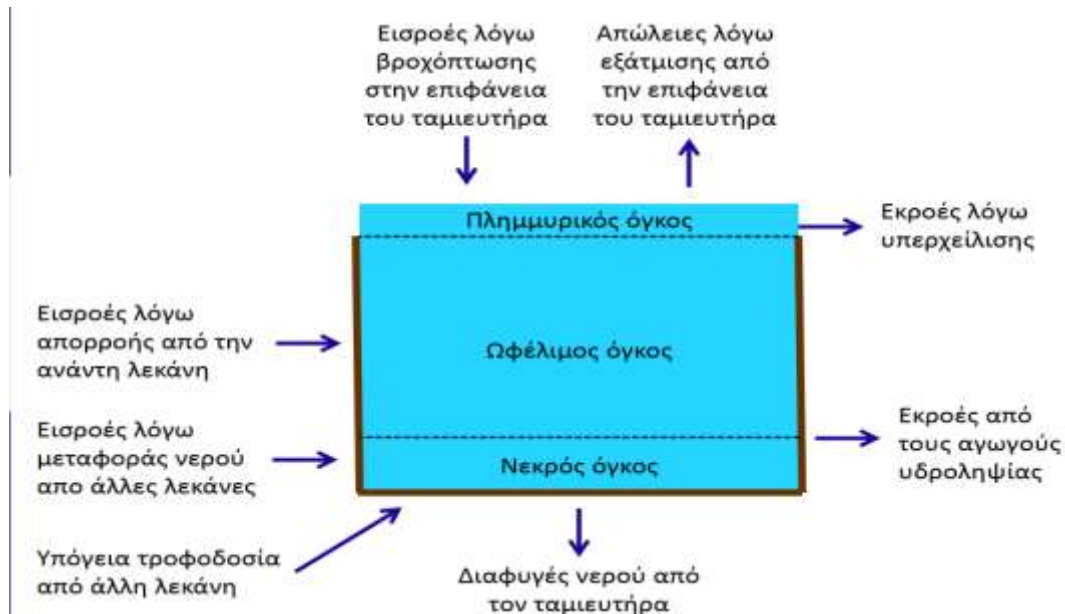
$$s_{t+\Delta t} = s_t + i_t + q_t + g_t + p_t - e_t - I_t - r_t - w_t \quad (2.3)$$

για διακριτό χρονικό διάστημα $(t, t+\Delta t)$, όπου:

- s_t = αποθηκευμένος όγκος νερού στην αρχή του χρονικού διαστήματος
- i_t = εισροές από την ανάντη λεκάνη (φυσική απορροή που παράγεται στην λεκάνη ή και ρυθμιζόμενες εκροές ανάντη ταμιευτήρα, εφόσον υπάρχει)
- q_t = μεταφορά (εκτροπή) νερού από άλλες λεκάνες
- g_t = υπόγεια τροφοδοσία από κοινά υδρογεωλογικά συστήματα
- p_t = όγκος βροχής που προσπίπτει στην επιφάνεια του ταμιευτήρα
- e_t = απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα
- I_t = απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών νερού (απώλειες από την λεκάνη κατάκλυσης, απώλειες διαμέσου του πυθμένα ή και του σώματος του φράγματος)
- r_t = ρυθμιζόμενες εκροές (απολήψεις) από τον ταμιευτήρα

- w_i = απώλειες λόγω υπερχειλίσης (εκροές νερού μέσω του υπερχειλιστή)

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου είναι πιο ακριβής όσο αυξάνουν η χρονική κλίμακα και το μέγεθος του ταμιευτήρα. Όλα τα παραπάνω γίνονται πιο κατανοητά με την ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2.3: Υδατικό Ισοζύγιο ταμιευτήρα (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

2.3 Κατηγορίες ταμιευτήρα.

Ένας ταμιευτήρας μπορεί να κατασκευαστεί για να εξυπηρετήσει κάποιες κύριες σκοπιμότητες, όπως αρδεύσεις, υδρεύσεις οικισμών, παροχή αντιπλημμυρικής προστασίας κ.λπ., και κάποιες δευτερεύουσες σκοπιμότητες, όπως εξυπηρέτηση θερμοηλεκτρικών σταθμών, ψυχαγωγία (τουρισμός, σπορ), ιχθυοτροφεία κ.λπ. Οι ταμιευτήρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την σκοπιμότητα κατασκευής τους. Έτσι έχουμε τις εξής κατηγορίες ταμιευτήρα:

- Απλής σκοπιμότητας
- Πολλαπλής σκοπιμότητας.

Οι ταμιευτήρες απλής σκοπιμότητας αφορούν κυρίως λειτουργίες όπως υδροδυναμική εκμετάλλευση, αντιπλημμυρική προστασία και αρδεύσεις ή υδρεύσεις οικισμών και δεν εντάσσονται συνήθως σε διασυνδεδεμένο υδραυλικό σύστημα ταμιευτήρων.

Οι ταμιευτήρες πολλαπλής σκοπιμότητας διακρίνονται στους ταμιευτήρες με ενιαίο ωφέλιμο όγκο για όλες τις προβλεπόμενες χρήσεις και στους ταμιευτήρες στους οποίους υπάρχει διαχωρισμός των ωφέλιμων όγκων. Λειτουργίες όπως οι υδροδυναμικές εκμεταλλεύσεις και οι υδρεύσεις – αρδεύσεις είναι συμβιβαστές μεταξύ τους ενώ η αντιπλημμυρική προστασία είναι ασυμβίβαστη με την υδροδυναμική εκμετάλλευση. Αυτό συμβαίνει διότι η αντιπλημμυρική προστασία



προϋποθέτει χαμηλές στάθμες νερού ενώ η υδροδυναμική εκμετάλλευση υψηλές. Οι πολλαπλές σκοπιμότητες συνήθως ανεβάζουν την μέγιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα και κατ' επέκταση και το μέγιστο ύψος αλλά και το κόστος κατασκευής του αντίστοιχου φράγματος που βοηθά στην αποθήκευση μεγάλης ποσότητας νερού.

Η κατασκευή ενός ταμιευτήρα μπορεί να έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλές σκοπιμότητες, ωστόσο η δημιουργία ενός ταμιευτήρα προκαλεί μεγάλες αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση της φυσικής υδρολογικής δίαιτας του ποταμού (εξομάλυνση ροών, μειωμένη συχνότητα και μέγεθος πλημμυρικών παροχών). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η παροχή του νερού σ' ένα μεγάλο μέρος του ποταμού, το οποίο βρίσκεται κατάντη του έργου, και έχει αρνητικές επιπτώσεις για την χλωρίδα και την πανίδα. Επιπλέον, παρατηρείται συγκράτηση φερτών κατά την κατασκευή του ταμιευτήρα και πρόκειται για μη αναστρέψιμη επίπτωση. Τέλος, είναι πιθανό να προκαλείται αισθητική όχληση σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων στάθμης (αποκάλυψη « νεκρής ζώνης »).



3. Φράγματα.

Φράγματα ή υδατοφράκτες ονομάζονται τα τεχνικά έργα που κατασκευάζονται εγκάρσια σε μια διατομή ενός υδατορρεύματος με σκοπό την δημιουργία μιας τεχνητής λίμνης. Οι στόχοι της κατασκευής ενός φράγματος είναι οι εξής:

- Δημιουργία ταμιευτήρα νερού, ο οποίος δημιουργεί αποθέματα νερού για να ανταπεξέλθει στις ενεργειακές ανάγκες που προκύπτουν κατά την χρονική περίοδο που παρατηρούνται αυξομειώσεις στην παροχή του ποταμού.
- Αύξηση του ύψους πτώσης η οποία είναι σημαντική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μ' αυτό τον τρόπο αυξάνεται η δυναμική και κατ' επέκταση η κινητική ενέργεια του νερού, μέσω της αύξησης της στάθμης στον ταμιευτήρα νερού.
- Ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής του ποταμού καθώς το φράγμα εμποδίζει την αρκετά αυξημένη παροχή του ποταμού να κατακλύσει τις γύρω περιοχές.
- Άρδευση και ύδρευση μέσω αρδευτικών και δικτύων ύδρευσης

Η κατασκευή των φραγμάτων έχει μεγάλο αρχικό κόστος που όμως έχει μεγάλη οικονομική απόδοση σε βάθος χρόνου και για αυτό κρίνεται ιδιαίτερα προσοδοφόρα. Ο χρόνος κατασκευής ενός φράγματος είναι αρκετά μεγάλος (της τάξεως 3 – 8 ετών) και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την προσβασιμότητα του πεδίου. Σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή μεγάλων φραγμάτων, φράγματα θεωρούνται οι κατασκευές ύψους τουλάχιστον 15m για οποιαδήποτε χωρητικότητα τεχνητής λίμνης.

Η κατασκευή ενός φράγματος μελετάται και κατασκευάζεται ανάλογα με τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει. Το φράγμα κατασκευάζεται σε κατάλληλο σημείο της κοίτης του ποταμού που επιλέγεται σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια:

- Ευκολία κατασκευής: μικρό πλάτος, ευκολία θεμελίωσης
- Δημιουργία μεγάλης χωρητικότητας ταμιευτήρα σε υδατοστεγές υπέδαφος
- Σχηματισμός μεγάλης υδραυλικής πτώσης
- Κόστος: προσβασιμότητα, ευρύτερο οδικό δίκτυο περιοχής
- Μικρό μήκος αγωγού προσαγωγής και σήραγγας εκτροπής του ποταμού κατά την κατασκευή

Η επιλογή της θέσης του φράγματος καθορίζει ως ένα βαθμό και τον τύπο του φράγματος: από οπλισμένο σκυρόδεμα ευθύγραμμο για σχετικά μικρά ύψη ή τοξωτό για μεσαία και μεγάλα ύψη ή χωμάτινο.

Η κατασκευή ενός φράγματος, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας τεχνητής λίμνης, δημιουργεί διαταραχές στο φυσικό περιβάλλον, μεγαλύτερες από οποιοδήποτε άλλο έργο, γιατί στην περιοχή που κατακλύζεται από το νερό του ποταμού (τεχνητή λίμνη) συσσωρεύονται τεράστιες ποσότητες νερού με αποτέλεσμα το υπέδαφος να καταπονείται από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις (πιθανή πρόκληση σεισμών ή ρηγμάτων). Εκτός όμως από τις πιέσεις, οι μεγάλες ποσότητες νερού δημιουργούν προβλήματα διαβρώσεων, διαρροών ή ακόμη και κατολισθήσεων στην περιοχή του φράγματος, που αν δεν προβλεφθούν για να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα μπορεί να οδηγήσουν στην καταστροφή του.

Τα σημαντικότερα αίτια καταστροφής των φραγμάτων ανά τον κόσμο είναι:

- Ανεπαρκής μελέτη των γεωλογικών συνθηκών της περιοχής του φράγματος



- Μελετητικό λάθος
- Κατασκευαστικό λάθος
- Απρόβλεπτης έντασης και έκτασης βροχόπτωσης
- Σεισμός μεγάλης έντασης.

3.1 Τύποι φραγμάτων.

Τα φράγματα ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τα άκαμπτα φράγματα, τα οποία είναι κατασκευασμένα από μπετόν ή λιθοδομή. Τέτοια φράγματα είναι τα φράγματα βαρύτητας, τα αντηριδωτά και τα τοξωτά.
- Τα φράγματα επιχώσεως με χύδην υλικό, όπως τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα.

Τα άκαμπτα φράγματα κατασκευάζονται συνήθως από σκυρόδεμα και θεμελιώνονται σε υγιή βράχο με προβλεπόμενες ελαστικές παραμορφώσεις ή οριακά πλαστικές. Το σώμα του φράγματος είναι συνήθως ομογενές.

Οι μεγάλες παραμορφώσεις και ρηγματώσεις δημιουργούν αστοχίες στην θεμελίωση της κατασκευής του φράγματος με αποτέλεσμα την πρόκληση αστοχίας σε ολόκληρο το έργο.

Ανάλογα με την στατική τους λειτουργία τα φράγματα αυτά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Κατασκευές με άξονα ευθύγραμμο που διαιρούνται σε κατακόρυφα τμήματα και στατικώς ανεξάρτητα.
- Κατασκευές με άξονα καμπύλο με μονολιθική στατική λειτουργία ώστε οι τάσεις να μεταβιβάζονται στα ακρόβαθρα.

Στα φράγματα με άξονα ευθύγραμμο ανήκουν τα λεγόμενα φράγματα βαρύτητας καθώς και διάφορες άλλες παραλλαγές, όπως τα αντηριδωτά, όπου υπάρχει προσπάθεια για ελάφρυνση της όλης κατασκευής.

Τα φράγματα βαρύτητας κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν στις πιέσεις του νερού, με μόνο στοιχείο το μεγάλο βάρος τους. Η χάραξη του φράγματος σε οριζοντογραφία μπορεί να είναι ευθύγραμμη ή καμπύλη, ανάλογα με την τοπογραφική διαμόρφωση της περιοχής και τις λειτουργικές ανάγκες. Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα φράγμα βαρύτητας είναι:

- Το βάρος του φράγματος B το οποίο αποτελεί την μεγαλύτερη σε μέτρο κατακόρυφη δύναμη και μπορεί να αντισταθμίσει τις άλλες δυνάμεις που ασκούνται σε κατακόρυφο άξονα και τείνουν να ανατρέψουν το φράγμα.
- Η πίεση του νερού P που πρόκειται για την συνισταμένη δύναμη που ασκείται στην κατακόρυφη πλευρά του φράγματος. Όταν το φράγμα στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζει μία κλίση και δεν είναι οριζόντιο, τότε η πίεση του νερού αναλύεται σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες. Έτσι θα έχουμε δύο πιέσεις, την οριζόντια P_1 και την κατακόρυφη P_2 .
- Η άνωση A που οφείλεται στην υποπίεση του νερού που διηθείται κάτω από το φράγμα. Η δύναμη της άνωσης υπάρχει πάντα ανεξάρτητα από τα μέτρα στεγανοποίησης που λαμβάνονται.

- Η πίεση των φερτών υλικών η οποία είναι μικρή και δεν επηρεάζει σημαντικά την ισορροπία του φράγματος. Ο όγκος των μεταφερόμενων υλικών (στερεοπαροχή) από τον ποταμό που τροφοδοτεί την τεχνητή λίμνη (ταμιευτήρα) πρέπει να υπολογίζεται (πίεση φερτών υλικών), γιατί επηρεάζει τον όγκο της με τις συνεχείς αποθέσεις.
 - Η πίεση των πάγων.
 - Σεισμική πίεση του νερού που προκαλείται από τις σεισμικές δονήσεις.
- Η σταθερότητα του όλου έργου χαρακτηρίζεται από την ασφάλεια σε ανατροπή και ολίσθηση.



Εικόνα 3.1: Φράγμα Λούρου, Πρέβεζα (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων)

Στα φράγματα με άξονα καμπύλο ανήκουν τα λεγόμενα τοξωτά φράγματα. Τα φράγματα αυτά σε κάτοψη έχουν τοξοειδή μορφή. Η πίεση του νερού εφαρμόζεται στην κυρτή επιφάνεια του φράγματος από την οποία μεταβιβάζεται στις όχθες του ρεύματος. Τα θολωτά φράγματα κατασκευάζονται με τα κοίλα στραμμένα προς τα κατάντη και το όλο έργο υπόκειται σε τάσεις θλίψης. Η διατομή ενός θολωτού

φράγματος είναι λεπτή και μπορεί να φτάσει το 60% του όγκου ενός αντίστοιχου φράγματος βαρύτητας.

Από πλευράς υπολογισμού ένα θολωτό φράγμα είναι μια πλάκα απλής ή σε πολλές περιπτώσεις διπλής καμπυλότητας, μικρού πάχους, πακτωμένη στις δύο στηρίξεις της. Βασική αρχή για τον υπολογισμό ενός θολωτού φράγματος είναι η αποκοπή του σε σειρές οριζόντιων και κατακόρυφων τόξων και η αυτοτελής στατική μελέτη του κάθε τόξου σαν να μην υπήρχε σύνδεση του ενός τόξου με το προηγούμενό του.

Το άνοιγμα του θόλου προκύπτει από την παραδοχή ότι το ελάχιστο κόστος κατασκευής αντιστοιχεί στον ελάχιστο όγκο του φράγματος, κι αυτός είναι ελάχιστος αν η επίκεντρη γωνία είναι περίπου ίση με 120° . Στην επιλογή της μορφής του θόλου παίζει ρόλο και η μορφή της κοιλάδας μέσα στην οποία θα κατασκευαστεί το φράγμα. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η κατασκευή θολωτών φραγμάτων επιβάλλεται σε περιπτώσεις που η κοιλάδα έχει απότομες κλίσεις και το φράγμα πρέπει να γίνει ψηλό, γιατί η κατασκευή οποιασδήποτε άλλης μορφής φράγματος, θα απαιτούσε υπερβολικά μεγάλο πλάτος βάσης και φυσικού όγκου.



Εικόνα 3.2: Φράγμα Ταυρωπού, Καρδίτσα (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων)

Τα φράγματα επιχώσεως περιλαμβάνουν τα χωμάτινα και τα λιθόρριπτα φράγματα. Αποτελούνται από κυρίως σώμα με υλικό χώμα ή λιθορριπτή, υδατοπερατό και από έναν κεντρικό πυρήνα αδιαπέρατο ή από ένα στρώμα αδιαπέρατο που τοποθετείται στην ανάντη πλευρά του φράγματος.

Τα χωμάτινα φράγματα προτιμούνται στις περιπτώσεις που δεν απαιτείται μεγάλου ύψους και μήκους φράγματα και σε περιπτώσεις όχι καλού εδάφους



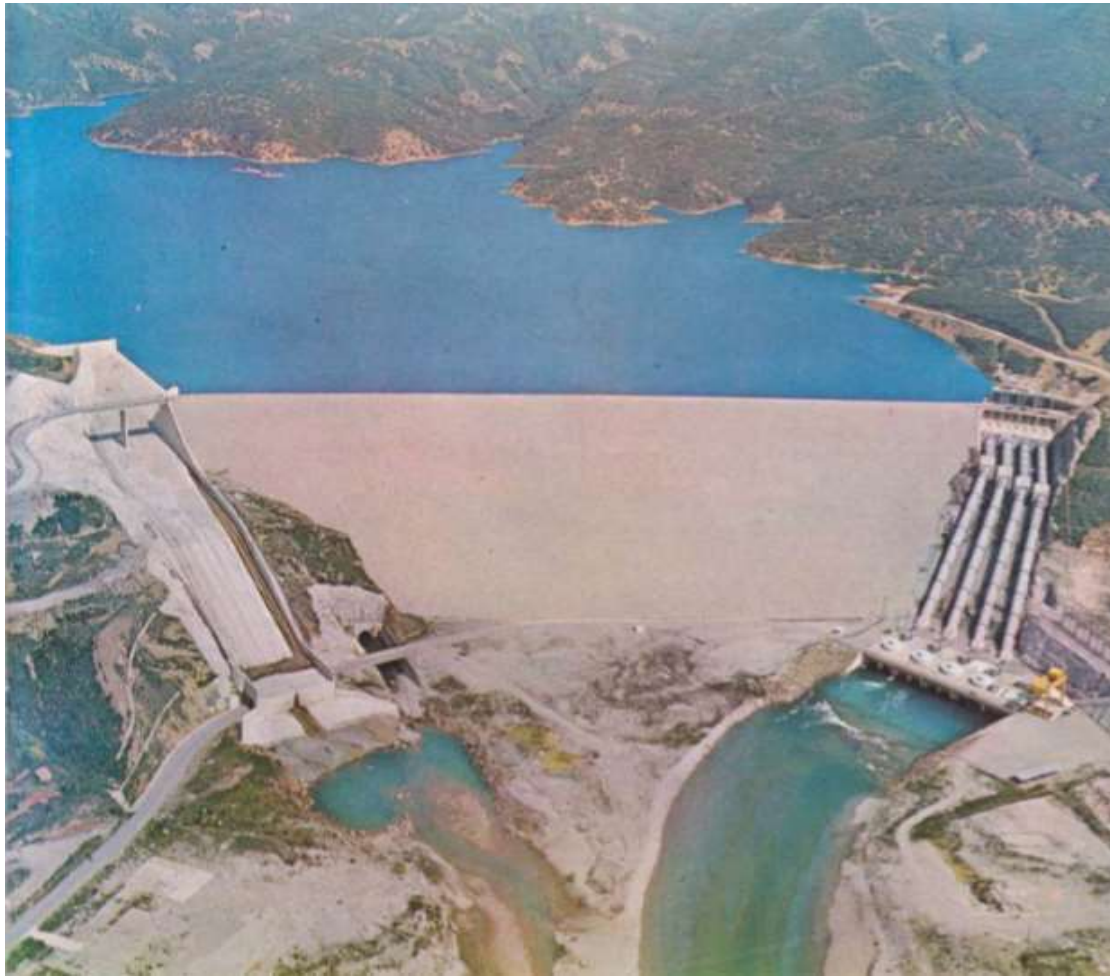
θεμελίωσης, όπου ενδείκνυται η εύκαμπτη κατασκευή από γαιώδη υλικά που μπορούν να παραμορφωθούν και να παρακολουθήσουν μικρές μετακινήσεις της θεμελίωσης χωρίς να διαταραχθεί η συνοχή τους.

Τα χωμάτινα φράγματα είναι οικονομικότερα από τα φράγματα από σκυρόδεμα, εκτός από ειδικές περιπτώσεις που οι προμήθειες με τα κατάλληλα γαιώδη υλικά όπως ο άργιλος βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση. Ο όγκος ενός χωμάτινου φράγματος είναι τεράστιος και η μεταφορά των ποσοτήτων αυτών επιβαρύνουν οικονομικά το έργο. Επιπλέον, τα γαιώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του χωμάτινου φράγματος παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα. Η στεγανότητα του φράγματος επιτυγχάνεται με την κατασκευή του αδιαπέρατου πυρήνα από άργιλο. Ο πυρήνας εκτείνεται περισσότερο ή λιγότερο μέσα στο έδαφος ενώ στην συνέχεια και μέχρι το αδιαπέρατο στρώμα κατασκευάζεται διάφραγμα διακοπής της υπόγειας ροής με πασσάλους, τσιμεντενέσεις και εγχύσεις τσιμέντου. Ο πυρήνας δεν κατασκευάζεται πάντα κατακόρυφος κατά την έννοια της διατομής αλλά και κεκλιμένος. Τα πρηνή προστατεύονται από την διαβρωτική επίδραση των κυματισμών της λίμνης με ειδική επίστρωση από λιθορριπή, που έχει πάχος 0.5 – 1.0m. Η υψομετρική τοποθέτηση της στέψης του φράγματος είναι θέμα μελέτης. Μπορούμε όμως να πούμε ότι τοποθετείται τουλάχιστον 3.0m επάνω από την ανώτατη στάθμη του νερού για να αποφευχθεί τυχόν υπερχειλίση κάτι το οποίο θα είχε καταστρεπτικές συνέπειες για το κατάντη πρηνές και φυσικά για το ίδιο το φράγμα.

Τα χωμάτινα φράγματα υπερτερούν των υπόλοιπων τύπων φραγμάτων καθώς μπορούν να θεμελιωθούν σε έδαφος το οποίο δεν είναι πάντα καλό. Για μικρά φράγματα (ύψους 3 – 5m) η μελέτη θεμελίωσης περιορίζεται σε μερικές γεωτρήσεις μικρού βάθους με τις οποίες διαπιστώνεται η φύση του υπεδάφους. Το υπεδάφος και το έδαφος θεμελίωσης κρίνονται ικανοποιητικά για την θεμελίωση αν δεν παρουσιάζουν αργιλώδη στρώματα, στρώματα με ρωγμές, ασταθή εδάφη (κατολισθαίνοντα) και εδάφη έντονα διαπερατά.

Τα πρακτικά κριτήρια για την ασφάλεια ενός χωμάτινου φράγματος μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

- Δεν πρέπει να υπάρχει κίνδυνος υπερχειλίσης του φράγματος. Οι διαστάσεις και ο σχεδιασμός του υπερχειλιστή πρέπει να μπορούν να παραλάβουν όλες τις πιθανές αιχμές πλημμύρας.
- Η γραμμή κορεσμού, δηλαδή η επιφάνεια μεταξύ του ξερού τμήματος του φράγματος και του κορεσμένου ή με άλλα λόγια η επιφάνεια στην οποία θα βρίσκαμε νερό αν ανοίγαμε γεωτρήσεις στο σώμα του φράγματος, πρέπει να βρίσκεται μέσα στο φράγμα.
- Η κλίση του ανάντη και του κατάντη πρηνούς να είναι μικρή.
- Το νερό που περνά μέσα και κάτω από το φράγμα που απορρέει προς τα κατάντη να έχει πολύ μικρή ταχύτητα, ανίκανη να παρασύρει και να μεταφέρει υλικά από την κατασκευή προς τα κάτω.
- Το ανάντη πρηνές να προστατευθεί σε ικανοποιητικό βαθμό (επένδυση με λιθορριπή, συρματοπλεκτα κιβώτια κ.λπ.) απέναντι στην δράση των κυμάτων της λίμνης και το κατάντη να προστατευθεί επίσης από την διαβρωτική επίδραση της βροχής.



Εικόνα 3.3: Φράγμα Καστρακίου, Αιτωλοακαρνανία (πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων)



4. Βοηθητικά τεχνικά έργα.

Για την σωστή λειτουργία και εξασφάλιση ενός φράγματος κατασκευάζονται βοηθητικά τεχνικά έργα τα οποία αναλύονται παρακάτω.

➤ Υπερχειλιστής

Είναι μια διάταξη από όπου εξέρχεται το νερό που πλεονάζει καθώς και η οικολογική παροχή. Με τον όρο οικολογική παροχή εννοούμε την ελάχιστη παροχή που θα πρέπει να διαρρέει έναν ποταμό έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η χλωρίδα και η πανίδα του. Ο υπερχειλιστής έχει την μορφή ενός αγωγού ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σώμα του φράγματος ή είναι μια διαμόρφωση στο ανώτερο σημείο του φράγματος. Γενικός σκοπός του υπερχειλιστή είναι να αποδεσμεύσει το νερό σε περίπτωση που ανέβει η στάθμη του υπερβολικά λόγω μεγάλης παροχής του ποταμού ή υψηλής βροχόπτωσης.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο υπερχειλιστής είναι ουσιαστικά μια δικλείδα ασφαλείας η οποία έχει ως σκοπό να διατηρεί την στάθμη του νερού σε προκαθορισμένα επίπεδα. Η μορφή του υπερχειλιστή εξαρτάται από την ασφάλεια και την προστασία που προϋποθέτει ο εκάστοτε τύπος φράγματος, την θέση του, τις τοπικές συνθήκες και την μέγιστη πλημμυρική παροχή. Για παράδειγμα, στα φράγματα τα οποία κατασκευάζονται από σκυρόδεμα η πιο οικονομική λύση είναι η τοποθέτηση του υπερχειλιστή μέσα στο φράγμα, ενώ στα χωμάτινα που αποφεύγεται αυτή η λύση είναι δυνατή η κατασκευή του υπερχειλιστή πλευρικά ή κάτω από το φράγμα (σπανιότερα). Γενικά, η πιο συνηθισμένη θέση του υπερχειλιστή είναι δεξιά ή αριστερά του φράγματος.

Για τον πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό ενός υπερχειλιστή είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός κάποιων ορισμένων βασικών του στοιχείων:

- Η ικανότητα του υπερχειλιστή να παραλάβει την απαιτούμενη παροχή. Η ικανότητα αυτή πρέπει να προσδιοριστεί με τρόπο σαφή με βάση την δυνατότητα παροχέτευσης της μέγιστης δυνατής πλημμύρας για να αποφεύγεται η ανύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα πάνω από το επιτρεπτό όριο. Το επιτρεπόμενο αυτό όριο προσδιορίζεται από την πλημμυρική παροχή του ποταμού και προκύπτει από τα υδρογραφήματα του ποταμού και τα υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης.
- Η στάθμη της στέψης του υπερχειλιστή, η οποία μπορεί να είναι ελεύθερη ή ελεγχόμενη. Η στέψη του υπερχειλιστή μπορεί να ελευθερώσει το νερό όταν η στάθμη του ταμιευτήρα ανεβαίνει από την στέψη του υπερχειλιστή ή όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο με το άνοιγμα των θυρών στην στέψη.
- Οι εγκαταστάσεις ελέγχου υπερχείλισης από τις οποίες οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι περιστρεφόμενες, κατακλινόμενες και οι κατακόρυφες ανυψούμενες θύρες.

Οι τύποι ενός υπερχειλιστή είναι οι εξής:

- Ελεύθερος υπερχειλιστής στον οποίο το νερό υπερχειλίζει την στέψη και διέρχεται μέσα από έναν αγωγό ο οποίος είναι συνήθως ανοικτός ορθογωνικής διατομής και είναι κατασκευασμένος από σκυρόδεμα.



Εικόνα 4.1: Μετωπικός Υπερχειλιστής (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

- Πλευρικός υπερχειλιστής στον οποίο το νερό περνά από την στέψη πλαϊνού τεχνικού έργου και διέρχεται μέσα από έναν αγωγό που κατασκευάζεται παράλληλα στην στέψη του υπερχειλιστή. Ο πλευρικός υπερχειλιστής εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στενών κοιλάδων που δεν μπορεί ν' αναπτυχθεί η στέψη σε μεγάλο μήκος.



