



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΑΥΤΗΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη Περίπτωσης Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου Γλαύκου και
Συγκριτική Ανάλυση των τύπων Υδροστροβίλων.**

Ειρήνη Τσοπανίδη

1085150

Επιβλέπων: Βούρος Α. Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Οκτώβριος 2024

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων Και Αεροναυπηγών
Μηχανικών
Ειρήνη Τσοπανίδη
© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Μελέτη Περίπτωσης Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου Γλαύκου και Συγκριτική Ανάλυση των τύπων Υδροστροβίλων.

Ειρήνη Τσοπανίδη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπόνηση της Σπουδαστικής Εργασίας (ΣΕ) βασίζεται στις Αρχές της Ρευστομηχανικής, ως το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, για την μελέτη που απαιτείται. Το θέμα της περιλαμβάνει δύο βασικούς άξονες. Ο πρώτος σχετίζεται με τη μελέτη των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων, κάνοντας ιδιαίτερη μνεία στο Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο του Γλαύκου και ο δεύτερος αφορά στη μελέτη ενός ιδιαίτερου για τους μηχανολόγους αντικείμενου, αυτό των υδροστροβίλων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (ΜΥΕ), οι κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται, ο ορισμός τους, η εξέλιξη τους στη διάρκεια του χρόνου, ο τρόπος που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους, η επιλογή της τοποθεσίας τους και ο τρόπος λειτουργίας τους, για την κατανόηση του οποίου αναλύονται τα τεχνικά έργα υδροληψίας, το σύστημα προσαγωγής και ο σταθμός παραγωγής που αφορούν στα Μ.Υ.Η.Ε.. Στη συνέχεια, μελετάται το Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο του Γλαύκου. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην επιλογή της τοποθεσίας του, στον τρόπο υδροληψίας του και στα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται και τα οποία είναι, ο υπερχειλιστής, το τοξωτό θυρόφραγμα, το αυτόματο θυρόφραγμα με αντίβαρο, η σήραγγα προσαγωγής, ο πύργος εκτόνωσης, ο αγωγός πτώσης, το εργοστάσιο παραγωγής, η κεντρική μονάδα ελέγχου καθώς και τα είδη και ο αριθμός των υδροστροβίλων που χρησιμοποιεί. Ακολουθεί ο δεύτερος βασικός πυλώνας της εργασίας που αφορά στη μελέτη των υδροστροβίλων. Αρχικά, αναφέρονται οι ενεργειακοί υπολογισμοί που διενεργούνται στους υδροστροβίλους, το Θεώρημα της Ροής της Ορμή –Συστροφής και η εφαρμογή του σε μερικό δρομέα και οι θεμελιώδεις εξισώσεις των στροβιλομηχανών. Παρατίθενται στην συνέχεια οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι υδροστροβίλοι και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά

σε τρεις από τους πιο σημαντικούς τύπους των υδροστροβίλων. Πρόκειται για τους υδροστροβίλους Pelton, Francis και Kaplan, οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στην παρούσα εργασία και γίνεται παράλληλα σύγκριση μεταξύ τους. Συμπληρωματικά, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των υδροστροβίλων και το φαινόμενο της σπηλαίωσης στους υδροστροβίλους αντίδρασης. Τέλος δίνεται ο τρόπος επιλογής του τύπου και του αριθμού των υδροστροβίλων ενός υδροηλεκτρικού συστήματος.

Λέξεις κλειδιά: 1. Ρευστομηχανική 2.Υδροηλεκτρική Ενέργεια 3. Μ.Υ.Η.Ε (Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα) 4. Γλαύκος 5. Υδροστροβίλοι.

Case Study of Glaukos Small Hydroelectric Power Plant and Comparative Analysis of Hydro Turbine Types.

Eirini Tsopanidi

ABSTRACT

This thesis is based on the principles of fluid mechanics, which constitute the necessary theoretical background for the research carried out in the context of this work. Its subject is based on two main axes. The first is related to the study of small hydroelectric projects, with special mention of the Small Hydroelectric Project of Glaukos, and the second concerns the study of a topic that particularly interests mechanical engineers: hydro turbines. First, the basic elements that characterize small hydroelectric projects, the categories in which they are classified, their definition, their evolution over time, how they generate electricity, their advantages and disadvantages, the criteria for selecting their location, and their mode of operation are presented. The mode of operation is better understood by analyzing the technical aspects of water abstraction works, the supply system, and the production station that govern small hydroelectric projects. Then, the Glaukos Small Hydroelectric Project is studied, focusing on its location, its water abstraction method, and its main components, which are the spillway, the arched sluice gate, the automatic counterweight sluice gate, the intake tunnel, the expansion tower, the drop chute, the generating plant, the central control unit, and the types and number of hydro turbines it uses. Next, the second main pillar of the work, concerning hydro turbines, is explored. Primarily, the energy calculations carried out in hydro turbines, the Torque of

Momentum - Twist Theorem and its application to a partial rotor, and the fundamental equations of turbine engines are discussed. Then, the categories of hydro turbines are listed, with special reference to three of the most important types of hydro turbines. The three main types emphasized are the Pelton, Francis, and Kaplan turbines, which are described in detail in this work, including a comparison of them. Furthermore, the characteristic parameters of hydro turbines and the phenomenon of cavitation in reaction hydro turbines are discussed. Finally, the method for selecting the type and number of hydro turbines for a hydroelectric system is presented.

Keywords: 1. Fluid Mechanics 2. Hydroelectric Energy 3. Small Hydroelectric Projects 4. Glaukos 5. Hydro turbines.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΥΕ)	13
1. ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ (Μ.Υ.Η.Ε)	15
1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.....	15
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.	15
1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.	16
1.4 Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΕ ΑΠΟ ΤΑ ΜΥΗΕ.	17
1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.	20
1.6 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.....	21
1.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.....	23
1.8 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ.	24
1.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ.	24
1.10 ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.	25
2. ΤΟ ΜΥΗΕ ΓΛΑΥΚΟΥ.....	27
2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.	28
2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ.....	31
2.3 Ο ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ.....	32
2.4 ΤΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑ.	32
2.5 ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑ ΜΕ ΑΝΤΙΒΑΡΟ.....	33
2.6 ΣΗΡΑΓΓΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ.	35
2.7 Ο ΠΥΡΓΟΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ.....	37
2.8 Ο ΑΓΩΓΟΣ ΠΤΩΣΗΣ & ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.	38
2.9 Η ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	39
2.10 ΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ.....	41
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ.....	47
3.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ.	47
3.2. ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ – ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ.	49
3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΔΡΟΜΕΑ.....	51
3.4. ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ.....	53
3.5. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ.....	54

3.6.	ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ PELTON.....	56
3.7.	ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ FRANCIS.	61
3.8.	ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ KAPLAN.....	66
3.9.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	69
3.10.	ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ ΣΤΟΥΣ ΤΟΥΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ.....	72
3.11.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	77
3.12.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	81
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

Πίνακας Εικόνων

<i>Εικόνα 1. Συνιστώσες ενός Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Μάμασης & Στεφανάκος, 2011)</i>	<i>17</i>
<i>Εικόνα 2. Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα. (Πηγή: RAE GeoPortal, 2024).....</i>	<i>18</i>
<i>Εικόνα 3. Η μετατροπή ενέργειας που συντελείται στα Μ.Υ.Η.Ε. (Ramos & Betamio, 1998)</i>	<i>21</i>
<i>Εικόνα 4. Γενικό σχέδιο συστήματος ΜΗΥΣ (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016).....</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 5. Γενική διάταξη του Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Andaroodi, 2005)</i>	<i>23</i>
<i>Εικόνα 6. Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Νίκος Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018).</i>	<i>26</i>
<i>Εικόνα 7. Το ΥΕ Γλαύκου. (Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=_m2zJEi4Awg).....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 8. Ο ποταμός Γλαύκος - Λεκάνη απορροής (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016).....</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 9. Ο ποταμός Γλαύκος - Λεκάνη απορροής (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016).....</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 10. Φράγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 11. Κανάλια ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016).</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 12. Το σύστημα προσαγωγής. (Πηγη: Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 13. Ηλεκτρικό τοξωτό θυρόφραγμα. (Πηγη: Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)</i>	<i>32</i>
<i>Εικόνα 14. Αυτόματο θυρόφραγμα με αντίβαρο. (Πηγη: Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό</i>	

<i>Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)</i>	34
<i>Εικόνα 15 Θυρόφραγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	35
<i>Εικόνα 16. Θυρόφραγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	36
<i>Εικόνα 17. Υδατόπυργος ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	37
<i>Εικόνα 18. Αγωγός Προσαγωγής. (Πηγή: Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010).</i>	38
<i>Εικόνα 19. Εσωτερική άποψη σταθμού. Στα δεξιά της φωτογραφίας ο πίνακας ελέγχου και στο βάθος ο στρόβιλος Pelton. (Πηγή: Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)...</i>	39
<i>Εικόνα 20. Πίνακας Ελέγχου ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	41
<i>Εικόνα 21 Παλιός Πίνακας Ελέγχου ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	41
<i>Εικόνα 22. Σχέδιο κατόψεως του χώρου εγκατάστασης των υδροστροβίλων Francis και Pelton στον Υ.Η.Σ. Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	42
<i>Εικόνα 23. Υδροστρόβιλος Pelton (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	43
<i>Εικόνα 24 .Γεννήτρια Pelton (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	43
<i>Εικόνα 25. Υδροστρόβιλος Francis και Γεννήτρια (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	44
<i>Εικόνα 26. Μακέτα εγκατάστασης ΜΗΥΣ (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	44
<i>Εικόνα 27. Μακέτα εγκατάστασης ΜΗΥΣ (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	45
<i>Εικόνα 28. Μακέτα εγκατάστασης ΜΗΥΣ (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)</i>	45
<i>Εικόνα 29. Διάγραμμα $Q=f(H)$ του υδροστροβίλου Francis στον ΥΗΣ Γλαύκου (Ευαγγελάτος, 2016)</i>	46

<i>Εικόνα 30. Σχηματική αναπαράσταση υδροστροβίλου. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009)</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 31. Ροπή διανύσματος ως προς άξονα. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009) και η σχηματική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα ω₀:</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 32. Διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα ω₀. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009).....</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 33. Μερικός δρομέας στροβίλου και συνιστώσες ταχυτήτων. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009).....</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 34. Δρομέας και τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου ακτινικής ροής. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009).....</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 35. Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton. (Πηγή: Σούλης, 2004).....</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 36. Σκαριφήματα Υδροστροβίλου Pelton. (Πηγή: Petley, 2018).....</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 37. Διαμόρφωση υδροστροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια (Πηγή: http://www.bflhydro.com , 2021).....</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 38. Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο με υδροστρόβιλο Pelton. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 39. Ταχύτητες του jet: A. Είσοδος & B. Έξοδος. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 40. Γραφική παράσταση της $W = f(\omega)$. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 41. Υδροστρόβιλος τύπου Francis. (Πηγή: Σούλης, 2004).....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 42. Διαμήκης ροή του Υδροστροβίλου Francis. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 43. Τα στροφεία του Υδροστροβίλου Francis. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 44. Υδροηλεκτρικό σύστημα του υδροστροβίλου Francis (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 45. Διαμόρφωση υδροστροβίλων τύπου Francis. (Πηγή: www.energotech.gr, 2009)</i>	<i>64</i>

<i>Εικόνα 46. Διανύσματα σχετικής και απόλυτης ταχύτητας και γεωμετρία A. για την εξωτερική ακτίνα και B. για την εσωτερική ακτίνα του τροφείου του στροβίλου Francis (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).</i>	65
<i>Εικόνα 47. Υδροστροβίλος τύπου Kaplan. (Πηγή: Σούλης, 2004).</i>	67
<i>Εικόνα 48. Τομές υδροστροβίλων τύπου Kaplan. (Πηγή: www.toshiba.co.jp, 2009)</i>	67
<i>Εικόνα 49. Διαμόρφωση υδροστροβίλων τύπου Kaplan και τροφείου. (http://sfrang.com/historia/selida625.htm, 2009).</i>	68
<i>Εικόνα 50. Διαμήκης τομή του Υδροστροβίλου Kaplan. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)</i>	68
<i>Εικόνα 51. ΥΗΣ με υδροστροβίλο Kaplan κατακόρυφου άξονα. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019, Μέγα, Ν. Μ., 2009,</i>	69
<i>Εικόνα 52. Ειδικές ταχύτητες ns (καμπύλες) για διάφορους υδροστροβίλους και διαθέσιμα ύψη.</i>	71
<i>Εικόνα 53. Βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων στροβίλων προς το φορτίο συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας ns. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).</i>	72
<i>Εικόνα 54. Τοποθέτηση υδροστροβίλου Francis σε σχέση με τη στάθμη του κάτω ταμιευτήρα. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).</i>	73
<i>Εικόνα 55. s_{cr} συναρτήσει του ns. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).</i>	76
<i>Εικόνα 56. Εύρος λειτουργίας των τύπων υδροστροβίλων ως προς την παροχή και το ύψος.</i>	82
<i>Εικόνα 57. Νομογράφημα Ροής – Καθαρού πιεζομετρικού φορτίου (Πηγή: www.turbogen-engineering.com, 2009).</i>	82
<i>Εικόνα 58. Νομογράφημα Ροής – Πιεζομετρικού Φορτίου (Πηγή: www.energotech.com, 2009).</i>	83

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1. Τα 12 μεγαλύτερα Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα.....	19
Πίνακας 2. Περιοχές χρήσης των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων σε συνάρτηση της ειδικής ταχύτητας καθώς και ενδεικτικές τιμές του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης.....	71

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΥΕ)

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η σημαντικότερη σε παγκόσμια κλίμακα ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και είναι ευρέως διαδεδομένη. Οι πιο ανεπτυγμένες χώρες έχουν εκμεταλλευτεί αξιοσημείωτο αριθμό από τις καταλληλότερες τοποθεσίες τους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η παραγωγή ΥΕ, η οποία αποτελεί δείγμα ανάπτυξης και ευημερίας των χωρών αυτών. Παράλληλα δείχνουν έτσι, πως η ταχεία εξέλιξη και η ορθή χρήση της τεχνολογίας μπορεί να βελτιώσει το βιοτικό επίπεδο των λαών, χωρίς σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ΥΕ έγινε πηγή ενέργειας στα τέλη του 19ου αιώνα και χαρακτηρίζεται ως ανανεώσιμη, γιατί παράγει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας την ενέργεια του κινούμενου νερού. Συγκεκριμένα, η ΥΕ είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική ενέργεια μέσα σε βαρυτικό πεδίο, με τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη διαδρομή της συνεχόμενης ροής του ελεύθερου νερού και ταυτόχρονα αποδίδεται ως κινητική ενέργεια μέσω της υδατόπτωσης. Η κινητική ενέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί χωρίς κάποια περαιτέρω επεξεργασία επιτόπου, όπως στην περίπτωση των νερόμυλων, είτε να μετατραπεί σε άλλες μορφές αποθήκευσης, ώστε τελικά να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις.

Η μηχανική ενέργεια δημιουργείται από την περιστροφή των στροβίλων (turbines) που επιτυγχάνεται με την κίνηση του νερού και έπειτα η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω κατάλληλων γεννητριών. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει φθάσει να ικανοποιεί το 10% των ενεργειακών μας αναγκών.

[Μένου Ελ., (2023), Τα Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα της Ελλάδας και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]

1. ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ (Μ.Υ.Η.Ε)

1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την χωρητικότητα αποθήκευσης, τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το υλικό κατασκευής και τον σκοπό για τον οποίο προορίζονται, όπως για έλεγχο πλημμυρών, για υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας, για άρδευση και ύδρευση. Διακρίνονται επίσης και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος. Σχετικά με αυτό, τα Μ.Υ.Η.Ε. που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας ταξινομούνται σε μεγάλα, μεσαία και μικρά.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (Υ.Η.Σ) είναι η πιο σημαντική κατηγορία, γιατί παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της υδροηλεκτρικής ισχύος. Παρόλα αυτά, οι μικρότερες κατηγορίες έχουν εξέχουσα σημασία σε τοπικό επίπεδο, γιατί ενώ σε σχέση με τους μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η συνεισφορά τους στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, το πλήθος των εγκαταστάσεων είναι πολύ μεγάλος.

Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι τα πιο τεχνικά εξελιγμένα και γενικά σχεδιάζονται ξεχωριστά για την εκάστοτε τοποθεσία, με χρήση στροβίλων που έχουν κατασκευαστεί ειδικά για τον συγκεκριμένο σταθμό παραγωγής ενέργειας. Τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια, είναι παρόμοια με τα μεγάλα, αλλά ορισμένα χρησιμοποιούν έτοιμες τουρμπίνες και άλλα τυποποιημένα και όχι ειδικά κατασκευασμένα εξαρτήματα.

Τέλος, σημειώνεται ότι για τα μεγάλα υδροηλεκτρικά η ισχύς ξεπερνάει τα 100 MW, για τα μεσαία υδροηλεκτρικά η ισχύς κυμαίνεται από 10 MW έως 100 MW και για τα μικρά υδροηλεκτρικά, η ισχύς της υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερη από 10 MW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Μ.Υ.Η.Ε παγκοσμίως εκτιμάται σε 78 GW.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

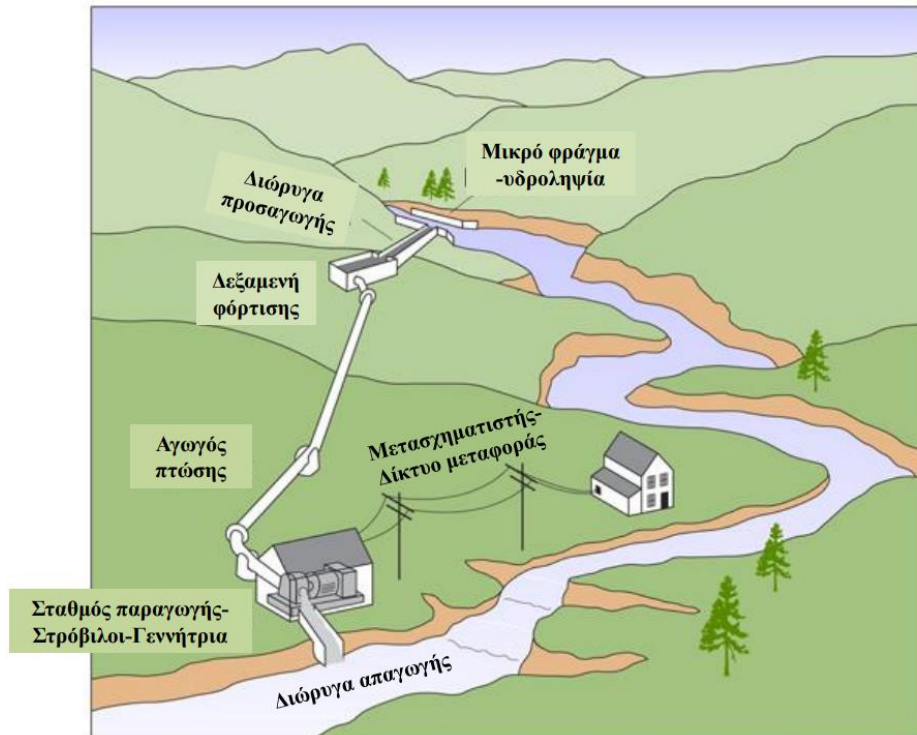
Τα Μ.Υ.Η.Ε. στην πραγματικότητα είναι η εξελιγμένη μορφή των νερόμυλων. Οι νερόμυλοι ήταν κατασκευές μεγάλου μεγέθους και μικρής ισχύος, μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μπορούσε να μετασχηματίζεται σε μηχανική. Πρώτη καταγραφή των νερόμυλων, γίνεται κατά την αρχαιότητα που περιγράφονται ως συστήματα μετάδοσης κίνησης και συγκεκριμένα οδοντωτά, τα οποία αποδίδονται στον Αριστοτέλη. Αξίζει να

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

σημειωθεί, ότι το πιο παλαιό δείγμα της σχετικής τεχνολογίας είναι ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων. Η τεχνολογία των Μ.Υ.Η.Ε. άρχισε να αναπτύσσεται μετά τις αρχές του 19ου αιώνα, όταν έκαναν τα πρώτα στάδια της εμφάνισης τους οι υδροστρόβιλοι. Οι υδροστρόβιλοι, χαρακτηρίζονταν ως μηχανές σχετικά μικρής ισχύος, αφού τα τεχνικά μέσα της περιόδου ήταν λιγοστά και επίσης λόγω της τοποθεσίας κατανάλωσης η μηχανική ενέργεια δεν μπορούσε να μεταφερθεί. Κόμβο, για την ανάπτυξη τους, αποτέλεσαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού. Μέσω των εφαρμογών αυτών, γνωρίζοντας πως η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται εύκολα με μηδαμινές απώλειες από τη θέση παραγωγής προς τις θέσεις κατανάλωσης, γίνεται αντιληπτό, ότι οι υδροστρόβιλοι μπορούν πλέον, να χρησιμοποιούν όλο και περισσότερη υδραυλική ενέργεια, την οποία μετασχηματίζουν αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια την μηχανική αυτή ενέργεια την μετατρέπουν σε ηλεκτρική, μέσω μιας συζευγμένης γεννήτριας. Έτσι, κατά τον 20^ο αιώνα, λόγω του ότι υπάρχουν πλέον υδροστρόβιλοι υψηλής απόδοσης, αναπτύσσονται ραγδαία τα υδροηλεκτρικά έργα μικρής ισχύος που ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στις ενεργειακές και καταλανωτικές ανάγκες της ανθρωπότητας.

1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Κατά την Ελληνική Νομοθεσία, Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο (Μ.Υ.Η.Ε ήτοι Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο), χαρακτηρίζεται ένα Υδροηλεκτρικό Έργο εγκατεστημένης ισχύος που φθάνει τα 15 MW. Συγκεκριμένα, για την περιγραφή της λειτουργίας του, ένας ενδεικτικός Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός, αξιοποιεί τη υδραυλική ενέργεια, μετατρέποντας την σε πρώτο στάδιο σε μηχανική ενέργεια και σε δεύτερο στάδιο σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εγκατάσταση ενός ΜΥΗΣ εκμεταλλεύεται την υψομετρική διαφορά της φυσικής πτώσης των νερών και με τη βοήθεια ενός υπό πίεση υδραυλικού συστήματος (υδραυλική ενέργεια) οδηγεί το νερό σε ένα στρόβιλο (μηχανική ενέργεια) και στη συνέχεια σε μια γεννήτρια (ηλεκτρική ενέργεια). Ένα Μικρό Υδροηλεκτρικό Έργο, λοιπόν, περιλαμβάνει υδροληψία, σύστημα προσαρμογής για την μεταφορά παροχής σε στρόβιλο και το σταθμό παραγωγής, με την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση [Τζαμάκου Ευτ., (2018)].



Εικόνα 1. Συνιστώσες ενός Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Μάμασης & Στεφανάκος, 2011)

1.4 Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΕ ΑΠΟ ΤΑ ΜΥΗΕ.

Η ανά τους αιώνες και ανά τον κόσμο σημαντικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι η ΥΕ, η οποία έχει κυρίαρχο ρόλο στην ενεργειακή ανάπτυξη παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, κατέχει πάνω από το 60% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ. Είναι γνωστό, πως η ΥΕ χαρακτηρίζεται από μεγάλη απόδοση και το κόστος της είναι χαμηλότερο από αυτό των αντίστοιχων τεχνολογιών που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το 32% της παγκόσμιας ΥΕ παράγεται στην περιοχή της Ασίας - Ειρηνικού, έχοντας εγκατεστημένη ισχύ 487 GW. Σε παγκόσμια κλίμακα, η ΥΕ συνέβαλε περίπου στο 16% της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με μελέτες που αφορούν στο 2018. Επίσης, περισσότερο από το 90% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ προέρχεται από φράγματα. Είναι γεγονός ότι η ανάπτυξη των υδροηλεκτρικών φραγμάτων γίνεται με ιλιγγιώδεις ρυθμούς. Υπολογίζεται ότι περισσότερα από 3.700 φράγματα προγραμματίζονται να κατασκευαστούν ή κατασκευάζονται ήδη στο διεθνές προσκήνιο.

Για τα Ευρωπαϊκά δεδομένα, η ΥΕ έχει μείζονα ρόλο στον τομέα της ενέργειας. Ωστόσο, αν και σε άλλα μέρη του κόσμου η παραγωγή ΥΕ έχει διπλασιαστεί από το 1990, στην γηραιά ήπειρο έχει αυξηθεί επί 1.33%, κατά προσέγγιση. Σε κάθε περίπτωση είναι αξιοσημείωτο, ότι

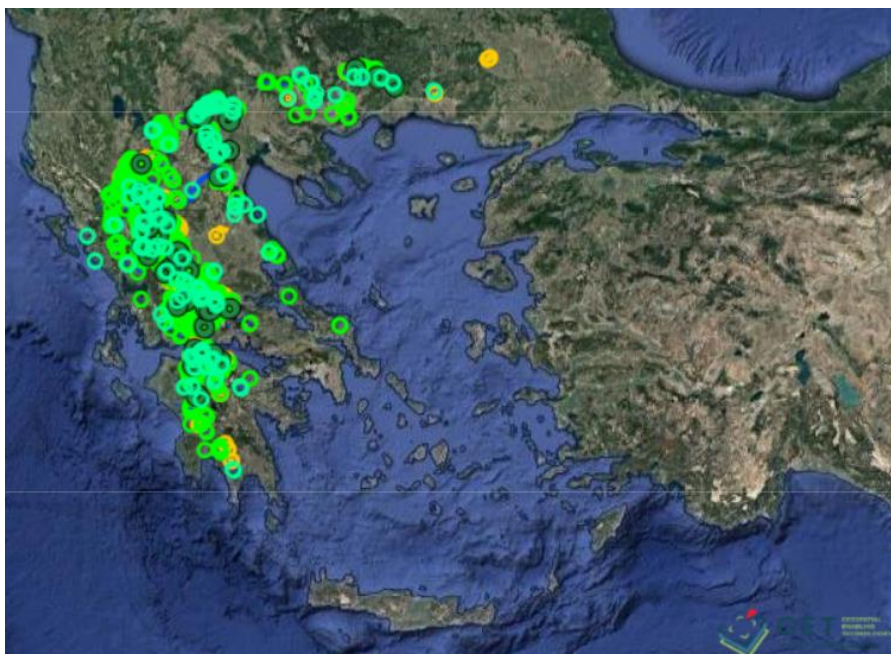
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

σε σχέση με όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ΥΕ είναι η κυρίαρχη, φθάνοντας στο 41.7% της ολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε.

Ιδιαίτερη ανάπτυξη της ΥΕ, χαρακτηρίζει και την Ελλάδα, αφού ως ορεινή χώρα κυρίως στο δυτικό και βόρειο τμήμα της ηπειρωτικής χώρας, έχει σημαντικό υδροηλεκτρικό δυναμικό το οποίο μέχρι και τις ημέρες μας έχει αξιοποιηθεί κατά ένα αξιοσημείωτο ποσοστό. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό της Ελλάδας ανέρχεται σε 12 TWh, με το 40% να χρησιμοποιείται ετησίως μέσω των υδροηλεκτρικών σταθμών. Αναφέρεται ότι το 26.5 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της ΔΕΗ είναι διατεθειμένο από τους ΥΗΣ.

Είναι γνωστό ότι η Ελλάδα έχει στο δυναμικό της πολλούς ποταμούς, με τους βασικότερους να είναι ο Έβρος, ο Νέστος, ο Στρυμόνας, ο Αξιός, ο Πηνειός, ο Αραχθός, ο Αχελώος, ο Σπερχειός, ο Αλφειός και ο Αλιάκμονας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι οι υδάτινοι πόροι στην Ελλάδα καλύπτουν μια έκταση 2.200 km², δηλαδή ποσοστό κάλυψης 1.6% και θέτοντας στην εξίσωση και το μεγάλο ρυθμό ροής του νερού όλων των ποταμών της, είναι εύκολα αντιληπτό ότι οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις που έχουν δημιουργηθεί στην Ελλάδα και έχουν στόχο την εκμετάλλευση του υδροδυναμικού της είναι πάρα πολλές και ιδιαίτερης σημασίας, για την κάλυψη των ανάγων σε ενέργεια και την οικονομία ολόκληρης της χώρας.

Παρακάτω παρατίθεται ο Γεωπληροφοριακός Χάρτης ΡΑΕ που παρουσιάζει τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην Ελλάδα .



Εικόνα 2. Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα. (Πηγή: ΡΑΕ GeoPortal, 2024)

Στην Ελλάδα υπάρχουν 110 έργα με εγκατεστημένη ισχύ 110 MW. Τα 12 μεγαλύτερα σύμφωνα με έρευνα του Σεπτεμβρίου του 2017 έχουν ως ακολούθως:

Πίνακας 1. Τα 12 μεγαλύτερα Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα. (Πηγή: Νίκος Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018)

Ονομασία Φορέα	Ισχύς (MW)	Θέση εγκατάστασης	Περ/κή Ενότητα
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	10.8	Αρδευτική Διώρυγα Αλιάκμονα	Ημαθίας
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	10.4	Λεοντάριο	Καρδίτσας
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	10.3	Ποταμός Λούρος - Φράγμα	Πρέβεζας - Άρτας
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	8.5	Δαφνοζωνάρα-Σανίδι του ποτ. Αχελώου	Αιτωλ/νίας - Ευρυτανίας
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	8.5	Έξοδος σήραγγας Μόρνου	Φωκίδας
ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	7.4	Ρέμα Βαλτσιστινό, θέση Μύλος Παλιουρή	Ιωαννίνων
ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	7.4	Ρέμα Βαλτσιστινό Δημ.Διαμέρ.Κληματιάς	Ιωαννίνων
ΔΕΗ - ΤΕΡΝΑ	6.6	Ελεούσα (φράγμα Αξιού) Δ.Χαλκηδόνας	Θεσ/νίκης
ΥΔΡΗΛ Α.Ε.	6.6	Γέφυρα Φλόκα ποταμού Αλφειού	Ηλείας
ΑΡΓΥΡΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	6.35	Αργύρι ποταμού Πλατανιά Δ. Αχελώου	Καρδίτσας
ΔΕΗ Ανανεώσιμες	6.2	Αχελώος - Περιοχή Στράτου	Αιτωλ/νίας
ΥΗΣ ΓΛΑΥΚΟΥ Α.Ε.	5.5	Ποταμός Γλαύκος	Αχαΐας

1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται από τα Μ.Υ.Η.Ε, ως ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Βοηθάει στην πράσινη ανάπτυξη, έχοντας μεγάλη ενεργειακή απόδοση, σχετικά μικρό κόστος και δεν συμμετέχει στην μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Η παραγωγή της, δεν λαμβάνει μέρος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αφού δεν απελευθερώνει βλαβερά αέρια.
- Η καλή κατανομή των σταθμών παραγωγής της συναρτήσει των σημείων κατανάλωσης, μειώνει αισθητά τις ενεργειακές απώλειες.
- Η παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην εκμετάλλευση των πόρων της εκάστοτε χώρας, συντελώντας έτσι στην οικονομική και ενεργειακή αυτονομία της και στην ανάπτυξη της εν γένει.
- Τα Μ.Υ.Η.Ε. χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργειακή απόδοση, που σημαίνει ότι η ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια ζωής τους αποσβένει το κόστος που δαπανήθηκε για την κατασκευή, συντήρηση και λειτουργία τους. Επειδή κατασκευάζονται σε απομονωμένες ορεινές περιοχές, οι ενοχλήσεις που προκαλούν τα Μ.Υ.Η.Ε. είναι αμελητέες. Η τεχνολογία των στροβίλων συντελεί σε ελάχιστο θόρυβο και δεν χρειάζεται αποθήκευση νερού. Συνεπώς, τα Μ.Υ.Η.Ε. αλλοιώνουν ελάχιστα τη γεωγραφική περιοχή στην οποία εδράζονται, προστατεύοντας το οικοσύστημα.
- Τέλος, με την λειτουργία των Μ.Υ.Η.Ε. επιτυγχάνονται και άλλες δυνατότητες ύδρευσης και άρδευσης, αυξάνοντας έτσι τα οφέλη της χρήσης τους.

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα των Μ.Υ.Η.Ε., θα μπορούσαν να καταγραφούν:

- Τα Μ.Υ.Η.Ε. σε σχέση τις με συμβατικές πηγές ενέργειας, εφόσον δεν υπάρχει έλλειμμα ορυκτών καυσίμων, παράγουν ακριβότερη ενέργεια. Λόγω του ότι η κρατική ενίσχυση, μέσω της οποίας προωθείται η ΥΕ, είναι πεπερασμένη, πολλές φορές η χρήση της είναι οικονομικά ασύμφορη.
- Τα Μ.Υ.Η.Ε. σε σύγκριση με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, δεν υποστηρίζουν τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού σε ταμιευτήρα, που σημαίνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταγενέστερα, αλλά μόνο άμεσα.
- Δεν έχουν χρονικά ισοβαρή παραγωγή, σημειώνοντας την μεγαλύτερη παραγωγή τους κατά τους χειμερινούς μήνες και την ελάχιστη παραγωγή κατά τους θερινούς, δημιουργώντας έτσι φαινόμενα έλλειψης ενέργειας.
- Τέλος, το γεγονός ότι τα Μ.Υ.Η.Ε. βρίσκονται διάσπαρτα και το πλήθος τους είναι αρκετά μεγάλο, δυσχεραίνει τον πλήρη έλεγχο και την συντήρηση τους.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα μπορούμε να πούμε, ότι αν και τα Μ.Υ.Η.Ε. παρουσιάζουν μειονεκτήματα, τα πλεονεκτήματα που τα χαρακτηρίζουν υπερτερούν, διότι η ενεργειακή τους απόδοση σε συνδυασμό με το γεγονός ότι βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος, κάνουν την παραγωγή και την χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα σημαντική [Μέγα, Ν. Μ., 2009].

1.6 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Ο τρόπος λειτουργίας των Μ.Υ.Η.Ε. στηρίζεται στην αξιοποίηση της ενέργειας των επιφανειακών νερών, η οποία μετατρέπεται καταρχήν σε μηχανική ενέργεια και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια, εκμεταλλευόμενη τους νόμους των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Συγκεκριμένα, η υδραυλική ενέργεια μετασχηματίζεται σε μηχανική, μέσω της περιστροφικής κίνησης του στροβίλου και τέλος σε ηλεκτρική, μέσω της κίνησης της γεννήτριας.

Ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας της εγκατάστασης ακολουθεί τον παρακάτω τύπο:

$$P_f = n \rho g Q H_{net}, \quad (1)$$

Όπου:

P_f η ισχύς λειτουργίας (KW),

N ο βαθμός απόδοσης ($n = \eta_{\text{στροβίλου}} \cdot \eta_{\text{γεννήτριας}} \cdot \eta_{\text{μετασχηματιστή}}$),

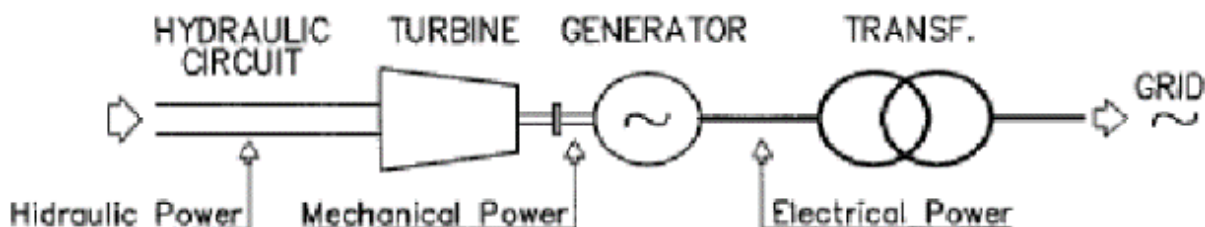
ρ η πυκνότητα του νερού ($\approx 1.0 \text{ t/m}^3$),

g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$),

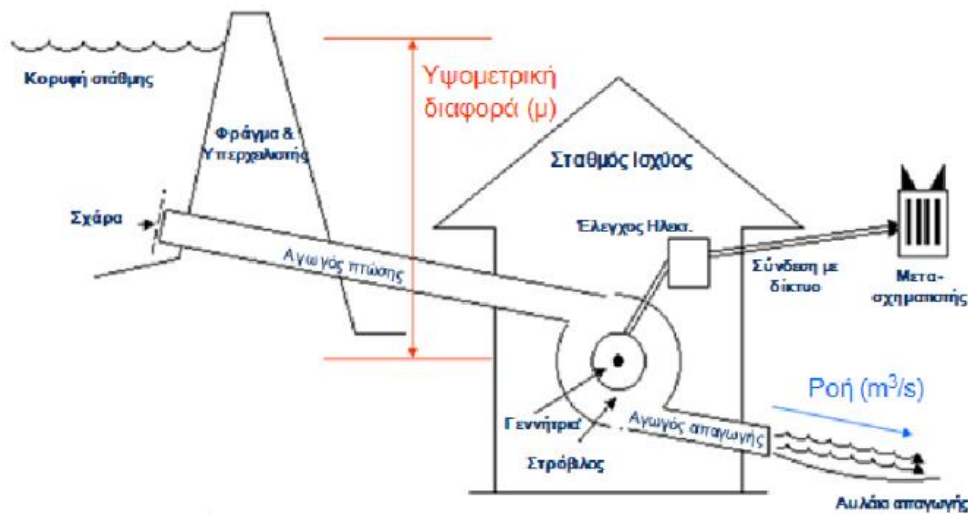
Q η διερχόμενη του στροβίλου παροχή (m^3/s) &

H_{net} το καθαρό ύψος πτώσης, αφού αφαιρεθούν οι γραμμικές και τοπικές απώλειες (m).

Στο παρακάτω σκαρίφημα παρουσιάζεται η μετατροπή ενέργειας που συντελείται στα Μ.Υ.Η.Ε.