Εικόνα 4.2: Πλευρικός Υπερχειλιστής, Φράγμα Καστρακίου (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)



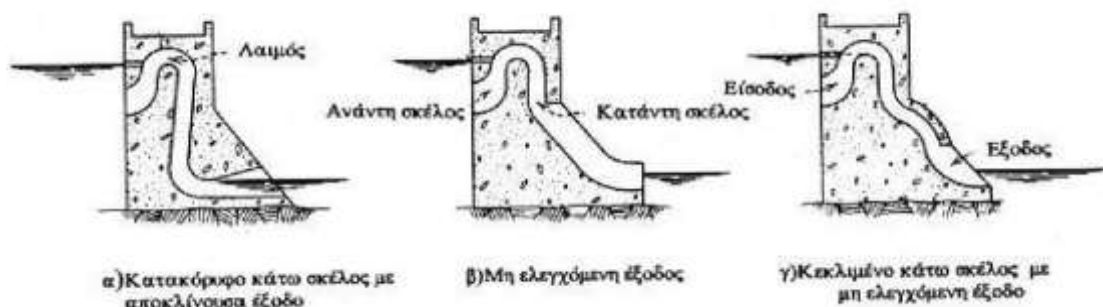
Εικόνα 4.3: Πλευρικός Υπερχειλιστής, Φράγμα Καστρακίου (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

- Φρεατοειδής υπερχειλιστής στον οποίο το νερό διέρχεται μέσα από ένα κατακόρυφο φρέατιο και οδηγείται κατόντη του φράγματος. Η χρήση ενός τέτοιου υπερχειλιστή προτιμάται όταν κανένας άλλος από τους προηγούμενους υπερχειλιστές δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις εκάστοτε συνθήκες οι οποίες κυρίως αναφέρονται σε χαμηλά φράγματα. Το κατακόρυφο τμήμα ενός φρεατοειδούς υπερχειλιστή κατασκευάζεται από σκυρόδεμα οπλισμένο ή από μεταλλική κατασκευή. Το χείλος του φρέατος είναι διπλατυσμένο σχετικά με την υπόλοιπη κατασκευή (χοάνη). Το οριζόντιο τμήμα του υπερχειλιστή αποτελείται κυρίως από σήραγγα που ανοίγεται πλευρικά του φράγματος. Ο υπερχειλιστής δουλεύει με μικρή πλήρωση και το νερό μπαίνει περιμετρικά από το χείλος του κατακόρυφου αγωγού. Όσο το φορτίο αυξάνει, το πάχος του νερού που υπερχειλίζει αυξάνει με αποτέλεσμα ο αγωγός να δουλεύει σαν ανοιχτός (ελεύθερη ροή νερού) ή με πλήρη γέμιση. Όταν το φορτίο είναι πολύ μεγάλο, το στόμιο του υπερχειλιστή είναι βυθισμένο. Η αύξηση του φορτίου πάνω από το όριο αυτό δεν έχει σαν συνέπεια ανάλογη αύξηση της απορρέουσας παροχής. Ο ακριβής υπολογισμός της οριακής παροχής δεν είναι εύκολος με αναλυτικές σχέσεις και συνήθως βρίσκεται με εργαστηριακές έρευνες σε ομοιώματα.



Εικόνα 4.4: Φρεατοειδής υπερχειλιστής (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)

- Υπερχειλιστής μορφής σίφωνα ο οποίος χρησιμοποιείται όταν η ποσότητα υπερχειλίσης δεν είναι πολύ μεγάλη. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του τύπου υπερχειλιστή είναι ότι η υπερχειλίση γίνεται αυτόματα. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η διακοπή της ροής λόγω της συγκέντρωσης αέρα στο ανώτερο σημείο του σίφωνα, το οποίο αντιμετωπίζεται με την κατασκευή αεροεξαγωγού. Ο αεροεξαγωγός όμως χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο της σιφωνοειδούς δράσης του υπερχειλιστή. Έτσι, όταν το επίπεδο της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, κατέβει κάτω από το κανονικό επίπεδο, εισέρχεται αέρας στο σίφωνα και διακόπτεται η σιφωνοειδής λειτουργία. Η είσοδος του σίφωνα τοποθετείται αρκετά κάτω από το κανονικό επίπεδο της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα, για να αποφεύγεται η εισαγωγή πάγου, κορμών δέντρων και η δημιουργία στροβίλων που διακόπτουν την λειτουργία του σίφωνα.



Εικόνα 4.5: Σιφωνοειδής Υπερχειλιστής (πηγή: Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης)



Τα σύγχρονα φράγματα έχουν μεγάλο ύψος και μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες νερού. Το νερό που εξέρχεται από τον υπερχειλιστή έχει ταχύτητα συνήθως μεγαλύτερη από 15m/s και άρα η ισχύς που παράγεται κατά την έξοδο είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διάβρωση τόσο της κοίτης του ποταμού όσο και του ίδιου του φράγματος στο κατάντη μέρος, καθώς επίσης και την ελαχιστοποίηση της υποσκαφής. Για την αποφυγή όλων των προηγουμένων θα πρέπει να μειωθεί η ενέργεια του νερού κατά την έξοδο του και αυτό επιτυγχάνεται με την παρεμβολή στη ροή του εξέρχοντος νερού, διατάξεων που εξασφαλίζουν συνθήκες ηρεμίας στον αποδέκτη ποταμό μέσω της μείωσης της ενέργειας. Τέτοιες διατάξεις που εξυπηρετούν αυτό τον σκοπό είναι η λεκάνη ηρεμίας που κατασκευάζεται στην έξοδο του νερού από τον αγωγό και μειώνει την κινητική ενέργεια του νερού με την δημιουργία του υδραυλικού άλματος και τα ανεστραμμένα άκρα σε συνδυασμό με την λεκάνη απομόνωσης ή ηρεμίας.

➤ Σήραγγα εκτροπής

Η σήραγγα εκτροπής έχει ως σκοπό την διευκόλυνση της κατασκευής ενός φράγματος. Επιπλέον, κατά την λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος συμβάλλει στο έργο του υπερχειλιστή, με την απελευθέρωση πλεοναζόντων ποσοτήτων νερού, οι οποίες οφείλονται κυρίως σε έντονες βροχοπτώσεις και επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία του υδροηλεκτρικού.

Είναι γεγονός ότι η κατασκευή ενός φράγματος έρχεται αντιμέτωπη με ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα. Το πρόβλημα αυτό αφορά την φυσική ροή ενός ποταμού η οποία είναι και αυτή που δυσκολεύει το έργο της κατασκευής. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος κατασκευάζεται μία σήραγγα η οποία εκτρέπει την φυσική ροή του ποταμού έτσι ώστε να παρακάμψει την περιοχή κατασκευής του φράγματος. Εκτός της ροής του ποταμού, υπάρχουν και υπόγεια νερά τα οποία δυσκολεύουν εξίσου την κατασκευή και το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται επίσης με την σήραγγα εκτροπής. Συνεπώς, για να ξεκινήσει η κατασκευή ενός φράγματος θα πρέπει να αδειάσει η περιοχή από τα νερά του ποταμού ή τα υπόγεια νερά. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Με την κατασκευή της σήραγγας εκτροπής πριν από την κατασκευή του φράγματος. Μέσα από τη σήραγγα θα διέρχεται όλη η παροχή του ρεύματος, αφού δημιουργηθεί λίγο πιο κάτω από το στόμιο της σήραγγας μικρό ανασχετικό φράγμα. Με αυτό τον τρόπο η περιοχή κατασκευής του φράγματος θα διατηρείται ξηρή. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών του φράγματος, η σήραγγα εκτροπής λειτουργεί σαν εκκενωτής στην περίπτωση που χρειάζεται να αποδεσμευτεί μεγάλη ποσότητα νερού, βοηθώντας το έργο του υπερχειλιστή. Τέλος, λίγο πριν την έξοδο της σήραγγας στο κάτω μέρος, κατασκευάζεται πολλές φορές ένα προφράγμα για την αποφυγή της αναστροφής της ροής κατά τις εκσκαφές των θεμελίων.
- Με την σταδιακή κατασκευή του φράγματος. Αρχικά, κατασκευάζεται ένα δακτυλιοειδές μικρό φράγμα το οποίο απομονώνει ένα μέρος της κοίτης του ποταμού ώστε να μην επηρεάζεται από την ροή. Στο χώρο αυτό κατασκευάζεται το πρώτο μισό του φράγματος. Έπειτα, στο άλλο μισό της κοίτης του ποταμού



δημιουργείται ένα περιμετρικό δακτυλιοειδές φράγμα το οποίο συνδέεται με την μέχρι τότε κατασκευή και απομονώνει την περιοχή. Στην φάση αυτή, το νερό διέρχεται από τον εκκενωτή και έτσι αδειάζει τελείως η περιοχή αυτή, με τελικό αποτέλεσμα να καθίσταται εφικτή η κατασκευή και του δεύτερου μισού του φράγματος.

➤ **Εκκενωτής πυθμένα**

Ο εκκενωτής πυθμένα είναι ο αγωγός με τον οποίο εκκενώνεται ο ταμιευτήρας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή συντήρησης. Επιπλέον, μέσα από τον εκκενωτή διοχετεύεται η απαιτούμενη παροχή συντήρησης της κοίτης του ποταμού. Ο εκκενωτής πυθμένα τοποθετείται στο χαμηλότερο μέρος του ταμιευτήρα και δουλεύει πάντοτε υπό πίεση. Αποτελείται από το στόμιο εισόδου, τον αγωγό, τις θυρίδες, τις δικλείδες ασφαλείας και το έργο εξόδου. Το στόμιο εισόδου είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός στροβίλων κατά την είσοδο του νερού στον αγωγό. Η διατομή του αγωγού υπολογίζεται με βάση τις ποσότητες νερού που θα διέλθουν μέσα από τον αγωγό και την ταχύτητα ροής. Επιπρόσθετα, οι θυρίδες καθώς και οι δικλείδες ασφαλείας τοποθετούνται σε ειδικό θάλαμο σε κατάλληλη θέση ώστε να είναι επισκέψιμες σε περιπτώσεις συντήρησης. Τέλος, η χάραξη του αγωγού θα πρέπει να είναι όσο κατά το δυνατόν ευθύγραμμη.

➤ **Υδροληψία**

Η υδροληψία πρόκειται για το σημείο στο οποίο το νερό εισέρχεται στον αγωγό προσαγωγής και τελικά φτάνει είτε στους υδροστροβίλους με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είτε σε άλλον αγωγό για την μεταφορά του νερού με σκοπό την άρδευση. Σημαντικό τμήμα της υδροληψίας αποτελεί το τεχνικό έργο εισόδου το οποίο μπορεί να έχει μορφή πύργου θεμελιωμένου στον πυθμένα της λίμνης ή στομίου αγκυρωμένου στο δεξιό ή αριστερό αντίρεια κοντά στο φράγμα. Το άνοιγμα της εισόδου βρίσκεται χαμηλότερα από την επιφάνεια του νερού του ταμιευτήρα και προστατεύεται με σχάρα με σκοπό την μη μεταφορά υλικών που μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στους αγωγούς και στους υδροστροβίλους. Συνήθως, η υδροληψία χρησιμοποιεί τον αγωγό εκκένωσης από ένα σημείο και μετά.

➤ **Σήραγγα και κλειστός αγωγός προσαγωγής του νερού από το φράγμα στους υδροστροβίλους**

Ο αγωγός προσαγωγής είναι χαλύβδινος με διάμετρο η οποία καθορίζεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Όταν ο αγωγός προσαγωγής είναι μεγάλου μήκους τότε συνηθίζεται να τροφοδοτεί ο ίδιος ταυτόχρονα όλους τους υδροστροβίλους του υδροηλεκτρικού συστήματος, ενώ αν ο αγωγός είναι μικρού μήκους τότε ο κάθε υδροστροβίλος τροφοδοτείται από ξεχωριστό αγωγό.

➤ **Πύργος ανάπασης – εκτόνωσης ενέργειας**

Ο πύργος ανάπασης ή εκτόνωσης έχει ως σκοπό την προστασία του αγωγού προσαγωγής από υποπίεσεις ή υπερπίεσεις οι οποίες μπορούν να εμφανιστούν κατά τα μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης ή απόρριψης του φορτίου των υδροστροβίλων



(υδραυλικό πλήγμα). Πρόκειται για μια δεξαμενή νερού η οποία απορροφά την μεγάλη αύξηση της πίεσης που εμφανίζεται καθώς το νερό εισέρχεται σ' αυτήν, κατά το απότομο κλείσιμο της βάννας που ρυθμίζει την παροχή στον υδροστρόβιλο. Μ' αυτό τον τρόπο εξαλείφεται το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος που εμφανίζεται στο εσωτερικό του αγωγού προσαγωγής λόγω της μεγάλης ποσότητας νερού που συγκεντρώνεται. Επιπλέον, οι πύργοι ανάπαλσης μπορεί να λειτουργούν και σαν αποσβεστήρες, μειώνοντας τις ταλαντώσεις που δημιουργούνται από την ποσότητα νερού που αποθηκεύεται στο εσωτερικό τους. Κατασκευάζονται στην είσοδο ή κατά μήκος του αγωγού προσαγωγής και είναι απαραίτητοι σε μεγάλους υδροστροβίλους. Τέλος, το ύψος τους μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 100m για αγωγούς προσαγωγής μεγάλου μήκους.

➤ **Σήραγγα – αγωγός απαγωγής**

Ο αγωγός ή σήραγγα απαγωγής έχουν ως σκοπό την μεταφορά του νερού στην κατάντη φυσική κοίτη του ποταμού, αφού πρώτα έχει διέλθει από τον υδροστρόβιλο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

➤ **Θυροφράγματα και βάννες**

Τα θυροφράγματα και οι βάννες κατασκευάζονται με σκοπό την ρύθμιση της παροχής του νερού στο υδροηλεκτρικό σύστημα, καθώς και για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες κατασκευής και συντήρησης του έργου. Τοποθετούνται ανάντη και κατάντη των υδροστροβίλων.

➤ **Υδροηλεκτρικός σταθμός**

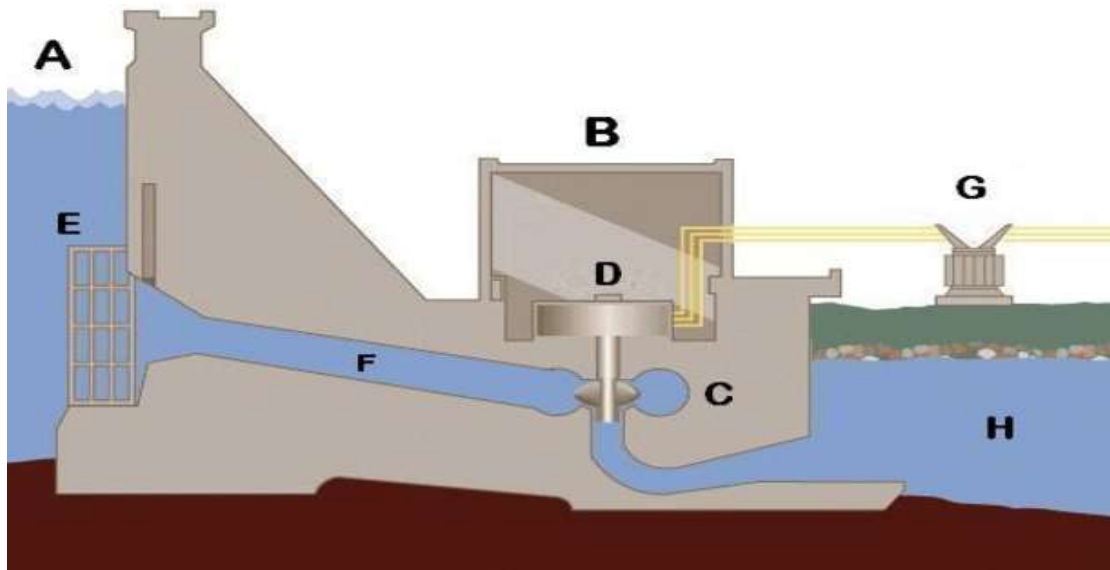
Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από τις κτιριακές εγκαταστάσεις, τους υδροστροβίλους, τις ηλεκτρογεννήτριες, τους μετασχηματιστές και το βοηθητικό εξοπλισμό για την λειτουργία και την συντήρηση της όλης εγκατάστασης. Η θέση εγκατάστασης του υδροστροβίλου προσδιορίζεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Μπορεί να εγκαθίσταται στην βάση του φράγματος είτε υπέργεια είτε υπόγεια είτε σε κάποιο άλλο δόκιμο σημείο. Σημαντικό επίσης ρόλο στον καθορισμό της θέσης εγκατάστασης παίζει η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου (πρόβλημα σπηλαιώσης) καθώς και η μορφολογία του εδάφους. Συνήθως, ο υδροστρόβιλος εγκαθίσταται υπόγεια. Καθώς ο υδροστρόβιλος περιστρέφεται, περιστρέφεται και ο άξονάς του στον οποίο είναι συνδεδεμένη και η γεννήτρια η οποία με την σειρά της παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι γεννήτριες δεν είναι συνδεδεμένες στον ίδιο άξονα με τον υδροστρόβιλο και απαιτείται κάποιο σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Αυτό συμβαίνει σε μονάδες μικρής ισχύος. Στη συνέχεια, ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση του ρεύματος έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί το ρεύμα μέσα των καλωδίων, σε μεγάλες αποστάσεις στους διάφορους νομούς της χώρας, με τις μικρότερες δυνατές απώλειες και με το μικρότερο κόστος. Τέλος, ο αριθμός των μονάδων (υδροστρόβιλος – γεννήτρια) εξαρτάται από το ποσό ηλεκτρικής ισχύος που θέλουμε να παράγουμε καθώς επίσης και από την διακύμανση παροχής που παρουσιάζεται σε περιόδους αιχμής αλλά και από οικονομοτεχνικά κριτήρια. Συνήθως, για λόγους ασφαλείας το πλήθος των μονάδων ενός υδροηλεκτρικού συστήματος είναι μεγαλύτερο ή ίσο του δύο, έτσι ώστε να

υπάρχει δυνατότητα συντήρησης και μεγαλύτερη ευελιξία στην παραγωγή στο πρόγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

➤ Ταμιευτήρας ή τεχνητή λίμνη

Ο ταμιευτήρας έχει ως σκοπό την συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας νερού με την βοήθεια του φράγματος. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της παροχής για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ή και για άλλους σκοπούς όπως την ύδρευση ή την άρδευση. Επίσης, είναι δυνατόν για τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συστήματα, να εκτρέπονται πολλά ποτάμια ή ρεύματα προς τον ταμιευτήρα. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η ωφέλιμη παροχή του ταμιευτήρα αλλά υπάρχει περίπτωση εξάτμισης μεγάλης ποσότητας νερού. Για τον λόγο αυτό, η κατασκευή ενός ταμιευτήρα εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Μέγεθος και χωρητικότητα του ταμιευτήρα
- Θέση
- Σταθερότητα της όχθης και διεισδυτικότητα του νερού στο έδαφος
- Σεισμικότητα
- Απόθεση ιλύος
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις



Εικόνα 4.6: Υδροηλεκτρικό Εργοστάσιο (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

A = Ταμιευτήρας, B = εγκατάσταση παραγωγής ισχύος, C = Υδροστρόβιλος, D = Γεννήτρια, E = Υδατοφράκτης, F = Υδαταγωγός, G = Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, H = Συνέχεια ροής ποταμού



5. Υδροστροβίλοι.

Ένας υδροστροβίλος αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι ενός υδροηλεκτρικού συστήματος, καθώς είναι αυτός που μετατρέπει την δυναμική και κατ' επέκταση την κινητική ενέργεια του νερού σε περιστροφική του άξονα με τελικό αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με την βοήθεια της ηλεκτρικής γεννήτριας. Για την εξυπηρέτηση αυτού το σκοπού, σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου έτσι ώστε να πετύχουμε τον μέγιστο βαθμό απόδοσης κάτι που θα οδηγήσει στην μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Μια σημαντική παράμετρος για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου είναι η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του. Επιπλέον, για να εξασφαλίσουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης περισσότερων του ενός υδροστροβίλων για να μπορούμε να επιλέγουμε τον κατάλληλο συνδυασμό λειτουργίας των υδροστροβίλων με βάση τις εκάστοτε συνθήκες.

5.1 Κατηγορίες υδροστροβίλων.

Οι υδροστροβίλοι διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο παραλαβής της ενέργειας του νερού σε:

- Υδροστροβίλους δράσης ή ισοθλιπτικός (τύπου Pelton) του οποίου το στροφέιο αποτελείται από σκαφίδια. Μια υδάτινη δέσμη νερού προσπίπτει κάθε φορά μέσω ενός ακροφυσίου που είναι προσαρμοσμένο στην έξοδο του αγωγού προσαγωγής, πάνω στα σκαφίδια. Με αυτόν τον τρόπο, η δυναμική ενέργεια του νερού η οποία μετατρέπεται με την ατμοσφαιρική πίεση σε κινητική ενέργεια, έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή του στροφείου του υδροστροβίλου. Η υδάτινη δέσμη νερού που προσπίπτει επάνω στα σκαφίδια δεν τα γεμίζει εντελώς και εξέρχεται από αυτά με καινούρια διεύθυνση, αφού κατά την ροή του πάνω σε κάθε πτερύγιο ακολουθεί την διαμόρφωση επιφάνειας του σκαφιδίου. Τα σκαφίδια είναι τοποθετημένα περιμετρικά του στροφείου του υδροστροβίλου, το οποίο περιστρέφεται λόγω της δύναμης που δέχεται από την εκτρεπόμενη δέσμη νερού, με την στατική πίεση του νερού να παραμένει σταθερή στο χώρο του στροφείου.
- Υδροστροβίλους αντίδρασης (τύπου Kaplan, Francis) οι οποίοι εκμεταλλεύονται την δυναμική ενέργεια του νερού. Μέρος της δυναμικής ενέργειας μετατρέπεται μέσω των οδηγών πτερυγίων σε κινητική και μέρος της διαθέσιμης πίεσης μετατρέπεται σε ταχύτητα και στη συνέχεια πέφτει πάνω στα πτερύγια του στροφείου. Το νερό στο χώρο μεταξύ των πτερυγίων του στροφείου, λόγω της υπερπίεσης, εξέρχεται από αυτό επιταχυνόμενο με μεγαλύτερη ταχύτητα και με μικρότερη πίεση. Έτσι, λόγω των παραπάνω δημιουργείται μια εξ' αντίδρασης συνιστώσα εφαπτομενικής δύναμης. Επομένως, σε αυτού του τύπου υδροστροβίλους, μέρος της δυναμικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε κινητική και το υπόλοιπο μέρος παραμένει ως δυναμική ενέργεια υπό την μορφή πίεσης. Το νερό καθώς διέρχεται με πίεση μέσα από το στροφέιο, καλύπτει όλο τον διαθέσιμο χώρο χωρίς να αφήνει κενά. Παρατηρούμε λοιπόν



ότι στους υδροστροβίλους αντίδρασης, η περιστροφή του στροφείου και άρα η παραγωγή ισχύος οφείλεται κυρίως στην δυναμική ενέργεια του νερού παρά στην κινητική του ενέργεια, σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους δράσης που η παραγωγή ισχύος οφείλεται στην κινητική ενέργεια του νερού. Σε γενικές γραμμές, η ροή του νερού έχει ως σκοπό την περιστροφή του άξονα του υδροστροβίλου μέσω της δράσης των πτερυγίων που διαθέτει. Όταν τα πτερύγια του υδροστροβίλου είναι διαμορφωμένα όπως σε μια προπέλα, η ροή είναι αξονική και η μηχανή ονομάζεται υδροστρόβιλος Kaplan. Όταν τα πτερύγια είναι προσανατολισμένα όπως σε μια φυγοκετρική αντλία, η ροή ονομάζεται ακτινική και η μηχανή ονομάζεται υδροστρόβιλος τύπου Francis. Το νερό κατά την έξοδό του από τον υδροστρόβιλο μπορεί να εξέρχεται με πίεση έως και 8m ύψος της στήλης νερού και για το λόγο αυτό απαιτείται η δημιουργία κατάλληλου αγωγού εκτόνωσης (διαχύτης).

Οι υδροστρόβιλοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με το διαθέσιμο ύψος πτώσης:

- Για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H > 500\text{m}\Sigma\Upsilon$) στις οποίες χρησιμοποιείται συνήθως ο υδροστρόβιλος δράσης τύπου Pelton.
- Για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($50 < H < 500\text{m}\Sigma\Upsilon$) στις οποίες χρησιμοποιείται συνήθως ο υδροστρόβιλος αντίδρασης τύπου Francis.
- Για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H < 50\text{m}\Sigma\Upsilon$) στις οποίες χρησιμοποιείται κυρίως ο υδροστρόβιλος αντίδρασης τύπου Kaplan.

•

Οι υδροστρόβιλοι με βάση τον βαθμό αντίδρασης διακρίνονται σε:

- Υδροστροβίλους αντίδρασης ή ολικής προσβολής των οποίων το στροφείο λειτουργεί αξονοσυμμετρικά. Οι υδροστρόβιλοι αυτοί έχουν βαθμό αντίδρασης διαφορετικό του μηδενός, δηλαδή καθώς το νερό διέρχεται μέσα από το στροφείο μεταβάλλεται ταυτόχρονα η στατική πίεση και γι' αυτό τα στροφεία τους είναι ολικής προσβολής, δηλαδή λειτουργούν ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Το νερό καλύπτει πλήρως το κέλυφος του στροβίλου αντίδρασης. Για το λόγο αυτό, ο υδροστρόβιλος αντίδρασης παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος από τον αντίστοιχο δράσης για την ίδια διάμετρο, ολικό ύψος και παροχή όγκου.
- Υδροστροβίλους δράσης ή μερικής προσβολής στους οποίους ο βαθμός αντίδρασης είναι ίσος με το μηδέν. Είναι μερικής προσβολής γιατί σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του στροφείου συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.

Οι υδροστρόβιλοι ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής τους διακρίνονται σε οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα περιστροφής.

Οι υδροστρόβιλοι ανάλογα με την διεύθυνση ροής του νερού διακρίνονται σε:

- Υδροστρόβιλους εφαπτομενικής ροής (τύπου Pelton)
- Υδροστρόβιλους αξονικής ροής (τύπου Kaplan) οι οποίοι είναι σαν προπέλα αξονικής ροής που λειτουργεί ανάποδα. Το στροφείο ενός υδροστροβίλου αξονικής ροής αποτελείται από 3 έως 8 πτερύγια τα οποία είναι πολύ λιγότερα από τα πτερύγια που διαθέτει το στροφείο ενός υδροστροβίλου τύπου Francis. Οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής αποτελούνται από δύο τύπους στροβίλων, του στροβίλου τύπου Kaplan και τους στροβίλους προπέλας. Οι στροβίλοι τύπου

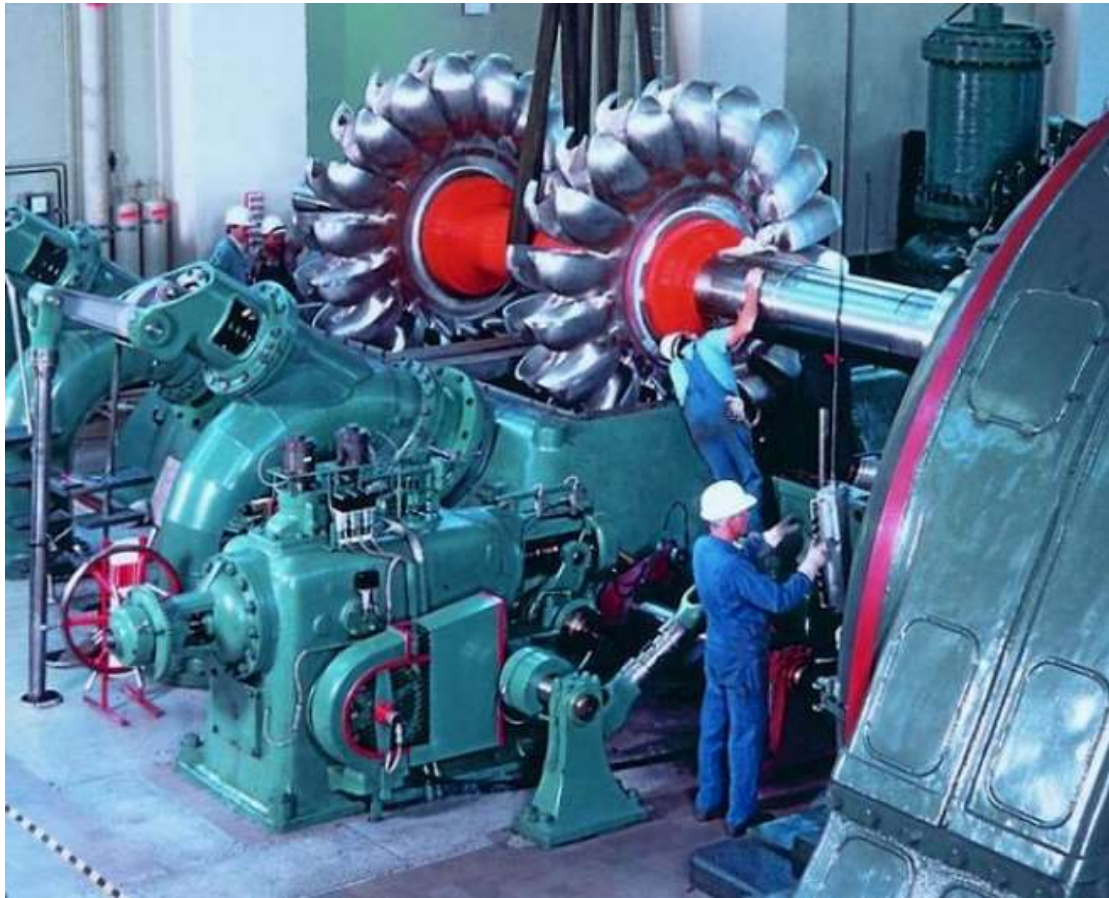


Karlan είναι διπλής ρύθμισης καθώς η ροή του νερού ελέγχεται με δύο τρόπους, είτε στρέφοντας τις θύρες διόδου είτε ρυθμίζοντας το βήμα στα πτερύγια του δρομέα. Οι στρόβιλοι προπέλας είναι περίπου όμοιοι με τους στρόβιλους τύπου Karlan με την μόνη διαφορά ότι δεν διαθέτουν κινητά πτερύγια για την ρύθμιση της παροχής και ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί αυτή η ρύθμιση είναι θύρες διόδου. Ο βαθμός απόδοσης των υδροστροβίλων αξονικής ροής είναι συγκρίσιμη με τον βαθμό απόδοσης των υδροστροβίλων τύπου Francis και μπορεί να φτάσει μέχρι και το 94%.

- Υδροστροβίλους ακτινικής ή μικτής ροής (τύπου Francis) οι οποίοι γεωμετρικά μοιάζουν με μια αντλία φυγοκεντρικής ή μικτής ροής, αλλά με την ροή στην αντίθετη κατεύθυνση. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια αντλία που λειτουργεί ανάποδα δεν αποτελεί αποδοτικό στρόβιλο. Ένας τυπικός μεγάλος υδροστρόβιλος τύπου Francis μπορεί να έχει 16 ή και περισσότερα πτερύγια δρομέα και επιτυγχάνει απόδοση που κυμαίνεται από 90% μέχρι και 95%.

5.2 Υδροστρόβιλοι δράσης (τύπου Pelton).

Ο υδροστρόβιλος δράσης κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό μηχανικό Lester Pelton το 1889. Το στροφέιο του αποτελείται από σκαφίδια τα οποία είναι διατεταγμένα περιφερειακά. Στα σκαφίδια του στροφείου προσπίπτει μια δέσμη νερού με την βοήθεια ενός ακροφυσίου, με την μορφή δέσμης υψηλής ταχύτητας (jet). Επιπλέον, τα σκαφίδια διαθέτουν στον διαμήκη άξονά τους ένα διαχωριστικό έτσι ώστε η δέσμη νερού που προσπίπτει να χωρίζεται στα δύο και να εξέρχεται από το στροφέιο του υδροστροβίλου. Σ' αυτό συμβάλουν οι εγκοπές που διαθέτει κάθε σκαφίδιο οι οποίες επιτρέπουν την πλήρωσή του και το γρήγορο άδειασμά του. Το στροφέιο του υδροστροβίλου Pelton μπορεί να κατασκευάζεται είτε ολόσωμο είτε συναρμολογημένο. Στην περίπτωση του συναρμολογούμενου στροφείου, τα σκαφίδια προσαρμόζονται στο στροφέιο μέσω κατάλληλης κοχλιωτής σύνδεσης με ασφάλιση. Επίσης, τα σκαφίδια δέχονται μεγάλες δυνάμεις κατά την λειτουργία του στροφείου και υφίστανται διάβρωση λόγω της ροής. Για το λόγο αυτό τα σκαφίδια κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην περίπτωση ολόσωμου στροφείου είναι φυσικό ότι ολόκληρο το στροφέιο κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάμετρος του στροφείου είναι συνάρτηση του πλήθους και των διαστάσεων των σκαφιδίων. Το πλήθος των σκαφιδίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της δέσμης (jet) του νερού που προσπίπτει επάνω σε αυτά και συνήθως κυμαίνεται από 20 με 26 σκαφίδια. Ο άξονας του στροφείου μπορεί να είναι είτε οριζόντιος είτε κατακόρυφος. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερες δέσμες νερού προτιμότερη είναι η κατακόρυφη διάταξη άξονα ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία των ακροφυσίων από τα απόνερα των σκαφιδίων.



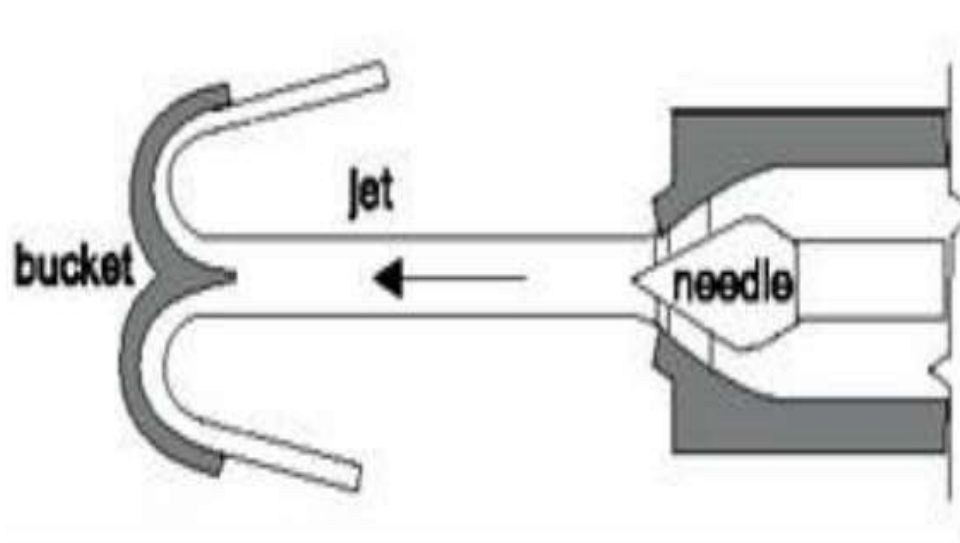
Εικόνα 5.1: Υδροστρόβιλος Pelton (πηγή: Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης)

5.3 Κύρια μέρη υδροστρόβιλων δράσης (τύπου Pelton).

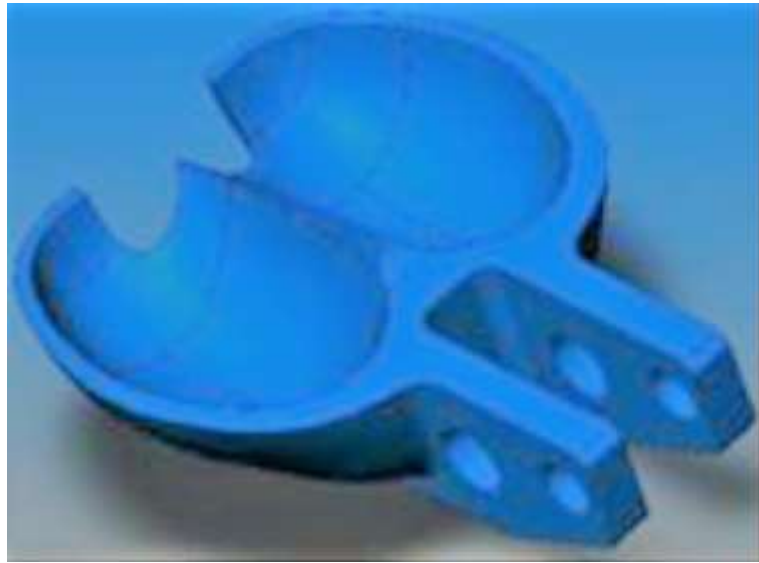
Οι υδροστρόβιλοι δράσης διαθέτουν τα εξής στοιχεία:

- Τον μηχανισμό ελέγχου παροχής ο οποίος αποτελείται από μία βελόνη η οποία βρίσκεται στο άκρο ενός μεταλλικού εμβόλου και μπορεί να ολισθαίνει εντός ενός ακροφυσίου. Η μετακίνηση της βελόνης ρυθμίζει την διατομή εισροής του νερού, την διάμετρο της δέσμης του νερού, με τελικό αποτέλεσμα την μεταβολή της παροχής. Ολόκληρη η κατασκευή του ακροφυσίου είναι πολύ στιβαρή λόγω της μεγάλης στατικής πίεσης και των μεγάλων ταχυτήτων στην διατομή εξόδου του ακροφυσίου, αφού όπως έχουμε ήδη αναφέρει η δέσμη νερού προσπίπτει στα σκαφίδια μέσω του ακροφυσίου με μεγάλη ταχύτητα (jet). Επιπρόσθετα, για την γρήγορη απόρριψη του φορτίου υπάρχει όνυχας εκτροπής της δέσμης νερού (μεταλλική επιφάνεια), αμέσως μετά την διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα επιπλέον μηχανισμό ελέγχου της παροχής. Ο όνυχας εκτρέπει την δέσμη η οποία δεν προσπίπτει στον δρομέα και στην συνέχεια η παροχή της μειώνεται μέσω κλεισίματος της βελόνης.

- Τον δρομέα ο οποίος αποτελείται από έναν κυκλικό δίσκο όπου περιμετρικά είναι τοποθετημένα τα σκαφίδια. Ο δρομέας είναι δυνατόν να κατασκευάζεται είτε ολόσωμος είτε συναρμολογημένος όμως σε κάθε περίπτωση κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα ώστε να μπορεί να αντέξει τις ισχυρές δυνάμεις και την διάβρωση που προκαλείται λόγω της ροής. Η διάμετρος του δρομέα είναι συνάρτηση του πλήθους και των διαστάσεων των σκαφιδίων τα οποία συνήθως κυμαίνονται από 20 έως 26 σκαφίδια. Κάθε σκαφίδιο διαθέτει δύο ημικυκλικά κύπελλα τα οποία διαχωρίζονται με ένα μεταλλικό διαχωριστικό (splitter) κι έτσι η δέσμη νερού που προσπίπτει επάνω σε αυτά διαχωρίζεται σε δύο τμήματα. Τα διαχωριστικά κύπελλα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δώσουν την κατάλληλη κλίση στις δέσμες νερού κατά την έξοδό τους από τα σκαφίδια, για να μεταβάλλεται όσο το δυνατόν η κατεύθυνσή τους η οποία είναι της τάξης των 165° . Οι υπόλοιπες 15° αποτρέπουν τις δέσμες που εξέρχονται να προσκρούσουν στην πίσω επιφάνεια του αμέσως εξερχόμενου σκαφιδίου. Σκοπός της χρήσης των διπλών κυπέλλων είναι η εξισορρόπηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτά. Τέλος, για την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων και συνεπώς την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος είναι δυνατό να υπάρξουν παραπάνω από μία δέσμες οι οποίες θα προσπίπτουν στα σκαφίδια του δρομέα.



Εικόνα 5.2: Απεικόνιση σκαφιδίου και ακροφυσίου υδροστροβίλου Pelton (πηγή: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης)

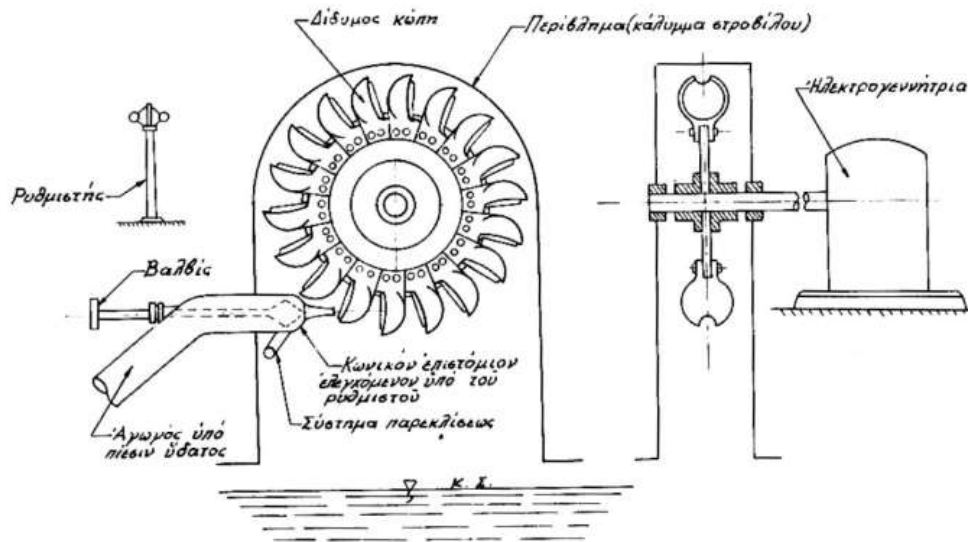


Εικόνα 5.3: Απεικόνιση σκαφιδίου υδροστροβίλου Pelton (πηγή: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης)

- Το περίβλημα του δρομέα το οποίο δεν συμμετέχει στην υδραυλική μηχανική συμπεριφορά του νερού. Ωστόσο, έχει την δυνατότητα να αποτρέπει το νερό να εισέρχεται στον περιβάλλοντα χώρο, προστατεύοντας έτσι από τυχόν ατυχήματα και περιορίζει το νερό να κατευθυνθεί στην διώρυγα φυγής.
- Το υδραυλικό φρένο το οποίο χρησιμεύει στο να τερματίζει σε μικρό χρονικό διάστημα τον δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που είναι αναγκαία η διακοπή παραγωγής ισχύος από τον υδροστρόβιλο Pelton, η βαλβίδα εισόδου θα κλείσει εμποδίζοντας έτσι την εισροή δέσμης νερού. Κάτι τέτοιο όμως δεν συνεπάγεται τον αυτόματο τερματισμό της περιστροφής του δρομέα καθώς συνεχίζει να περιστρέφεται λόγω της κεκτημένης ταχύτητάς του. Σ αυτό το πρόβλημα έρχεται να βοηθήσει το υδραυλικό φρένο που έχει ως σκοπό τον γρήγορο τερματισμό της λειτουργίας του δρομέα. Όταν αναφερόμαστε στο υδραυλικό φρένο εννοούμε ουσιαστικά μια δέσμη νερού η οποία εξέρχεται από ένα μικρό ακροφύσιο και η οποία προσκρούει στην πίσω επιφάνεια των σκαφιδίων, επιβραδύνοντας με αυτό τον τρόπο την περιστροφική τους κίνηση.
- Τον αυτόματο έλεγχο του υδροστροβίλου Pelton. Ένα υδροηλεκτρικό σύστημα για να λειτουργεί αποτελεσματικά, απαιτεί πολλές φορές την μεταβολή σε διάφορα χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως την μεταβολή της ισχύος με βάση το φορτίο, την παροχή ή το ύψος πτώσης. Όλες οι λειτουργίες του υδροηλεκτρικού πραγματοποιούνται με την βοήθεια ενός συστήματος ελέγχου, σκοπός του οποίου είναι η αποτελεσματική λειτουργία του υδροηλεκτρικού κάτω από οποιαδήποτε συνθήκη. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με την διατήρηση της περιστροφικής ταχύτητας του δρομέα με τιμή ίση με την σχεδιαστική. Τέλος, ο έλεγχος περιλαμβάνει και την άριστη κατανομή του φορτίου και επιτρέπει την ταχεία παύση λειτουργίας της μηχανής όποτε κρίνεται αναγκαίο, όπως στην υπερθέρμανση των στροφείων ή σε ελαττωματική λειτουργία του συστήματος λίπανσης της μηχανής.

Οι υδροστρόβιλοι δράσης διακρίνονται σε υδροστρόβιλους με οριζόντια και υδροστρόβιλους με κατακόρυφη άτρακτο. Στους υδροστρόβιλους με οριζόντια

άτρακτο συνήθως υπάρχουν δύο δρομείς που βρίσκονται στις δύο πλευρές της γεννήτριας. Ο μέγιστος αριθμός εκροής σε αυτή την διάταξη είναι δύο ανά δρομέα. Οι υδροστρόβιλοι με κατακόρυφη άτρακτο χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας του χώρου καθώς και για μεγάλα ύψη πτώσης. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι δυνατόν να αυξηθεί με την αύξηση του αριθμού των δεσμών εκροής του νερού. Ο αριθμός εκροής που χρησιμοποιείται σε αυτή την διάταξη είναι 6 ανά δρομέα.

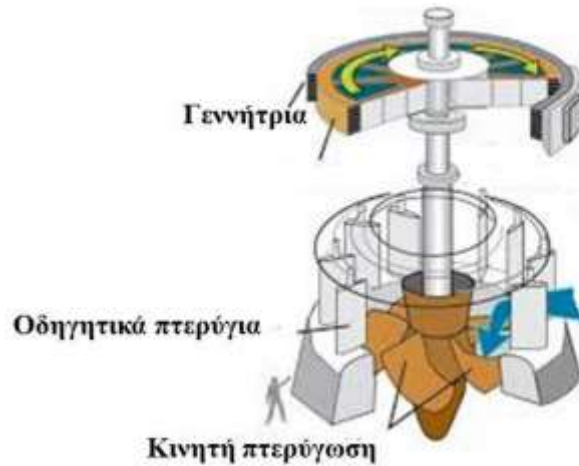


Σχήμα 2.5. Υδροστρόβιλος Pelton

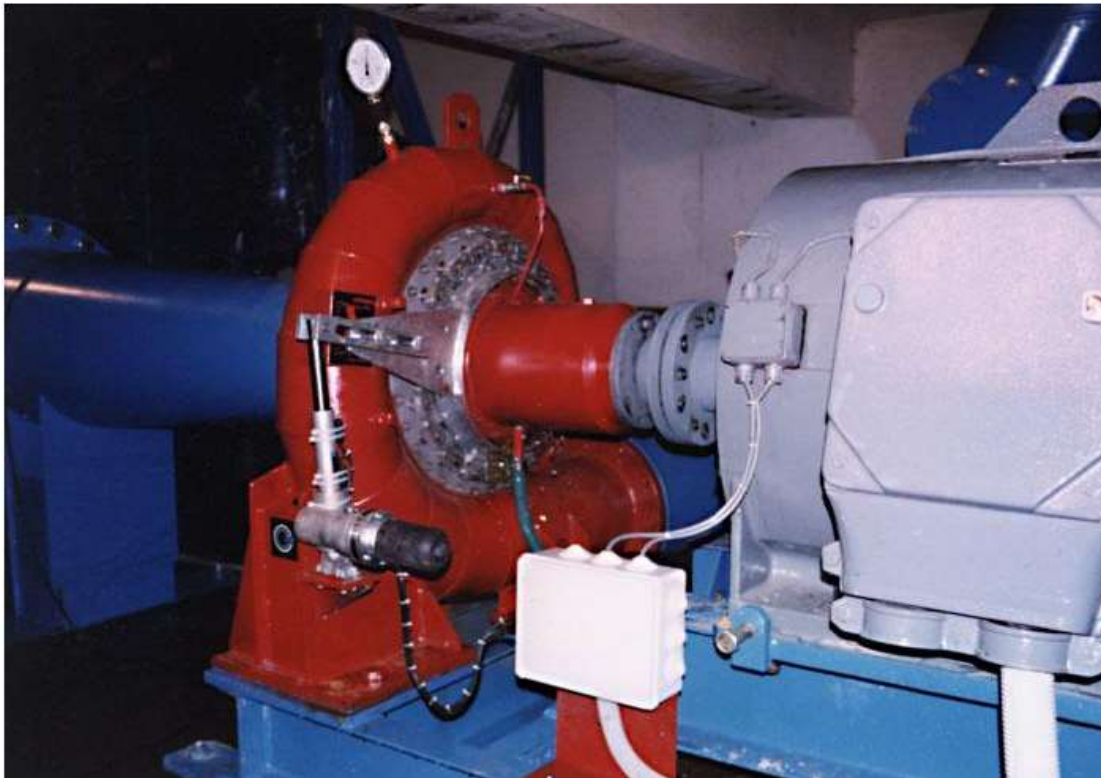
Εικόνα 5.4: Υδροστρόβιλος Pelton (πηγή: Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, ΑΤΕΙ Πειραιά)

5.4 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης (τύπου Kaplan, Francis).

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης έχουν διαφορετικό σχεδιασμό συγκριτικά με τους υδροστροβίλους δράσης, καθώς στους πρώτους το νερό διέρχεται συνεχώς μέσα από ολόκληρη την περιφέρεια του υδροστροβίλου και εξέρχεται αξονικά, σε αντίθεση με τους τελευταίους όπου η δέσμη του νερού που προσπίπτει κάθε φορά στα σκαφίδια εξέρχεται με διαφορετική κατεύθυνση. Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης είναι ολικής προσβολής και η ροή δια μέσω της πτερωτής γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης, δηλαδή λειτουργούν ομοιόμορφα κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο, το ρευστό παρέχει μια σταθερή ώθηση στον δρομέα, σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους δράσης όπου υπάρχει μια σειρά από διαδοχικές κρούσεις επάνω στα σκαφίδια.



Εικόνα 5.5: Υδροστροβίλος Kaplan (πηγή: Αποθετήριο «Κάλλιπος»)



Εικόνα 5.6: Υδροστροβίλος Francis (πηγή: CINK HYDRO ENERGY)

5.5 Κύρια μέρη υδροστροβίλων αντίδρασης (τύπου Francis).

Ο υδροστροβίλος τύπου Francis αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό μηχανικό J. B. Francis το 1849. Η απόδοση της λειτουργίας του μπορεί να φθάσει μέχρι και το 90%.

Τα κύρια μέρη ενός υδροστροβίλου Francis είναι:

- Σπειροειδές κέλυφος: Καθώς το νερό εξέρχεται από τον αγωγό προσαγωγής, εισέρχεται εντός ενός σπειροειδούς κελύφους το οποίο περιβάλλει πλήρως τον δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη τροφοδοσία και λειτουργία του υδροστροβίλου. Η διατομή του σπειροειδούς κελύφους μειώνεται κατά μήκος της ροής έτσι ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η ταχύτητα του νερού. Για ύψη πτώσεως μεγαλύτερα των 25 – 30 mΣΥ το σπειροειδές κέλυφος κατασκευάζεται από συγκολλητά χαλυβδοελάσματα και στην συνέχεια περιβάλλεται ολικά ή μερικά από σπλισμένο σκυρόδεμα.



Εικόνα 5.7: Υδροστρόβιλος Francis (πηγή: MF RURAL)

- Οδηγά πτερύγια: Τα οδηγά πτερύγια είναι προσαρμοσμένα περιμετρικά του δρομέα του υδροστροβίλου και κάθε πτερύγιο δύναται να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Το νερό που διέρχεται μέσα από το σπειροειδές κέλυφος είναι υποχρεωμένο να διέλθει μέσα από τα ακίνητα (οδηγά) πτερύγια. Έτσι, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της εισερχόμενης παροχής εντός των πτερυγίων του δρομέα και συνεπώς ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος. Τα οδηγά πτερύγια κατασκευάζονται συνήθως από χυτοχάλυβα ή σφυρήλατο χάλυβα.



Εικόνα 5.8: Δρομέας υδροστροβίλου Francis (πηγή: Mechanical Engineering)



Εικόνα 5.9: Δρομέας υδροστροβίλου Francis (πηγή: HTE Engineering).

- Δρομέας: Ο δρομέας αποτελείται από μία σειρά καμπυλωτών πτερυγίων, τα οποία είναι συμμετρικά κατανεμημένα και προσαρμοσμένα περιμετρικά του άξονά του. Εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης στην οποία είναι πακτωμένα. Μ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η μηχανική στιβαρότητα της κατασκευής και η αντοχή σε δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια από την διερχόμενη ροή. Τα πτερύγια είναι διαμορφωμένα ούτως 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.
- Αγωγός φυγής: Το νερό εξέρχεται από τον δρομέα κατά την αξονική κατεύθυνση και απομακρύνεται από τον υδροστρόβιλο διαμέσου του αγωγού φυγής. Η πλειοψηφία των υδροστροβίλων Francis έχουν την άτρακτο σε κατακόρυφη θέση.

5.6 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης (τύπου Kaplan).

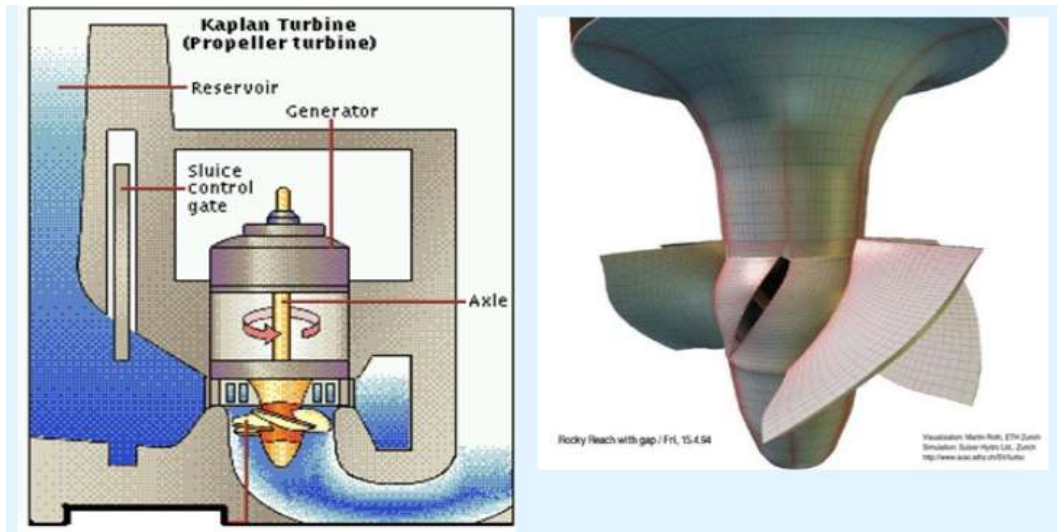
Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης αξονικής ροής δημιουργήθηκαν από τον αυστριακό καθηγητή μηχανικό Viktor Kaplan (1876 – 1934). Η απόδοση λειτουργίας αυτού του τύπου υδροστροβίλου μπορεί να φθάσει μέχρι και το 90%.

Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στους υδροστροβίλους Kaplan και Francis εντοπίζονται στο δρομέα:

- Ο δρομέας του υδροστροβίλου Kaplan αποτελείται από 4 έως 10 πτερύγια τα οποία τοποθετούνται συμμετρικά στην περιφέρεια της άτρακτου, ενώ ο δρομέας του υδροστροβίλου Francis αποτελείται από 16 έως 24 πτερύγια.
- Τα πτερύγια του δρομέα του υδροστροβίλου Kaplan έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν την σχετική τους γωνία ως προς την κύρια ροή ώστε να ελέγχουν την διατομή του χώρου ροής, ενώ τα πτερύγια του υδροστροβίλου Francis παραμένουν ακίνητα.

Όπως και στις αντλίες, ένας πλήρης υδροστρόβιλος αποτελείται και από άλλα τμήματα τα οποία εξασφαλίζουν την στεγανότητα με το περιβάλλον (εξωτερικό

κέλυφος κ.λπ.), την μεταφορά της μηχανικής ισχύος (άτρακτος, συμπλέκτες, έδρανα), την παραλαβή των αναπτυσσόμενων δυνάμεων (ωστικό έδρανο) και άλλα.



Εικόνα 5.10: Υδροστροβίλος Kaplan (πηγή: SlidePlayer)

5.7 Σύγκριση τύπων υδροστροβίλων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων συνοψίζονται παρακάτω:

- Υδροστροβίλος δράσης (τύπου Pelton):
 - Κατάλληλος για πολύ υψηλές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H > 300\text{m}\Sigma\Upsilon$).
 - Ισχύς μέχρι 400MW.
 - Άριστη προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή.
 - Κακή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη υδραυλική πτώση H .
- Υδροστροβίλος αντίδρασης (τύπου Francis):
 - Κατάλληλος για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($150 < H < 750\text{m}\Sigma\Upsilon$).
 - Ισχύς μέχρι 800MW.
 - Αργόστροφος (χαμηλός ειδικός αριθμός στροφών) ή υψηλόστροφος (υψηλός ειδικός αριθμός στροφών).
 - Μέτρια έως καλή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή.
 - Μέτρια έως καλή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη υδραυλική πτώση H .
- Υδροστροβίλος αντίδρασης (τύπου Kaplan):
 - Κατάλληλος για μικρές έως μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($10 < H < 150\text{m}\Sigma\Upsilon$).
 - Ισχύς μέχρι 200MW.
 - Πολύστροφος (υψηλός ειδικός αριθμός στροφών).



- Καλή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή \dot{V} .
- Σχετικά καλή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη υδραυλική πτώση H .

Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα της σύγκρισης των υδροστροβίλων Pelton και Francis θεωρούμε ότι και οι δύο υδροστρόβιλοι διαθέτουν υδραυλική πτώση $H = 400 \text{ mSY}$ και παράγουν ισχύ $\dot{W} = 50 \text{ MW}$.

Συγκριτικά πλεονεκτήματα του υδροστροβίλου Pelton έναντι του Francis:

- Η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου Pelton είναι υψηλότερη της στάθμης τοποθέτησης του υδροστροβίλου Francis και φυσικά υψηλότερη από την μέγιστη στάθμη του κάτω ταμιευτήρα. Το πλεονέκτημα αυτό είναι σημαντικό στην περίπτωση όπου ο υδροστρόβιλος Pelton είναι υπέργειος και λιγότερο όταν είναι υπόγειος.
- Δεν υπάρχει κίνδυνος να πλημμυρίσει ο υδροστρόβιλος Pelton ούτε από ανάντη ούτε από κατόντη.
- Στον υδροστρόβιλο Pelton οι υπερπιέσεις που παρουσιάζονται στον αγωγό προσαγωγής είναι ελεγχόμενες χάρη στην διάταξη εκτροπής της δέσμης του ρευστού που διαθέτει κατά τα μεταβατικά φαινόμενα. Με αυτό τον τρόπο, δεν απαιτείται κάποια άλλη διάταξη προστασίας ακόμα και αν το μήκος του αγωγού προσαγωγής είναι σημαντικό. Στην αντίστοιχη περίπτωση του υδροστροβίλου Francis είναι συχνά απαραίτητη η κατασκευή ενός πύργου ανάπαλσης που θα βοηθήσει στην μείωση της έντασης των υπερπιέσεων και υποπιέσεων κατά την μεταβατική λειτουργία.
- Ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Pelton είναι καλύτερος στα μερικά φορτία (περί το 65% της μέγιστης παραγόμενης ισχύος) και η περιοχή λειτουργίας είναι πολύ εκτεταμένη (10-100% της μέγιστης παραγόμενης ισχύος).
- Η αποσυναρμολόγηση του υδροστροβίλου Pelton είναι πιο εύκολη και πιο γρήγορη του υδροστροβίλου Francis.
- Στην εν κενώ λειτουργία, για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$) του ηλεκτρικού δικτύου, δεν είναι απαραίτητη η εκκένωση του υδροστροβίλου Pelton από το νερό καθώς το στροφείο του είναι πάντοτε έξω από το νερό, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην περίπτωση του υδροστροβίλου Francis.
- Δεν υπάρχει φαινόμενο σπηλαίωσης στον υδροστρόβιλο Pelton

Συγκριτικά πλεονεκτήματα του υδροστροβίλου Francis έναντι του Pelton:

- Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι μεγαλύτερη στον υδροστρόβιλο Francis δεδομένου ότι το στροφείο του Pelton πρέπει να τοποθετείται υψηλότερα από την μέγιστη δυνατή στάθμη του αγωγού απαγωγής.
- Ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου Francis είναι υψηλότερος στο κανονικό σημείο λειτουργίας και για την περιοχή από 65% έως 100% της μέγιστης παραγόμενης ισχύος.
- Η ταχύτητα περιστροφής του στροφείου του Francis είναι μεγαλύτερη από αυτή του Pelton με αποτέλεσμα το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του Francis να είναι μικρότερα. Το ίδιο ισχύει και για την γεννήτρια, ιδιαίτερα για ταχύτητες περιστροφής μικρότερες από 750rpm ή 1000rpm, οπότε δεν αντιμετωπίζονται φαινόμενα συντονισμού (κρίσιμης ταχύτητας περιστροφής).