Εικόνα 3. Η μετατροπή ενέργειας που συντελείται στα Μ.Υ.Η.Ε. (Ramos & Betamio, 1998)



Εικόνα 4. Γενικό σχέδιο συστήματος ΜΗΥΣ (Πηγή: Εναγγελάτος, 2016)

Ο τύπος που περιγράφει την ενέργεια που παράγεται σε χρονικό διάστημα Δt :

$$E = \sum_{t=0}^{\Delta t} P * dt \quad (2)$$

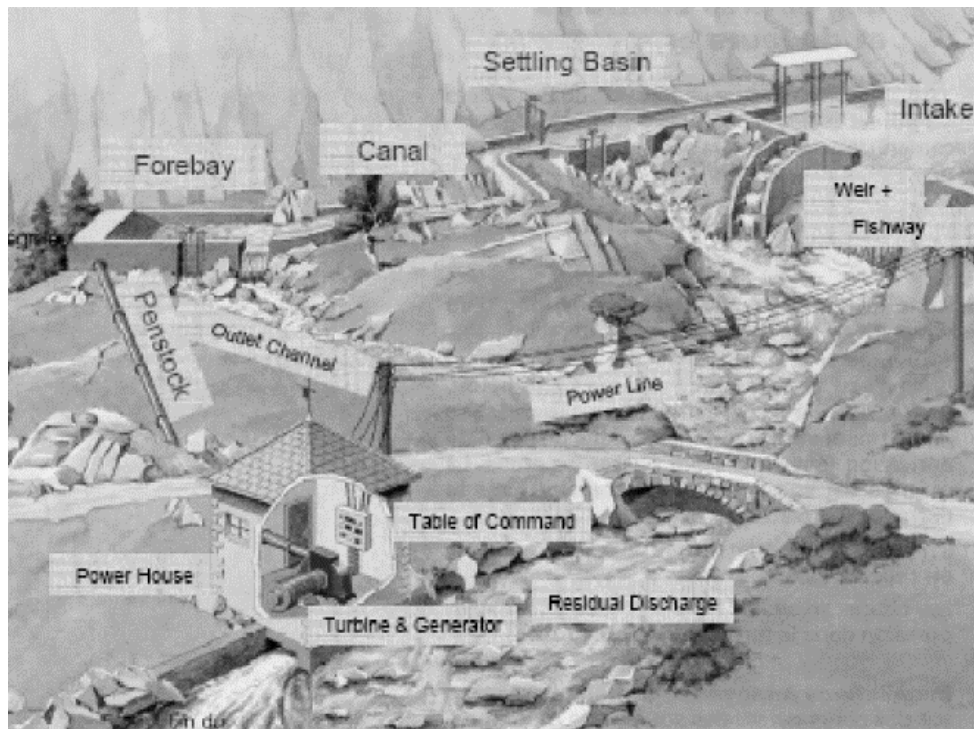
όπου:

E η ενέργεια η οποία παράγεται σε χρονικό διάστημα Δt (KWh),

P η ισχύς λειτουργίας για κάθε στοιχειώδες χρονικό διάστημα dt (KW) &

Dt το στοιχειώδες χρονικό διάστημα κατά το οποίο η ισχύς θεωρείται σταθερή (h).

Οι εγκαταστάσεις των Μ.Υ.Η.Ε. χρησιμοποιούν τη φυσική πτώση των επιφανειακών υδάτων, μέσω ενός υπό πίεση υδραυλικού συστήματος που είναι υπεύθυνο για την διοχέτευση του νερού στο στρόβιλο. Στο παρακάτω σκαρίφημα φαίνεται η γενική διάταξη του Μ.Υ.Η.Ε.



Εικόνα 5. Γενική διάταξη του Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Andaroodi, 2005)

1.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Είναι πολύ σημαντική η επιλογή της σωστής θέσης εγκατάστασης των Μ.Υ.Η.Ε. Τα κριτήρια επιλογής της τοποθεσίας παρατίθενται παρακάτω:

- ✓ η παροχή του ποταμού,
- ✓ οι εποχιακές διακυμάνσεις,
- ✓ το ύψος πτώσεως,
- ✓ η εκτίμηση της διαθέσιμης ισχύος,
- ✓ η πυκνότητα του νερού,
- ✓ η επιτάχυνση της βαρύτητας &
- ✓ η ολική απόδοση του στροβίλου και της γεννήτριας.

Στη συνέχεια αναλύονται τα τεχνικά έργα υδροληψίας, το σύστημα προσαγωγής και ο σταθμός παραγωγής των Μ.Υ.Η.Ε., για να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους.

1.8 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ.

Οι βασικότεροι τύποι υδροληψίας είναι η ορεινή (tyrolean intake), η πλευρική (side intake) και η υδροληψία τύπου σίφωνα (siphon intake). Στις περιπτώσεις που το νερό έρχεται από φυσικό υδατόρευμα γίνεται χρήση των δύο πρώτων τύπων, ενώ ο τρίτος χρησιμοποιείται όταν το νερό προέρχεται από υφιστάμενο ταμιευτήρα ή κανάλι.

Η υδροληψία σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε μέρος της παροχής (οικολογική παροχή) να αποδίδεται απευθείας στο φυσικό υδατόρευμα, με σκοπό την προστασία του παρόχθιου οικοσυστήματος. Στις πλευρικές υδροληψίες γίνεται ενσωμάτωση θυροφραγμάτων στον αναβαθμό με στόχο την εκκένωση των φερτών, ώστε σε κάθε περίπτωση να εμποδίζεται η στερεομεταφορά κατά μήκος της κοίτης. Αφού το νερό φύγει από την κοίτη, με ελεύθερη ροή περνάει στη δεξαμενή καθίζησης ή εξαμμωτή (desilter).

Μετά τον εξαμμωτή, ακολουθεί η δεξαμενή φόρτισης (forebay), η οποία εξασφαλίζει τις κατάλληλες υδραυλικές συνθήκες εισόδου στον υπό πίεση αγωγό προσαγωγής. Κατά τον σχεδιασμό χρειάζεται προσοχή, ώστε να μην γίνει εισροή αέρα στον αγωγό προσαγωγής, ενέργεια ικανή για να δημιουργήσει προβλήματα σπηλαίωσης.

1.9 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ.

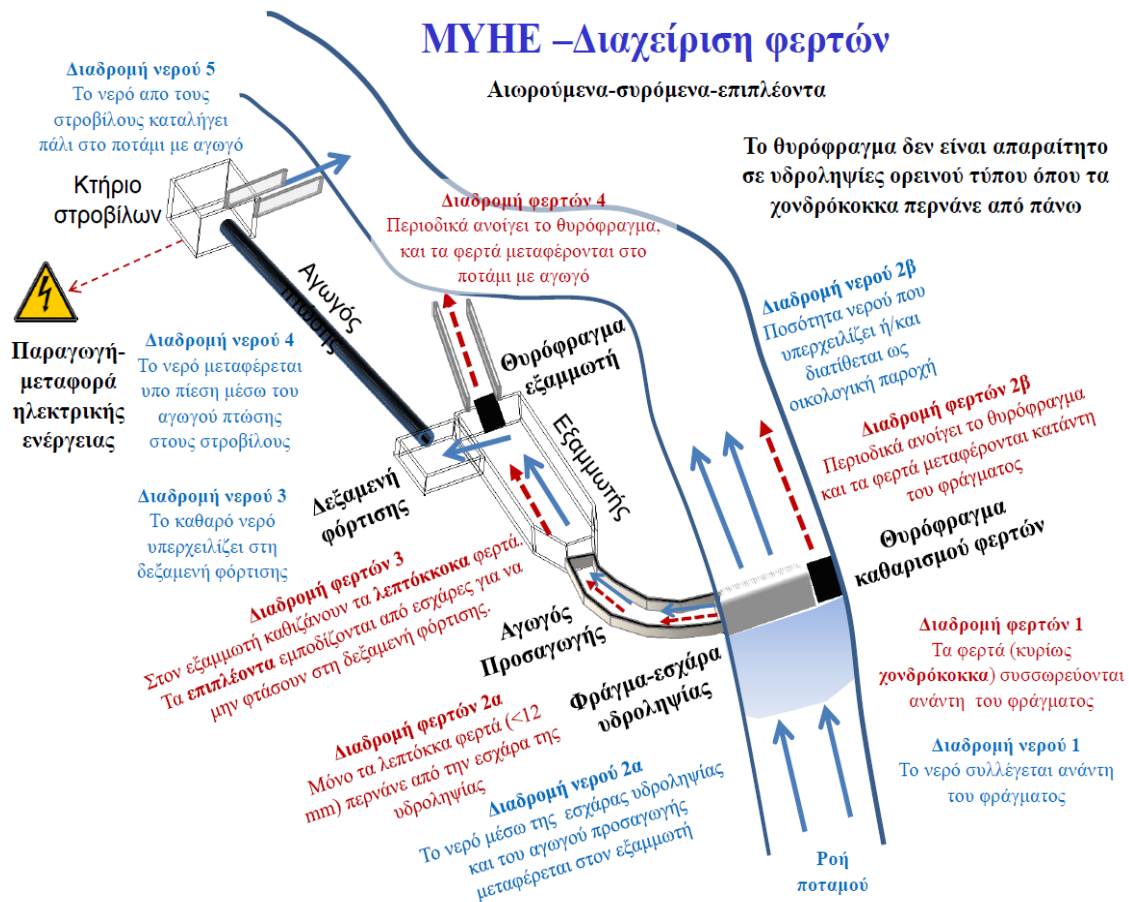
Το κύριο τεχνικό έργο του συστήματος προσαγωγής είναι ο αγωγός, ο οποίος επιτυγχάνει τη μεταφορά της παροχής στο στρόβιλο. Το υλικό κατασκευής και οι διαστάσεις του αγωγού καθορίζονται με τεχνοοικονομικά κριτήρια, πετυχαίνοντας έτσι την πιο αποδοτική και οικονομικά συμφέρουσα σχεδίαση του. Σχετικά με το υλικό κατασκευής, τα πιο πολυχρησιμοποιημένα υλικά είναι ο χάλυβας, τα συνθετικά υλικά (PVC, GRP) και το οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα (σήραγγες). Χρησιμοποιώντας κριτήρια όπως, οι εκάστοτε τοπικές συνθήκες, οι συνθήκες εγκατάστασης, οι καταπονήσεις, τα διαθέσιμα μέσα και οι κατασκευαστικές δυνατότητες, γίνεται τελικά η επιλογή του υλικού. Ακολουθώντας, όσον αφορά στις διαστάσεις του αγωγού, η επιλογή της διαμέτρου γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τον περιορισμό των υδραυλικών απωλειών, το κόστος και τη διατήρηση της ταχύτητας σε συγκεκριμένα επίπεδα. Η εγκατάσταση του αγωγού είναι πολύ πιθανό τόσο το να είναι υπόγεια όσο και επιφανειακή. Συνηθίζεται η τοποθέτηση του σε σκάμμα, για λόγους προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και αποφυγή καταστροφής από τον ανθρώπινο παράγοντα. Επίσης, στον αγωγό προστίθενται και κατάλληλες καλωδιώσεις για τον έλεγχο των θυροφραγμάτων

της υδροληψίας, από το σταθμό παραγωγής. Οι πιέσεις που καταπονούν τον αγωγό, λαμβάνοντας υπόψιν και τις υπερπιέσεις, βοηθούν στην δημιουργία ανάπτυξη ωστικών δυνάμεων (thrust forces) στις θέσεις όπου συναντιούνται γωνίες ή αλλαγές διαμέτρου. Με σκοπό να επιτευχθεί ευστάθεια του αγωγού, πρέπει να περιοριστούν οι τάσεις στα τοιχώματα, οπότε κατασκευάζονται σώματα αγκύρωσης (thrust blocks) από σκυρόδεμα, με τα οποία μεταδίδονται οι ωθήσεις στο έδαφος. Οι διαστάσεις που επιλέγονται για τα σώματα αγκύρωσης καθορίζονται από παραμέτρους, όπως η εσωτερική πίεση σχεδιασμού, η διάμετρος του αγωγού και οι υπάρχουσες εδαφικές συνθήκες.

1.10 ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.

Ο σταθμός παραγωγής αποτελεί τον χώρο τερματισμού του συστήματος, όπου τοποθετείται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και παρουσιάζει το μεγαλύτερο μηχανολογικό ενδιαφέρον. Εκεί εγκαθίστανται οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός ελέγχου του έργου. Σημαντική ενέργεια αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων τύπων και του πλήθους των στροβίλων. Η επιλογή αυτή γίνεται με κριτήρια τα μεγέθη σχεδιασμού, δηλαδή την παροχή και το ύψος πτώσης καθώς και το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας του σταθμού. Οι πιο συνήθεις τύποι στροβίλων είναι οι Francis, Kaplan και Pelton. Οι στρόβιλοι Francis, Kaplan επιλέγονται για μικρά και μεσαία ύψη πτώσης, καθώς και για μεγάλες παροχές. Με τη σειρά του ο στρόβιλος Pelton, χρησιμοποιείται για μεγάλα ύψη πτώσης, έχοντας παράλληλα ευρύ εύρος παροχών λειτουργίας. Ο σταθμός παραγωγής εξαρτάται από την εκάστοτε τοπογραφία, τις συνθήκες ροής του φυσικού υδατορεύματος και τον τύπο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Η τοποθεσία του εξοπλισμού, αλλάζει για στρόβιλο οριζοντίου, κατακόρυφου και διαγώνιου άξονα. Εφόσον ο σταθμός παραγωγής είναι επιφανειακός και όχι υπόγειος, ο όγκος και η χωροθεσία του σταθμού εξαρτώνται από τους όρους δόμησης της περιοχής και είναι απαραίτητο να υπάρχουν ορισμένες αποστάσεις από τα όρια του οικοπέδου και την οριογραμμή του υδατορεύματος.

Τέλος, όταν το νερό εκρέει από το στρόβιλο μέσω της διώρυγας της φυγής (outlet channel), εμπίπτει στη φυσική ροή του υδατορεύματος. Παρατηρείται ότι η διώρυγα φυγής στην περίπτωση των στροβίλων Kaplan και Francis αποσκοπεί στη διατήρηση ομαλών συνθηκών στην ελεύθερη ροή, ώστε να μη συμβαίνει το ανεπιθύμητο φαινόμενο της σπηλαίωσης [Μέγα, Ν. Μ., 2009].



Εικόνα 6. Μ.Υ.Η.Ε. (Πηγή: Νίκος Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης και Α. Κουτσογιάννης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018).

2. ΤΟ ΜΥΗΕ ΓΛΑΥΚΟΥ.

Το ΥΗΕ του Γλαύκου είναι το πρώτο στην Ελλάδα και υλοποιήθηκε τις χρονιές 1922-1926 από τη δημοτική επιχείρηση Γλαύκος. Το έργο αυτό ήταν έργο πνοής για την Πάτρα, γιατί θα κάλυπτε τις ενεργειακές απαιτήσεις και τις ανάγκες ύδρευσης των κατοίκων της πόλης, εκμεταλλευόμενο τα νερά του χειμάρρου του Γλαύκου. Το έργο αυτό μελετήθηκε και εκπονήθηκε από το Πολυτεχνείο της Γενεύης και το κόστος του ανερχόταν γύρω στις 145.000 λίρες. Το σπουδαίο έργο αυτό καταστράφηκε ολοσχερώς το 1928 από κατολισθήσεις και ξανακατασκευάστηκε εκ νέου. Σημαντικό είναι το έτος 1968, κατά το οποίο η ΔΕΗ αγόρασε το ΥΗΕ που μέχρι τότε άνηκε στον δήμο Πατρών και το ενέταξε στο δίκτυο των υδροηλεκτρικών σταθμών της. Η σημερινή χρήση του Γλαύκου, αν και δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες της Πάτρας σε νερό, συμμετέχει ενεργά στην ύδρευση της πόλης, αφού παράγει ενέργεια ανά χρόνο, η οποία υπολογίζεται 10 GWh. Το ΥΗΕ του Γλαύκου, όντας μικρό έργο, δεν αποταμιεύει νερό αλλά βοηθάει στην εκτροπή του ποταμού.

Αν περιγράψαμε τη σύγχρονη μορφή του ΥΗΕ του Γλαύκου θα λέγαμε ότι, απαρτίζεται από δύο θυροφράγματα που έχουν διαστάσεις 4x4 m και 9x4 m, μία διώρυγα που οδηγεί το νερό στην υδροληψία και έναν αγωγό μήκους 1.700 m ο οποίος ωθείτο νερό στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Ο Γλαύκος σημειώνει μεγάλη στερεοαπορροή κυρίως την χειμερινή περίοδο, γεγονός που οφείλεται στο σαθρό εδάφους και στις μεγάλες κλίσεις.

Αξίζει να τονισθεί, ότι στον σταθμό εγκαταστάθηκαν καταρχήν τρεις μονάδες Francis των 750 kW. Το 1936 έγινε η τοποθέτηση μιας ακόμα μονάδα τύπου Pelton ισχύος 1.5 MW. Επειδή όμως οι υδροστρόβιλοι Francis χαρακτηριζόταν από μικρό μέγεθος, όχι εξελιγμένης τεχνολογίας και έφεραν πλήθος φθορών, η απόδοση τους μειώθηκε κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό και συγκεκριμένα κατά 60%, οπότε ήταν αναμενόμενη η απομάκρυνση τους από το έργο. Έτσι, από το 1996 έως σήμερα η εγκατεστημένη ισχύς του είναι 3.8 MW και το έργο μετά από ανακαίνιση αποτελείται από ένα στρόβιλο Francis ισχύς 2.2 MW και από ένα στρόβιλο Pelton ισχύς 1.6 MW.



Εικόνα 7. Το ΥΕ Γλαύκου. (Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=m2zJEi4Awg>)



Εικόνα 8. Ο ποταμός Γλαύκος - Λεκάνη απορροής (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΜΥΗΕ.

Η τοποθεσία του Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου βρίσκεται σε ύψος 185 m στο Νότιο Τμήμα της Πάτρας στο μήκος του ποταμού Γλαύκου, του οποίου η ροή αυξάνεται από παράπλευρες πηγές και το μήκος του υπολογίζεται γύρω στα 26.3 km. Βασικό είναι να αναφερθεί, ότι πραγματοποιούνται κάποιες ενέργειες γύρω από τον ποταμό, όπως η ρύθμιση της κοίτης, η Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

κατασκευή τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα και η εκ νέου κατασκευή του δρόμου γύρω από τον ποταμό, οι οποίες στοχεύουν στην καλύτερη εκμετάλλευση του. Τέλος, το Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου χαρακτηρίζεται ως συνεχούς ροής.



Εικόνα 9. Ο ποταμός Γλαύκος - Λεκάνη απορροής (Πηγή: Εναγγελάτος, 2016)



Εικόνα 10. Φράγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Εναγγελάτος, 2016)



Εικόνα 11. Κανάλια ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016).

2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ.

Το φράγμα του Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου, κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα και εδραιώθηκε επάνω στο παλιό φράγμα το οποίο αποτελείτο από σκυρόδεμα και φερτές ύλες. Αναφέρεται και η ύπαρξη ενός προφράγματος 400 m μακριά που έχει ως στόχο την προστασία του φράγματος. Όσον αφορά στη διάταξη του φράγματος, το φράγμα είναι κατασκευασμένο κάθετα στην κοίτη του ποταμού Γλαύκου, ώστε να πετυχαίνει να παροχετεύει ή να ανασχετεί την πλημμυρική παροχή της ροής. Έτσι, εγκαρσία στην κοίτη του χειμάρρου εδράζονται ένα αυτόματο και ένα ηλεκτροκίνητο θυρόφραγμα, τα οποία συμβάλλουν στην ανάπτυξη μιας μικρής δεξαμενής, οδηγώντας το νερό να κατευθυνθεί προς τον αγωγό προσαγωγής. Η υδροληψία λαμβάνει χώρα σε υψόμετρο 339.5 m.



Εικόνα 12. Το σύστημα προσαγωγής. (Πηγή: Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Αναεώσιμες Α.Ε., 2010)

2.3 Ο ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΣΤΗΣ.

Ο υπερχειλιστής αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του φράγματος, γιατί εξυπηρετεί την ασφάλεια του φράγματος σε περίπτωση που το φράγμα έρθει αντιμέτωπο με ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως πλημμύρες ή άλλα επιβλαβή φαινόμενα, όπως κατολισθήσεις και σεισμούς. Το 1928, χρονιά ορόσημο για το Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου, συνέβη κατολίσθηση και το έργο υπέστη τεράστια ζημιά. Έτσι, το έργο όντας κατεστραμμένο, ξανακατασκευάστηκε έχοντας πλέον δύο θυροφράγματα, ένα αυτόματο με αντίβαρο και ένα τοξωτό ηλεκτροκίνητο. Οι διαστάσεις του αυτόματου με αντίβαρου θυροφράγματος είναι 9.00 x 4.00 m (πλάτος x ύψος) ενώ αυτές του τοξωτού είναι 4.00 x 4.00 m (πλάτος x ύψος).

2.4 ΤΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑ.

Το τοξωτό θυρόφραγμα εδράζεται δίπλα από την λιθόκτιστη κατασκευή στήριξης του έργου. Λειτουργεί με ηλεκτρισμό και χωρίς βοηθητική γεννήτρια, σε περίπτωση που διακοπεί αιφνιδίως το ηλεκτρικό ρεύμα. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, η λειτουργία του θυροφράγματος γίνεται χειροκίνητα.



Εικόνα 13. Ηλεκτρικό τοξωτό θυρόφραγμα. (Πηγή: Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)

Όταν η στάθμη του νερού φτάσει σε οριακό σημείο, ο υπεύθυνος της βάρδιας θα ανοίξει το ηλεκτροκίνητο θυρόφραγμα χειροκίνητα, επιτρέποντας έτσι την διέλευση του νερού και των φερτών υλικών κάτω από αυτό. Όταν το θυρόφραγμα ανοίξει, το νερό ρέει μέσω μιας μικρή διώρυγας που είναι ανθεκτική σε καταπονήσεις και οδηγείται στην παλαιά κοίτη του χειμάρρου.

2.5 ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΘΥΡΟΦΡΑΓΜΑ ΜΕ ΑΝΤΙΒΑΡΟ.

Το αυτόματο θυρόφραγμα με αντίβαρο, αποτελείται από δύο μέρη τα οποία συνδέονται με ένα βραχίονα. Στην περίπτωση που η στάθμη του νερού του φράγματος πάνω από το θυρόφραγμα ξεπεράσει τα 300 cm, το βάρος του παύει να εξισορροπεί το αντίβαρο, το οποίο ανυψώνεται οδηγώντας έτσι το θυρόφραγμα να κατέβει. Στη συνέχεια, εάν ανεβεί περαιτέρω η στάθμη του νερού, το αντίβαρο, για να υπάρξει ισορροπία, μετακινείται με ταυτόχρονη άνοδο του θυροφράγματος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το θυρόφραγμα να ανοίξει πλήρως. Παράλληλα, το νερό κατευθύνεται σε μικρή διώρυγα, η οποία στο τέλος της αποτελείται από μια κάθετη διάταξη από σκυρόδεμα ενισχυμένο με χαλύβδινες πλάκες, όπου επιτυγχάνεται η συγκράτηση μεγάλης ποσότητας φερτών υλικών.

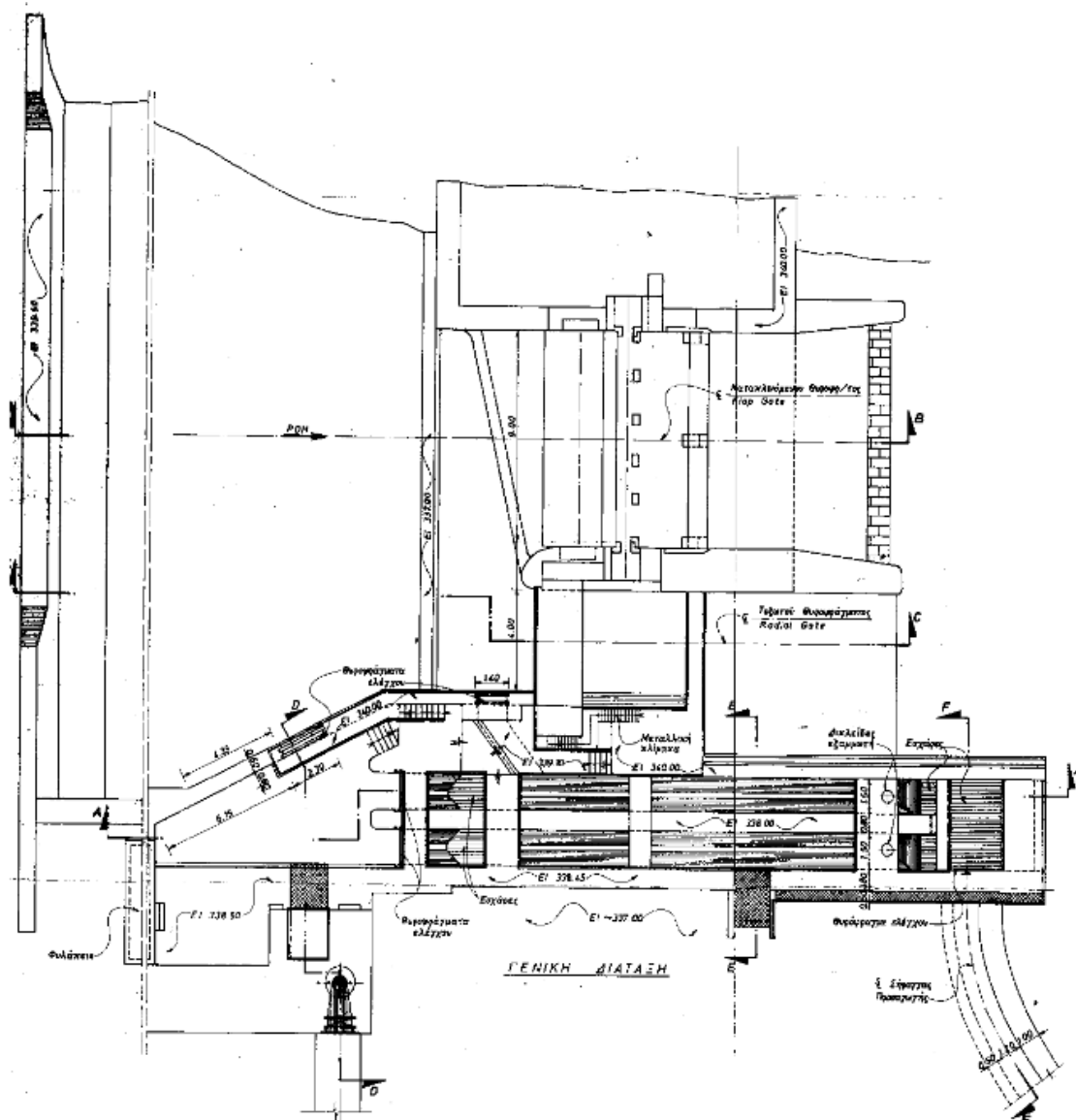
Επισημαίνεται ότι το αυτόματο θυρόφραγμα έχει αρκετά μειονεκτήματα. Είναι γεγονός ότι η λειτουργία του με την ταυτόχρονη διέλευση του νερού από πάνω, αφήνει την είσοδο και σε φερτά υλικά που παρασύρονται από τους ορεινούς όγκους και τα οποία προσκολλώνται πάνω στο θυρόφραγμα, εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο το κλείσιμο του. Έτσι παρατηρείται το φαινόμενο της παραμονής του θυροφράγματος σε ανοικτή θέση και μετά το τέλος της πλημμύρας, με αποτέλεσμα την ανάγκη πολλής και επίπονης δουλειάς, ώστε να μπορέσουν να απομακρυνθούν όλα τα φερτά υλικά και κατόπιν να καταστεί δυνατό στο αντίβαρο, να σηκώσει ξανά το θυρόφραγμα.

Για την προστασία της θεμελίωσης του έργου, προστίθεται κατόπιν του υπερχειλιστή ένας μονόλιθος οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 1.50m. Στην περίπτωση που απαιτηθούν οποιεσδήποτε επισκευές, αυτές γίνονται κατά κύριο λόγο τους θερινούς μήνες και συνήθως σχετίζονται με την πλήρωση των σκαμμένων τμημάτων σκυροδέματος, το οποίο ωστόσο πλέον δεν χαρακτηρίζεται από επαρκείς αντοχές και άρα δεν λειτουργεί ως οπλισμένο σκυρόδεμα.

Κατά την διάρκεια του χειμώνα, οι επισκευές αυτές επαναφθείρονται, αποκαλύπτοντας έτσι για ακόμα μια φορά έως και τον διαβρωμένο οπλισμό, κατά περίπτωση. Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει σπάσει σχεδόν σε όλο το μήκος του στην κατάντη του άκρη και έτσι στη θέση που ενώνεται με την κοίτη του χειμάρρου έχει δημιουργηθεί μία τάφρος βάθους το ελάχιστο 1.50m. Μέσα στην τάφρο αυτή του νερού, έχουν τοποθετηθεί βαρέλια με σκυρόδεμα για να μην επεκταθεί περισσότερο η υποσκαφή. Επιπλέον, η τύρβη που δημιουργείται από το νερό στην τάφρο, όταν λειτουργεί το ηλεκτροκίνητο θυρόφραγμα, οδηγεί στην απομάκρυνση ορισμένων βαρελιών από τη θέση τους μετατοπίζοντας τα αρκετά μέτρα μακριά.



Εικόνα 14. Αυτόματο θυρόφραγμα με αντίβαρο. (Πηγή: Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)

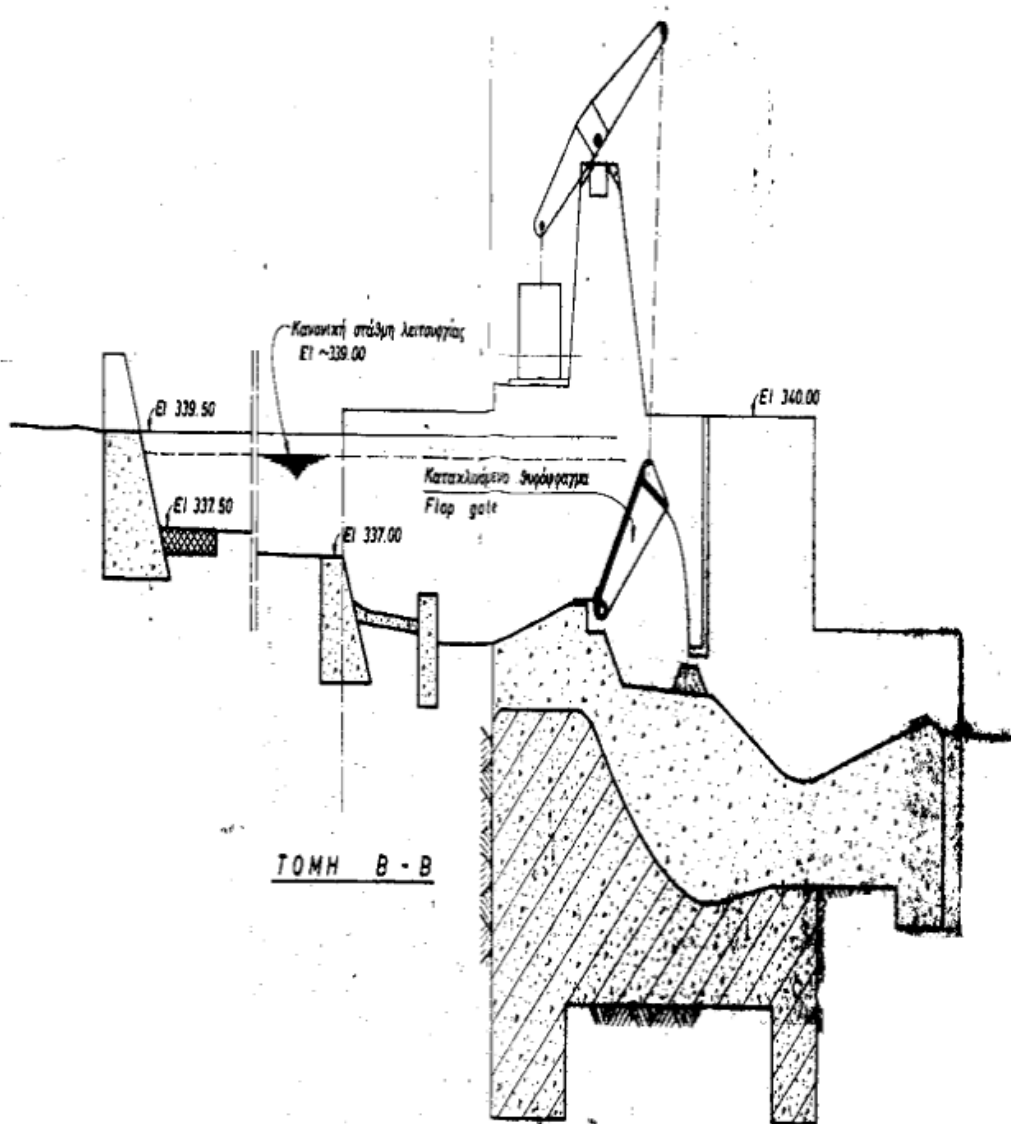


Εικόνα 15 Θυρόφραγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

2.6 ΣΗΡΑΓΓΑ ΠΡΟΣΑΓΩΓΗΣ.

Για το Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου, η σήραγγα προσαγωγής είναι φτιαγμένη από σκυρόδεμα και τοποθετείται μέσα στο έδαφος και κατευθύνει το νερό από τον ταμιευτήρα στο σταθμό παραγωγής. Κατόπιν της διέλευσης του από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οδηγεί στη κοίτη του ποταμού ή στον επόμενο ταμιευτήρα. Η σήραγγα προσαγωγής έχει μήκος 1.695 m και η διατομή της παίρνει τιμές από 1.64 m² έως 1.95 m². Επίσης, αξίζει να αναφερθεί, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

ότι ο πυθμένας της σήραγγας στην υδροληψία έχει στάθμη 334.60 m, η κλίση της σήραγγας είναι 1.67% και το πάχος της επένδυσης από μπετόν αρμέ αρχίζει από 0.10 m και φθάνει έως 0.40 m.



Εικόνα 16. Θυρόφραγμα ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Εναγγελάτος, 2016)

2.7 Ο ΠΥΡΓΟΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ.

Ο πύργος εκτονώσεως βρίσκεται στο τέλος της σήραγγας, αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει εσωτερική διάμετρο 9m και ύψος 9m. Ακόμα, στον πυθμένα του παρατηρείται κωνικό άνοιγμα διαμέτρου 1.50m προς τον αγωγό πτώσης. Η στάθμη στον πυθμένα είναι 328.5m στο ανώτερο μέρος του υδατόπυργου όπου υπάρχει και ένας μικρός υπερχειλιστής, είναι 337.5m. Η χρήση του πύργου εκτονώσεως, αφορά στο να προστατεύει τον αγωγό προσαγωγής που βάλλεται από υπερβολικές πιέσεις και στο να βοηθάει στην παροχή πρόσθετης ποσότητας νερού που χρειάζεται κατά την εκκίνηση των μονάδων. Μετά από τον πύργο εκτόνωσης, ο αγωγός προσαγωγής πηγαίνει προς την άνω βαλβίδα με μεταλλική επένδυση. Η άνω βαλβίδα είναι μια βαλβίδα τύπου πεταλούδας με διάμετρο 3m, η οποία στοχεύει να προστατέψει τον αγωγό προσαγωγής, στην περίπτωση που έχει παρατηρηθεί υπερβολική ταχύτητα του νερού στον αγωγό. Είναι δόκιμο να αναφερθεί, ότι στον πυθμένα του πύργου εκτονώσεως, υπάρχει ένας μικρός αγωγός εκκένωσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του υδατόπυργου από φερτές ύλες.



Εικόνα 17. Υδατόπυργος ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

2.8 Ο ΑΓΩΓΟΣ ΠΤΩΣΗΣ & ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.

Ο αγωγός πτώσης είναι κατασκευασμένος από μέταλλο και έχει μήκος 308m, διάμετρο 0.90m και μέση κλίση γύρω στο 48%. Μέσω του μεταλλικού αγωγού, το νερό βαίνει από τον υδατόπυργο προς τον σταθμό παραγωγής. Με άλλα λόγια, το νερό διοχετεύεται μέσω του αγωγού πτώσης, από τον πύργο εκτόνωσης στον σταθμό για την παραγωγή ενέργειας. Το εργοστάσιο παραγωγής βρίσκεται σε υψόμετρο 183 m, έχει κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα και απαρτίζεται από:

- ✓ Μια μονάδα, η οποία περιλαμβάνει έναν στρόβιλο τύπου Francis οριζοντίου άξονα που έχει αριθμό στροφών 1000rpm και μια σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2.8 MVA και τάσης 8.4 kV
- ✓ Μια μονάδα, η οποία περιλαμβάνει έναν στρόβιλο τύπου Pelton οριζοντίου άξονα που έχει αριθμό στροφών 500rpm και από μια σύγχρονη γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 2.0 MVA και τάσης 8.4 kV.



Εικόνα 18. Αγωγός Προσαγωγής. (Πηγή: Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010).

Αναφορικά με την εσωτερική διαρρύθμιση του κτιρίου, υπάρχει ισόγειος όροφος και υπόγειο. Στο ισόγειο συναντάμε τον χώρο συναρμογής της μονάδας, την αίθουσα ελέγχου, τους πίνακες ελέγχου, το χώρο βοηθητικών πινάκων, το μηχανουργείο, το ηλεκτρολογείο και το γραφείο του χειριστή. Στο υπόγειο, από την άλλη, υπάρχει ο χώρος συσσωρευτών.



Εικόνα 19. Εσωτερική άποψη σταθμού. Στα δεξιά της φωτογραφίας ο πίνακας ελέγχου και στο βάθος ο στρόβιλος Pelton. (Πηγή: Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., Μελέτης και Περιγραφή του ΜΥΗΣ Γλαύκου, Πτυχιακή Εργασία Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., 2010)

2.9 Η ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.

Μείζονος σημασίας κεφάλαιο για το έργο, αποτελεί ο έλεγχος της λειτουργίας των μονάδων που έχει γίνει πλήρως αυτοματοποιημένος και υλοποιείται μέσω ενός ηλεκτρονικού ρυθμιστή που υπάρχει στην αίθουσα ελέγχου.

Είναι σημαντικό ότι όλες οι εντολές έναρξης και παύσης και οι ρυθμίσεις ενεργού και αέργου ισχύος της μονάδας, γίνονται από τον χειριστή του ΜΥΗΣ Γλαύκου. Η κεντρική μονάδα ελέγχου συντονίζει την ισχύ της μονάδας, την προστασία της γεννήτριας και την τροφοδότηση των βοηθητικών συστημάτων της μονάδας. Αξίζει να αναφερθεί ότι, η μονάδα αποτελείται από όργανα, λυχνίες, διακόπτες και κομβία πίεσης, που στοχεύουν στην εποπτεία και τον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδας.

Αναλυτικά τα όργανα του πίνακα ελέγχου του υδροηλεκτρικού σταθμού Γλαύκου είναι τα ακόλουθα:

1. Βολτόμετρο με επιλογικό διακόπτη,
2. Αμπερόμετρα,
3. Ενδεικτικό όργανο συχνότητας,

4. Ενδεικτικό όργανο ταχύτητας περιστροφής,
5. Ενδεικτικό όργανο ενεργού ισχύος,
6. Ενδεικτικό όργανο αέργου ισχύος,
7. Ενδεικτικό όργανο συντελεστή ισχύος,
8. Ενδεικτικό όργανο καταγραφής ωρών λειτουργίας,
9. Ενδεικτικά όργανα ποσοστού ανοίγματος ρυθμιστικών πτερυγίων &
10. Ενδεικτικό όργανο ανάντη στάθμης φράγματος.