- Για τον υδροστρόβιλο Francis το κόστος του έργου του πολιτικού μηχανικού είναι μικρότερο.
- Το κόστος του αγωγού απαγωγής είναι μικρότερο για τον υδροστρόβιλο Francis λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων και των μικρότερων διατομών.
- Η ρύθμιση του υδροστροβίλου Francis μέσω της στεφάνης των ρυθμιστικών πτερυγίων είναι περισσότερο ικανοποιητική όσον αφορά την διατήρηση της συχνότητας του ρεύματος σε αυτόνομο δίκτυο.
- Η μηχανική διάβρωση που παρουσιάζεται στα διαρρέομενα στοιχεία του υδροστροβίλου Francis (στροφείο, ρυθμιστικά πτερύγια), επηρεάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά λιγότερο από ό,τι η φθορά που παρουσιάζεται στις ακμές των σκαφιδίων ή της ακίδας τροφοδοσίας του Pelton. Η επιμετάλλωση ενός ρυθμιστικού πτερυγίου του Francis είναι επίσης πιο εύκολη από αυτήν των σκαφιδίων του Pelton.
- Το πρόβλημα κόπωσης που εμφανίζεται στο στροφείο του υδροστροβίλου Pelton (λόγω των εναλλασσόμενων φορτίσεων) απαιτεί συχνότερους προληπτικούς ελέγχους από ότι στο αντίστοιχο στροφείο του υδροστροβίλου Francis.

Σαν τελικό συμπέρασμα οι υδροστρόβιλοι Francis είναι προτιμητέοι για μεσαίες και υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H , ενώ οι υδροστρόβιλοι Pelton πλεονεκτούν μόνο για πολύ υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H . Τέλος, εάν έχουμε να διαλέξουμε ανάμεσα στους υδροστροβίλους Pelton και Francis σε περίπτωση κοινής διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, θα πρέπει να προτιμάται ο δεύτερος.

Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των υδροστροβίλων Francis και Kaplan, θεωρούμε ότι και οι δύο υδροστρόβιλοι έχουν υδραυλική πτώση $H = 50\text{mΣΥ}$ και παράγουν ισχύ $\dot{W} = 50\text{MW}$.

Συγκριτικά πλεονεκτήματα του υδροστροβίλου Francis έναντι του Kaplan:

- Η διάμετρος του στροφείου και το μέγεθος του σπειροειδούς κελύφους του υδροστροβίλου Francis είναι μικρότερα έναντι του υδροστροβίλου Kaplan για την ίδια εφαρμογή.
- Μηχανικά ο υδροστρόβιλος Francis είναι απλός, σε αντίθεση με τον υδροστρόβιλο Kaplan ο οποίος παρουσιάζει μεγάλη πολυπλοκότητα και άρα το κόστος των περιστρεφόμενων πτερυγίων του στροφείου θα είναι μεγαλύτερο.
- Η αξονική δύναμη είναι μικρότερη και άρα το μέγεθος του ωστικού εδράνου θα είναι μικρότερο.
- Η παράμετρος της σπηλαίωσης για τον υδροστρόβιλο Francis είναι μικρότερη και άρα οι εκσκαφές για την ασφαλή τοποθέτηση του υδροστροβίλου είναι μικρότερες (υψηλότερη στάθμη τοποθέτησης).
- Τα μεταβατικά φαινόμενα είναι λιγότερο έντονα και συνεπώς ελέγχονται πιο εύκολα. Με αυτό τον τρόπο, δεν απαιτείται συνδυασμός στην κλίση των πτερυγίων του στροφείου και της στεφάνης των ρυθμιστικών πτερυγίων.
- Η δυνατότητα λειτουργίας σε αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο με σταθερή την συχνότητα, είναι πολύ πιο εύκολη για τον υδροστρόβιλο Francis, ακόμα και σε δίκτυο με έντονες διαταραχές.
- Σε γενικές γραμμές, ένα υδροηλεκτρικό σύστημα που διαθέτει υδροστρόβιλο Francis, έχει μικρότερο κόστος.



Συγκριτικά πλεονεκτήματα του υδροστροβίλου Karlan έναντι του Francis:

- Η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου Karlan είναι λίγο μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής του υδροστροβίλου Francis, ενώ επιπλέον είναι περισσότερο επίπεδη η καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης σε ευρεία περιοχή γύρω από το κανονικό σημείο λειτουργίας, πράγμα που σημαίνει ότι ο υδροστροβίλος Karlan λειτουργεί αποδοτικά για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια.
- Ο υδροστροβίλος Karlan έχει την δυνατότητα να λειτουργεί ομαλά ακόμη και σε μερικά φορτία ή σημαντικά μειωμένες τιμές της υδραυλικής πτώσης, σε αντίθεση με τον υδροστροβίλο Francis ο οποίος σε μερικά φορτία, λόγω των κραδασμών και της ασταθούς λειτουργίας, πρέπει να τίθεται εκτός λειτουργίας.

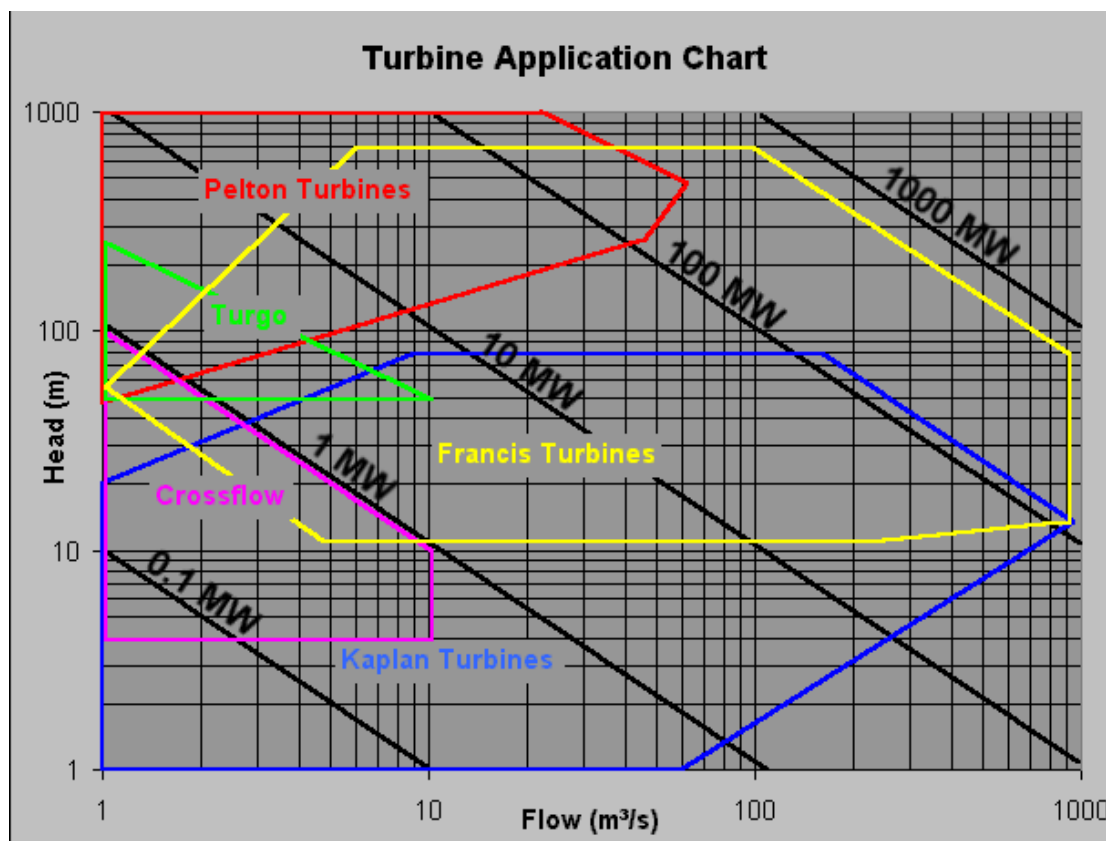
Και σ' αυτή την περίπτωση, πιο ιδανικός υδροστροβίλος παρουσιάζεται ο υδροστροβίλος Francis για υδραυλική πτώση μεγαλύτερη των 30 mΣΥ. Ωστόσο, ο υδροστροβίλος Karlan είναι μονόδρομος για περιπτώσεις υδραυλικής πτώσης μέχρι 50 mΣΥ.

5.8 Επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου.

Η ύπαρξη του ταμιευτήρα επιτρέπει την λειτουργία του υδροστροβίλου κοντά στις σχεδιαστικές του παραμέτρους με αποτέλεσμα τον υψηλό και σταθερό βαθμό απόδοσης. Υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης όλης της ετήσιας παροχής (με κατάλληλο ταμιευτήρα) χωρίς να υπερδιαστασιοποιηθεί το σύστημα του υδροστροβίλου – προσαγωγής, ενώ μπορεί να γίνει και ρύθμιση της παραγόμενης ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ταμιευτήρας, το ρεύμα του νερού διέρχεται κατευθείαν μέσα από τον υδροστροβίλο, με συνέπεια η παροχή να είναι μερικώς ελεγχόμενη και ο βαθμός απόδοσης να αλλάζει με βάση την εκάστοτε παροχή, με τελικό αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις έντονης ροής, ένα κομμάτι της παροχής παρακάμπτεται καθώς ο υδροστροβίλος με βάση τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του, δεν είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την αυξημένη παροχή. Επιπλέον, σε περιπτώσεις πολύ μικρής παροχής, ο υδροστροβίλος δεν είναι σε θέση να λειτουργήσει καθώς χρειάζεται ένα ελάχιστο ποσό ροής για να μπορέσει να το αξιοποιήσει. Το ελάχιστο και το μέγιστο ποσό ροής που ρέει μέσα από έναν υδροστροβίλο προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι προκειμένου ένας υδροστροβίλος ν' ανταποκριθεί σε διάφορες παροχές θα πρέπει να αυξηθεί το μέγεθος του και κάτι τέτοιο θα έχει άμεσες συνέπειες στο κόστος κατασκευής του το οποίο γίνεται σαφές ότι θα αυξηθεί, καθώς όταν ο υδροστροβίλος λειτουργεί με χαμηλή παροχή θα μειωθεί και ο βαθμός απόδοσής του. Με βάση τα παραπάνω κατανοούμε ότι η δημιουργία ταμιευτήρα είναι σημαντική για την ομαλή λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού συστήματος, καθώς με αυτό τον τρόπο μπορούμε να δημιουργούμε αποθέματα νερού και να ρυθμίζουμε την παροχή που θα τροφοδοτεί κάθε φορά τον υδροστροβίλο, ανάλογα με τις ανάγκες και τις υπάρχουσες καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, η δημιουργία ταμιευτήρα προϋποθέτει την κατασκευή φράγματος, γεγονός που αυξάνει το κόστος της όλης κατασκευής. Επιπλέον, όπως έχουμε ήδη αναφέρει και σε προηγούμενη παράγραφο,

η κατασκευή ενός φράγματος παρουσιάζει και αρκετές περιβαλλοντικές συνέπειες δεδομένου ότι υπάρχουν μεγάλες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον για την κατασκευή του. Έτσι λοιπόν, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθιστούν εφικτό το όλο έργο σε περιπτώσεις μεγάλων υδροηλεκτρικών συστημάτων που εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς και εντάσσονται σε γενικούς ενεργειακούς και υδροδοτικούς σχεδιασμούς.

Βασικό στοιχείο της οριστικής μελέτης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος είναι η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, ο σχεδιασμός του και ο αριθμός τους. Οι υδροστροβίλοι αποτελούν την καρδιά ενός υδροηλεκτρικού συστήματος και σύμφωνα με αυτούς κατασκευάζονται όλα τα επιμέρους λειτουργικά μέρη της μηχανής (σπειροειδές κέλυφος, στεφάνη, ρυθμιστικά πτερύγια, γεννήτρια κ.λπ.) καθώς και τα έργα του πολιτικού μηχανικού. Ο καθορισμός του είδους αλλά και του μεγέθους του υδροστροβίλου γίνεται με βάση οικονομοτεχνικά κριτήρια. Το βασικότερο κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου είναι το ωφέλιμο ύψος πτώσης της εγκατάστασης. Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για μια δεδομένη εγκατάσταση, γίνεται η χρήση διαγραμμάτων στα οποία παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα κάθε τύπου υδροστροβίλου με βάση μια συγκεκριμένη παροχή, ύψος πτώσης και παραγόμενη ισχύ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου τύπου διαγράμματος είναι αυτό που παρατίθεται ακολούθως.



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα επιλογής κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου (πηγή: wikiwand)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε τα χαρακτηριστικά διάφορων τύπων υδροστροβίλων τα οποία αναφέρονται στο ωφέλιμο ύψος πτώσης, στην ογκομετρική παροχή και στην παραγόμενη ισχύ. Ανάλογα με το διαθέσιμο ύψος πτώσης και την



διαθέσιμη παροχή την οποία και δύναται να εκμεταλλευτεί ο κάθε υδροστροβίλος, επιλέγουμε τον αντίστοιχο τύπο. Με βάση τον τύπο υδροστροβίλου που επιλέξαμε, προσδιορίζουμε και το ποσό ισχύος που είναι ικανός να παράγει. Στο διάγραμμα παρατηρούμε περιοχές στις οποίες είναι κατάλληλα δύο ή και τρία διαφορετικά είδη υδροστροβίλων. Σε μια τέτοια περίπτωση που δεν μπορούμε με μια πρώτη άποψη να αποφασίσουμε το κατάλληλο είδος υδροστροβίλου, υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες που θα συμβάλλουν στην λήψη της σωστής απόφασης. Έτσι λοιπόν, μπορούμε να επιλέξουμε με βάση το βαθμό απόδοσης, την συντήρηση που απαιτεί η λειτουργία του κάθε υδροστροβίλου και γενικά με βάση μια οικονομοτεχνική ανάλυση. Τέλος, αν με βάση τα δεδομένα της περιοχής είναι κατάλληλα δύο είδη υδροστροβίλων και το σημείο που αντιστοιχεί σε κάποιον από τους δύο υδροστροβίλους είναι οριακό (δηλαδή είναι κοντά στην περιμετρική γραμμή που ορίζει το είδος του υδροστροβίλου), τότε επιλέγουμε τον άλλον υδροστροβίλο στον οποίο το σημείο θα εντοπίζεται σε ένα πιο κεντρικό σημείο του περιγράμματός του, για λόγους ασφαλείας.

Γενικά, μονάδα ονομάζουμε το αυτοτελές συγκρότημα που αποτελείται από τον υδροστροβίλο και όλες τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις και τα έργα του πολιτικού μηχανικού που συνοδεύουν την λειτουργία του. Για την αποτελεσματικότερη και πιο ευέλικτη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού συστήματος, είναι δυνατή η τοποθέτηση δύο ή και περισσότερων υδροστροβίλων. Έτσι μπορούμε είτε να λειτουργούμε το σύνολο των υδροστροβίλων αξιοποιώντας τους στο μέγιστο, είτε να λειτουργούμε κάποιους από αυτούς. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την διαθέσιμη παροχή η οποία εξαρτάται άμεσα από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να πετύχουμε την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος. Στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (έργα με μεγάλη παροχή) η ύπαρξη μεγάλου αριθμού υδροστροβίλων είναι ενδεδειγμένη. Συνήθως, χρησιμοποιούνται ίδιοι υδροστροβίλοι για λόγους οικονομίας.

Ο αριθμός των μονάδων εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

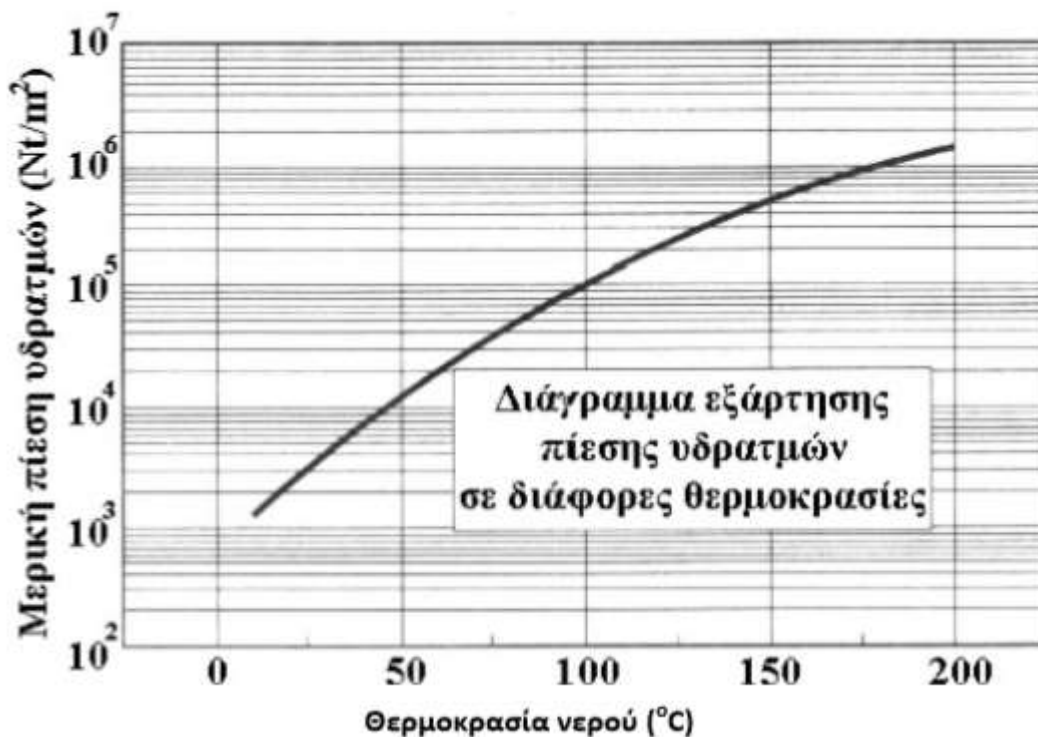
- Την διαθέσιμη παροχή (από την οποία εξαρτάται και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς)
- Την επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών του υδροστροβίλου
- Την ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου, που καθορίζει με την σειρά της το μέγεθος, το βάρος και το κόστος των ηλεκτρομηχανικών διατάξεων και των έργων του πολιτικού μηχανικού
- Την μορφολογία και την γεωλογία της περιοχής, που καθορίζει το πλήθος των αγωγών προσαγωγής, την διάταξη του υδροηλεκτρικού συστήματος (χώρος των βανών, χώρος συναρμολόγησης, βοηθητικοί χώροι κ.λπ.), την κατασκευή του υδροηλεκτρικού εργοστασίου σε περισσότερες από μία φάσεις
- Την χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα, την καμπύλη διάρκειας παροχής κ.λπ.

6. Σπηλαίωση

Η σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται τόσο σε αντλίες όσο και σε υδροστροβίλους και έχει ως συνέπεια αρχικά την παραμόρφωση του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια σε μια κατασκευή και τελικά την διάλυση του.

Η σπηλαίωση εμφανίζεται όταν ένα ρευστό διέρχεται με μεγάλες ταχύτητες μέσα από μια ρευστοδυναμική μηχανή και είναι δυνατόν υπό ορισμένες συνθήκες να σχηματιστούν φυσαλίδες ατμών μέσα στην κινούμενη μάζα, με δυσμενή επίδραση στην λειτουργία της μηχανής. Αυτό πρακτικά επηρεάζει τόσο τον βαθμό απόδοσης της μηχανής όσο και την ίδια την κατασκευή. Η σπηλαίωση αρχίζει να εμφανίζεται ειδικότερα σε μια υδραντλία όταν η απόλυτη στατική πίεση στην αναρρόφησή της γίνει ίση (περίπου) ή μικρότερη από την μέγιστη τάση των υδρατμών. Τότε, δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού, από το ίδιο το νερό, οι οποίες παρασυρόμενες σε περιοχές μεγαλύτερης πίεσης συνθλίβονται με κρότο. Για το λόγο αυτό, το φαινόμενο της σπηλαίωσης σε μια αντλία συνδέεται με κραδασμούς και κρότους. Όταν οι φυσαλίδες αυτές συνθλίβονται πάνω στις επιφάνειες της μηχανής προκαλούν διαβρώσεις και καταπονήσεις σε τμήματα του στροφείου.

Μόρια ενός υγρού τα οποία εγκαταλείπουν την ελεύθερη επιφάνειά του, σχηματίζουν ένα νέφος ατμών το οποίο καλύπτει την επιφάνεια του υγρού. Το νέφος αυτό αυξάνεται ή ελαττώνεται ανάλογα με την διεύθυνση της ταχύτητας του καθαρού αριθμού των μορίων που διασχίζουν την διαχωριστική επιφάνεια. Η πίεση του νέφους αυτού ονομάζεται πίεση ατμών υγρού.



Εικόνα 6.1: Μεταβολή της πίεσης των υδρατμών συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας).

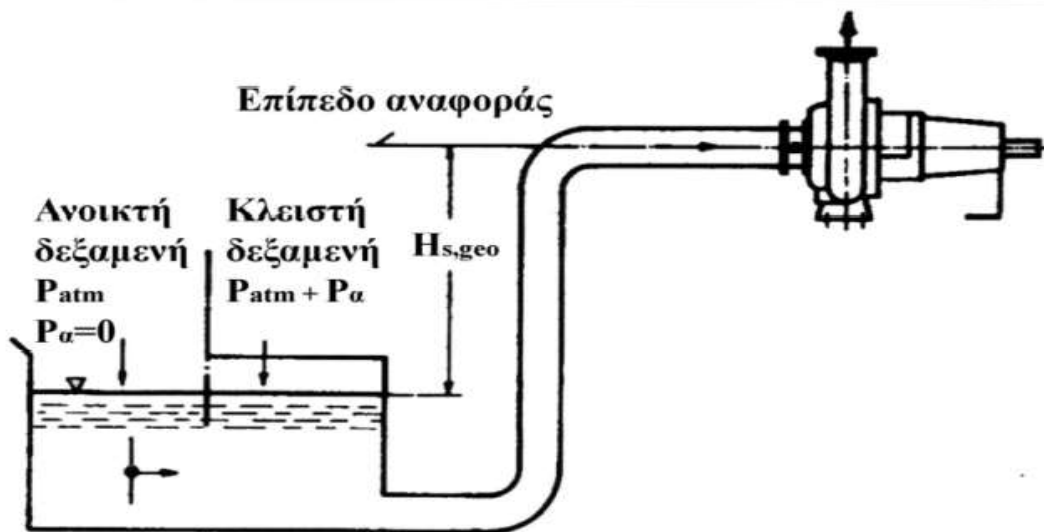
6.1 Προσδιορισμός του ύψους αναρρόφησης στο οποίο παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης.

Σε μια φυγοκεντρική αντλία οι πλέον πιθανές περιοχές ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι αυτές στις οποίες η στατική πίεση είναι ήδη χαμηλή οπότε με περαιτέρω μείωσή της, λόγω υδροδυναμικών φαινομένων επιτάχυνσης της ροής, ενδέχεται αυτή να μειωθεί κάτω από την πίεση ατμοποίησης. Επομένως, στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών η πιθανή περιοχή ανάπτυξης της σπηλαιώσης είναι η διατομή εισόδου της πτερωτής.

Για τον προσδιορισμό του ύψους αναρρόφησης στο οποίο παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά διακρίνουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης της αντλίας, την περίπτωση ανύψωσης στην αναρρόφηση και την περίπτωση θετικής αναρρόφησης. Πιο αναλυτικά:

- Περίπτωση ανύψωσης στην αναρρόφηση (suction lift): Σ' αυτή την περίπτωση η αντλία τοποθετείται πάνω από την επιφάνεια του νερού (suction lift).



Εικόνα 6.2: Ανύψωση στην αναρρόφηση (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

Έστω ότι η δεξαμενή αναρρόφησης είναι ανοικτή. Θεωρούμε σημείο Α στην επιφάνεια του νερού και σημείο Β στην αναρρόφηση της αντλίας. Επιπλέον, θεωρούμε και τα ύψη h_A και h_B στα αντίστοιχα σημεία. Τέλος, ορίζουμε ως z_i την διαφορά μεταξύ των δύο υψών στα σημεία Α και Β.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli θα έχουμε:

$$P_{ολ,A} = P_{ολ,B} \Rightarrow H_{ολ,A} = H_{ολ,B}$$

$$\Rightarrow \frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2}{2 \cdot g} + h_A = \frac{P_B}{\rho \cdot g} + \frac{u_B^2}{2 \cdot g} + h_B + \Delta h_f$$



Θεωρούμε ότι $u_A \approx u_B \approx 0$. Παράλληλα αφαιρούμε την τάση των ατμών P_s .

$$\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + h_A = \frac{P_B - P_s}{\rho \cdot g} + h_B + \Delta h_f, \text{ όπου}$$

$$\frac{P_B - P_s}{\rho \cdot g} = NPSHa \text{ (= διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης)} \quad (6.1)$$

$$\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + h_A = NPSHa + h_B + \Delta h_f$$

$$\Rightarrow NPSHa = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + (h_A - h_B) - \Delta h_f$$

$$\Rightarrow NPSHa = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} - z_i - \Delta h_f \quad (6.2)$$

Σημειώνεται ότι από πριν είχαμε ορίσει ότι $z_i = h_A - h_B$ και με βάση και το παραπάνω σχήμα που απεικονίζει την τοποθέτηση της αντλίας σε σχέση με την επιφάνεια του νερού, ισχύει ότι $h_A < h_B$ και άρα η διαφορά z_i θα είναι αρνητική. Επιπλέον, θα πρέπει το διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του απαιτούμενου ύψους αναρρόφησης και επομένως ισχύει η σχέση:

$$NPSHa \geq NPSHr$$

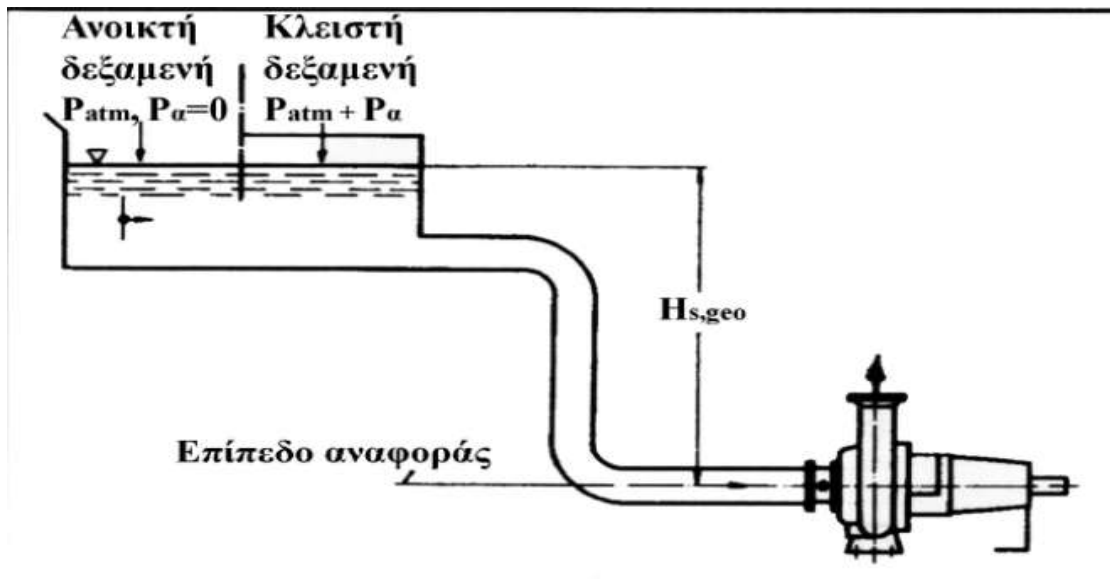
$$\Rightarrow \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} - z_i - \Delta h_f \geq NPSHr$$

$$\Rightarrow z_i \leq \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} - \Delta h_f - NPSHr$$

$$\Rightarrow h_{\max} = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} - \Delta h_f - NPSHr \quad (6.3)$$

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τιμές μεγαλύτερες του h_{\max} παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

- Περίπτωση θετικής αναρρόφησης (positive suction lift): Σ' αυτή την περίπτωση η αντλία τοποθετείται κάτω από την επιφάνεια του νερού.