Για να εξασφαλισθεί η λειτουργία της μονάδας, έχουν εγκατασταθεί οι εξής Ηλεκτρονόμοι Προστασίας (H/N):

1. H/N υπό τάσης,
2. H/N υπερέντασης και βραχυκυκλώματος ,
3. H/N αντιστρόφου ροής ισχύος ,
4. H/N ελέγχου διέγερσης γεννήτριας ,
5. H/N ύπαρξης τάσης δικτύου,
6. H/N υπερθέρμανσης τυλιγμάτων στάτη και εδράνων,
7. H/N διαρροής στάτη προς γη,
8. H/N Boucholz Μετασχηματιστή ανύψωσης &
9. H/N ουδετέρου Μετασχηματιστή ανύψωσης.

Σημαντική κρίνεται και η λειτουργία του ηλεκτρονικού σταθμήμετρου ΜΥΗΣ που έχει εγκατασταθεί στον εξαμμοτή της υδροληψίας, το αισθητήριο του οποίου έχει τοποθετηθεί μέσα σε σωλήνα από ανοξείδωτο χάλυβα, φέροντας αλεξικέραυνα για την προστασία του από υπερτάσεις. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σταθμήμετρου είναι τα παρακάτω:

- 1 Ακρίβεια μέτρησης,
- 2 Βαθμός προστασίας
- 3 Έξοδος.



Εικόνα 20. Πίνακας Ελέγχου ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)



Εικόνα 21 Παλιός Πίνακας Ελέγχου ΜΥΗΣ Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

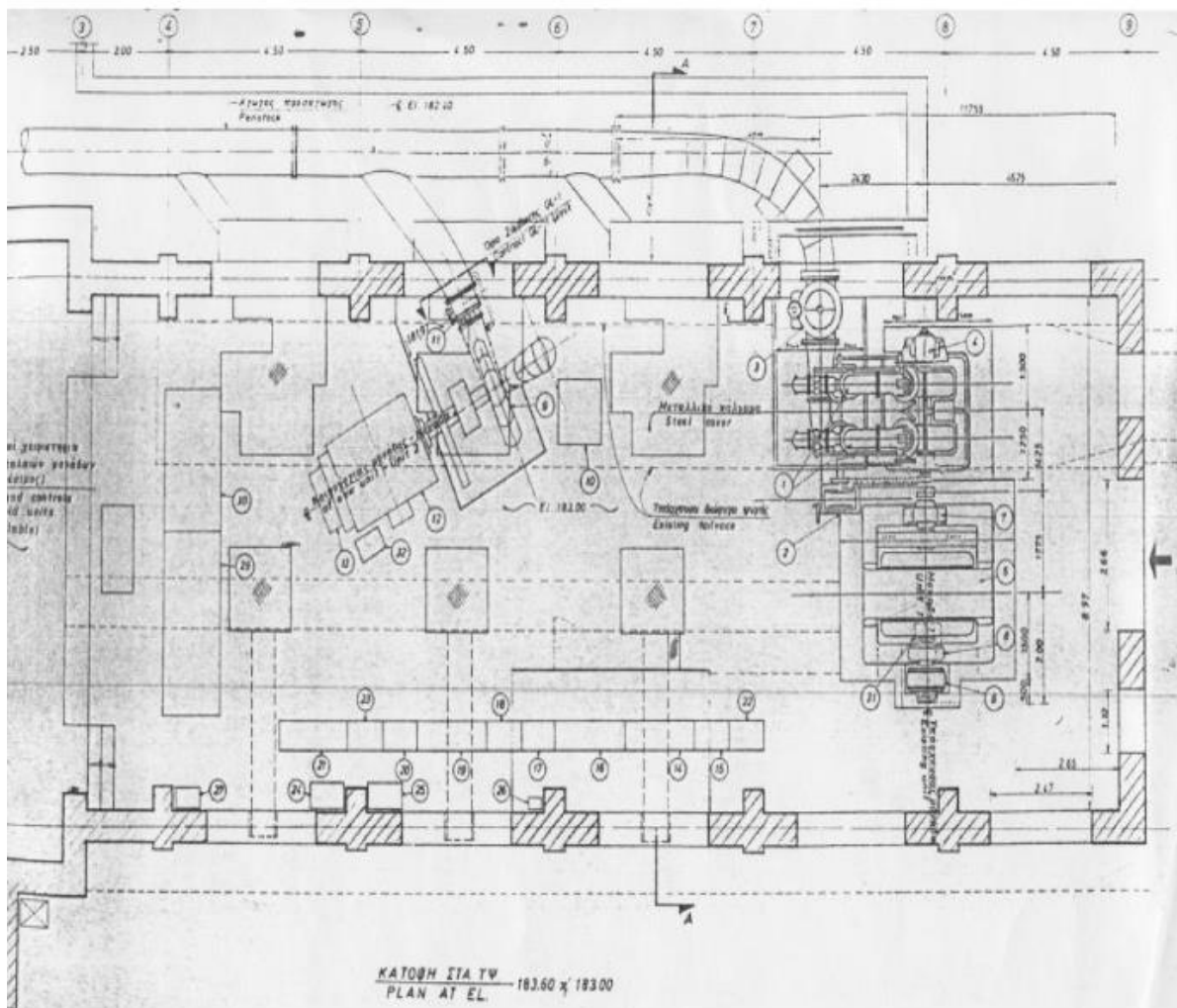
2.10 ΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ.

Οι υδροστρόβιλοι ανήκουν στα πεδία μελέτης που συγκεντρώνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους μηχανολόγους, γιατί η λειτουργία τους έχει να κάνει με την μετατροπή της μηχανική Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

ενέργειας, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αναλυτικά, το Μ.Υ.Η.Ε Γλαύκου απαρτίζεται από τις παρακάτω μονάδες:

1. Δύο στροβίλους PELTON ισχύος 1.4 MW &
2. Έναν στρόβιλο FRANCIS ισχύος 2.29 MW.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η συνολική μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι 3.7 GWH. Όταν το νερό εξέλθει από τον στρόβιλο μέσω του αγωγού φυγής, ένα μέρος του πηγαίνει στα διυλιστήρια της ΔΕΥΑΠ και το υπόλοιπο χρησιμοποιείται για τις αρδευτικές ανάγκες της αγροτικής περιοχής των Πατρών. [Γεωργίτσης Α. & Σίννης Α., 2010].



Εικόνα 22. Σχέδιο κατόψεως του χώρου εγκατάστασης των υδροστροβίλων Francis και Pelton στον Υ.Η.Σ. Γλαύκου (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)



Εικόνα 23. Υδροστρόβιλος Pelton (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)



Εικόνα 24 .Γεννήτρια Pelton (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)



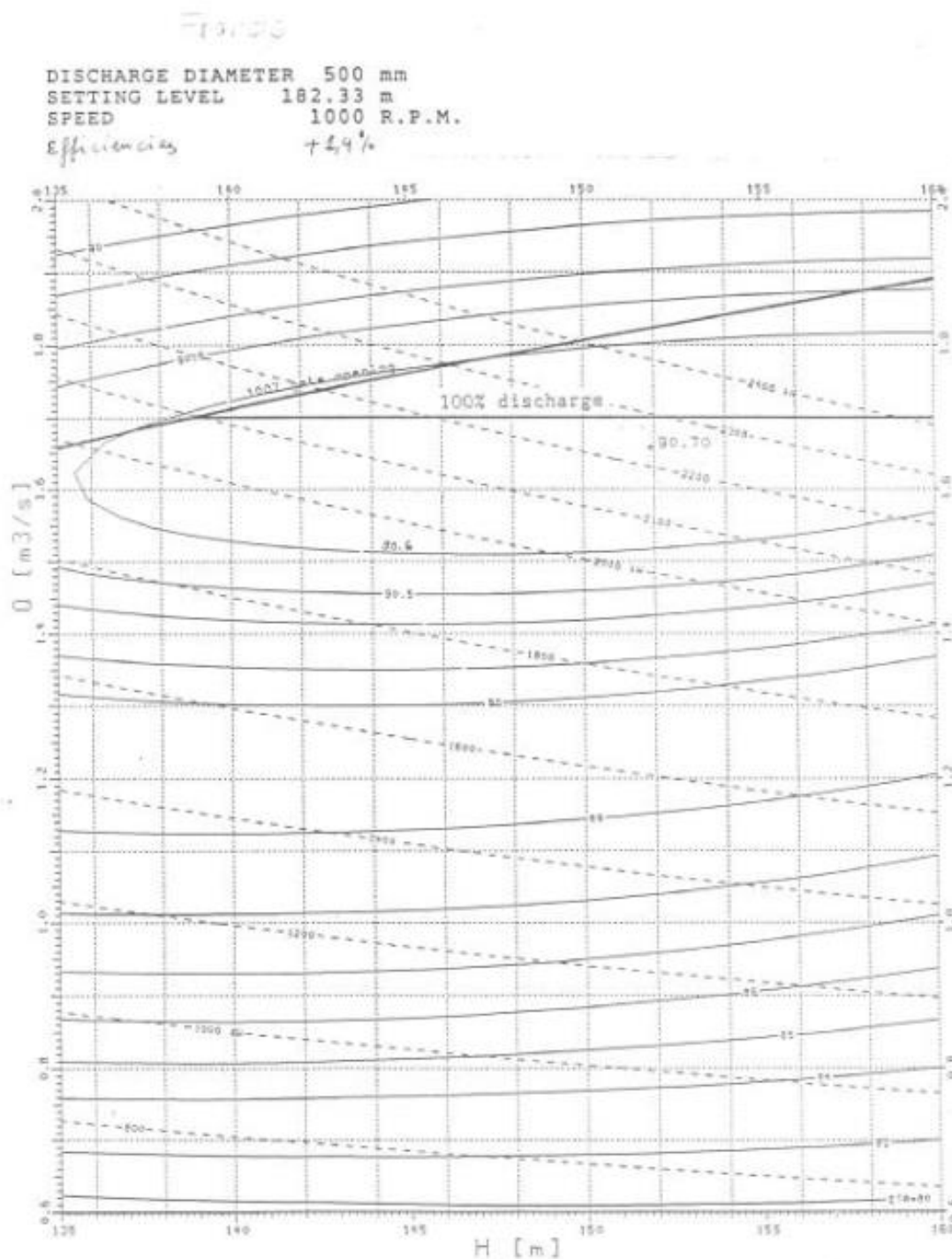
Εικόνα 25. Υδροστρόβιλος Francis και Γεννήτρια (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

Τέλος, παρουσιάζεται η μακέτα που αναπαριστά το ΜΥΗΣ του Γλαυκού:



Εικόνα 26. Μακέτα εγκατάστασης ΜΗΥΣ (Πηγή: Ευαγγελάτος, 2016)

GLAFKOS - HILL CHART



SULZER ESCHER WYSS, H841 9.12.91 *del* 1 070 906

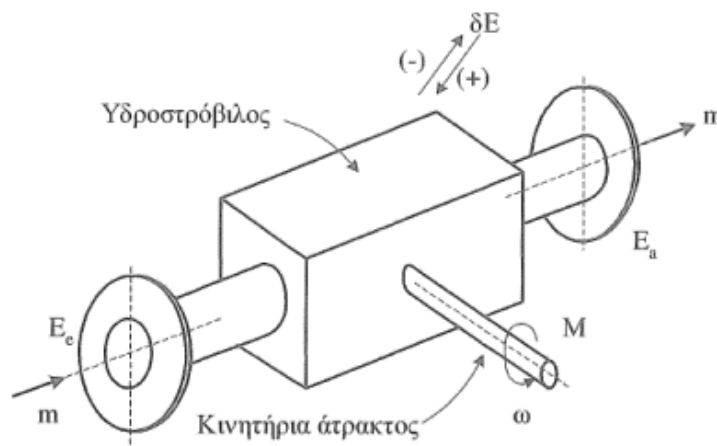
Εικόνα 29. Διάγραμμα $Q=f(H)$ του υδροστροβίλου Francis στον ΥΗΣ Γλαύκον (Ευαγγελάτος, 2016)

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ.

3.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ.

Οι υδροστρόβιλοι περιγράφονται ως μηχανές, οι οποίες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ενέργεια του ρευστού ή το αντίστροφα, μέσω της συνεχούς ροής του ρευστού και της μη μεταβαλλόμενης περιστροφικής κίνησης, η οποία είναι υπεύθυνη για την μεταφορά της μηχανικής ενέργειας, δηλαδή της στρεπτικής ροπής, η οποία αναπτύσσεται σε άτρακτο στρεφόμενη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα.

Στο σκαρίφημα παριστάνεται σχηματικά ένας υδροστρόβιλος, όπου με e συμβολίζεται η συμβατική διατομή εισόδου της διερχόμενης παροχής μάζας του ρευστού στη μηχανή και με a η συμβατική διατομή εξόδου της διερχόμενης παροχής μάζας του ρευστού. Από τον υδροστρόβιλο εξέρχεται η άτρακτος, η οποία συνδέεται με τη μηχανή που απορροφά την ισχύ, δηλαδή την ηλεκτρική γεννήτρια.



Εικόνα 30. Σχηματική αναπαράσταση υδροστρόβιλου. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009)

Αναλύοντας το μοντέλο, υποθέτουμε ότι οι διαρροές ρευστού είναι μηδενικές προς τον εξωτερικό χώρο και άρα μεταξύ των διατομών e και a ισχύει η αρχή της συνέχειας. Θεωρούμε ότι η λειτουργία της μηχανής γίνεται σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή με σταθερή παροχή ρευστού και με σταθερή γωνιακή ταχύτητα της άτρακτου. Στην άτρακτο που στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , αναπτύσσεται μηχανική ροπή M .

Επομένως, η πραγματική μηχανική ισχύς στην άτρακτο είναι ίση προς:

$$N = M \cdot \omega \quad (3.1)$$

Η ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού που μπορεί να εναλλαχθεί σε μηχανική ενέργεια συμβολίζεται με E_{th} και είναι ίση με:

$$E_{th} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.2)$$

όπου στην οποία εξίσωση με v συμβολίζεται το μέτρο της ταχύτητας του εξεταζόμενου στοιχείου του ρευστού, με p η στατική του πίεση, ρ η πυκνότητα, z το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία αυθαίρετη στάθμη αναφοράς και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Συνεχίζοντας συμβολίζουμε με E_e και E_a την ομοιόμορφη ανά μονάδα μάζας ενέργεια του ρευστού στις διατομές εισόδου e και εξόδου a αντίστοιχα και έτσι προκύπτει ότι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εναλλάσσεται σε μηχανική ενέργεια, η οποία ορίζεται ως θεωρητική ισχύς N_{th} , θα είναι ίση προς:

$$N_{th} = \dot{m} (E_e - E_a) \quad (3.3)$$

Η εναλλαγή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω κατάλληλου διαμορφωμένου δρομέα. Η πραγματική ισχύς που αναπτύσσεται στην άτρακτο είναι ίση προς N και είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική ισχύ N_{th} , λόγω της ύπαρξης ενεργειακών απωλειών που παρατηρούνται στην ίδια τη μηχανή. Οι ενεργειακές αυτές απώλειες, υφίστανται εξαιτίας των απωλειών τριβών που οφείλονται τόσο στη ροή διαμέσου της στροβιλομηχανής, όσο και στις απώλειες τριβής των εδράνων της ατράκτου. Έτσι, υπολογίζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης η του στροβίλου ως εξής:

$$\eta = \frac{N}{N_{th}} \quad (3.4)$$

και ο οποίος δείχνει το ποσοστό της ενέργειας που δεσμεύεται από το ρευστό και μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ, στην άτρακτο του στροβίλου. Σημειώνεται ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης παίρνει τιμές από $0 < \eta < 1$.

Στις υδροδυναμικές μηχανές, η ολική ενέργεια και πίεση εκφράζονται μέσω της αντίστοιχης τιμής τους σε μέτρα στήλης ύδατος [mΣΥ], ως εξής:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{p}{\gamma}, \quad (3.5)$$

οπότε προκύπτει:

$$E_e - E_a = g(H_{t,e} - H_{t,a}), \quad (3.6)$$

όπου H_t το ολικό ύψος, δηλαδή η ολική πίεση εκφρασμένη σε [mΣΥ].

Για τους υδροστροβίλους εάν υπάρχει ροή ασυμπίεστου ρευστού (ρ =σταθερό), η σταθερή παροχή μάζας $\dot{m}$ μπορεί να αντικατασταθεί από την επίσης σταθερή αντίστοιχη τιμή της παροχής όγκου Q , μέσω της σχέσης:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = g \cdot \frac{\dot{m}}{\gamma} \quad (3.7)$$

Συνεπώς με δεδομένη την παροχή όγκου Q και εκφράζοντας την ολική ενέργεια του υγρού ανά μονάδα μάζας μέσω των αντίστοιχων τιμών του ολικού ύψους H , διατυπώνεται η παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$N_{th} = Q \cdot \rho \cdot g (H_{t,e} - H_{t,a}) = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_{us}, \quad (3.8)$$

όπου με H_{us} συμβολίζεται το ωφέλιμο ολικό ύψος που δηλώνει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που έχει διαθέσιμη ο υδροστροβίλος για να την μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί, ότι εξαιτίας των απωλειών σε τριβές και στροβιλισμούς στο εσωτερικό της μηχανής μέρος του H_{us} , απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με την μορφή θερμότητας. [Χαλακατεβάκη Μ., 2020].

3.2. ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ – ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ.

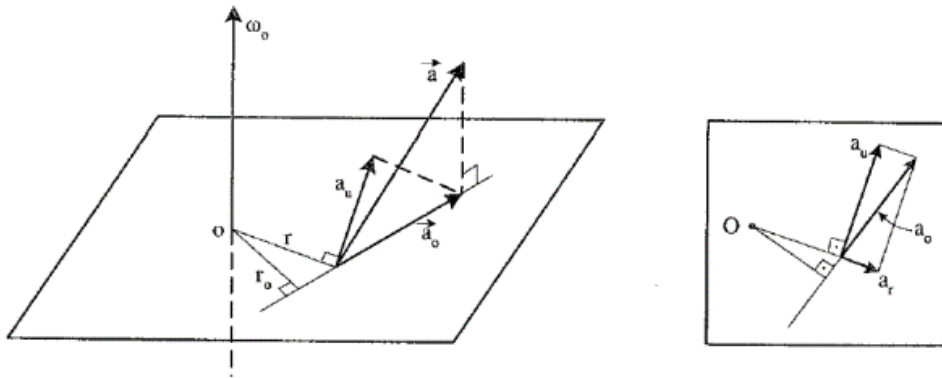
Το θεώρημα της ροπής της ορμής, στηρίζεται στην επιβολή της ισορροπίας των ροπών των δυνάμεων και της συστροφής ως προς άξονα. Η σκοπιμότητα του θεωρήματος της συστροφής αφορά στο ότι μέσω αυτού υπολογίζεται η ροπή, που αναπτύσσεται στο εξεταζόμενο σώμα, στην περίπτωση των υδροστροβίλων στην περωτή, χωρίς να είναι απαραίτητα γνωστή η ροή στο εσωτερικό της περωτής σημείο προς σημείο. Από το θεώρημα αυτό, μπορούμε να εξαγάγουμε μεγάλης σημασίας συμπεράσματα σχετικά με το πως μπορούμε να διαμορφώσουμε την περωτή, για να αναπτύσσεται η επιθυμητή τιμή της ροπής και να πραγματοποιείται η επιθυμητή εναλλαγή ενέργειας. Εφαρμόζοντας την αντίστοιχη διαδικασία σε μία δεδομένη περωτή, είναι δυνατό να υπολογισθεί η ροπή που αναπτύσσεται για δεδομένες συνθήκες εισόδου. Ο δρομέας υδροστροβίλου (περωτή) απαρτίζεται από πτερύγια, δηλαδή φέρουσες επιφάνειες, και τουλάχιστον από μία πλήμνη (δίσκος στον οποίο είναι πακτωμένα τα πτερύγια και η άτρακτος).

Καθώς το ρευστό διαρρέει μεταξύ των πτερυγίων, αποκαθίσταται στις επιφάνειες των πτερυγίων ένα πεδίο ταχυτήτων και άρα μία κατανομή στατικών πιέσεων. Η κατανομή δημιουργεί στοιχειώδεις δυνάμεις στις επιφάνειες των πτερυγίων και κατά επέκταση, ροπές ως προς τη πλήμνη και την άτρακτο. Με την ολοκλήρωση αυτών, προκύπτει η αναπτυσσόμενη ροπή, η οποία ορίζεται ως:

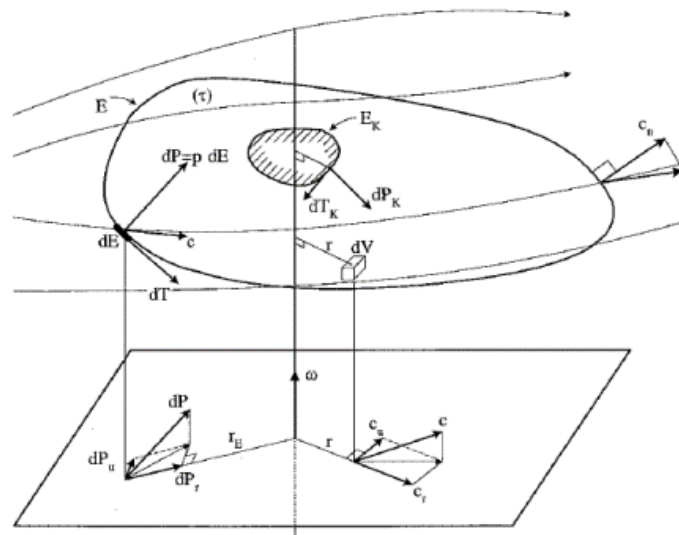
$$M_{\alpha} = (\vec{r}_a \times \vec{a}) \cdot \vec{\omega}_0, \quad (3.9)$$

όπου $\vec{r}_a$ η διανυσματική ακτίνα από σημείο, έστω το Ο, του άξονα προς τυχόν σημείο του φορέα του διανύσματος $\vec{a}$.

Στο σκαρίφημα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ροπή διανύσματος ως προς άξονα:



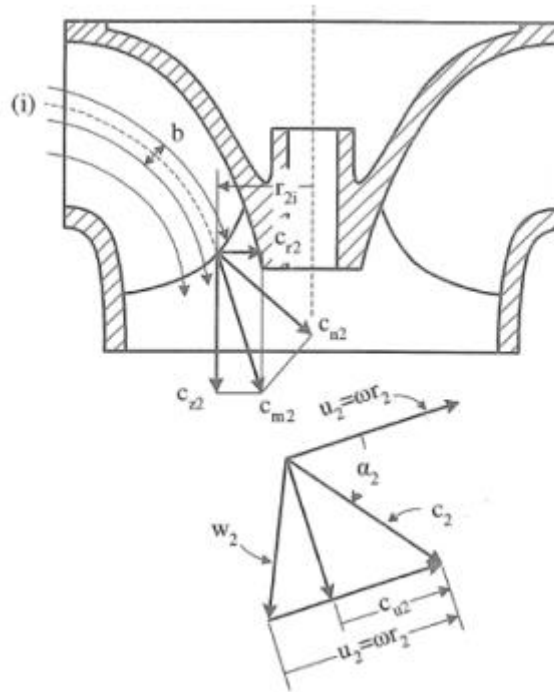
Εικόνα 31.Ροπή διανύσματος ως προς άξονα. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009) και η σχηματική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα ω₀:



Εικόνα 32. Διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα ω. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009)

3.3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΔΡΟΜΕΑ.

Ως μερική, ορίζεται μία πτερωτή της οποίας το πλάτος b είναι μικρό σε σύγκριση με την ακτίνα r , για να ισχύει η υπόθεση ότι κατά το πλάτος b οι συνθήκες της ροής δεν μεταβάλλονται. Το ίδιο θα συμβαίνει και στις διατομές εισόδου E_1 και εξόδου E_2 κάθε μερικής πτερωτής. Παρακάτω παρουσιάζεται ο μερικός δρομέας στροβίλου και οι συνιστώσες ταχυτήτων:



Εικόνα 33. Μερικός δρομέας στροβίλου και συνιστώσες ταχυτήτων. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009)

Θεωρώντας ομοιομορφία των συνθηκών της ροής στις επιφάνειες E_1 και E_2 , προκύπτει:

$$M_u = \rho_1 \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_{E1} \cdot E_1 - \rho_2 \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_{E2} \cdot E_2 \quad (3.10)$$

Από την αρχή της συνέχειας η παροχή μάζας $\dot{m}$ μέσω του δρομέα εκφράζεται ως:

$$\dot{m}_u = \rho_1 \cdot c_{n1} \cdot E_1 = \rho_2 \cdot c_{n2} \cdot E_2 \quad (3.11)$$

οπότε

$$M_u = \rho_1 \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_{E1} \cdot E_1 - \rho_2 \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_{E2} \cdot E_2 \quad (3.12)$$

και λαμβάνοντας υπόψιν ότι $u_1 = \omega \cdot r_1$ και $u_2 = \omega \cdot r_2$, η αντίστοιχη περιφερειακή ισχύς θα είναι:

$$N_u = M_u \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_{E1} - c_{u2} \cdot r_{E2}) \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad (3.13)$$

Η ροή νερού στα Υ.Η.Ε. αντιμετωπίζεται ως ροή ασυμπίεστου ρευστού, όπου

$\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{σταθ.}$ και επίσης η παροχή μάζας εκφράζεται μέσω της αντίστοιχης παροχής όγκου

$$Q_u = \frac{\dot{m}_u}{\rho}. \quad (3.14)$$

Η περιφερειακή ισχύς N_u εκφράζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_u = \gamma \cdot Q_u \cdot H_u \quad (3.15)$$

όπου γ το ειδικό βάρος, Q_u η διερχόμενη παροχή όγκου και H_u το θεωρητικό ύψος του δρομέα.

Το θεωρητικό ύψος H_u συνδέεται με μεταβολή της ολικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από το δρομέα μέσω της εξίσωσης: $H_u = H_{u,1} - H_{u,2} - \delta h_{f,u}$ στην οποία με $\delta h_{f,u}$ συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες λόγω τριβής από τη διατομή εισόδου 1 μέχρι τη διατομή εξόδου 2 του δρομέα. Η ενέργεια που αντιστοιχεί στις υδραυλικές απώλειες $\delta h_{f,u}$ μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία στην περίπτωση του ασυμπίεστου ρευστού, δεν μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις

$$N_u = \dot{M}_u \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_{E1} - c_{u2} \cdot r_{E2}) \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad \&$$

$N_u = \gamma \cdot Q_u \cdot H_u$, προκύπτει:

$$H_u = \frac{1}{g}(c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad (3.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται εξίσωση Euler και αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών. Θεωρώντας δεδομένες τις κλίσεις α_1 και α_2 των απόλυτων ταχυτήτων c_{u1} και c_{u2} αντίστοιχα και εφαρμόζοντας το νόμο των συνημιτόνων στα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και έξοδο του δρομέα, το ύψος H_u διατυπώνεται ως εξής:

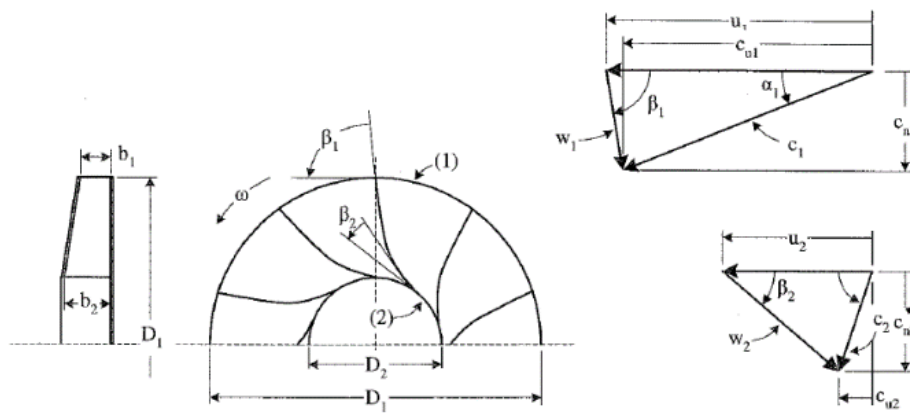
$$H_u = \frac{(c_{u1} \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_{u2} \cdot u_2 \cdot \cos \alpha_2)}{g} \quad (3.17)$$

$$H_u = \left(\frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g} \right) + \left(\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{w_1^2}{2g} - \frac{w_2^2}{2g} \right) \quad (3.18)$$

Προκύπτει από τις δύο τελευταίες εξισώσεις, ότι οι ταχύτητες έχουν κύριο ρόλο στην ανάπτυξη της ροπής και ειδικά στη διατομή εξόδου, όπου ο ίδιος ο δρομέας διαμορφώνει το μέγεθος και την κλίση των ταχυτήτων. Αξίζει να τονίσουμε σε αυτό το σημείο, τη σημαντικότητα της μορφής του δρομέα και των πτερυγίων του, όσον αφορά στον ρυθμό εναλλαγής της ενέργειας. [Χαλακατεβάκη Μ., 2020]

3.4. ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ.

Επιλέγεται να μελετήσουμε τη θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών στην περίπτωση της περωτής πλήρως ακτινικής ροής, διότι σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετά εύκολη η παράσταση των διαφόρων μεγεθών και των ταχυτήτων τόσο στην όψη, όσο και στη μεσημβρινή προβολή, χωρίς όμως να περιορίζεται η γενικότητα των παρατηρήσεων και των συμπερασμάτων. Ακόμα, λόγω του μικρού πλάτους b της περωτής σε σύγκριση με τις διαμέτρους ολόκληρη η περωτή θεωρείται ως μία μερική περωτή. Παρακάτω παρουσιάζεται ο δρομέας και τα τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου ακτινικής ροής:



Εικόνα 34. Δρομέας και τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου ακτινικής ροής. (Πηγή: Παπαντώνης, 2009).

Γίνεται η υπόθεση ότι ο δρομέας στροβίλου ακτινικής ροής στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω και τις απώλειες της ροής στο εσωτερικό του δρομέα δεν τις λαμβάνουμε υπόψη ($\delta h_{f12} = 0$). Τότε η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που μετατρέπεται στο δρομέα από ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια, δίνεται από την σχέση:

$$H_u = \frac{1}{g}(c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) = H_{t1} - H_{t2} \quad (3.19)$$

Παρατηρείται όσον αφορά στις δύο συνιστώσες της ταχύτητας, ότι η ακτινική c_{u1} , η οποία συνδέεται με την αρχή της συνέχειας, συμβάλει στη διασφάλιση της διερχόμενης παροχής, ενώ η c_{u2} αυξάνοντας τις απώλειες της ροής κατάντη του δρομέα, συντελεί στη μετατροπή της ενέργειας σε μία μορφή ανεκμετάλλευτη. Έτσι, θα πρέπει στο κανονικό σημείο λειτουργίας, το ρευστό να εξέρχεται από το δρομέα χωρίς συστροφή, δηλαδή με $c_{u2}=0$, οπότε η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$H_{u,d} = \frac{1}{g}c_{u1} \cdot u_1 \quad (3.20)$$

Η κατάλληλη τιμή της ανά μονάδα μάζας ενέργειας του υγρού η οποία μετασχηματίζεται σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή η τιμή του H_u μπορεί να πραγματοποιηθεί ή με μεγάλη τιμή της $u_1 = \omega D_{12}$ και μικρή τιμή της c_{u1} , ή αντίθετα με μικρή u_1 και μεγάλη c_{u1} . Αντιλαμβανόμαστε ότι η πρώτη λύση είναι πιο επιθυμητή, διότι αντιστοιχεί σε μικρές τιμές της απόλυτης ταχύτητας c_1 , που συνεπάγεται μικρότερες τιμές της ταχύτητας διαμέσου του δρομέα και επομένως μικρότερες απώλειες της ροής δh_{f12} . Οπότε, γίνεται κατανοητό γιατί η διατομή εισόδου στο δρομέα, στους σύγχρονους δρομείς υδροστροβίλων, είναι η εξωτερική και η ροή κατευθύνεται από την περιφέρεια προς τον άξονα περιστροφής.

3.5. ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.

Οι υδροστρόβιλοι χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα της εξεταζόμενης παραμέτρου ενδιαφέροντος. Αρχικά, διαχωρίζονται με βάση τον βαθμό αντίδρασης. Έχουμε έτσι, υδροστροβίλους δράσης και υδροστροβίλους αντίδρασης.

- ✓ **Υδροστρόβιλος δράσης**, καλείται ένας υδροστρόβιλος, όταν η στεφάνη στο εσωτερικό του μετακινείται λόγω πλήξεως του νερού. Τότε το νερό λόγω της κινητικής του ενέργειας δρα επί της στεφάνης. Σημειώνεται ότι σε αυτήν την περίπτωση η ενέργεια θλίψεως του νερού μετασχηματίζεται όλη σε κινητική. Αξίζει να δοθεί έμφαση στον μόνο τύπο υδροστρόβιλου δράσης που έχει κυριαρχήσει μέχρι σήμερα, ο οποίος είναι ο υδροστρόβιλος Pelton.
- ✓ **Υδροστρόβιλος αντίδρασης** καλείται ο υδροστρόβιλος που χαρακτηρίζεται από σταθερή διανέμουσα στεφάνη που μετατρέπει μέρος της πτώσης σε ταχύτητα. Οι υδροστρόβιλοι αυτοί είναι ολικής προσβολής, που σημαίνει ότι ολόκληρη η πτερωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, εν αντίθεση με τους υδροστρόβιλους δράσης, οι οποίοι έχουν βαθμό αντίδρασης μηδενικό, είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή ένα τμήμα της πτερωτής λαμβάνει μέρος στην ενεργειακή μετατροπή.

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης, οι οποίοι έχουν επικρατήσει και η λειτουργία τους είναι εξέχουσας σημασίας είναι οι υδροστρόβιλοι Francis, για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης και συγκεκριμένα από 50-500 m, οι υδροστρόβιλοι διαγώνιας ροής, και οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής, για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης με τιμές μικρότερες από 50 m.

Ένας δεύτερος διαχωρισμός υδροστροβίλων αφορά σε υδροστροβίλους τμηματόκλειστους σαν τον Pelton, ο οποίος απαρτίζεται από τη διάταξη προσαγωγής και από ένα δρομέα ή στρεφόμενο τροχό ή ολόκλειστους όπως είναι οι υδροστρόβιλοι Francis και Kaplan.

Τρίτος διαχωρισμός, εάν θέσουμε ως κριτήριο την καθοδήγηση του νερού, κατηγοριοποιεί τους υδροστροβίλους σε:

1. Αξονικούς,
2. Ακτινωτούς &
3. Μικτούς.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι αξονικός λέγεται ένας στρόβιλος σε περίπτωση που το νερό οδηγείται στην κινητή στεφάνη, έτσι ώστε η κυκλοφορία του να αποκτήσει κατεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του κινητήρα.

Ο υδροστρόβιλος χαρακτηρίζεται ως ακτινωτός, στην περίπτωση που δεν συμβαίνει η προσαγωγή του νερού να είναι παράλληλη με τον άξονα αλλά να έχει διεύθυνση ακτινωτή, που σημαίνει διεύθυνση κάθετη προς αυτόν. Αναφέρεται ότι στους ακτινωτούς υδροστρόβιλους, η απαγωγή του νερού από την κινητή στεφάνη μπορεί να συμβαίνει σε τυχαία κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, οι ακτινωτοί στρόβιλοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Τον κεντρομόλο &
2. Τον φυγοκεντρικό.

Αναλυτικότερα, **κεντρομόλος** καλείται ο στρόβιλος σε περίπτωση που τα μόρια του νερού που βρίσκονται σε υγρή κατάσταση κατά την εντός του κινητήρα κυκλοφορία κατευθύνονται προς τον άξονα, ενώ, όταν αυτά φεύγουν προς την αντίθετη κατεύθυνση, ο στρόβιλος καλείται φυγοκεντρικός.

Μικτός θεωρείται ένας υδροστρόβιλος, όταν η κυκλοφορία του νερού μέσα στον κινητήρα γίνεται κατά ένα μέρος παράλληλα και κατά ένα άλλο μέρος κάθετα ως προς τον άξονά του.

Εάν θέσουμε ως κριτήριο την πίεση, τέταρτος διαχωρισμός, αφορά σε:

1. Υδροστροβίλους υψηλής πίεσης,
2. Υδροστροβίλους μέσης πίεσης &
3. Υδροστροβίλους χαμηλής πίεσης.

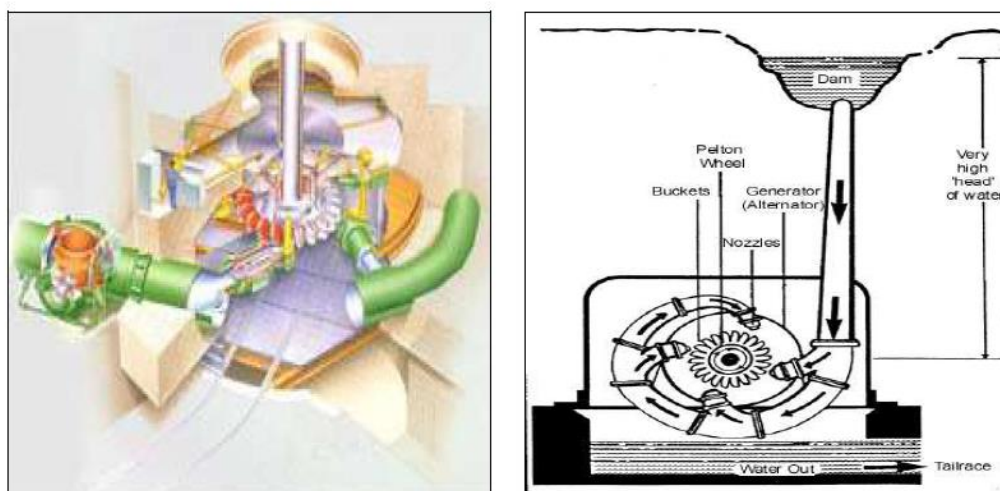
[Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ. & Μαμάσης Ν. (2018),]

3.6. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟΣ PELTON.

Ο υδροστρόβιλος Pelton είναι υδροστρόβιλος δράσεως, του οποίου το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας με σκοπό την μετατροπής της κινητικής ενέργειας του νερού σε μηχανική ενέργεια, μέσω της ροπής στρέψεως. Έχει μια από τις μεγαλύτερες αποδόσεις, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τουρμπίνες νερού και περιστρέφεται σε υψηλό αριθμό στροφών, οι οποίες αποδίδουν έργο που αγγίζει έως και το 90%. Η χρήση του υδροστρόβιλου Pelton γίνεται κατά κύριο λόγο σε μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες, που χαρακτηρίζονται από μεγάλα ύψη και μικρές ποσότητες νερού.