Εικόνα 6.3: Τοποθέτηση αντλίας κάτω από την επιφάνεια του νερού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

Έστω ότι η δεξαμενή αναρρόφησης είναι ανοικτή. Θεωρούμε σημείο A στην επιφάνεια του νερού και σημείο B στην αναρρόφηση της αντλίας. Επιπλέον, θεωρούμε και τα ύψη h_A και h_B στα αντίστοιχα σημεία. Τέλος, ορίζουμε ως z_i την διαφορά μεταξύ των δύο υψών στα σημεία A και B. Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli θα έχουμε:

$$P_{ολ,A} = P_{ολ,B} \Rightarrow H_{ολ,A} = H_{ολ,B}$$

$$\Rightarrow \frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2}{2 \cdot g} + h_A = \frac{P_B}{\rho \cdot g} + \frac{u_B^2}{2 \cdot g} + h_B + \Delta h_f$$

Θεωρούμε ότι $u_A \approx u_B \approx 0$. Παράλληλα αφαιρούμε την τάση των ατμών P_s .

$$\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + h_A = \frac{P_B - P_s}{\rho \cdot g} + h_B + \Delta h_f ,$$

όπου

$$\frac{P_B - P_s}{\rho \cdot g} = NPSHa (= \text{διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης}) \quad (6.4)$$

$$\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + h_A = NPSHa + h_B + \Delta h_f$$

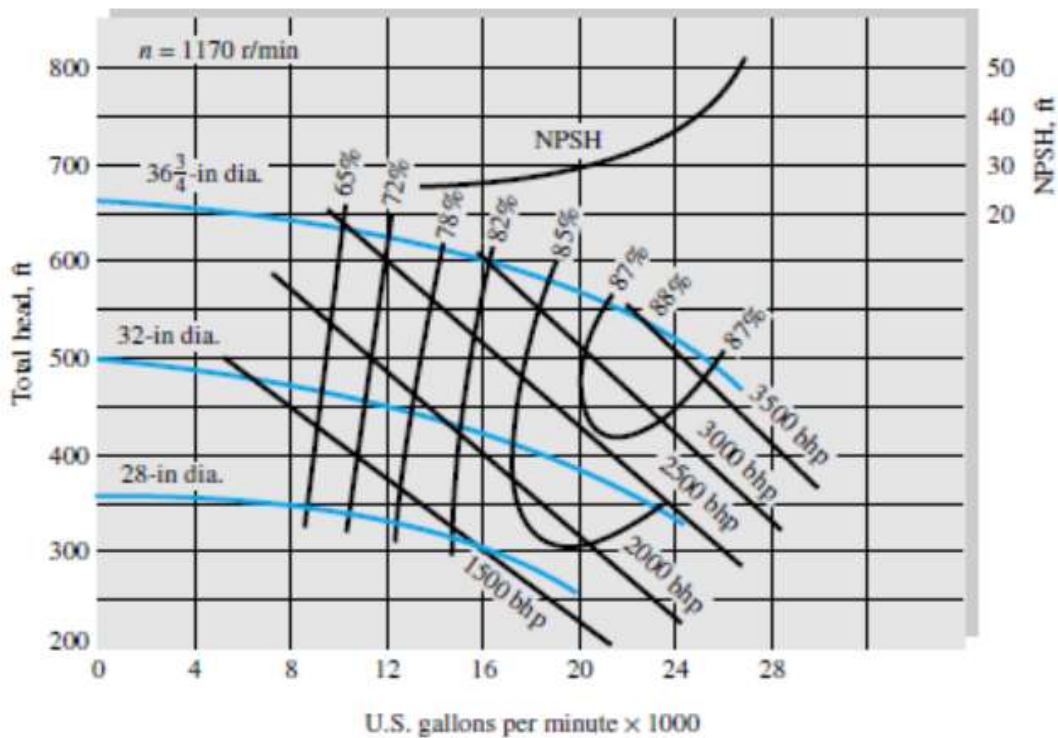
$$\Rightarrow NPSHa = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + (h_A - h_B) - \Delta h_f$$

$$\Rightarrow NPSHa = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + z_i - \Delta h_f \quad (6.5)$$

Σημειώνεται ότι από πριν είχαμε ορίσει ότι $z_i = h_A - h_B$ και με βάση και το παραπάνω σχήμα που απεικονίζει την τοποθέτηση της αντλίας σε σχέση με την επιφάνεια του νερού, ισχύει ότι $h_A > h_B$ και άρα η διαφορά z_i θα είναι θετική. Επιπλέον, θα πρέπει το διαθέσιμο ύψος αναρρόφησης να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του απαιτούμενου ύψους αναρρόφησης και επομένως ισχύει η σχέση:

$$\begin{aligned}
 NPSH_a &\geq NPSH_r \\
 \Rightarrow \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + z_i - \Delta h_f &\geq NPSH_r \\
 \Rightarrow z_i &\geq -\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + \Delta h_f + NPSH_r \\
 \Rightarrow h_{\min} &= -\frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + \Delta h_f + NPSH_r \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τιμές μικρότερες του h_{\min} παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης.



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα προσδιορισμού του απαιτούμενου ύψους αναρρόφησης $NPSH_r$ (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

Το παραπάνω διάγραμμα είναι ένα διάγραμμα του ολικού ύψους μεταξύ της επιφάνειας του νερού και της αναρρόφησης της αντλίας, συναρτήσεως της παροχής. Σ' αυτό το διάγραμμα απεικονίζονται οι καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα στροφέια διαφόρων αντλιών ανάλογα με την διάμετρό τους. Σκοπός αυτού του διαγράμματος είναι ο προσδιορισμός του απαιτούμενου ύψους αναρρόφησης $NPSH_r$ έτσι ώστε να



μπορέσει να υπολογισθεί το ύψος στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια της παροχής που τροφοδοτεί της αντλία και της καμπύλης του ύψους αναρρόφησης NPSH. Προσδιορίζοντας το σημείο στο οποίο τέμνει η παροχή την καμπύλη του ύψους αναρρόφησης, πηγαίνοντας δεξιά στον άξονα εντοπίζουμε την τιμή για το απαιτούμενο ύψος αναρρόφησης.



7. Εξοπλισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Σκοπός μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου της χώρας με την απαραίτητη ενέργεια για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των πολιτών. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για την επίτευξη αυτού του σκοπού απαιτείται η εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας η οποία με την πτώση του νερού από κάποιο ύψος (λόγω του ταμιευτήρα), μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Η κινητική αυτή ενέργεια στην συνέχεια θα περιστρέψει τον υδροστρόβιλο ο οποίος μέσω ορισμένων μηχανισμών θα μεταδώσει αυτή την κίνηση στον άξονα της γεννήτριας που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, για την παραγωγή, μετατροπή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρη τη χώρα, απαιτείται ένα σύνολο από μηχανισμούς, οι οποίοι αναλύονται ακολούθως.

Οι μηχανισμοί που απαιτούνται για την επίτευξη του στόχου είναι οι εξής:

- Γεννήτριες οι οποίες συνδέονται με τους υδροστροβίλους και μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι γεννήτριες είναι δύο ειδών, σύγχρονες και ασύγχρονες, όμως στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων χρησιμοποιούνται κυρίως οι ασύγχρονες γεννήτριες.
- Κινητήριες μηχανές
- Συστήματα ρύθμισης διέγερσης και τάσης
- Μετασχηματιστές οι οποίοι έχουν ως σκοπό την ανύψωση της τάσης έτσι ώστε να μεταφέρεται η παραγόμενη ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου της χώρας
- Διακόπτες ζεύξης και απόζευξης
- Όργανα ελέγχου
- Γραμμές μεταφοράς για την μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στον τόπο κατανάλωσής της.

Οι τελικές διαστάσεις του σταθμού παραγωγής της εγκατάστασης εξαρτώνται κυρίως από τον τύπο, τον αριθμό και το μέγεθος των υδροστροβίλων και των γεννητριών.

7.1 Γεννήτριες.

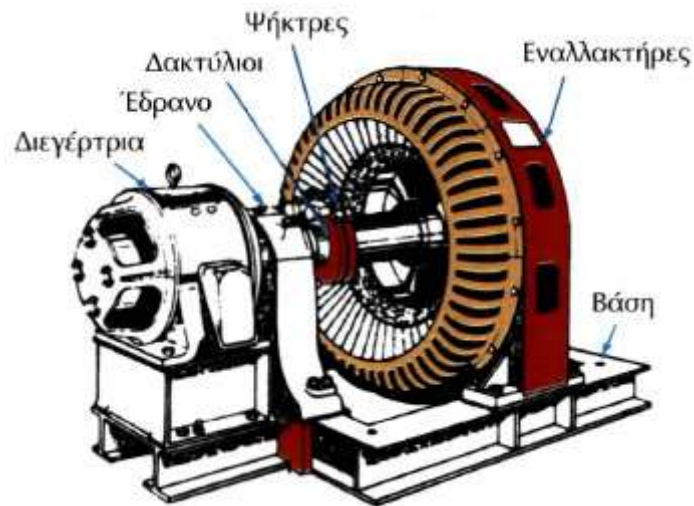
Οι γεννήτριες ή ηλεκτρογεννήτριες έχουν ως στόχο την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο νόμο του Faraday. Ο νόμος του Faraday ή νόμος της επαγωγής αναφέρει ότι όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ ενός αγωγού και ενός μαγνητικού πεδίου (είτε κινείται ο αγωγός ως προς το μαγνητικό πεδίο, είτε κινείται το μαγνητικό πεδίο ως προς τον αγωγό), αναπτύσσεται στα άκρα του αγωγού ηλεκτρεργετική δύναμη (Η.Ε.Δ) ή αλλιώς τάση εξ επαγωγής. Έτσι λοιπόν, καθώς το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου περιστρέφεται εντός του μαγνητικού πεδίου μαγνητικής ροής Φ , τότε στα άκρα του αναπτύσσεται τάση εξ επαγωγής. Η τάση αυτή είναι ημιτονοειδούς μορφής και άρα εναλλασσόμενη.

Οι γεννήτριες αποτελούνται από ένα σταθερό μέρος το οποίο ονομάζεται στάτης και από ένα κινούμενο μέρος που ονομάζεται ρότορας. Καθώς ο ρότορας περιστρέφεται εντός του στάτη, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ρότορας είναι δυνατό να περιστραφεί με πολλούς τρόπους. Στην περίπτωση μας, ο ρότορας περιστρέφεται μέσω της περιστροφής του υδροστροβίλου και η κίνηση αυτή μεταδίδεται μέσω του άξονα που συνδέει το στρόβιλο με την γεννήτρια.

7.2 Κατηγορίες γεννητριών.

Οι γεννήτριες διακρίνονται σε:

- **Σύγχρονες:** οι γεννήτριες αυτές μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα από το δίκτυο και να παράγουν ισχύ δεδομένου ότι η ισχύς διέγερσης δεν εξαρτάται από το δίκτυο. Οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν με συνεχές ρεύμα και γι' αυτό είναι απαραίτητη η τροφοδότησή τους με συνεχές ρεύμα. Καθώς ο άξονας του υδροστροβίλου περιστρέφεται, περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο, επάγοντας τριφασική τάση στο τύλιγμα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι κυλινδρικός ή εκτύπων πόλων και είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα. Οι κυλινδρικοί δρομείς φέρουν αυλακώσεις στις οποίες τοποθετούνται τα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μέχρι τεσσάρων πόλων. Σε γεννήτριες με περισσότερους πόλους επιλέγονται δρομείς εκτύπων πόλων.



Εικόνα 7.1: Σύγχρονη γεννήτρια (πηγή: Τμήμα Ηλεκτρολογίας, ΤΕΙ Πειραιά)

- **Ασύγχρονες:** οι γεννήτριες αυτές δεν μπορούν να παράγουν άεργο ισχύ. Αντίθετα καταναλώνουν άεργο ισχύ και για το λόγο αυτό απαιτείται μια εξωτερική πηγή άεργης ισχύς μόνιμα συνδεδεμένης. Η εξωτερική πηγή θα ρυθμίσει και την τάση στην έξοδο της γεννήτριας αφού λόγω της έλλειψης ρεύματος διέγερσης αυτό είναι αδύνατο να επιτευχθεί από την ίδια την γεννήτρια. Επομένως, οι εξωτερικοί πυκνωτές είναι αυτοί που θα παράγουν το ρεύμα μαγνήτισης που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη γεννήτρια.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που εντοπίζεται είναι ότι η τάση στα άκρα της έχει άμεση και μεγάλη εξάρτηση από το φορτίο και όταν αυτό έχει ισχυρό επαγωγικό χαρακτήρα μπορεί να έχουμε μεγάλη πτώση στην τάση της γεννήτριας. Γενικά η ασύγχρονη γεννήτρια επιδεινώνει τον συντελεστή ισχύος του δικτύου και προκαλεί μεγάλες πτώσεις. Ωστόσο, παρά τα μειονεκτήματα, η ασύγχρονη γεννήτρια έχει ένα αρκετά σημαντικό πλεονέκτημα, το οποίο είναι η απλότητα της, δηλαδή δεν απαιτείται κάποιο ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης δεν χρειάζεται να κινείται συνεχώς με την ίδια ταχύτητα. Έτσι, όσο μεγαλύτερη ροπή εφαρμόζεται στον άξονα τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς στην έξοδο.

Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ακριβότερες από τις ασύγχρονες και χρησιμοποιούνται σε συστήματα ισχύος όπου η παραγωγή ενέργειας αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό του φορτίου του συστήματος ισχύος. Οι ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε μεγάλα δίκτυα όπου η παραγωγή τους είναι ένα αμελητέο ποσοστό του φορτίου του συστήματος ισχύος.



Εικόνα 7.2: Ασύγχρονη γεννήτρια (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

7.3 Επιλογή τύπου γεννήτριας.

Η σωστή επιλογή του τύπου γεννήτριας σε ένα υδροηλεκτρικό έργο είναι πολύ σημαντική και αρκετά δαπανηρή και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες.

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ότι λειτουργεί ως γεννήτρια μόνο όταν είναι συνδεδεμένος με ένα εξωτερικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Αντίθετα, η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί με ή χωρίς εξωτερικό κύκλωμα.



Έτσι λοιπόν κατανοούμε ότι όταν η υδροηλεκτρική εγκατάσταση χρειάζεται ανεξαρτησία από το εξωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο ή υπάρχει έλλειψη του τελευταίου, τότε επιλέγεται η σύγχρονη γεννήτρια. Επιπλέον, η επιλογή της σύγχρονης γεννήτριας επιτυγχάνει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και έχει μεγαλύτερη εκκίνηση, σε σχέση πάντα με τον κινητήρα επαγωγής.

Η επιλογή ενός επαγωγικού κινητήρα βασίζεται στις χαμηλές τιμές που κυμαίνεται η ταχύτητα λειτουργίας του, στο ότι είναι ευρέως διαθέσιμοι στην αγορά και στο ότι έχουν μικρότερο κόστος σε σχέση με τις σύγχρονες γεννήτριες. Απαραίτητη προϋπόθεση για την χρήση του επαγωγικού κινητήρα είναι η δυνατότητα σύνδεσης με εξωτερικό δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος. Επιπρόσθετα, η κατασκευή των επαγωγικών κινητήρων είναι απλή και στιβαρή και τους καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτικούς ακόμα και σε λειτουργίες υψηλών ταχυτήτων.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι ακατάλληλες για την μεταφορά του ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις και συνεπώς καθίσταται αδύνατη η ηλεκτροδότηση των περιοχών. Ωστόσο, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σπάνια σε μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις και γίνεται κυρίως λόγω του πολύ χαμηλού κόστους για παραγωγή πολύ μικρών τιμών ισχύος.

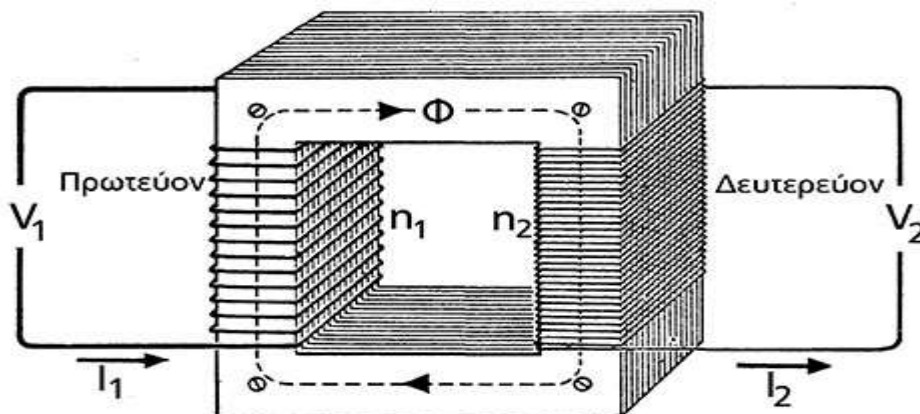
8. Μετασχηματιστές.

Οι μετασχηματιστές είναι στατικές διατάξεις, δηλαδή δεν διαθέτουν κινούμενα μέρη, και έχουν ως στόχο την μετατροπή ή μεταβολή των χαρακτηριστικών (τάση ή ένταση) του εναλλασσόμενου ρεύματος. Η χρήση τους οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος, χάρη στις δυνατότητες εύκολου, γρήγορου και οικονομικού μετασχηματισμού του.

Ένας μετασχηματιστής αποτελείται από:

- Τον πυρήνα, ο οποίος αποτελεί το μαγνητικό κύκλωμα, «οδηγώντας» τις μαγνητικές γραμμές
- Τα δύο τυλίγματα, το πρωτεύον και το δευτερεύον.

Πρωτεύον τυλίγμα είναι το τυλίγμα το οποίο προσλαμβάνει ενέργεια από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και δευτερεύον τυλίγμα είναι το τυλίγμα το οποίο προσφέρει ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό φορτίο. Η μαγνητική σύζευξη των δύο αυτών τυλιγμάτων γίνεται μέσω του πυρήνα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, προκειμένου να μειωθεί η επαγωγή των δινορρευμάτων, τα οποία οδηγούν σε απώλειες ενέργειας με την μορφή θερμότητας.



Εικόνα 8.1: Περιελίξεις μετασχηματιστών (πηγή: Άρθρα μετασχηματιστών)

8.1 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή.

Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Η εναλλασσόμενη τάση της πηγής U_1 (είσοδος) δημιουργεί ροή εναλλασσόμενου ρεύματος εντός του πρωτεύοντος τυλίγματος
- Το εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί στο εσωτερικό του πρωτεύοντος τυλίγματος μαγνητικό πεδίο εναλλασσόμενης και άρα μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής Φ_μ
- Η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μεταφέρεται μέσω του πυρήνα στο εσωτερικό του δευτερεύοντος τυλίγματος

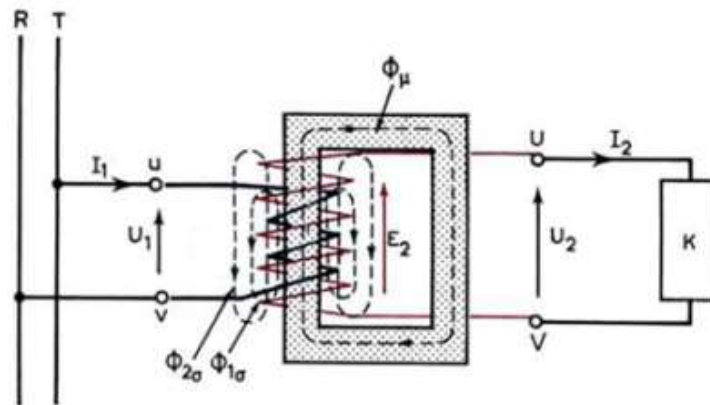
- Εξαιτίας του νόμου του Faraday, στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος αναπτύσσεται εναλλασσόμενη τάση εξ επαγωγής (ηλεκτρεργετική δύναμη) U_2 , η οποία αποτελεί και την έξοδο του μετασχηματιστή.

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι ένα χαρακτηριστικό του μετασχηματιστή και υπολογίζεται ως εξής $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = k$, όπου U , I , N είναι η τάση, το ρεύμα και ο

αριθμός των σπειρών αντίστοιχα για το εκάστοτε τύλιγμα του μετασχηματιστή. Γίνεται σαφές ότι με την κατάλληλη επιλογή των σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, δηλαδή του λόγου μετασχηματισμού, είναι δυνατό να λαμβάνουμε από το δευτερεύον τύλιγμα (έξοδο) τάση μεγαλύτερη (μετασχηματιστής ανύψωσης της τάσης) ή μικρότερη (μετασχηματιστής υποβιβασμού της τάσης) από αυτήν του πρωτεύοντος.

Η προσέγγιση στις παραπάνω σχέσεις είναι τόσο μεγαλύτερη όσο ο μετασχηματιστής πλησιάζει τον ιδανικό. Ως ιδανικό μετασχηματιστή ορίζουμε εκείνον στον οποίο δεν εντοπίζονται απώλειες ισχύος στα τυλίγματα και στον πυρήνα, δεν εντοπίζονται ροές σκέδασης και το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλη μαγνητική αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται αμελητέο ρεύμα διέγερσης για την ανάπτυξη της μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Επομένως, σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή οι σχέσεις αυτές ισχύουν απόλυτα.

Τέλος, παρατηρούμε ότι αν ένας μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, θα ανυψώνει την ένταση σε αυτό με την ίδια περίπου σχέση. Αυτό επίσης συνεπάγεται ότι το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μεγάλης έντασης έχει μικρό αριθμό σπειρών και αγωγό μεγάλης διατομής, ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης και χαμηλής έντασης έχει μεγάλο αριθμό σπειρών και αγωγό μικρής διατομής.



Εικόνα 8.2: Μονοφασικός Μετασχηματιστής με φορτίο (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

9. Υδροηλεκτρικός σταθμός Καστρακίου.



Εικόνα 9.1: Υδροηλεκτρικός Σταθμός Καστρακίου (πηγή: Mapio.net)

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Καστρακίου βρίσκεται στην δυτική Στερεά Ελλάδα στον νομό Αιτωλοακαρνανίας και η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1969 όπου και ξεκίνησε η εμπορική του λειτουργία. Σκοπός της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος καθώς και η ύδρευση και η άρδευση. Επομένως, είναι ένα έργο πολλαπλού σκοπού. Διαθέτει τέσσερις υδροστροβίλους Francis, καθένας από τους οποίους έχει την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος 80MW. Επομένως, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι ίση με 320MW. Η μέση ετήσια παραγόμενη ισχύς ανέρχεται στις 598GWh.

Για την πιο αποτελεσματική λειτουργία του υδροηλεκτρικού συστήματος έχει κατασκευαστεί χωμάτινο φράγμα ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία ταμιευτήρα. Το ύψος του φράγματος είναι ίσο με 96m και το μήκος της στέψης είναι ίσο με 547m. Ο όγκος του φράγματος ισούται με $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Η χωρητικότητα του ταμιευτήρα ισούται με $165 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και η επιφάνειά του με $24,2 \text{ km}^2$. Τέλος, η παροχή σχεδιασμού για τον υπερχειλιστή είναι ίση με $3700 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}}$.

9.1 Μελέτη περίπτωσης.

Η παρακάτω άσκηση αναφέρεται στα στοιχεία λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού Καστρακίου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του. Έτσι μπορούμε να



υπολογίσουμε με βάση τα δεδομένα λειτουργίας την ισχύ που παράγεται από την λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και τον βαθμό απόδοσης για τους διάφορους μήνες λειτουργίας. Αυτό θα μπορέσει να μας γνωστοποιήσει σε ποιους μήνες παράγεται η μεγαλύτερη ισχύς και τι πρέπει να κάνουμε έτσι ώστε κάθε μήνα να πετυχαίνουμε την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος. Σ' αυτό μπορεί να συμβάλει και ο υπολογισμός της εκμεταλλεύσιμης δυναμικότητας %. Στην συνέχεια είναι χρήσιμο να προσδιοριστούν οι απώλειες ενέργειας που παρουσιάζονται κατά μήκος των αγωγών προσαγωγής, έτσι ώστε να παράγουμε ενέργειες για να υπερνικηθούν αυτές οι αντιστάσεις. Επιπλέον, θα πρέπει να υπολογιστούν το απαιτούμενο και το διαθέσιμο ύψος για την σωστή τοποθέτηση του υδροστροβίλου έτσι ώστε να περιορίσουμε το φαινόμενο εμφάνισης της σπηλαιώσεως. Τέλος, είναι χρήσιμος ο προσδιορισμός της γωνίας ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων από τον κατασκευαστή πριν από την οποιαδήποτε χρήση του υδροστροβίλου.

9.2 Πίνακας υπολογισμού ενεργειών και βαθμού απόδοσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία λειτουργίας των τεσσάρων υδροστροβίλων για κάθε μήνα. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται:

- Ο διαθέσιμος όγκος νερού W_{ap} (m^3) που απαιτείται για την παραγωγή συγκεκριμένου ποσού ηλεκτρικής ενέργειας και καθορίζεται από το δίκτυο
- Ο χρόνος λειτουργίας σε h για κάθε μονάδα στην διάρκεια ενός μηνός
- Το μανομετρικό ύψος σε m για κάθε μονάδα υδροστροβίλου, δηλαδή την απόσταση που διανύει το νερό από τον ταμιευτήρα μέχρι την αναρρόφηση του στροβίλου με σκοπό την παραγωγή ενέργειας

Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμεύουν για τον υπολογισμό των παρακάτω στοιχείων. Αρχικά υπολογίζουμε την παροχή με την βοήθεια της εξίσωσης

$$Q = \frac{W_{ap}}{t \cdot 3600} \quad (9.1)$$

όπου

- W_{ap} είναι ο διαθέσιμος όγκος νερού που απαιτείται για την παραγωγή συγκεκριμένου ποσού ενέργειας σε m^3
- t είναι ο χρόνος λειτουργίας κάθε υδροστροβίλου σε h .

Η παροχή υπολογίζεται σε $\frac{m^3}{sec}$. Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για τον μήνα Ιανουάριο και την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού σταθμού, η παροχή Q υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = \frac{11660160}{28,40 \cdot 3600} \Rightarrow Q = 114,05 \frac{m^3}{sec}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς που παράγεται με την εξίσωση



$$P_e = \frac{E_{net}}{t} \quad (9.2)$$

όπου

- E_{net} είναι η παραγόμενη ενέργεια σε MWh
- t ο χρόνος λειτουργίας σε h

Η ισχύς υπολογίζεται σε MW. Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού για τον μήνα Ιανουάριο, η ισχύς P_e υπολογίζεται ως εξής:

$$P_e = \frac{2205}{28,40} \Rightarrow P_e = 77,64 MW$$

Έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης νερού με την βοήθεια της εξίσωσης

$$\lambda = \frac{W_{ap}}{E_{net} \cdot 1000} \quad (9.3)$$

όπου W_{ap} και E_{net} είναι γνωστά από πριν. Η ειδική κατανάλωση νερού υπολογίζεται σε $\frac{m^3}{kWh}$. Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού για τον μήνα Ιανουάριο, η ειδική κατανάλωση λ υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = \frac{11660160}{2205 \cdot 1000} \Rightarrow \lambda = 5,29 \frac{m^3}{kWh}$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός της υδραυλικής ισχύος με την εξίσωση

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (9.4)$$

όπου

- ρ είναι η πυκνότητα του νερού και είναι περίπου ίση με $1000 \frac{kg}{m^3}$
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας και είναι ίση με $9,81 \frac{m}{sec^2}$
- Q η παροχή που υπολογίστηκε προηγουμένως σε $\frac{m^3}{sec}$
- H το μανομετρικό ύψος σε m που δίνεται για κάθε μονάδα.

Η υδραυλική ισχύς υπολογίζεται σε MW. Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού και για τον μήνα Ιανουάριο, η υδραυλική ισχύς P_h υπολογίζεται ως εξής:

$$P_h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 114,05 \cdot 75,62 \Rightarrow P_h = 84,60 MW$$



Επιπλέον, υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης της κάθε μονάδας υδροστροβίλου με την εξίσωση

$$\eta_p = \frac{P_e}{P_h} \quad (9.5)$$

όπου

- P_e είναι η ισχύς που υπολογίστηκε προηγουμένως σε MW
- P_h η υδραυλική ισχύς που υπολογίστηκε σε MW

Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού για τον μήνα Ιανουάριο, ο βαθμός απόδοσης η_p υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_p = \frac{77,64}{84,60} \Rightarrow \eta_p = 91,77\%$$

Τέλος, υπολογίζεται ο παράγοντας

$$\frac{Q}{Q_{\max}} \quad (9.6)$$

όπου

- Q η παροχή που υπολογίστηκε προηγουμένως σε $\frac{m^3}{\text{sec}}$
- Q_{\max} η μέγιστη παροχεταιυτική ικανότητα του αγωγού προσαγωγής η οποία είναι ίση με $116 \frac{m^3}{\text{sec}}$.

Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για την μονάδα 1 του υδροηλεκτρικού για τον μήνα Ιανουάριο, ο παράγοντας $\frac{Q}{Q_{\max}}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{114,05}{116} = 0,98$$

Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα. Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση υπολογισμού, υπολογίσθηκε ως παράδειγμα η πρώτη σειρά του πίνακα. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται και οι υπόλοιπες γραμμές του πίνακα.

Μήνας	Μονάδα	Wap	t	H	Q	Pe	Enet	λ	Ph	ηp	Q / Qmax
		m ³	h	m	m ³ / sec	MW	MWh	m ³ / kWh	MW	%	-



Διπλωματική εργασία «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδροηλεκτρικά Έργα – Μελέτη Περίπτωσης του ΥΗΣ Καστρακίου».
ΚΑΡΑΝΤΖΗ ΕΛΕΝΗ, Α.Μ. 7147

Ιαν.	1	11660160	28,40	75,62	114,05	77,64	2205	5,29	84,60	91,77	0,98
	2	28405410	69,25	75,62	113,94	77,69	5380	5,28	84,52	91,91	0,98
	3	78490950	384,30	75,62	56,73	32,10	12335	6,36	42,09	76,26	0,49
	4	125772960	649,10	75,62	53,82	29,86	19380	6,49	39,93	74,78	0,46
Φεβ.	1	10094340	25,10	75,64	111,71	75,90	1905	5,30	82,89	91,56	0,96
	2	47102730	115,25	75,64	113,53	77,44	8925	5,28	84,24	91,93	0,98
	3	78688830	374,15	75,64	58,42	33,40	12495	6,30	43,35	77,04	0,50
	4	103876170	508,20	75,64	56,78	32,13	16330	6,36	42,13	76,27	0,49
Μαρ.	1	7338630	18,05	75,56	112,94	77,01	1390	5,28	83,71	91,99	0,97
	2	4145880	10,10	75,56	114,02	77,72	785	5,28	84,52	91,96	0,98
	3	29562120	123,30	75,56	66,60	40,02	4935	5,99	49,37	81,08	0,57
	4	37275960	147,00	75,56	70,44	43,10	6335	5,88	52,21	82,54	0,61
Απρ.	1	0	0,00	76,51	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	8513310	21,10	76,51	112,08	76,78	1620	5,26	84,12	91,27	0,97
	3	33696660	151,40	76,51	61,82	37,19	5630	5,99	46,40	80,14	0,53
	4	26691990	122,25	76,51	60,65	36,02	4404	6,06	45,52	79,14	0,52
Μαιος	1	2156880	5,20	76,75	115,22	78,85	410	5,26	86,75	90,89	0,99
	2	2225220	5,30	76,75	116,63	80,19	425	5,24	87,81	91,32	1,01
	3	42258540	176,30	76,75	66,58	40,98	7225	5,85	50,13	81,75	0,57
	4	74305530	259,25	76,75	79,62	51,21	13275	5,60	59,94	85,42	0,69
Ιουν.	1	8647530	21,55	76,75	111,47	76,33	1645	5,26	83,92	90,96	0,96
	2	13466520	33,00	76,75	113,35	78,18	2580	5,22	85,35	91,61	0,98
	3	82423980	282,05	76,75	81,18	52,44	14790	5,57	61,12	85,80	0,70
	4	162309330	558,20	76,75	80,77	52,07	29064	5,58	60,81	85,62	0,70
Ιουλ.	1	22973040	57,45	77,17	111,08	76,59	4400	5,22	84,09	91,08	0,96
	2	25733220	62,55	77,17	114,28	78,90	4935	5,21	86,51	91,20	0,99
	3	151291410	448,30	77,17	93,74	63,09	28285	5,35	70,97	88,91	0,81
	4	174992850	516,00	77,17	94,20	63,56	32795	5,34	71,32	89,12	0,81
Αυγ.	1	32517870	80,50	76,76	112,21	76,89	6190	5,25	84,49	91,01	0,97
	2	27526500	67,55	76,76	113,19	77,79	5255	5,24	85,24	91,27	0,98
	3	139481370	431,35	76,76	89,82	59,33	25590	5,45	67,64	87,71	0,77
	4	159054300	485,00	76,76	91,10	60,20	29195	5,45	68,60	87,75	0,79
Σεπ.	1	7916940	19,00	76,86	115,74	79,74	1515	5,23	87,27	91,37	1,00
	2	17569260	43,35	76,86	112,58	77,28	3350	5,24	84,89	91,04	0,97
	3	74158170	234,15	76,86	87,98	58,02	13585	5,46	66,33	87,46	0,76



Διπλωματική εργασία «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδροηλεκτρικά Έργα – Μελέτη Περίπτωσης του ΥΗΣ Καστρακίου».
ΚΑΡΑΝΤΖΗ ΕΛΕΝΗ, Α.Μ. 7147

	4	114917190	351,25	76,86	90,88	60,28	21175	5,43	68,52	87,98	0,78
Οκτ.	1	0	0,00	76,88	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	9373710	23,00	76,88	113,21	77,83	1790	5,24	85,38	91,15	0,98
	3	61508160	207,40	76,88	82,38	53,42	11080	5,55	62,13	85,99	0,71
	4	75847110	263,05	76,88	80,09	51,72	13605	5,57	60,41	85,62	0,69
Νοεμ.	1	33715290	83,45	76,81	112,23	77,53	6470	5,21	84,56	91,68	0,97
	2	68468340	185,45	76,81	102,56	70,91	13150	5,21	77,28	91,76	0,88
	3	113659770	363,50	76,81	86,86	57,19	20790	5,47	65,45	87,39	0,75
	4	132796530	447,45	76,81	82,44	53,74	24045	5,52	62,12	86,51	0,71
Δεκ.	1	119354130	307,10	76,88	107,96	74,18	22780	5,24	81,42	91,10	0,93
	2	144240090	356,55	76,88	112,37	77,84	27755	5,20	84,75	91,85	0,97
	3	152507190	492,40	76,88	86,03	56,76	27950	5,46	64,89	87,48	0,74
	4	149679990	499,40	76,88	83,26	54,57	27250	5,49	62,79	86,90	0,72

Πίνακας 9.1: Υπολογισμός ενεργειών και βαθμών απόδοσης

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε αρχικά ότι οι τιμές του μανομετρικού διαφέρουν από μήνα σε μήνα και για τις τέσσερις μονάδες. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το μανομετρικό είναι η απόσταση που διανύει το νερό από την επιφάνεια του ταμιευτήρα μέχρι την είσοδο του υδροστροβίλου με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Έτσι λοιπόν παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή του μανομετρικού Η εμφανίζεται τον μήνα Ιούλιο. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οι ανάγκες για ενεργειακή κάλυψη είναι ιδιαίτερα αυξημένες και έχει γίνει η απαραίτητη αποθήκευση νερού για την κάλυψή τους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την παύση τροφοδότησης των γύρω περιοχών με νερό (ύδρευση, άρδευση), οδηγεί στην αυξημένη παροχή αυτούς τους μήνες. Όπως είναι φυσικό, υψηλές τιμές του μανομετρικού παρουσιάζονται και τους χειμερινούς μήνες όπου λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών που περιλαμβάνουν καταρρακτώδεις βροχές, υπάρχει εξίσου μεγάλη ροή νερού. Επιπλέον, οι τιμές του μανομετρικού στην διάρκεια ενός μηνός είναι ίδιες και για τους τέσσερις υδροστροβίλους καθώς οι υδροστροβίλοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και άρα το νερό θα διανύει κάθε φορά την ίδια απόσταση.

Μπορούμε ακόμη να παρατηρήσουμε ότι στην διάρκεια ενός μηνός, δεν λειτουργούν όλοι οι υδροστροβίλοι το ίδιο χρονικό διάστημα. Σύμφωνα με τα δεδομένα λειτουργίας που απεικονίζονται βλέπουμε ότι περισσότερες ώρες λειτουργούν οι μονάδες 3 και 4. Αυτό συνεπάγεται ότι αυτές οι μονάδες αξιοποιούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού που όμως όπως φαίνεται από τον πίνακα δεν είναι αρκετό δεδομένου των ωρών λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει καθώς η παροχή η οποία εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα νερού και τον χρόνο λειτουργίας συνδεδεμένα με

την εξίσωση $Q = \frac{W_{ap}}{t \cdot 3600}$, είναι μικρότερη σε σχέση με τις άλλες δύο μονάδες 1 και 2

που λειτουργούν λιγότερες ώρες. Αυτό οδηγεί στην παραγωγή μικρότερης ισχύος σε σχέση με τις μονάδες 1 και 2, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στους βαθμούς



απόδοσης των μονάδων 3 και 4, με βάση πάντα τον όγκο νερού και τον χρόνο λειτουργίας.

Η επιλογή των ωρών λειτουργίας για κάθε μονάδα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος λειτουργίας ή το κόστος συντήρησης καθενός από τους υδροστροβίλους ή ακόμα και τις ανάγκες κάλυψης συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας με βάση την κατανάλωση. Έτσι για παράδειγμα, οι μονάδες 3 και 4 μπορεί να παρουσιάζουν συχνά λειτουργικά προβλήματα, καθώς παρά το γεγονός ότι λειτουργούν πολλές ώρες, δεν αποδίδουν ούτε κατά το ήμισυ την ονομαστική ισχύ. Ακόμη, παρατηρούμε ότι τον μήνα Απρίλιο η μονάδα 1 τέθηκε εκτός λειτουργίας κάτι το οποίο μπορεί να σημαίνει ότι παρουσίασε κάποια βλάβη ή έγινε κάποια συντήρηση ή δεδομένων των ενεργειακών αναγκών δεν ήταν απαραίτητη η λειτουργία του συγκεκριμένου υδροστροβίλου σε συνδυασμό μάλιστα και με τα όποια τεχνικά προβλήματα που είναι πιθανό να παρουσιαστούν.

9.3 Πίνακας εξαγωγής διαγραμμάτων: μέση ειδική κατανάλωση νερού κάθε μήνα, φορτίο συναρτήσεως της ισχύος και καμπύλη φορτίου παροχής.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένα δεδομένα λειτουργίας τα οποία είναι η συνολική εισροή και εκροή νερού και για τους τέσσερις υδροστροβίλους στην διάρκεια ενός μήνα καθώς και ο όγκος νερού για την παραγωγή ενέργειας. Στην συνέχεια υπολογίζονται ορισμένα στοιχεία τα οποία θα μας βοηθήσουν να έχουμε μια καλύτερη άποψη για την λειτουργία του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης του νερού με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, ο οποίος εξάγεται μέσω του κλάσματος που έχει ως αριθμητή τον όγκο νερού για παραγωγή ενέργειας και παρονομαστή την συνολική εισροή νερού. Ακολούθως καταγράφεται η μέση ειδική κατανάλωση νερού σε $\frac{m^3}{kWh}$ και πρόκειται ουσιαστικά για τον μέσο όρο των ειδικών καταναλώσεων λ που υπολογίστηκαν σε προηγούμενο πίνακα και για τους τέσσερις υδροστροβίλους στην διάρκεια ενός μήνα. Έπειτα υπολογίζεται το φορτίο – ισχύς σε MW ως το άθροισμα της ενέργειας P_e που υπολογίστηκε σε προηγούμενο πίνακα και για τις τέσσερις μονάδες στην διάρκεια ενός μήνα. Με παρόμοιο τρόπο εξάγεται και η στήλη φορτίο σε MW όπου πρόκειται για το άθροισμα της υδραυλικής ενέργειας P_h για τις τέσσερις μονάδες στην διάρκεια ενός μήνα. Επιπλέον, υπολογίζεται και ο μέσος χρόνος λειτουργίας όλων των μονάδων για κάθε μήνα σε h, με βάση τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα. Τέλος, υπολογίζεται η παροχή σε $\frac{m^3}{sec}$ μέσω την εξίσωσης

$$Παροχή = \frac{όγκος}{t \cdot 3600} \quad (9.7)$$

όπου

- ο όγκος είναι ο όγκος νερού για παραγωγή ενέργειας που αναφέρεται στον συγκεκριμένο πίνακα



➤ το μέσος χρόνος λειτουργίας και των τεσσάρων μονάδων σε h.
Για την πρώτη γραμμή του πίνακα, δηλαδή για τον μήνα Ιανουάριο για το σύνολο και των τεσσάρων μονάδων του υδροηλεκτρικού, η παροχή υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Παροχή} = \frac{7881596}{282,76 \cdot 3600} = 7,74 \frac{m^3}{\text{sec}}$$

Στον ακόλουθο πίνακα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας. Να σημειωθεί ότι υπολογίσθηκε ως παράδειγμα η πρώτη γραμμή του πίνακα και ότι με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται και οι υπόλοιπες σειρές του πίνακα.

Μήνας	Συνολική εισροή νερού	Συνολική εκροή νερού	Όγκος νερού για παραγωγή ενέργειας	Συντελεστής χρησιμοποίησης νερού για παραγωγή ενέργειας	Μέση ειδική κατανάλωση νερού	Φορτίο - Ισχύς	Φορτίο	Μέσος χρόνος λειτουργίας	Παροχή
	m ³	m ³	m ³		m ³ / kWh	MW	MW	h	m ³ /sec
Ιαν	7865145	7911596	7881596	100,21	5,86	217,28	251,14	282,76	7,74
Φεβ	8214900	8297658	8267658	100,64	5,81	218,87	252,62	255,68	8,98
Μαρ	3185265	2556535	2526535	79,32	5,61	237,85	269,81	74,61	9,41
Απρ	2651732	2326732	2296732	86,61	5,77	149,99	176,04	73,69	8,66
Μαιος	4157295	3931489	3901489	93,85	5,49	251,22	284,63	111,51	9,72
Ιουν	8941579	8924912	8894912	99,48	5,41	259,02	291,20	223,70	11,05
Ιουλ	11924855	12126468	12096468	101,44	5,28	282,14	312,89	271,08	12,40
Αυγ	11750323	11597098	11567098	98,44	5,35	274,21	305,97	266,10	12,07
Σεπ	7042409	7182052	7152052	101,56	5,34	275,32	307,01	161,94	12,27
Οκτ	5045451	4763193	4733193	93,81	5,45	182,97	207,92	123,36	10,66
Νοεμ	11693331	11651331	11621331	99,38	5,35	259,37	289,41	269,96	11,96
Δεκ	18364884	18281013	18251013	99,38	5,35	263,35	293,85	413,86	12,25

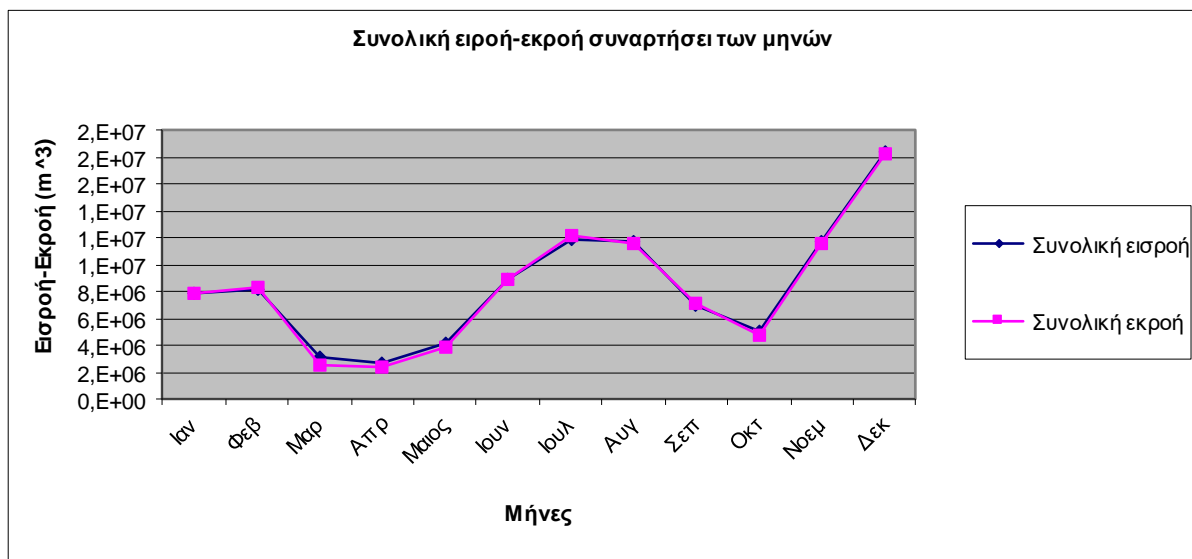
Πίνακας 9.2: Υπολογισμός συντελεστή χρησιμοποίησης για παραγωγή ενέργειας και παροχής

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μεγάλη εισροή νερού στον ταμιευτήρα παρατηρείται τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο που είναι άλλωστε λογικό δεδομένου των καιρικών συνθηκών. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι μεγάλη ποσότητα νερού που εισέρχεται στον ταμιευτήρα εντοπίζεται και τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, κάτι το οποίο οφείλεται από τη μία στη λειτουργία του προηγούμενου υδροηλεκτρικού των Κρεμαστών και από την άλλη στη μεγάλη αποθήκευση νερού στον ταμιευτήρα αυτούς τους μήνες σε συνδυασμό με την παύση τροφοδότησης της γύρω περιοχής με νερό. Τέλος, παρατηρούμε ότι σε ορισμένους μήνες η συνολική εκροή είναι μεγαλύτερη από την συνολική εισροή νερού. Αυτό συμβαίνει διότι στο σημείο υπάρχουν παραπτόταμοι οι οποίοι ενδέχεται

να απορρέουν στο σημείο εκροής στο οποίο καταγράφουμε την συνολική ποσότητα νερού.

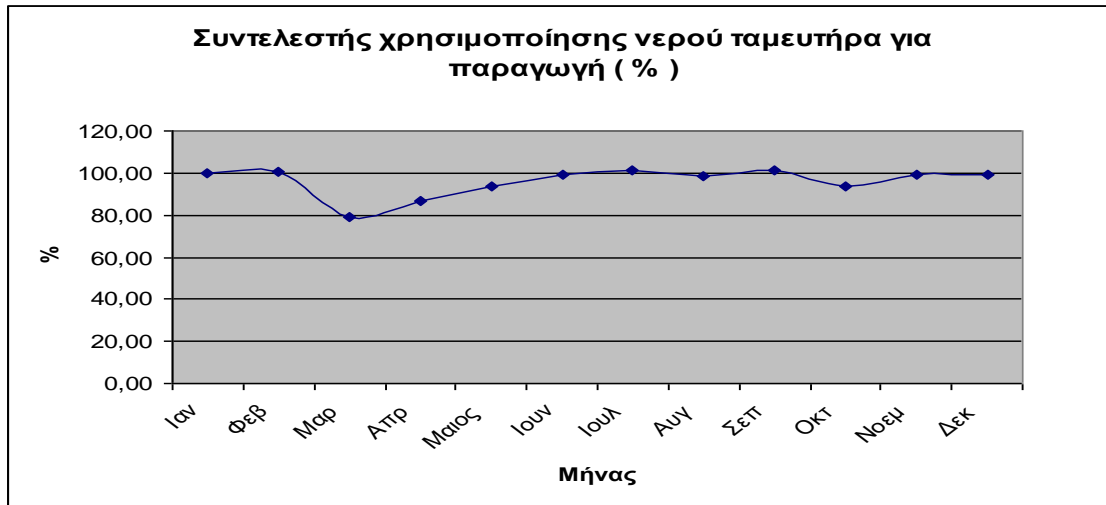
Αναφορικά με τον όγκο νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μπορούμε να δούμε ότι αξιοποιείται σχεδόν όλη η ποσότητα νερού κάθε μήνα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Αυτό αποτυπώνεται στις τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης του νερού με σκοπό την παραγωγή ενέργειας καθώς παρατηρούμε ότι οι τιμές του κυμαίνονται από 79% μέχρι και 100%. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο υδροηλεκτρικός σταθμός Καστρακίου είναι εν μέρει ένα έργο πολλαπλού σκοπού και εξυπηρετεί και άλλες ανάγκες, όπως ύδρευση και άρδευση γεωργικών εκτάσεων. Τα νερά που απορρέουν από το φράγμα Καστρακίου καταλήγουν στο ακόλουθο φράγμα του Στράτου το οποίο έχει ως σκοπό την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της γύρω περιοχής. Αυτός ίσως είναι ένα λόγος για τον οποίο ορισμένους μήνες ο συντελεστής χρησιμοποίησης του νερού με σκοπό την παραγωγή ενέργειας, είναι μικρότερος από 100% και κυμαίνεται από 80% έως 90%.

Για την καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων εξάγονται τα παρακάτω διαγράμματα.



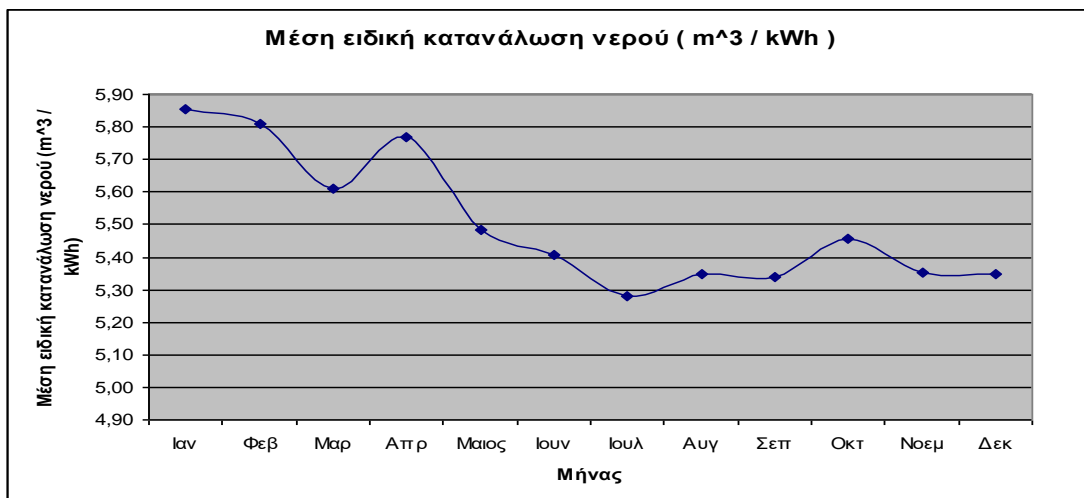
Διάγραμμα 9.1: Συνολική εισροή εκροή νερού συναρτήσεϊ των μηνών

Το παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνει την μεταβολή της συνολικής εισροής και εκροής νερού συναρτήσεϊ των μηνών. Όπως ήδη αναφέραμε και εξηγήσαμε παρατηρείται αύξηση της ποσότητας νερού τους χειμερινούς μήνες καθώς και τους καλοκαιρινούς. Τέλος, με την βοήθεια αυτού του διαγράμματος αποτυπώνεται καλύτερα αυτό που παρατηρήσαμε και στις τιμές του πίνακα, δηλαδή ότι σε ορισμένους μήνες η συνολική εκροή είναι μεγαλύτερη από την συνολική εισροή νερού. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως έχουμε ήδη πει, στο σημείο υπάρχουν παραπόταμοι που εκρέουν στο σημείο καταγραφής των τιμών.



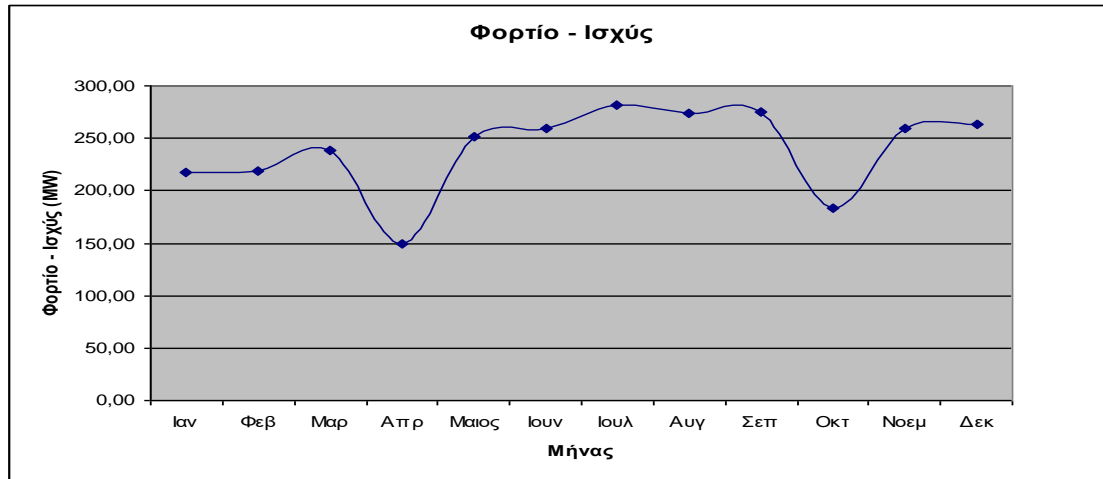
Διάγραμμα 9.2: Συντελεστής χρησιμοποίησης του νερού για κάθε μήνα

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την μεταβολή του συντελεστή χρησιμοποίησης του νερού του ταμειυτήρα συναρτήσεως των μηνών με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Έτσι λοιπόν μπορούμε να δούμε ότι τους μήνες Μάρτιο και Οκτώβριο ο συντελεστής χρησιμοποίησης του νερού δεν είναι 100% και κυμαίνεται από 79 % έως 90%. Αυτό όπως αναφέραμε και προηγουμένως μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνους τους μήνες εξυπηρετούνται και κάποιες άλλες λειτουργίες του υδροηλεκτρικού, όπως ύδρευση ή άρδευση των γύρω περιοχών, αφού το συγκεκριμένο υδροηλεκτρικό είναι ένα έργο πολλαπλού σκοπού. Επιπλέον, οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης για τους μήνες αυτούς μπορεί να υποδηλώνει ότι εκείνους του μήνες δεν υπάρχει μεγάλη απαίτηση για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και γι' αυτό το λόγο ένα μέρος της ποσότητας του νερού χρησιμοποιείται και για άλλες λειτουργίες. Τέλος, παρατηρούμε ότι τους υπόλοιπους μήνες η ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον ταμειυτήρα χρησιμοποιείται εξ' ολοκλήρου για την παραγωγή ενέργειας.



Διάγραμμα 9.3: Μέση ειδική κατανάλωση συναρτήσεως των μηνών

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την μεταβολή της μέσης ειδικής κατανάλωσης νερού των τεσσάρων μονάδων για κάθε μήνα. Το μέγεθος αυτό εκφράζει ουσιαστικά πόσα κυβικά νερού χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μίας κιλοβατώρας. Γίνεται κατανοητό ότι η ειδική κατανάλωση νερού εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα νερού που υπάρχει στον ταμιευτήρα καθώς και από την ενέργεια που παράγεται με βάση αυτή την ποσότητα νερού. Η μέγιστη μέση ειδική κατανάλωση νερού εντοπίζεται τον Ιανουάριο.



Διάγραμμα 9.4: Φορτίο συναρτήσει των μηνών

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την μεταβολή της ισχύος που παράγεται και για τις τέσσερις μονάδες στην διάρκεια ενός μήνα. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ισχύς παράγεται τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο καθώς και τον Σεπτέμβριο. Το ίδιο συμβαίνει και με τον Δεκέμβριο όπου έχουμε μεγάλη παραγωγή ισχύος. Στον αντίποδα ελάχιστη παραγωγή ισχύος παρατηρείται τους μήνες Απρίλιο και Οκτώβριο. Τους μήνες αυτούς είναι πιθανό να μην υπάρχουν τόσο μεγάλες απαιτήσεις για παραγωγή ισχύος, σε αντίθεση με τους μήνες που αναφέραμε όπου ενδέχεται να υπάρχουν υψηλές ανάγκες ενεργειακής κάλυψης και γι' αυτό να υπάρχει αυτή η διαφορά στην παραγωγή ισχύος. Επιπλέον, στους μήνες που αναφέραμε αρχικά υπάρχει μεγάλη εισροή νερού στον ταμιευτήρα, κάτι το οποίο έχει αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο.



Διάγραμμα 9.5: Καμπύλη φορτίου παροχής



Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή της υδραυλικής ισχύος και για τους τέσσερις υδροστροβίλους συναρτήσεως της παροχής. Καθένα ζευγάρι τιμών αντιστοιχεί στην διάρκεια ενός μήνα. Έτσι λοιπόν μπορούμε να δούμε ότι τον μήνα Ιούλιο παρατηρείται η παραγωγή μέγιστης υδραυλικής ισχύος, γεγονός το οποίο είναι λογικό καθώς η υδραυλική ισχύς συνδέεται με την παροχή μέσω της σχέσης $P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$. Τον μήνα Ιούλιο λοιπόν παρατηρείται η μέγιστη παροχή και άρα θα παράγεται η μέγιστη υδραυλική ισχύς.

9.4 Υπολογισμός απαιτούμενης παροχής και όγκου υπερχείλισης

Αρχικά υπολογίζεται η παροχή που απαιτείται για τη συνεχή λειτουργία των υδροστροβίλων (μονάδων). Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιούμε την εξίσωση

$$I = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta \Rightarrow Q = \frac{I}{9,81 \cdot H \cdot \eta} \quad (9.8)$$

όπου

- I είναι η ονομαστική ισχύς των μονάδων και είναι ίση με 80MW
- H είναι το μέσο ύψος υδατόπτωσης και είναι ίσο με 75,7m
- η είναι ο μέσος βαθμός απόδοσης και είναι ίσος με 87,45%

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα θα έχουμε

$$Q = \frac{80000}{9,81 \cdot 75,7 \cdot 0,8745} \Rightarrow Q = 123,19 \frac{m^3}{sec}$$

Συνολικά για τους τέσσερις υδροστροβίλους του υδροηλεκτρικού απαιτείται παροχή ίση με

$$Q_{ολ} = 4 \cdot Q = 4 \cdot 123,19 \Rightarrow Q_{ολ} = 492,76 \frac{m^3}{sec}$$

Για συνεχή λειτουργία των υδροστροβίλων απαιτείται ετησίως

$$V = Q \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 492,76 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \Rightarrow V = 15539,68 \cdot 10^6 m^3$$

Ακολούθως παρουσιάζονται η συνολική εισροή και εκροή νερού στο υδροηλεκτρικό Καστρακίου. Με βάση αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση ο αθροιστικός όγκος. Από την διαφορά του αθροιστικού όγκου για την εισροή και του αθροιστικού όγκου για την εκροή (κατανάλωση) προκύπτουν οι τιμές IN-OUT του πίνακα. Έπειτα, βρίσκουμε την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της στήλης. Η διαφορά των τιμών αυτών αποτελούν τον ωφέλιμο όγκο, δηλαδή τον όγκο ο οποίος μένει στον ταμιευτήρα έπειτα από την διαδικασία παραγωγής ενέργειας και ο οποίος είναι διαθέσιμος για την επιτέλεση άλλων ενεργειών. Τέλος, υπολογίζεται ο



όγκος υπερχείλισης από την διαφορά του συνολικού όγκου της εισροής μείον του συνολικού όγκου της εκροής. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Μήνες	Συνολική εισροή *10 ³ m ³	Αθροιστικός όγκος *10 ³ m ³	Συνολική εκροή *10 ³ m ³	Αθροιστικός όγκος *10 ³ m ³	IN-OUT *10 ³ m ³
ΜΑΡΤ	3185,265	7865,145	2526,535	7911,596	-46,451
ΑΠΡ	2651,732	10516,877	2296,732	10208,328	308,549
ΜΑΙΟΣ	4157,295	14674,172	3901,489	14109,817	564,355
ΙΟΥΝ	8941,579	23615,751	8894,912	23004,729	611,022
ΙΟΥΛ	11924,855	35540,606	12096,468	35101,197	439,409
ΑΥΓ	11750,323	47290,929	11567,098	46668,295	622,634
Σεπτ	7042,409	54333,338	7152,052	53820,347	512,991
ΟΚΤ	5045,451	59378,789	4733,193	58553,54	825,249
ΝΟΕΜ	11693,331	71072,12	11621,331	70174,871	897,249
ΔΕΚ	18364,884	89437,004	18251,013	88425,884	1011,12
ΙΑΝ	7865,145	97302,149	7881,596	96307,48	994,669
ΦΕΒ	8214,9	105517,049	8267,658	104575,14	941,911
Μέγιστος όγκος in-out *10 ³ m ³					1011,12
Ελάχιστος όγκος in-out *10 ³ m ³					-46,451
Ωφέλιμος όγκος *10 ³ m ³					1057,571
Όγκος υπερχείλισης *10 ³ m ³					941,911

Πίνακας 9.3: Υπολογισμός όγκου υπερχείλισης

Η παραπάνω διαδικασία έγινε με βάση τη διαδικασία του παραδείγματος 3 του κεφαλαίου 3 από το μάθημα «Υδροδυναμικά έργα» του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης. Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διαδικασίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήνες	Συνολική εισροή *10 ⁶ m ³	Αθροιστικός όγκος *10 ⁶ m ³	Συνολική εκροή *10 ⁶ m ³	Αθροιστικός όγκος *10 ⁶ m ³	IN-OUT *10 ⁶ m ³
-------	---	---	--	---	--



ΜΑΡΤ	472,7	472,7	263,3	263,3	209,4
ΑΠΡ	372,5	845,2	263,3	526,6	318,6
ΜΑΙΟΣ	240,3	1085,5	263,3	789,9	295,6
ΙΟΥΝ	188,4	1273,9	263,3	1053,2	220,7
ΙΟΥΛ	178,2	1452,1	263,3	1316,5	135,6
ΑΥΓ	165,4	1617,5	263,3	1579,8	37,7
ΣΕΠΤ	235,8	1853,3	263,3	1843,1	10,2
ΟΚΤ	472,2	2325,5	263,3	2106,4	219,1
ΝΟΕΜ	838,8	3164,3	263,3	2369,7	794,6
ΔΕΚ	358,6	3522,9	263,3	2633	889,9
ΙΑΝ	298,4	3821,3	263,3	2896,3	925
ΦΕΒ	285,7	4107	263,3	3159,6	947,4
Μέγιστος όγκος in-out *10⁶ m³					947,4
Ελάχιστος όγκος in-out *10⁶ m³					10,2
Ωφέλιμος όγκος *10⁶ m³					937,2
Όγκος υπερχείλισης *10⁶ m³					947,4

Πίνακας 9.4: Υπολογισμός όγκου υπερχείλισης για το παράδειγμα του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου

Συγκριτικά για τους δύο πίνακες παρατηρούμε ότι πρόκειται για δύο τελείως διαφορετικές περιπτώσεις παροχών και είναι φυσικό ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν. Αυτό μπορεί να συμβαίνει καθώς τα δύο παραδείγματα αναφέρονται σε διαφορετικούς ποταμούς με εντελώς διαφορετικές παροχές και σε περιοχές με διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι στην δεύτερη περίπτωση ο όγκος ο οποίος καταναλώνεται με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σταθερός, σε αντίθεση με την μελέτη περίπτωσης την οποία και εξετάζουμε στην έκταση της διπλωματικής. Ο όγκος κατανάλωσης εξαρτάται από τις ανάγκες οι οποίες πρέπει να καλυφθούν σε κάθε περίπτωση.