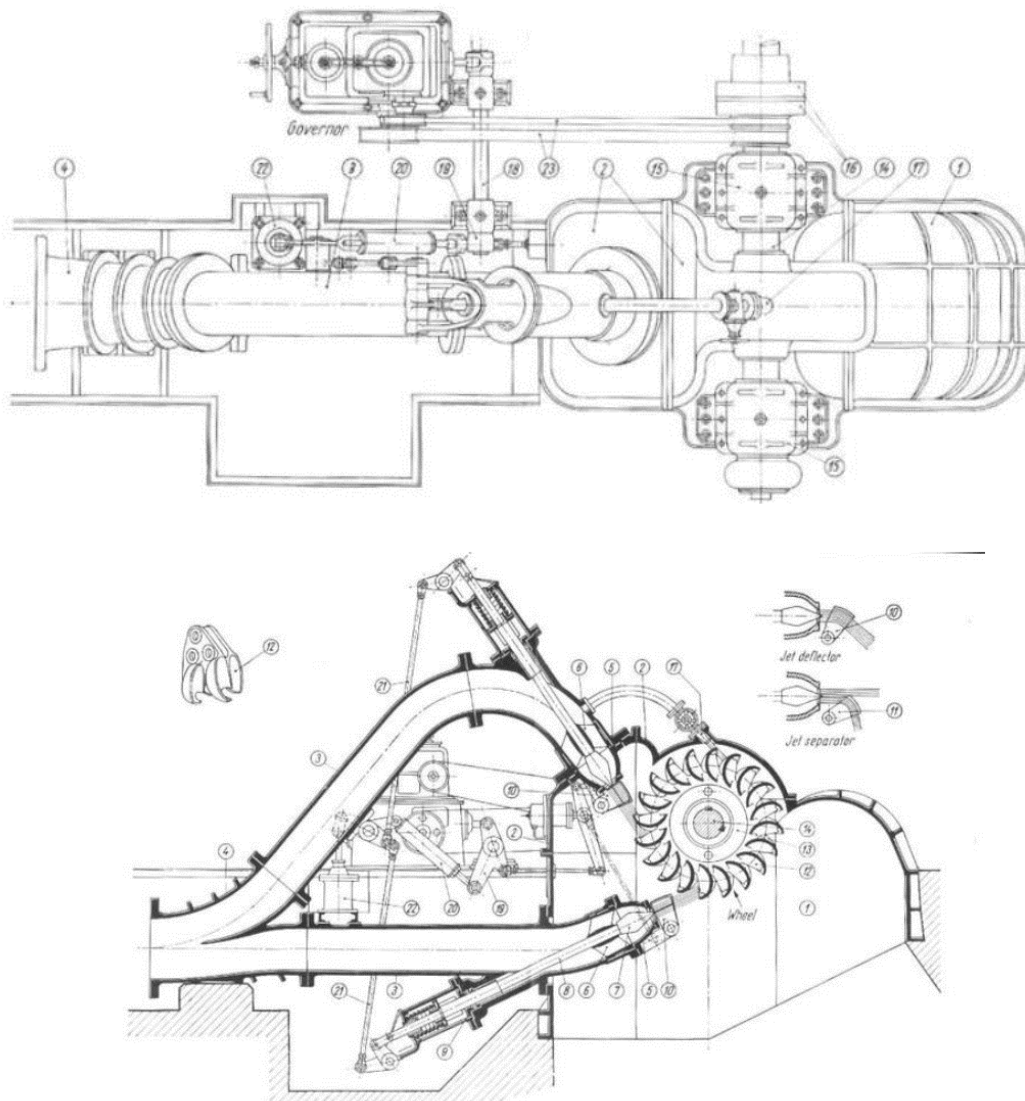
Υπενθυμίζεται ότι ο δρομέας, ένα κινούμενο τμήμα πάνω στο οποίο εδράζεται η περύγωση, το σύστημα προσαγωγής και απαγωγής του νερού και ο μηχανισμός αυτόματης ρύθμισης της ροής του νερού, είναι τα μέρη που απαρτίζουν τον υδροστρόβιλο. Αναλυτικότερα, στον Pelton ένα ακροφύσιο, συνήθως και περισσότερα, εκρέουν νερό με την μορφή δέσμης που έχει υψηλή ταχύτητα και προσπίπτει στα περύγια του στροφείου, με στόχο την μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική. Είναι σημαντικό ότι, κάθε δέσμη πέφτει στην περωτή, ωθώντας την στην περιφερειακή διεύθυνση, αποκτώντας κινητήρια ροπή. Ο άξονας της περωτής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος.

Εάν οι δέσμες είναι περισσότερες από μία, γεγονός που ισχύει συνήθως στον Pelton, επιλέγεται η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, έτσι ώστε όλα τα ακροφύσια να μην βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και να μην εμποδίζεται η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδίων.

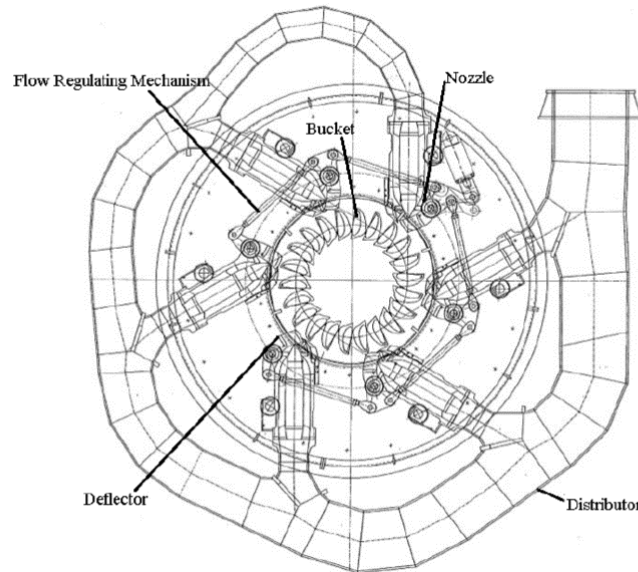


Εικόνα 35. Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton. (Πηγή: Σούλης, 2004)

Σημειώνεται ότι, τα σκαφίδια είναι από ανοξείδωτο χάλυβα, για να αντέχουν τις υψηλές δυνάμεις και τη διάβρωση που υφίστανται. Ακόμα, το πλήθος των σκαφιδίων επηρεάζεται από την γεωμετρία αυτών και από τις δέσμες του νερού, ωστόσο σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 20 με 26. Τέλος, στην κατακόρυφη διάταξη, το ωστικό έδρανο παραλαμβάνει το βάρος της γεννήτριας και του στροφείου της γεννήτριας. Ακολουθεί η παρουσίαση των όψεων του υδροστροβίλου Pelton και του στροφείου (Σούλης, 2004).

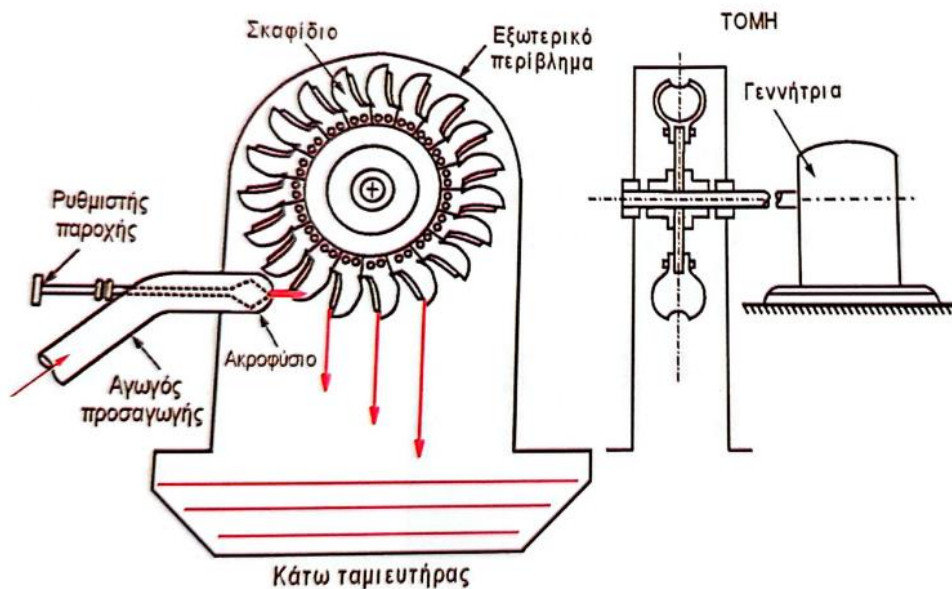


Εικόνα 36. Σκαριφήματα Υδροστροβίλου Pelton. (Πηγή: Petley, 2018)



Εικόνα 37. Διαμόρφωση υδροστροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια (Πηγή: <http://www.bflhydro.com>, 2021)

Στη συνέχεια παρατίθεται σκαρίφημα που δείχνει υδροηλεκτρικό εργοστάσιο με ΥΣ Pelton.
[Πολυζάκης Απ., (2019):



Εικόνα 38. Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο με υδροστρόβιλο Pelton. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Ανάλυση ταχυτήτων

Από 2^ο Νόμο Newton

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{V}) \rightarrow \vec{F} = \dot{m}\vec{V} + \vec{V}$$

Από τον ορισμό της ορμής: $\vec{J} = \dot{m}\vec{V}$

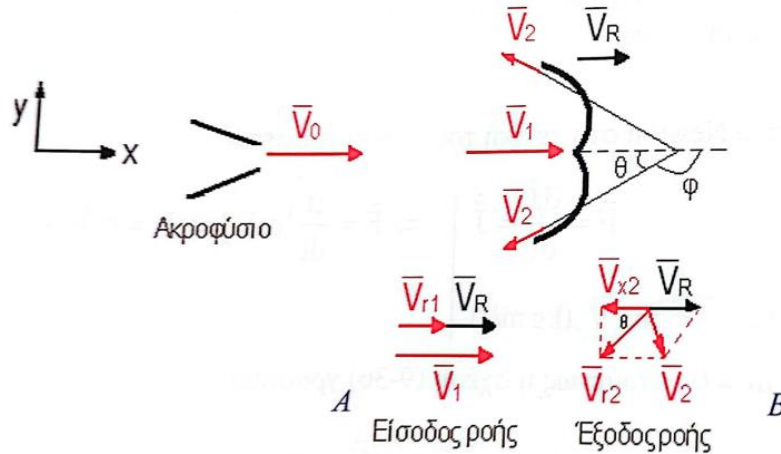
Για στερεά ισχύει $\dot{m} = 0$, άρα $\vec{F} = \dot{m}\vec{V}$

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

Για υγρά, $\vec{V} = 0$, άρα $\vec{F} = m\vec{V}$

Από το παρακάτω σχήμα προκύπτει ότι, αν το νερό προσκρούσει στο σκαφίδιο με απόλυτη ταχύτητα $\vec{V}_1$ και η ταχύτητα της σκάφης είναι $\vec{V}_R$, τότε η σχετική ταχύτητα του νερού ως προς το σκαφίδιο είναι:

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_R + \vec{V}_{r,1} \quad , \text{ οπότε } [\vec{V}_{r,1}] = [\vec{V}_1] - [\vec{V}_R]$$



Εικόνα 39. Ταχύτητες του jet: A. Είσοδος & B. Έξοδος. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Αντίστοιχα, από το σχήμα προκύπτει:

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_R + \vec{V}_{r,2} \quad , \text{ οπότε } [\vec{V}_{r,2}] = [\vec{V}_2] - [\vec{V}_R] \quad ,$$

Όπου, $\vec{V}_1$, η απόλυτη ταχύτητα του jet λίγο πριν προσκρούσει στο διαχωριστικό του σκαφιδίου.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με την V_0 , η οποία θεωρείται η ταχύτητα εξόδου του jet από το ακροφύσιο,

$\vec{V}_2$, η απόλυτη ταχύτητα του νερού όταν φεύγει από το ακροφύσιο,

$\vec{V}_R$, η απόλυτη ταχύτητα του σκαφιδίου, δηλαδή του στροφείου,

$\vec{V}_{r,1}$, η σχετική ταχύτητα του νερού όταν προσκρούει στο σκαφίδιο,

$\vec{V}_{r,2}$, η σχετική ταχύτητα του νερού όταν «αφήνει» το σκαφίδιο,

θ , οξεία γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση της $\vec{V}_{r,2}$ με τη διεύθυνση της $\vec{V}_1$.

ϕ , η παραπληρωματική γωνία της θ . Ισχύει $\cos\phi = \cos(180-\theta) = -\cos\theta$.

Η δύναμη που ασκείται στο νερό από σκαφίδιο κατά τον x-axis:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{F_{\sigma x \rightarrow v}} &= \dot{m} \overrightarrow{V_{\sigma x \rightarrow v}} = \dot{m}(\overrightarrow{V_{x2}} - \overrightarrow{V_{r,1}}) \rightarrow \overrightarrow{F_{v \rightarrow \sigma x}} = \dot{m}(\overrightarrow{V_{r,1}} - \overrightarrow{V_{x2}}) = \\ &= \dot{m}([\overrightarrow{V_{r,1}}] + [\overrightarrow{V_{x2}}]) = \dot{m}([\overrightarrow{V_{r,1}}] + [\overrightarrow{V_{r,2}}]\cos\theta) \\ &= \dot{m}([\overrightarrow{V_{r,1}}] + k[\overrightarrow{V_{r,1}}]\cos\theta) = \dot{m}([\overrightarrow{V_{r,1}}](1 + k\cos\theta)) = \dot{m}(\overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_R})(1 + k\cos\theta)\end{aligned}$$

$$\text{Άρα, } \overrightarrow{F_{\sigma x \rightarrow v}} = \vec{F}$$

τότε η δύναμη που ασκεί το jet του νερού στο σακφίδιο προκύπτει

$$\vec{F} = \dot{m}(\overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_R})(1 + k\cos\theta)$$

Μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση της παροχής

$$\vec{F} = \dot{V}\rho(\overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_R})(1 + k\cos\theta)$$

Η δύναμη $\vec{F}$ προκαλεί ροπή $\vec{M}$ στο στροφέιο του υδροστροβίλου ίση με $M = \vec{F}R$

Οπότε, $\vec{M} = \dot{m}R(\overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_R})(1 + k\cos\theta)$ και εν συνεχεία

$$\vec{M} = \dot{V}\rho R(\overrightarrow{V_1} - \overrightarrow{V_R})(1 + k\cos\theta), \text{ όπου } R, \text{ η μέση ακτίνα του στροφείου.}$$

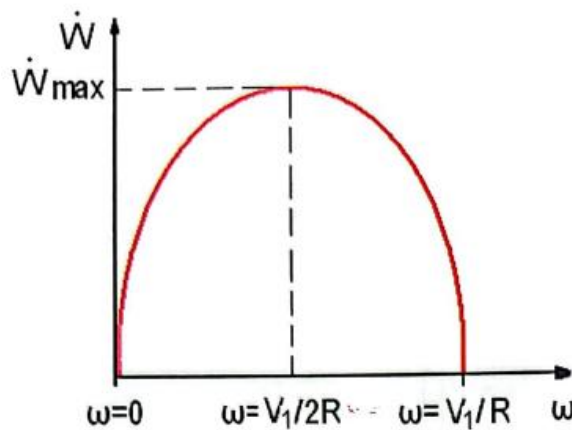
Σημαντικό υπολογισμός είναι και αυτός της διαθέσιμης ισχύος που δίνεται από την σχέση

$\rightarrow \dot{W} = M\omega$ και έπειτα προκύπτουν:

$$\dot{W} = \dot{m}R\omega(\overrightarrow{V_1} - \omega R)(1 + k\cos\theta),$$

$$\text{ισοδύναμα } \dot{W} = \dot{V}\rho R\omega(\overrightarrow{V_1} - \omega R)(1 + k\cos\theta)$$

Η γραφική παράσταση των δύο παραπάνω σχέσεων αποτυπώνεται ως παρακάτω:



Εικόνα 40. Γραφική παράσταση της $\dot{W} = f(\omega)$. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Σημειώνεται ότι η διαθέσιμη ισχύς μηδενίζεται για τιμές γωνιακής ταχύτητας $\omega=0$ και για $\omega=\frac{\overrightarrow{V_1}}{R}$

Αντίστοιχα γίνεται μέγιστη για: $\frac{d\dot{W}}{d\omega} = 0 \rightarrow \omega = \frac{\overrightarrow{V_1}}{2R}$.

Επίσης, για εξιδανικευμένες συνθήκες θα έχουμε μέγιστη ισχύ, όταν η ταχύτητα του πτερυγίου είναι η μισή της αρχικής ταχύτητας του jet, δηλαδή: $\overrightarrow{V_R} = \frac{1}{2} \overrightarrow{V_1}$

Σε τέτοιες συνθήκες, η ταχύτητα του εξερχόμενου νερού από το σκαφίδιο θα είναι ίση με το μηδέν και όλη η κινητική ενέργεια του jet θα έχει δαπανηθεί για την καθοδήγηση των πτερυγίων. Οπότε, εάν εφαρμόσουμε την εξίσωση Bernoulli μεταξύ του εισερχόμενου και εξερχόμενου jet νερού, θεωρώντας αμελητέο το ύψος και την κινητική ενέργεια του στην έξοδο, εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι το ύψος του στροβίλου είναι:

$$h_t = \frac{\vec{V}_1^2}{2g}$$

Άρα, η ισχύς που δημιουργείται είναι: $\dot{W} = Q\gamma h_t$,

όπου Q η παροχή του εισερχόμενου jet και γ το ειδικό βάρος του νερού του jet.

Μπορούμε να εκφράσουμε την ισχύ που δημιουργείται ως εξής:

$$\dot{W} = Q\rho \frac{\vec{V}_1^2}{2g}, \text{ όπου}$$

$\vec{V}_1 = \vec{V}_{jet}$ είναι η ταχύτητα του υγρού του jet.

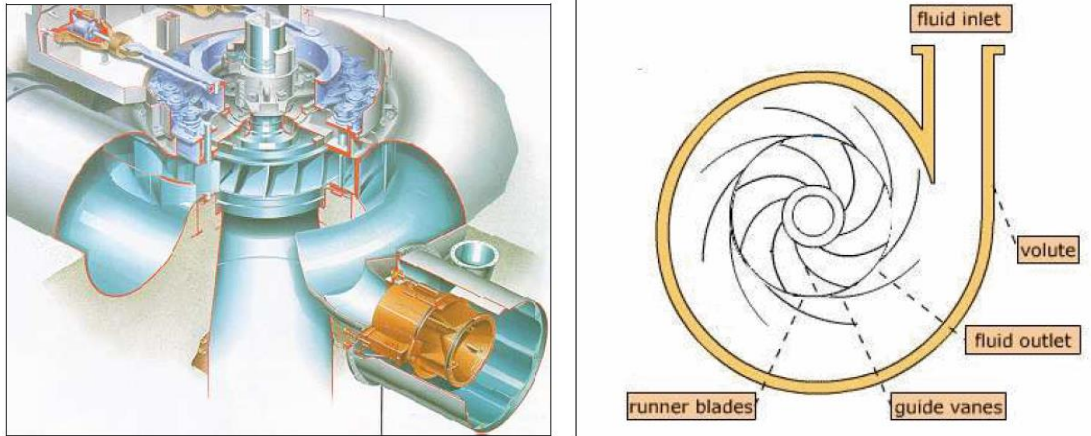
3.7. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ FRANCIS.