9.5 Πίνακας αποτύπωσης του βαθμού απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού



Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των βαθμών απόδοσης για κάθε μονάδα στην διάρκεια ενός μήνα όπως υπολογίστηκαν και στον πρώτο πίνακα μέσω της σχέσης $\eta_p = \frac{P_e}{P_h}$. Τέλος, αποτυπώνεται ο βαθμός απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού ο οποίος εξάγεται από τον μέσο όρο των βαθμών απόδοσης και των τεσσάρων υδροστροβίλων στην διάρκεια ενός μήνα. Έτσι λοιπόν, για τον μήνα Ιανουάριο θα έχουμε ότι:

$$\eta_p = \frac{91,77 + 91,91 + 76,26 + 74,78}{4} \Rightarrow \eta_p = 83,68\%$$

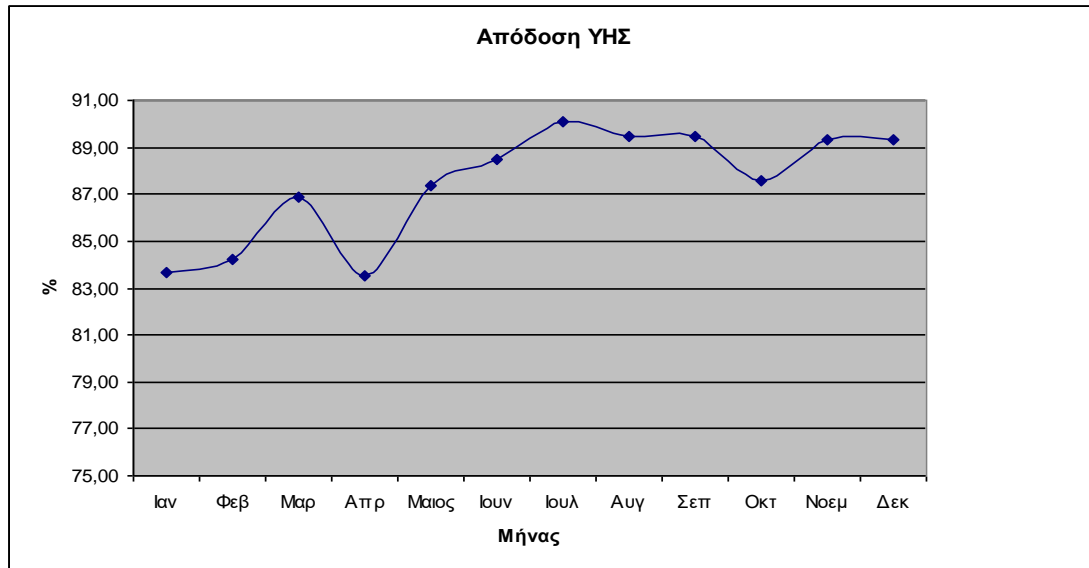
Με ανάλογο τρόπο προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού τους υπόλοιπους μήνες.

Μήνας	Απόδοση η (%)				
	Μονάδα1	Μονάδα2	Μονάδα3	Μονάδα4	ΥΗΣ
Ιαν	91,77	91,91	76,26	74,78	83,68
Φεβ	91,56	91,93	77,04	76,27	84,20
Μαρ	91,99	91,96	81,08	82,54	86,89
Απρ	0,00	91,27	80,14	79,14	83,52
Μάιος	90,89	91,32	81,75	85,42	87,35
Ιουν	90,96	91,61	85,80	85,62	88,50
Ιουλ	91,08	91,20	88,91	89,12	90,08
Αυγ	91,01	91,27	87,71	87,75	89,44
Σεπ	91,37	91,04	87,46	87,98	89,46
Οκτ	0,00	91,15	85,99	85,62	87,59
Νοεμ	91,68	91,76	87,39	86,51	89,34
Δεκ	91,10	91,85	87,48	86,90	89,33

Πίνακας 9.5: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε υψηλές τιμές του βαθμού απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού για όλους τους μήνες, οι οποίες κυμαίνονται

από 83% έως και 90%. Καλύτερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Διάγραμμα 9.6: Απόδοση υδροηλεκτρικού σταθμού συναρτήσει των μηνών

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή του βαθμού απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού συναρτήσει των μηνών. Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι μεγαλύτερη απόδοση έχουμε τον μήνα Ιούλιο, γεγονός το οποίο δικαιολογείται καθώς όπως είδαμε και σε προηγούμενους πίνακες τον μήνα αυτό υπάρχει η μεγαλύτερη παροχή και άρα παράγεται μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τους άλλους μήνες, κάτι το οποίο έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη παράγραφο.

9.6 Πίνακας εξαγωγής εκμεταλλεύσιμης δυναμικότητας %.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ενέργεια σε MWh που παράγεται από κάθε μονάδα για κάθε μήνα, η οποία είναι γνωστή από τον πρώτο πίνακα από τις τιμές του E_{net} , και στην συνέχεια εξάγεται η ενέργεια η οποία παράγεται συνολικά για κάθε μήνα και για τους τέσσερις υδροστρόβιλους και πρόκειται ουσιαστικά για το άθροισμα των ενεργειών που παράγονται από την κάθε μονάδα για κάθε μήνα. Στην συνέχεια υπολογίζεται η δυναμικότητα σε MWh για κάθε μονάδα στην διάρκεια ενός μήνα. Ο όρος δυναμικότητα αναφέρεται στην μέγιστη ενέργεια την οποία δύναται να παράγει ο υδροστρόβιλος και εξάγεται μέσω την εξίσωσης

$$\Delta = P_h \cdot \frac{Q}{Q_{max}} \cdot 30 \cdot 24 \quad (9.9)$$

όπου

- P_h είναι η μέγιστη υδραυλική ισχύς που δύναται να παραχθεί από τον υδροστρόβιλο σε MW



➤ $\frac{Q}{Q_{\max}}$ ο αδιάστατος όρος που υπολογίστηκε στον πρώτο πίνακα

Έτσι για τον μήνα Ιανουάριο προκύπτει η δυναμικότητα ως εξής:

$$\Delta = 84,60 \cdot 0,98 \cdot 30 \cdot 24 \Rightarrow \Delta = 59693,76 MWh$$

Με ανάλογο τρόπο υπολογίζονται οι τιμές της δυναμικότητας και για τους υπόλοιπους μήνες.

Τέλος, υπολογίζεται η εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα ως ο λόγος που έχει για αριθμητή την παραγόμενη ενέργεια των υδροστροβίλων και παρονομαστή την δυναμικότητα των μονάδων. Για τον μήνα Ιανουάριο η εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$E.\Delta = \frac{39300}{239556} \Rightarrow E.\Delta = 16,40\%$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται το ποσοστό της εκμεταλλεύσιμης δυναμικότητας και για τους υπόλοιπους μήνες.

Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των υπολογισμών που αναλύθηκαν παραπάνω.

	Παραγωγή Ενέργειας (MWh)				
Μήνας	Μονάδα1	Μονάδα2	Μονάδα3	Μονάδα4	ΥΗΣ
Ιαν	2205	5380	12335	19380	39300
Φεβ	1905	8925	12495	16330	39655
Μαρ	1390	785	4935	6335	13445
Απρ	0	1620	5360	4404	11384
Μάιος	410	425	7225	13275	21335
Ιουν	1645	2580	14790	29064	48079
Ιουλ	4400	4935	28285	32795	70415
Αυγ	6190	5255	25590	29195	66230
Σεπ	1515	3350	13585	21175	39625
Οκτ	0	1790	11080	13605	26475
Νοεμ	6470	13150	20790	24045	64455
Δεκ	22780	27755	27950	27250	105735

Πίνακας 9.6: Παραγωγή ενέργειας του υδροηλεκτρικού για κάθε μήνα



Μήνας	Δυναμικότητα (MWh)					Εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα ΥΗΣ %
	Μονάδα1	Μονάδα2	Μονάδα3	Μονάδα4	ΥΗΣ	
-						-
Ιαν.	59889	59889	59889	59889	239556	16,41
Φεβρ.	59361	59361	59361	59361	237444	16,70
Μαρτ.	59817	59817	59817	59817	239268	5,62
Απρ.	58518	58518	58518	58518	234072	4,86
Μάϊος	63564	63564	63564	63564	254256	8,39
Ιουν.	60048	60048	60048	60048	240192	20,02
Ιουλ.	61365	61365	61365	61365	245460	28,69
Αυγ.	59886	59886	59886	59886	239544	27,65
Σεπτ.	62697	62697	62697	62697	250788	15,80
Οκτ.	59996	59996	59996	59996	239984	11,03
Νοεμ.	58906	58906	58906	58906	235624	27,36
Δεκ.	59113	59113	59113	59113	236452	44,72

Πίνακας 9.7: Εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα του υδροηλεκτρικού για κάθε μήνα

Από τους παραπάνω πίνακες αρχικά παρατηρούμε ότι η μέγιστη ενέργεια παράγεται τον μήνα Δεκέμβριο και στην συνέχεια ακολουθεί ο μήνας Ιούλιος, κάτι το οποίο έχει αναλυθεί και σε προηγούμενη παράγραφο δεδομένου των καιρικών συνθηκών αλλά και των ενεργειακών αναγκών. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η δυναμικότητα έχει υπολογιστεί το ίδιο και για τις τέσσερις μονάδες το οποίο συμβαίνει καθώς και οι τέσσερις υδροστρόβιλοι είναι Francis ίδιων λειτουργικών χαρακτηριστικών και άρα θα έχουν την ίδια δυνατότητα παραγωγής συγκεκριμένης ποσότητας ισχύος. Τέλος, παρατηρούμε ότι η εκμεταλλεύσιμη δυναμικότητα κυμαίνεται από 5% μέχρι και 45%. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η ενέργεια που παράγεται συνολικά από τον υδροηλεκτρικό σταθμό είναι πολύ λιγότερη από την συνολική δυναμικότητα την οποία έχει. Αυτό μπορεί να συμβαίνει διότι οι μονάδες μπορεί να μην έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν στο μέγιστο όλους τους μήνες, είτε γιατί παρουσιάζουν συχνά λειτουργικά προβλήματα είτε γιατί χρειάζονται συντήρηση είτε γιατί οι ενεργειακές ανάγκες για κάποιους μήνες είναι πολύ χαμηλές.

9.7 Υπολογισμός απωλειών.

Κατά μήκος ενός αγωγού είναι δυνατόν να παρουσιάζονται απώλειες ενέργειας είτε λόγω των τριβών που παρουσιάζονται κατά την διάρκεια της ροής του ρευστού είτε λόγω των τοπικών απωλειών εξαιτίας των διαμορφώσεων που μπορεί να έχει ένας αγωγός, όπως διακλαδώσεις, γωνίες κ.λπ. Για τον υπολογισμό των ενεργειακών απωλειών χρησιμοποιείται η εξίσωση του Bernoulli η οποία έχει τρεις διαφορετικές εκφράσεις:



- $P_{ολ} = P_{\Sigma} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 + \rho \cdot g \cdot h$ (Pa)
- $\frac{P_{\Sigma}}{\rho} + \frac{u^2}{2} + g \cdot h = e_{ολ}$ ($\frac{Joule}{kg}$)
- $\frac{P_{\Sigma}}{\rho \cdot g} + \frac{u^2}{2 \cdot g} + h = H_{ολ}$ (m)

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη έκφραση της εξίσωσης του Bernoulli είναι η τελευταία έκφραση σε m. Ωστόσο, όταν αναφερόμαστε στην ροή ρευστού κατά μήκος ενός αγωγού χρησιμοποιούμε την εξίσωση ενέργειας η οποία εκτός από τους όρους που περιλαμβάνονται στην εξίσωση του Bernoulli, περιλαμβάνει και τον όρο των απωλειών ΔH . Έτσι, η εξίσωση της ενέργειας μεταξύ δύο σημείων κατά μήκος ενός αγωγού διαμορφώνεται ως εξής:

$$H_1 = H_2 \Rightarrow \frac{P_{\Sigma 1}}{\rho \cdot g} + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{P_{\Sigma 2}}{\rho \cdot g} + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + \Delta H$$

Ο όρος ΔH αναφέρεται στις απώλειες και είναι ίσος με

$$\Delta H = h_f + h_m \quad (9.10)$$

όπου

- h_f είναι οι απώλειες ενέργειας σε m λόγω τριβών
- h_m είναι οι τοπικές απώλειες ενέργειας σε m λόγω γωνιών, διακλαδώσεων κ.λπ. κατά μήκος του αγωγού.

Οι απώλειες λόγω τριβών δίνονται από την σχέση

$$h_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \text{ σε m} \quad (9.11)$$

όπου

- f είναι ο συντελεστής τριβής
- l το μήκος του αγωγού
- d η διάμετρος του αγωγού
- u η ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος του αγωγού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Επομένως, τα μεγέθη l , d είναι γνωστά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού που θα χρησιμοποιηθεί για την διέλευση του ρευστού και η ταχύτητα u μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια της εξίσωσης του Bernoulli. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής f ακολουθείται μια ξεχωριστή διαδικασία.

Αρχικά, θα πρέπει να προσδιοριστεί το είδος της ροής, δηλαδή αν είναι στρωτή ή τυρβώδης. Με τον όρο στρωτή ροή εννοούμε την ροή εκείνη στην οποία τα γειτονικά στρώματα του ρευστού κινούνται χωρίς μακροσκοπική ανάμιξη μεταξύ



τους. Η ροή αυτή απεικονίζεται με τις ρευματικές γραμμές. Δεν υπάρχει μετακίνηση ρευστών σωματιδίων κάθετα στις γραμμές αυτές. Η στρωτή ροή παρατηρείται όταν οι δυνάμεις συνοχής είναι σημαντικές έναντι των λοιπών δυνάμεων που εξασκούνται στο νερό. Με τον όρο τυρβώδη ροή εννοούμε εκείνη την ροή στην οποία τα ρευστά σωματίδια κινούνται ακανόνιστα, σχεδόν τυχαία, με εγκάρσιες διακυμάνσεις ως προς την κύρια διεύθυνση της ροής. Η κίνηση κατά στρώματα της στρωτής ροής εδώ δεν υπάρχει γιατί γίνεται ανάμιξη μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων και ρευστά σωματίδια μετακινούνται από το ένα στρώμα στο άλλο.

Ο προσδιορισμός του είδους της ροής είναι πολύ σημαντικός για τον υπολογισμό του συντελεστής τριβής f , καθώς ανάλογα με την ροή αλλάζει εντελώς η διαδικασία του υπολογισμού. Σημαντικό ρόλο για τον καθορισμό του είδους της ροής παίζει ο αριθμός Reynolds ο οποίος εξάγεται από το κλάσμα

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (9.12)$$

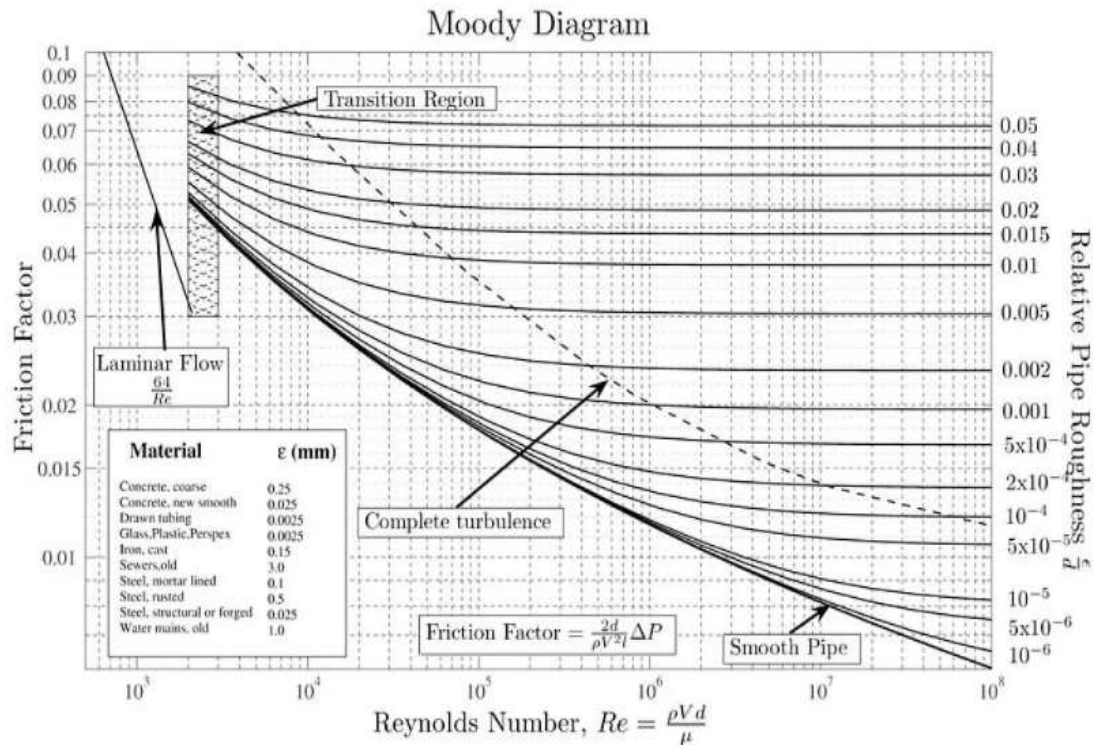
όπου

- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού σε $\frac{kg}{m^3}$
- u είναι η ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος του αγωγού σε $\frac{m}{sec}$
- d η διάμετρος του αγωγού σε m
- μ το ιξώδες του ρευστού σε $Pa \cdot sec = \frac{N}{m^2} \cdot sec = \frac{kg}{m \cdot sec}$
- ν είναι το κινηματικό ιξώδες το οποίο είναι ίσο με $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ και οι μονάδες μέτρησής του είναι $\frac{m^2}{sec}$

Έτσι λοιπόν, αν ο αριθμός Re είναι μικρότερος της τιμής 2300 τότε η ροή είναι στρωτή και ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από την σχέση

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9.13)$$

Όταν ο αριθμός Re κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2300 και 4000 τότε η ροή χαρακτηρίζεται ως μεταβατική. Τέλος, αν ο αριθμός Re είναι μεγαλύτερος από 4000 τότε η ροή είναι τυρβώδης και ο συντελεστής τριβής f υπολογίζεται με την βοήθεια του διαγράμματος Moody.



Εικόνα 9.2: Διάγραμμα Moody (πηγή: Owlcation)

Το παραπάνω διάγραμμα ονομάζεται διάγραμμα Moody και είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την εξαγωγή του συντελεστή τριβής f σε τυρβώδεις ροές. Αρχικά παρατηρούμε ότι το διάγραμμα αυτό αποτελείται από τρεις άξονες, τον συντελεστή τριβής f , τον αριθμό Reynolds Re και την σχετική τραχύτητα η οποία εξάγεται από τον λόγο $\frac{\epsilon}{D}$, όπου ϵ είναι η τραχύτητα του αγωγού σε mm και D είναι η διάμετρος του σε mm. Για να εξάγουμε τον συντελεστή τριβής θα πρέπει πρώτα να έχουμε υπολογίσει τον αριθμό Re καθώς και την σχετική τραχύτητα. Στην συνέχεια, εντοπίζουμε τις τιμές των μεγεθών που υπολογίσαμε αντίστοιχα στους δύο άξονες και έπειτα βρίσκουμε το σημείο το οποίο ορίζεται από τις δύο αυτές τιμές. Το σημείο αυτό θα εντοπίζεται συχνά πάνω σε κάποια από τις καμπύλες που απεικονίζονται και στην συνέχεια πηγαίνουμε προς τα αριστερά στην ίδια ευθεία με το οριζόμενο σημείο επάνω στην καμπύλη και προσδιορίζουμε την τιμή που προκύπτει επάνω στον άξονα του συντελεστή τριβής. Στην περίπτωση που το σημείο που προκύπτει από τις δύο τιμές του αριθμού Re και της σχετικής τραχύτητας δεν εντοπίζεται πάνω σε κάποια καμπύλη, θεωρούμε μία νοητή καμπύλη στο σημείο η οποία ουσιαστικά θα αντιστοιχεί σε μια ενδιάμεση τιμή του συντελεστή τριβής που ορίζεται από τις δύο καμπύλες που θα περικλείουν την δική μας νοητή καμπύλη. Έτσι με ανάλογο τρόπο εξάγεται και σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής τριβής. Πλέον, αφού έχουμε προσδιορίσει τον συντελεστή τριβής, έχουμε την δυνατότητα να υπολογίσουμε τις

απώλειες λόγω τριβής μέσω της εξίσωσης $h_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g}$ σε m, όπως αναφέραμε και προηγουμένως.

Οι τοπικές απώλειες h_m είναι οι απώλειες οι οποίες εμφανίζονται κατά μήκος του αγωγού λόγω των γεωμετρικών διαμορφώσεών του, πχ γωνίες, διακλαδώσεις κ.λπ. Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται σε m μέσω της εξίσωσης

$$h_m = K \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (9.14)$$

όπου

- K είναι ο αδιάστατος συντελεστής τοπικών απωλειών
- u η ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος του αγωγού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο αδιάστατος συντελεστής K εξάγεται από πειραματικά δεδομένα και λαμβάνεται με βάση τον ακόλουθο πίνακα.

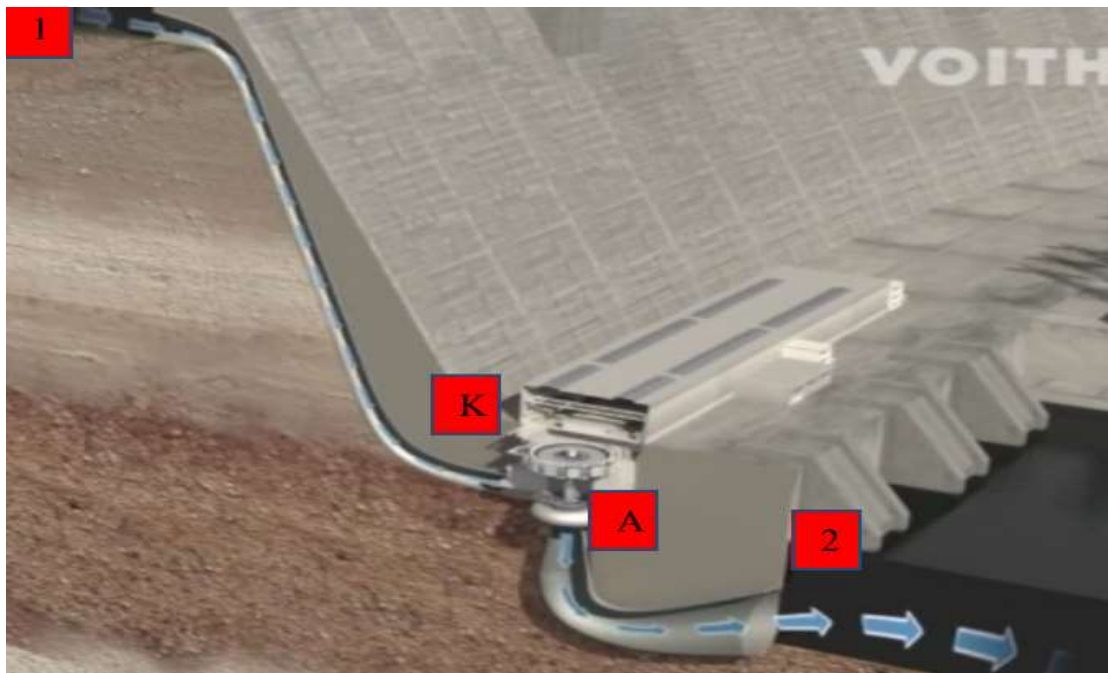
Α/Α	Περιγραφή	Συντελεστής K
Είσοδος υγρού σε σωλήνα		
1	Επιστόμιο με οξεία γωνία	0.5
2	Επιστόμιο με στρογγυλεμένη γωνία	0.05
3	Σωλήνας αναρροφήσεως με κωδωνοειδές χείλος	0.05-0.1
4	Εισέχον επιστόμιο	0.9-1
5	Σωλήνας αναρροφήσεως με επίπεδο χείλος	0.9
Έξοδος υγρού από σωλήνα		
6,7	Σε δεξαμενή	1
8	Βαθμιαία διεύρυνση, (ο λόγος $D_2/D_1 > 2$)	γωνία θ : $40^\circ \rightarrow 0.9, 20^\circ \rightarrow 0.5, 10^\circ \rightarrow 0.2$
Μεταβολή διαμέτρου		
9	Απότομη στένωση	d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.43, 0.4 \rightarrow 0.38, 0.6 \rightarrow 0.3, 0.8 \rightarrow 0.15$
10	Απότομη διεύρυνση	d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.93, 0.4 \rightarrow 0.7, 0.6 \rightarrow 0.4, 0.8 \rightarrow 0.15$
11	Βαθμιαία διεύρυνση Γωνία $\theta = 20^\circ$ Γωνία $\theta = 10^\circ$	d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.35, 0.4 \rightarrow 0.2$ d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.15, 0.4 \rightarrow 0.1$
12	Στρογγυλεμένη στένωση	d_2/d_1 : $0.2 \rightarrow 0.1, 0.4 \rightarrow 0.05$
Αλλαγή διεύθυνσης		
13, 14	Γωνία	$90^\circ \rightarrow 1.2, 60^\circ \rightarrow 0.6, 45^\circ \rightarrow 0.4, 22^\circ \rightarrow 0.15$
Συνδέσεις		
15	Κάμψη	Λόγος R/d : $1 \rightarrow 0.7, 2 \rightarrow 0.4, >5 \rightarrow 0.3$
16	Ταυ	0.25
17	Ταυ	1.2
18	Ταυ	1.4
Βαλβίδες - Δικλίδες		
19	Ολισθαίνουσα δικλίδα (εντελώς ανοικτή)	0.1-0.2
20	Ποδοβαλβίδα και φίλτρο	≥ 2.5
21	Βαλβίδα μη επιστροφής	≥ 1

Εικόνα 9.3: Πίνακας εξαγωγής συντελεστή K (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ανάλογα με την γεωμετρική διαμόρφωση του σωλήνα, η τιμή του συντελεστή K αλλάζει. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στένωση ή διεύρυνση του αγωγού, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του λόγου των διαμέτρων του αγωγού d_1 και d_2 , αφού η διάμετρος του αγωγού μεταβάλλεται. Σε γενικές γραμμές, οι τιμές του συντελεστή K είναι προσεγγιστικές και εξαρτώνται από το μέγεθος και την τραχύτητα του σωλήνα, την ταχύτητα ροής, το ιξώδες κ.λπ. Τέλος, στην περίπτωση που ένας αγωγός παρουσιάζει πολλές γεωμετρικές διαμορφώσεις κατά μήκος του, τότε είναι φυσικό ότι ο συντελεστής K θα είναι ίσος με το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών K που αντιστοιχούν στην κάθε περίπτωση.

9.8 Υπολογισμός απωλειών κατά μήκος της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης.

Κατά μήκος της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης παρουσιάζονται απώλειες οι οποίες είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν έτσι ώστε να μπορέσουμε να κάνουμε οποιαδήποτε βελτίωση στο σύστημα ώστε να υπερνική την αντίσταση που παρουσιάζεται λόγω των απωλειών. Οι απώλειες αυτές, όπως αναλύσαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, αναφέρονται στις τοπικές και στις απώλειες λόγω τριβών. Για την καλύτερη αποτύπωση των απωλειών και του ενεργειακού ισοζυγίου, θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση ενέργειας που ουσιαστικά πρόκειται για την εξίσωση του Bernoulli συμπεριλαμβανομένου και του όρου των απωλειών.



Εικόνα 9.4: Διαδρομή ρευστού κατά μήκος του υδροηλεκτρικού σταθμού (πηγή: Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας)



Όπως βλέπουμε και την εικόνα, η διαδρομή του ρευστού αποτελείται από τρεις επιμέρους διαδρομές:

- **1 → Κ:** Ταμιευτήρας → Κατάθλιψη υδροστροβίλου
- **Κ → Α:** Κατάθλιψη υδροστροβίλου → Αναρρόφηση υδροστροβίλου
- **Α → 2:** Αναρρόφηση υδροστροβίλου → Δεξαμενή απόρριψης

1 → Κ: Ταμιευτήρας → Κατάθλιψη υδροστροβίλου

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_K}{\rho \cdot g} + \frac{u_K^2}{2 \cdot g} + z_K + \Sigma \Delta h_{1K}.$$

Θεωρούμε ότι η ταχύτητα του νερού που φεύγει από τον ταμιευτήρα είναι περίπου ίση με μηδέν.

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta h_{1K} &= \frac{P_1 - P_K}{\rho \cdot g} + (z_1 - z_K) - \frac{u_K^2}{2 \cdot g} \Rightarrow \\ \Sigma \Delta h_{1K} &= \frac{P_1 - P_K}{\rho \cdot g} + (H_{geo} - z_K) - \frac{u_K^2}{2 \cdot g} \end{aligned} \quad (9.15)$$

Κ → Α: Κατάθλιψη υδροστροβίλου → Αναρρόφηση υδροστροβίλου

$$\frac{P_K}{\rho \cdot g} + \frac{u_K^2}{2 \cdot g} + z_K = \frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2}{2 \cdot g} + z_A + H_{turb} + \Sigma \Delta h_{KA}.$$

Θεωρούμε ότι οι ταχύτητες στην κατάθλιψη και στην αναρρόφηση του στροβίλου είναι ίσες μεταξύ τους.

$$\Sigma \Delta h_{KA} = \frac{P_K - P_A}{\rho \cdot g} + (z_K - z_A) - H_{turb} \quad (9.16)$$

Α → 2: Αναρρόφηση υδροστροβίλου → Δεξαμενή απόρριψης

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2}{2 \cdot g} + z_A = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + \Sigma \Delta h_{A2}$$

Θεωρούμε ότι το ύψος z_2 είναι ίσο με μηδέν καθώς πρόκειται για την στάθμη αναφοράς.

$$\Sigma \Delta h_{A2} = \frac{P_A - P_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2 - u_2^2}{2 \cdot g} + z_A \quad (9.17)$$

Συνδυάζοντας όλες τις προηγούμενες σχέσεις που προέκυψαν από τα ενεργειακά ισοζύγια με σκοπό τον υπολογισμό των απωλειών, θα έχουμε:



$$\Sigma \Delta h = \frac{P_1 - P_K}{\rho \cdot g} + (H_{geo} - z_K) - \frac{u_K^2}{2 \cdot g} + \frac{P_K - P_A}{\rho \cdot g} + (z_K - z_A) - H_{turb} + \frac{P_A - P_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2 - u_2^2}{2 \cdot g} + z_A$$

Θεωρούμε όπως και πριν ότι οι ταχύτητες στην κατάθλιψη και στην αναρρόφηση του στροβίλου είναι ίσες.

$$\Sigma \Delta h = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} - \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + H_{geo} - H_{turb} \quad (9.18)$$

$$H_{turb} = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g} - \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + H_{geo} - \Sigma \Delta h \quad (9.19)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι και ο ταμιευτήρας αλλά και η δεξαμενή απόρριψης είναι δεξαμενές ανοιχτές τότε επενεργεί η ατμοσφαιρική πίεση και άρα $P_1 = P_2 = P_{atm}$.

9.9 Διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων για τις ενεργειακές απώλειες.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα ύψη υδατόπτωσης σε m και οι αντίστοιχες ταχύτητες στον πιεστικό αγωγό σε m/sec.

Ύψος υδατόπτωσης (m)	30	60	90	120	150	180	240	300
Ταχύτητα στον πιεστικό αγωγό (m/sec)	3,66	4,2	4,45	4,46	4,5	4,6	4,6	4,6

Πίνακας 9.8: Αποτύπωση του ύψους υδατόπτωσης συναρτήσει της ταχύτητας στον αγωγό

Από τον παραπάνω πίνακα χρειάζεται να προσδιορίσουμε την ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μέσο ύψος υδατόπτωσης της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης που είναι ίσο με 75,7 m. Παρατηρούμε ότι η τιμή αυτή δεν εμφανίζεται στον πίνακα και για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Ουσιαστικά θα προσδιορίσουμε τις δύο τιμές του ύψους υδατόπτωσης στις οποίες η τιμή που θέλουμε βρίσκεται ανάμεσα. Έτσι λοιπόν βλέπουμε ότι η τιμή 75,7 m βρίσκεται ανάμεσα στα ύψη υδατόπτωσης 60 m και 90 m και οι αντίστοιχες ταχύτητες είναι ίσες με $4,2 \frac{m}{sec}$ και $4,45 \frac{m}{sec}$. Στην συνέχεια η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής:

$$\frac{75,7 - 60}{x - 4,2} = \frac{90 - 75,7}{4,45 - x} \Rightarrow \frac{15,7}{x - 4,2} = \frac{14,3}{4,45 - x} \Rightarrow 15,7 \cdot (4,45 - x) = 14,3 \cdot (x - 4,2) \Rightarrow$$

$$x = 4,33 \frac{m}{sec}$$



Επομένως, η ταχύτητα η οποία αντιστοιχεί στο μέσο ύψος υδατόπτωσης 75,7m είναι ίση με $4,33 \frac{m}{sec}$.

Με βάση την ταχύτητα στον πιεστικό αγωγό με κριτήριο το μέσο ύψος υδατόπτωσης υπολογίζουμε την μέγιστη παροχή στον αγωγό προσαγωγής. Η διάμετρος του αγωγού προσαγωγής είναι γνωστή και ίση με 5,8m.

$$Q = u \cdot A = u \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 4,33 \cdot \frac{\pi \cdot 5,8^2}{4} \Rightarrow Q = 114,40 \frac{m^3}{sec}$$

Επιπλέον, η επιλογή της κλίσης των πτερυγίων είναι πολύ σημαντική για τον καθορισμό του όγκου νερού που θα διέλθει μέσα από το στροφέιο του υδροστροβίλου με σκοπό την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι η κλίση των πτερυγίων είναι ίση με 50% τότε η παροχή θα είναι ίση με:

$$Q' = Q_{max} \cdot 50\% \Rightarrow Q' = 114,40 \cdot \frac{50}{100} \Rightarrow Q' = 57,2 \frac{m^3}{sec}$$

Για τέσσερις ώρες λειτουργίας με κλίση των πτερυγίων 50%, ο όγκος νερού που θα διέλθει μέσα από το στροφέιο του υδροστροβίλου θα είναι ίσος με

$$W_{ap} = Q' \cdot 4 \cdot 3600 = 57,2 \cdot 4 \cdot 3600 \Rightarrow W_{ap} = 823680 m^3$$

Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται και στον ακόλουθο πίνακα.

Γραμμική παρεμβολή	
Ταχύτητα (m/sec)	4,33
Qmax (m ³ /sec)	114,40
Κλίση Πτερυγίων	50%
Q' (m ³ /sec)	57,20
Wap (m ³) 4h	823680,00

Πίνακας 9.9: Εξαγωγή αποτελεσμάτων για κλίση πτερυγίων 50%

Ακολούθως παρουσιάζεται ένας πίνακας ο οποίος περιλαμβάνει την ταχύτητα στον αγωγό προσαγωγής, την διάμετρο του αγωγού, τον αριθμό Re, την τραχύτητα καθώς και την σχετική τραχύτητα, το συντελεστή τριβής καθώς και τα μήκη των τεσσάρων αγωγών προσαγωγής.



Τα μήκη και η διάμετρος των αγωγών προσαγωγής καθώς και η τραχύτητα του αγωγού είναι γνωστά. Η ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής υπολογίστηκε προηγουμένως και είναι ίση με $4,33 \frac{m}{sec}$.

Όπως εξηγήσαμε και αναλύσαμε και σε προηγούμενη παράγραφο, προκειμένου να υπολογίσουμε τις απώλειες θα πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε κάποια βασικά στοιχεία. Αρχικά, υπολογίζεται ο αριθμός Reynolds μέσω της σχέσης

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad (9.11)$$

όπου

- ρ είναι η πυκνότητα του νερού και είναι περίπου ίση με $1000 \frac{kg}{m^3}$
- u είναι ταχύτητα του νερού στον αγωγό προσαγωγής και είναι ίση με $4,33 \frac{m}{sec}$
- d η διάμετρος του αγωγού προσαγωγής η οποία είναι ίση με $5,8$ m
- μ το ιξώδες το οποίο είναι ίσο με $1,002 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot sec}{m^2}$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την σχετική τραχύτητα η οποία είναι ίση με

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0,0460 \cdot 10^{-3}}{5,8} = 7,931 \cdot 10^{-6}$$

Τέλος, προσδιορίζεται ο συντελεστής τριβής f από το διάγραμμα Moody με βάση το είδος της ροής, τον αριθμό Re και την σχετική τραχύτητα. Στην άσκηση χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη ιστοσελίδα για τον ακριβή υπολογισμό του συντελεστή τριβής: http://www.advdelpisys.com/michael_maley/moody_chart/. Ακολουθεί ο πίνακας με τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας.

Παράμετροι			
Ταχύτητα νερού εντός του αγωγού προσαγωγής m / s	4,33	Συντελεστής τριβής f	0,0083
Διάμετρος αγωγού προσαγωγής m	5,80	μήκος αγωγού L1	254,20
Αριθμός Reynolds	25063872,2555	Μήκος αγωγού L2	246,80
τραχύτητα mm	0,0460	Μήκος αγωγού L3	238,60



σχετική τραχύτητα	7,931E-06	Μήκος αγωγού L4	230,60

Πίνακας 9.10: Καταγραφή δεδομένων και αποτελεσμάτων για τον υπολογισμό των απωλειών

Έπειτα υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω τριβών και τις απώλειες λόγω των γεωμετρικών διαμορφώσεων του αγωγού ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο.

Για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω τριβών χρησιμοποιούμε την εξίσωση

$$h_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \text{ σε m} \quad (9.10)$$

όπου

- f είναι ο συντελεστής τριβής που υπολογίστηκε προηγουμένως
- l και d το μήκος και η διάμετρος του εκάστοτε αγωγού
- u η ταχύτητα του ρευστού στον αγωγό προσαγωγής
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Στην συνέχεια υπολογίζεται η πίεση των απωλειών σε Pa και για το λόγο αυτό πολλαπλασιάζουμε την τιμή h_f με την πυκνότητα και την επιτάχυνση της βαρύτητας καθώς για τις μονάδες μέτρησης ισχύει ότι $m \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} = Pa$. Ακολουθως, υπολογίζονται οι απώλειες που προκαλούνται λόγω των γεωμετρικών διαμορφώσεων του αγωγού με την βοήθεια της εξίσωσης

$$h_m = K \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} \quad (9.13)$$

όπου

- K είναι ο συντελεστής των τοπικών απωλειών και διαφέρει ανάλογα την περίπτωση (γωνία, διακλάδωση, κ.λπ.)
- u η ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος του αγωγού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ο υπολογισμός για την εξαγωγή της πίεσης των γεωμετρικών απωλειών είναι ίδιος με πριν. Τέλος, εξάγονται οι συνολικές απώλειες σε m και Pa για κάθε αγωγό προσαγωγής. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

	Αγωγός1	Αγωγός2	Αγωγός3	Αγωγός4
Απώλειες τριβών hf m	0,3476181	0,3374987	0,3262852	0,3153452



πίεση απωλειών τριβών Pa	3410,134	3310,8618	3200,8575	3093,5362
απώλειες γεωμετρίας m	0,3631285	0,3631285	0,3631285	0,3631285
πίεση απωλειών γεωμετρίας Pa	3562,291	3562,291	3562,291	3562,291
Συνολικές απώλειες Pa	6972,425	6873,1528	6763,1485	6655,8272
Συνολικές απώλειες m	0,7107467	0,7006272	0,6894137	0,6784737

Πίνακας 9.11: Υπολογισμός των ενεργειακών απωλειών κατά μήκος του αγωγού

9.10 Υπολογισμός παραμέτρων σπηλαίωσης.

Η σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο το οποίο μπορεί να εμφανίζεται τόσο σε αντλίες όσο και σε υδροστροβίλους. Η σπηλαίωση δύναται να προκαλέσει σοβαρά λειτουργικά προβλήματα στις ρευστοδυναμικές μηχανές και για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με το φαινόμενο της σπηλαίωσης, έτσι ώστε να καταστεί πιο εφικτή η πρόβλεψη του χρόνου στον οποίο θα εμφανιστεί η σπηλαίωση ή το σημείο στο οποίο θα εμφανιστεί. Για παράδειγμα, η σωστή τοποθέτηση των υδροστροβίλων σε μία υδροηλεκτρική εγκατάσταση, δηλαδή η τοποθέτησή τους στο κατάλληλο ύψος, μπορεί ακόμη και να καθυστερήσει την εμφάνιση της σπηλαίωσης.

Αρχικά, υπολογίζουμε την πίεση στην είσοδο του υδροστροβίλου με την παρακάτω διαδικασία. Όπως έχουμε ήδη αναλύσει, χρησιμοποιούμε την εξίσωση του Bernoulli:

$$P_{o\lambda,A} = P_{o\lambda,B} \Rightarrow H_{o\lambda,A} = H_{o\lambda,B} \Rightarrow \frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{u_A^2}{2 \cdot g} + h_A = \frac{P_B}{\rho \cdot g} + \frac{u_B^2}{2 \cdot g} + h_B + \Delta h_f$$

Στην προκειμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την πίεση στην αναρρόφηση του υδροστροβίλου και γι' αυτό χρησιμοποιούμε την σχέση

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{U_{2e}^2}{2 \cdot g} + h_A = 0 \Rightarrow P_A = \left(\frac{U_{2e}^2}{2 \cdot g} - h_A \right) \cdot \rho \cdot g \quad (9.20)$$



όπου

- U_{2e} είναι η ταχύτητα στην αναρρόφηση του υδροστροβίλου
- h_A το ύψος στην αναρρόφηση του στροβίλου το οποίο έχει οριστεί ως στάθμη αναφοράς και για το λόγο αυτό είναι ίσο με μηδέν
- ρ η πυκνότητα του νερού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας στην αναρρόφηση του στροβίλου χρησιμοποιούμε την εξίσωση

$$U_{2e} = \frac{u_{2e}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = \frac{\pi \cdot D_{2e} \cdot n}{60 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (9.21)$$

όπου

- D_{2e} η διάμετρος του στροβίλου που είναι ίση με 3,81 m
- n οι στροφές του στροβίλου ανά λεπτό και είναι ίσες με 166,7 rpm
- H το μανομετρικό ύψος που είναι ίσο με 75,7 m

Επομένως, θα έχουμε

$$U_{2e} = \frac{\pi \cdot 3,81 \cdot 166,7}{60 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 75,7}} \Rightarrow U_{2e} = 0,86 \frac{m}{sec}$$

Με γνωστή πλέον την ταχύτητα στην αναρρόφηση του στροβίλου, υπολογίζουμε την πίεση στο σημείο αυτό:

$$P_A = \left(\frac{0,86^2}{2 \cdot 9,81} - 0 \right) \cdot 1000 \cdot 9,81 \Rightarrow P_A = 369,8 Pa.$$

Σε επόμενο στάδιο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του καθαρού και του απαιτούμενου θετικού ύψους έτσι ώστε να προσδιορίσουμε πάνω ή κάτω από ποιο σημείο παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης στους υδροστροβίλους στην συγκεκριμένη περίπτωση. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης θα πρέπει το καθαρό διαθέσιμο ύψος $NPSH_a$ να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το απαιτούμενο θετικό ύψος $NPSH_r$. Αρχικά, υπολογίζουμε το διαθέσιμο καθαρό ύψος μέσω της σχέσης

$$NPSH_a = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} + z_i - \Sigma \Delta h \quad (9.22)$$

όπου

- P_A είναι η πίεση στην αναρρόφηση του υδροστροβίλου που υπολογίστηκε προηγουμένως, z_i το μανομετρικό ύψος
- ρ η πυκνότητα του νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας
- $\Sigma \Delta h$ οι συνολικές απώλειες
- P_s η τάση των ατμών

Το $\Sigma \Delta h$ αναφέρεται ουσιαστικά στις συνολικές απώλειες και πρόκειται για τον μέσο όρο των απωλειών και των τεσσάρων υδροστροβίλων σε m. Ο μέσος όρος των



απωλειών είναι ίσος με 0,6948 m. Η τάση των ατμών για νερό θερμοκρασίας 20°C είναι ίση με 2340 Pa. Αντικαθιστώντας, τα δεδομένα στην παραπάνω εξίσωση για το διαθέσιμο καθαρό θετικό ύψος θα έχουμε

$$NPSHa = \frac{369,8 - 2340}{1000 \cdot 9,81} + 75,7 - 0,6948 \Rightarrow NPSHa = 74,8 \text{ m}$$

Το απαιτούμενο καθαρό θετικό ύψος υπολογίζεται ως εξής

$$NPSHr = \left(\frac{P_o - P_s}{\rho \cdot g} \right) = \left(\frac{100000 - 2340}{1000 \cdot 9,81} \right) \Rightarrow NPSHr = 9,96 \text{ m}$$

όπου P_o είναι η απόλυτη ολική πίεση στην έξοδο του υδροστροβίλου. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι ισχύει η απαιτούμενη συνθήκη, δηλαδή $NPSHa \geq NPSHr \rightarrow 74,8\text{m} > 9,96\text{m}$. Τέλος, υπολογίζουμε το ελάχιστο ύψος στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί ο υδροστροβίλος μέσω της σχέσης

$$h_{\min} = \frac{P_A - P_s}{\rho \cdot g} - \Delta h_f - NPSHr = \frac{369,8 - 2340}{1000 \cdot 9,81} - 0,6948 - 9,96 \Rightarrow h_{\min} = -10,8556 \text{ m}$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η αναρρόφηση του στροβίλου είναι σε χαμηλότερο ύψος από την επιφάνεια της δεξαμενής και για τιμές μικρότερες του h_{\min} παρουσιάζεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίεση στην είσοδο του στροβίλου Pa (Pa)	369,80
NPSHa	74,80
NPSHr	9,96
hmax (m)	- 10,8556

Πίνακας 9.12: Εξαγωγή αποτελεσμάτων σπηλαίωσης

9.11 Υπολογισμός παραμέτρων κινητών πτερυγίων υδροστροβίλων.

Τα κινητά πτερύγια ενός υδροστροβίλου παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του. Για παράδειγμα, όπως είδαμε και σε προηγούμενο πίνακα, η κλίση



των πτερυγίων του στροβίλου μπορεί να επηρεάσει ακόμα και την παροχή που θα διέλθει μέσα από αυτόν. Επομένως, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός αυτών των βασικών παραμέτρων για την σωστή επιλογή και χρησιμοποίηση των υδροστροβίλων. Αυτοί οι παράμετροι προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές.

Στον ακόλουθο πίνακα εξάγονται τα αποτελέσματα για τον αριθμό της παροχής μέσω της σχέσης

$$\underline{Q} = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (9.23)$$

όπου

- Q είναι η παροχή σε $\frac{m^3}{sec}$
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε $\frac{m}{sec^2}$
- H το μέσο μανομετρικό ύψος σε m

Ακολουθώς υπολογίζεται ο αριθμός της ταχύτητας μέσω της εξίσωσης

$$\underline{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad (9.24)$$

όπου

- ω είναι η γωνιακή ταχύτητα η οποία προκύπτει από την σχέση $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$ σε $\frac{rad}{sec}$

Σημειώνεται ότι οι στροφές του στροφείου του υδροστροβίλου είναι ίσες με 166,7 rpm. Έπειτα υπολογίζεται η παράμετρος Ω μέσω της σχέσης

$$\Omega = \underline{\omega} \cdot \sqrt{Q} \quad (9.25)$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την μέγιστη γωνία ανοίγματος των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων μέσω της εξίσωσης

$$a_{go} = 4 \cdot ((-4 \cdot \Omega^2) + (13 \cdot \Omega) + 1) \quad (9.26)$$

Τέλος, εξάγουμε την γωνία σχεδιασμού των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων του στροβίλου, η οποία προκύπτει από την σχέση $a_{pt} = \frac{a_{go}}{2}$.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Q_{-}	3,01
ω_{-}	0,45



Ω	0,79
αγο	34,97
απt	17,48

Πίνακας 9.13: Εξαγωγή παραμέτρων κινητών πτερυγίων

9.12 Εξαγωγή του ειδικού αριθμού στροφών n_s και της παραμέτρου σπηλαίωσης $\sigma_{κρ}$

Όπως και ο προσδιορισμός της γωνίας ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων στην προηγούμενη παράγραφο, έτσι και ο υπολογισμός του ειδικού αριθμού των στροφών αλλά και της παραμέτρου της σπηλαίωσης, παίζουν σημαντικό ρόλο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου καθώς και για την ομαλή λειτουργία ολόκληρης της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της παραμέτρου της σπηλαίωσης σε συνδυασμό και με τον υπολογισμό του καθαρού θετικού ύψους αναρρόφησης όπως προσδιορίστηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, μας βοηθά στην τοποθέτηση του υδροστροβίλου στο κατάλληλο ύψος για την καθυστέρηση της εμφάνισης της σπηλαίωσης σε αυτόν.

Ο ειδικός αριθμός στροφών υπολογίζεται μέσω της σχέσης $n_s = 1304 \cdot H^{-0,654}$, όπου το H είναι το μέσω μανομετρικό ύψος σε m. Η παράμετρος της σπηλαίωσης εξαρτάται άμεσα από τον ειδικό αριθμό των στροφών και υπολογίζεται μέσω της σχέσης $\sigma_{κρ} = 7,54 \cdot 10^{-5} \cdot n_s^{1,41}$.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

ns	76,97
σκρ	0,03

Πίνακας 9.14: Υπολογισμός παραμέτρων σπηλαίωσης



Διπλωματική εργασία «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδροηλεκτρικά Έργα – Μελέτη Περίπτωσης του ΥΗΣ Καστρακίου».
ΚΑΡΑΝΤΖΗ ΕΛΕΝΗ, Α.Μ. 7147



10. Γενικό συμπέρασμα και ανακεφαλαίωση.

Με βάση την παραπάνω μελέτη κατανοούμε ότι καθεμία από τις παραμέτρους που προσδιορίστηκαν και αναλύθηκαν παίζουν σημαντικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία και αποτελεσματικότητα της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Αρχικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε την χρονική περίοδο στην οποία οι ανάγκες για ενεργειακή κάλυψη είναι περισσότερο αυξημένες και να αξιοποιήσουμε στο έπακρο κάθε υδροστρόβιλο, με προσοχή πάντα για τυχόν βλάβες. Έπειτα, η εξαγωγή διαγραμμάτων μας βοηθά στην καλύτερη απεικόνιση των υδρολογικών δεδομένων σε συνδυασμό με την λειτουργία του υδροηλεκτρικού. Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι απώλειες που παρουσιάζονται κατά μήκος της ροής του νερού εντός του αγωγού, πράγμα το οποίο βοηθά στον προσδιορισμό του κατάλληλου τύπου αντλίας με σκοπό την υπερνίκηση των αντιστάσεων αυτών. Επίσης, υπολογίστηκαν οι παράμετροι της σπηλαιώσης για την κατάλληλη τοποθέτηση των υδροστροβίλων στο αντίστοιχο ύψος, το οποίο και έχει προσδιοριστεί στην αντίστοιχη παράγραφο ανάλυσης της σπηλαιώσης. Τέλος, υπολογίστηκε η γωνία σχεδιασμού των ρυθμιστικών κινητών πτερυγίων, η οποία προσδιορίζεται από τους κατασκευαστές και η οποία επηρεάζει άμεσα την παροχή που θα διέλθει μέσα από τον στρόβιλο. Καθένα από το παραπάνω έχει αναλυθεί στην αντίστοιχη παράγραφο και έχουν εξαχθεί τα αντίστοιχα συμπεράσματα.



Βιβλιογραφία

- «Τα φράγματα της Ελλάδας», Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, Νοέμβριος 2013
- Αγγελίδης Π., Αναπληρωτής Καθηγητής, «Υδροδυναμικά Έργα», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
- Αννισάκης Μ., Πτυχιακή Εργασία, «Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελούμενο από αιολικό πάρκο και αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό για τη νήσο Σκύρο», Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο, 2012
- Αργυράκης Ι., Διευθυντής Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, «Εκμετάλλευση των Υδροηλεκτρικών σταθμών ως έργων πολλαπλού σκοπού», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας και Περιφερειακό Τμήμα Ηπείρου του Τ.Ε.Ε.
- Αργυράκης Ι., Διευθυντής Υδροηλεκτρικής Παραγωγής, «Η Υδροηλεκτρική Παραγωγή της ΔΕΗ Α.Ε.», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
- Αυλακά Ι., Διπλωματική Εργασία, «Μελέτη μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού στην περιοχή της Ευρυτανίας», Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2019
- Δαλή, Ισμαήλ Σ.; Χατζή Ισμαήλ Μουχτερέμ Ο., Πτυχιακή Εργασία, «Πειραματική Συσκευή Μικρής Κλίμακας επίδειξης λειτουργίας Υδροηλεκτρικών Εγκαταστάσεων Παραγωγής Ενέργειας», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ, Πάτρα, 2017
- Διαχείριση Υδάτινων Πόρων, Τμήμα Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων, Τ.Ε.Ι. Λάρισας
- Μαμασούλα Θ. Χ., Μπιστιντζάνος Δ., Πτυχιακή Εργασία, «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικό σταθμό», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πάτρα, 2015
- Μίχας Σ., Δερματάς Δ., Ευστρατιάδης Α., «Φράγματα-Υδραυλικές Κατασκευές», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μουτάφης Ν.Ι., Λέκτορας Καθηγητής ΕΜΠ, «Υδραυλικές Κατασκευές-Φράγματα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μπαλτάς Ε., «Υδρολογικός Σχεδιασμός Ταμιευτήρα για την Παραγωγή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας στη Θέση Αυλάκι του Αχελώου», Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Παναγιωτόπουλος Μ., «Υδροηλεκτρικά Έργα», Κ.Α.Π.Ε
- Πεύκος Τ., Μανωλάς Γ., Πτυχιακή Εργασία, «Υδροηλεκτρική ενέργεια και οικονομική μελέτη με τη βοήθεια του λογισμικού RETSCREEN
- Πολυζάκης Α., Ρευστοδυναμικές Μηχανές, «Στροβιλομηχανές-Υδροδυναμικές Μηχανές», Εκδόσεις Power Heat Cool



- Πολυζάκης Α., Σκούρας Ε., Βούρος Α., Εργαστήριο Ρευστοδυναμικών Μηχανών, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
- Χαντόλιας Δ., Γκοτσόπουλος Θ., Πτυχιακή Εργασία, «Μελέτη Παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας ΥΗΣ Καστρακίου», Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διαδικτυακές αναφορές

- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CE%BF%CF%82_%CF%84%CE%BF%CF%85_%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%8D#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Water_cycle_e_l.jpg
- http://evangelosakylas.weebly.com/uploads/8/7/3/4/8734654/lec_3.pdf
- <https://docplayer.gr/6999756-A-t-e-i-peiraiia-sholi-tehnologikon-efarmogon-tmima-ilektrologias.html>
- https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1119/1/02_chapter_8.pdf
- <https://www.mfrural.com.br/detalhe/338803/turbina-hidraulica-do-tipo-francis#lg=1&slide=0>
- <https://www.cink-hydro-energy.com/el/%CF%85%CE%B4%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%84%CF%81%CF%8C%CE%B2%CE%B9%CE%BB%CE%BF%CF%82-francis/>
- <http://me-resetsg.blogspot.com/2016/02/francis-turbine-runner.html>
- <http://www.hte-eng.com/equipment/turbines/francis-turbine/>
- https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CIVIL114/ene_yhs_11.pdf
- <https://slideplayer.com/slide/5842513/>
- https://www.wikiwand.com/simple/Water_turbine
- http://okeanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2123/hlg_201400883.pdf?sequence=1
- https://12112a3a-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/metaschematistes/in-the-news/personsnamesnewwebsitewinswobbyaward/297%20a%20peris0001%20a.jpg?at_tachauth=ANoY7cq2QH5gdAmHTBtaS2osAhNsMq9pgh8wHV_IsD1SPEM9WMD_Y3SZbjihTUftn0mua7M_fGLhctPLNR0nxupgdYp0deiuIX_3DBHKVe6j6F2lvHsSQ_4rz6xRADedqKP43HwIU3s_3JL7ga69CFxY_kH1tBdz0D32OSJ3QS80aF9oIRn_90r_HgXroJC6qtLKQVFBss5u4sRXMIYMI4OKKvfIK7FSbPG5xGkE1CLIFatCxp7Pt6N_EsMF9jVqAfz3NXpnoyI5w7I1-zkW9yQKy4flCSEoJZbErQm9eakqzRDyNuR_BCTxo%3D&attredirects=1
- <http://wikimapia.org/4905159/el/%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82-%CE%A3%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82-%CE%A6%CF%81%CE%AC%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82-%CE%9A%CE%B1%CF%83%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%AF%CE%BF%CF%85-320-%CE%9CW>
- <https://owlcation.com/stem/How-To-Read-a-Moody-Chart>