Στον υδροστρόβιλο Francis, που είναι υδροστρόβιλος αντίδρασης, η ροή διαμέσου της πτερωτής συμβαίνει με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης, γεγονός που δικαιολογεί γιατί οι πτερωτές είναι ολικής προσβολής, που σημαίνει ότι κατά την περιφερειακή τους διεύθυνση λειτουργούν ομοιόμορφα. Ο στρόβιλος Francis έχει πολλές εφαρμογές στα μεσαία γεωδαιτικά ύψη και είναι αντιπροσωπευτικό δείγμα μηχανής ημιαξονικής ροής. Εδώ σημειώνεται, ότι με την αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της ακίνητης πτερωτής, ρυθμίζεται η παροχή του στροβίλου και κατ' επέκταση ο ίδιος ο στρόβιλος. Ο στρόβιλος μπορεί να περιστρέφεται σε υψηλές στροφές, καθώς είναι εγκατεστημένος μέσα στο νερό, δεσμεύοντας πολύ λίγο χώρο. Επίσης, ο άξονας περιστροφής είναι συνήθως κατακόρυφος, ωστόσο σε μικρές μηχανές δεν αποκλείεται να είναι και ο οριζόντιος. Η ομοιόμορφη κατανομή της ροής στον υδροστρόβιλο οφείλεται στο σπειροειδές κέλυφος. Επιπροσθέτως, το σπειροειδές κέλυφος έχει εγκάρσιες τομές που είναι κυκλικής διατομής, όπου το εμβαδόν μειώνεται κατά τη κατεύθυνση ροής, με αποτέλεσμα να διαμορφώνονται ομοιόμορφες συνθήκες ροής και παράλληλα ομοιόμορφη τροφοδοσία στροφείου. Σημειώνεται ότι η κατασκευή του σπειροειδούς κελύφους, γίνεται από συγκολλητικά χαλυβδοελάσματα και περικλείεται ολικώς ή μερικώς από οπλισμένα σκυρόδεμα, εάν τα ύψη πτώσεως είναι επάνω από 25-30mΣΥ.

Στον υδροστροβίλο Francis, το νερό διαρρέει πρώτα από σταθερά κατευθυντήρια πτερύγια που εδράζονται στο δακτύλιο του κελύφους και είναι ακτινικά προσανατολισμένα από την περιφέρεια προς κέντρο. Τα πτερύγια είναι τοποθετημένα περιμετρικά σε μια στεφάνη που συντελεί στην ενίσχυση της μηχανικής αντοχής και στη στιβαρότητα του σπειροειδούς κελύφους, που είναι το πιο ογκώδες τμήμα της μηχανής και υποβάλλεται στη μεγαλύτερη, από όλα τα υπόλοιπα, στατική πίεση. Το νερό ρέει μέσα από μια διάταξη ρυθμιστικών πτερυγίων, που είναι τοποθετημένα μεταξύ της στεφάνης των οδηγητικών πτερυγίων και της διατομής εισόδου του στροφείου. Εν τέλει η τιμή της συστροφής, ισοδυναμεί με την απόλυτη ταχύτητα στην είσοδο του στροφείου και καθορίζεται από τα ρυθμιστικά πτερύγια. Άρα, τα ρυθμιστικά πτερύγια μπορούν να χαρακτηριστούν ως μια διάταξη που καθορίζει το σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Όσο αυξάνεται σε μέγεθος ο υδροστροβίλος, αυξάνεται και ο αριθμός των ρυθμιστικών πτερυγίων. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο μεγάλος είναι ο υδροστροβίλος, τόσο πιο μικρό μήκος έχει η χορδή του, προκαλώντας την μείωση των δυνάμεων και των ροπών που δημιουργούνται και τη μείωση του ακτινικού διάκενου ανάμεσα στην ακτίνα της στεφάνης R_v και της εξωτερικής ακτίνας του στροφείου R . Σημειώνουμε την προσεγγιστική σχέση που εκφράζει τον αριθμό των ρυθμιστικών πτερυγίων n και είναι πολλαπλάσιο του 2 ή του 4.

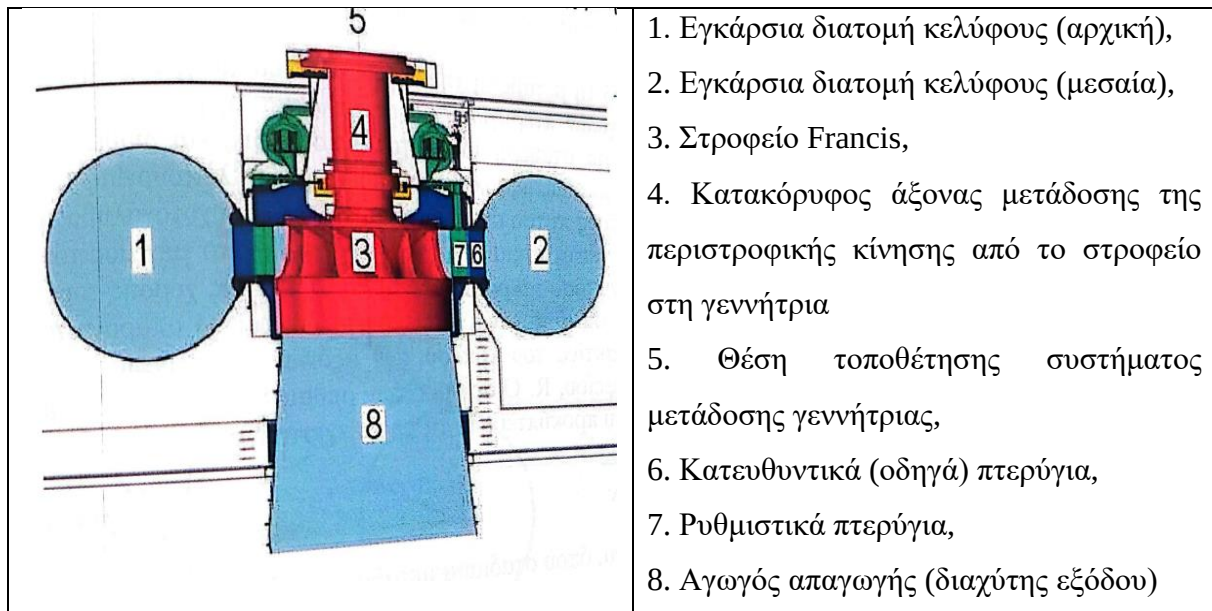
$$n \approx 17^3 \sqrt{R_v}$$

Σε τελικό επίπεδο, το νερό προσκρούει στα πτερύγια του στροφείου, όπου αλλάζει πορεία σε αξονική από ακτινική που είχε αρχικά. Όταν το νερό διέρχεται από τα πτερύγια του στροφείου, καθώς αυξάνεται η αξονική συνιστώσα της ταχύτητας και παράλληλα μειώνεται ο στροβιλισμός, η εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας μειώνεται. Τα πτερύγια του στροφείου εκτείνονται από την πλήμνη στην στεφάνη, όπου είναι πακτωμένα. Η στεφάνη συντελεί στην αύξηση της μηχανικής στιβαρότητας του στροφείου και ειδικότερα των πτερυγίων, όπου αναπτύσσονται δυνάμεις τόσο από την διερχόμενη ροή όσο και από την περιστροφή, οι οποίες ονομάζονται φυγόκεντρες δυνάμεις.



Εικόνα 41. Υδροστροβίλος τύπου Francis. (Πηγή: Σούλης, 2004)

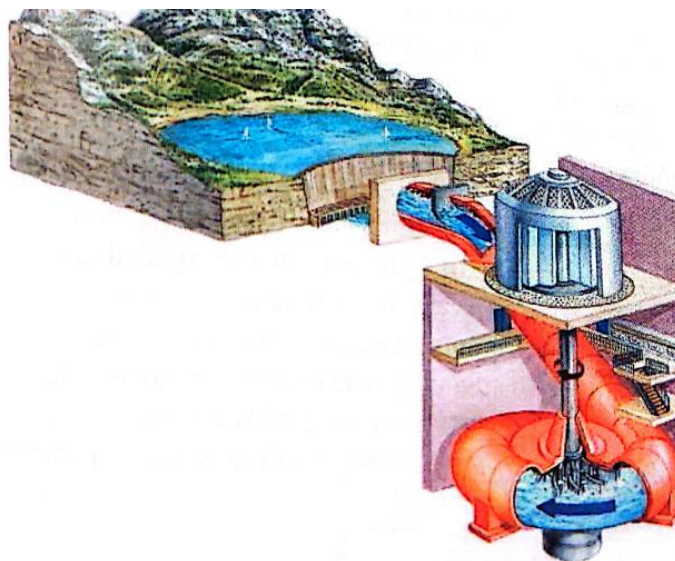
Παρακάτω παρουσιάζεται η διαμήκης ροή του στροβίλου και τα στροφεία του:



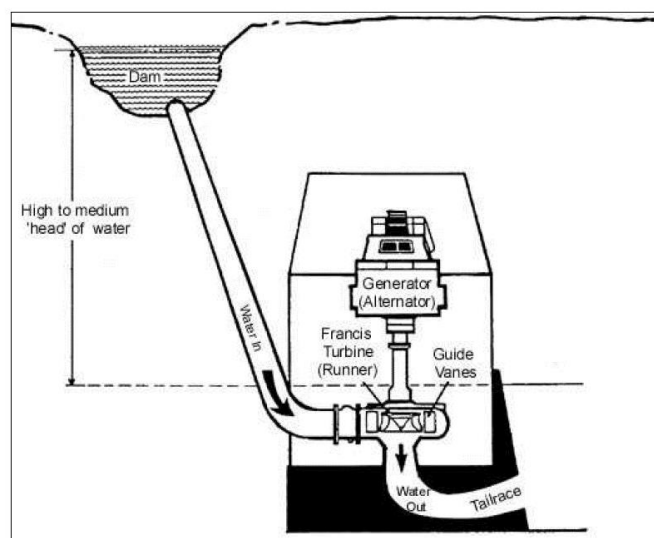
Εικόνα 42. Διαμήκης ροή του Υδροστροβίλου Francis. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)



Εικόνα 43. Τα στροφεία του Υδροστροβίλου Francis. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

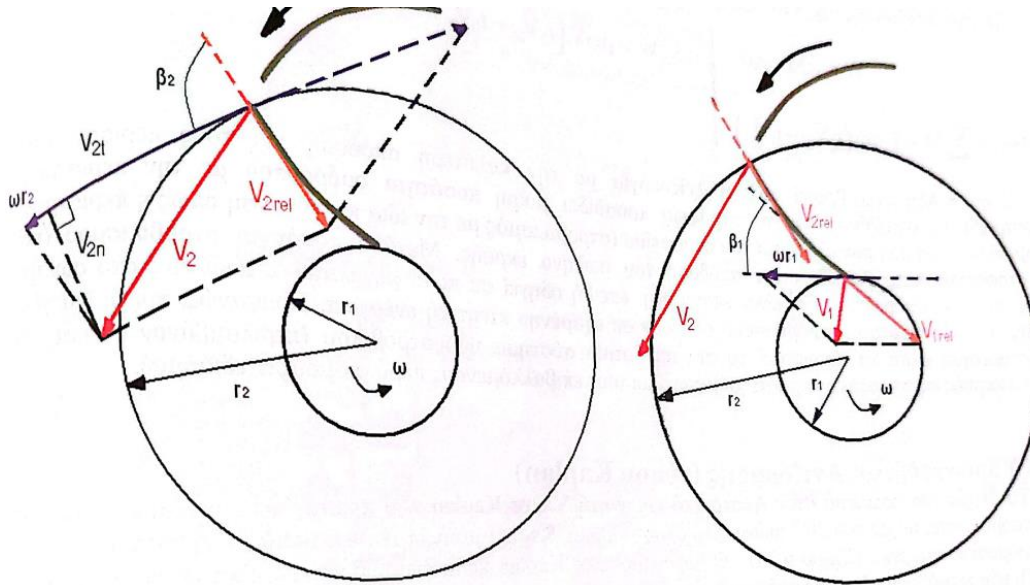


Εικόνα 44. Υδροηλεκτρικό σύστημα του υδροστροβίλου Francis (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)



Εικόνα 45. Διαμόρφωση υδροστροβίλων τύπου Francis. (Πηγή: www.energotech.gr, 2009)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα διανύσματα ταχύτητας για το απόλυτο σύστημα αναφοράς και σχετικό που περιστρέφεται με το στροφέιο. Η ροή αναγκάζεται από τα στατικά πετρώγια να προσκρούει στο πετρώγιο του στροφείου με απόλυτη ταχύτητα $\vec{V}_2$.



Εικόνα 46. Διανύσματα σχετικής και απόλυτης ταχύτητας και γεωμετρία *A.* για την εξωτερική ακτίνα και *B.* για την εσωτερική ακτίνα του στροφείου του στροβίλου Francis (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).

Το πετρώγιο του στροφείου εκτελεί αριστερόστροφη περιστροφή και κινείται εφαπτομενικά σε ακτίνα r_2 με ταχύτητα ωr_2 . Κατασκευάζουμε το διανυσματικό άθροισμα της $\vec{V}_2$ με τον αντίθετο της ωr_2 , για να μετατρέψουμε το σύστημα αναφοράς σε περιστρεφόμενο. Προκύπτει ένα παράλληλο στην ακμή προσβολής του πετρώγιου του στροφείου $\vec{V}_{2rel}$. Η εφαπτομενική συνιστώσα $\vec{V}_{2t}$ του διανύσματος της απόλυτης ταχύτητας $\vec{V}_2$ που είναι ίση με:

$$\vec{V}_{2t} = \omega r_2 - \frac{\vec{V}_{2t}}{\tan \beta_2}$$

Γίνεται αντιληπτό ότι η ροή στρέφεται έτσι ώστε, να εκρέει παράλληλα με την ακμή εκφυγής του πετρώγιου του δρομέα, σχηματίζοντας γωνία β_1 από την εφαπτομενική γραμμή του κύκλου r_1 . Συνεπώς, για να ξαναγυρίσουμε στο απόλυτο σύστημα αναφοράς, προβαίνουμε στην διανυσματική πρόσθεση της $\vec{V}_{1rel}$ και της ταχύτητας του πετρώγιου ωr_1 , παίρνοντας τελικά την απόλυτη ταχύτητα $\vec{V}_1$.

Τέλος, παρατίθεται η σχέση της ισχύς εξόδου της ατράκτου που προκύπτει χρησιμοποιώντας την εξίσωση Euler για στροβιλομηχανές:

$\dot{W} = \omega M = \omega T \rightarrow$ όπου $\dot{W} = \rho \omega \dot{V} (r_2 \vec{V}_{2t} - r_1 \vec{V}_{1t})$, όπου η εφαπτομενική συνιστώσα ισούται με: $\vec{V}_{1t} = \omega r_1 - \frac{\vec{V}_{1n}}{\tan \beta_1}$.

Οι υδροστροβίλοι Francis έχουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα, ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς αντιστρεπτής λειτουργίας. [Πολυζάκης Απ., (2019).

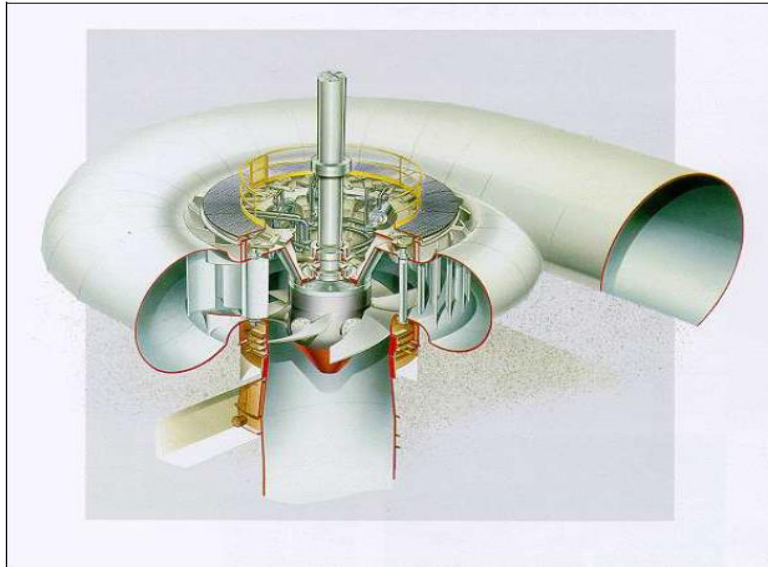
3.8. ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ KAPLAN.

Ο ΥΣ Kaplan, είναι υδροστροβίλος αντίδρασης και είναι ο πλέον κατάλληλος σε περιπτώσεις που επικρατούν χαμηλά πιεζομετρικά φορτία και υψηλές τιμές ροής του νερού. Η λειτουργία του βασίζεται στο γεγονός ότι το νερό διαρρέει την προπέλα, αναγκάζει τον έλικα να περιστραφεί και η περιοχή στην οποία ρέει το νερό, τείνει να καταλάβει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια. Η είσοδος του νερού στον ΥΣ γίνεται πλευρικά, η εκτροπή του από τα κατευθυντήρια πτερύγια και η ροή του αξονικά μέσω της προπέλας. Έτσι, οι ΥΣ Kaplan ονομάζονται και υδροστροβίλοι αξονικής ροής.

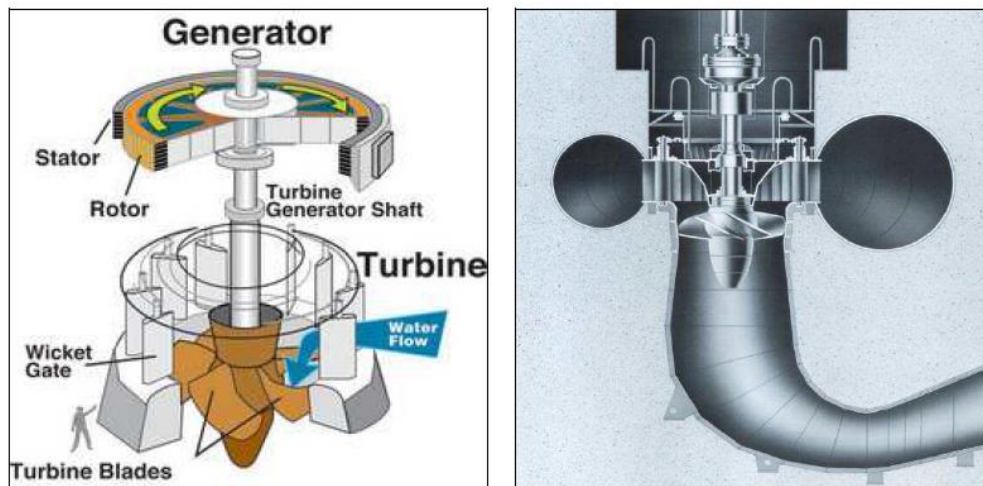
Λόγω των προσαρτημένων πτερυγίων, ο ΥΣ Kaplan έχει σύνθετη κατασκευή. Συγκεκριμένα, ο λειτουργικός μηχανισμός του απαρτίζεται από μια κεφαλή πίεσης, ένα σερβοκινητήρα και ένα λειτουργικό μοχλό πτερυγίου που βρίσκεται στο εσωτερικό του άξονα. Αναλυτικά, τα κινητά πτερύγια μπορούν να εναρμονιστούν με τις γωνίες των πτερυγίων χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό σύνδεσης. Ο μηχανισμός αυτός εδράζεται στο εσωτερικό του κινητήριου διανομέα. Ανάμεσα στον κινητήριο διανομέα και στο στέλεχος του πτερυγίου υπάρχει μια ειδική συσκευή που στοχεύει να αποτρέψει να συμβεί η διείσδυση νερού εξωτερικά του διανομέα και η διαρροή του λιπαντικού υγρού. Η τροφοδοσία και η ανάδραση του σερβοκινητήρα, οφείλεται στην πίεση από την κεφαλή του λαδιού και στις περισσότερες περιπτώσεις εδράζεται στην κορυφή της γεννήτριας. Το κινητήριο πτερύγιο του σερβοκινητήρα τοποθετείται συνήθως ανάμεσα στον κύριο άξονα του στροβίλου και του άξονα της γεννήτριας ή στο εσωτερικό του κινητήρα διανομής.

Είναι γεγονός πως οι αυτοί οι ΥΣ είναι καλύτεροι από τους ΥΣ ακτινικής ροής όσον αφορά στην τεχνολογική προσαρμοστικότητα της γωνίας των πτερυγίων σε περιπτώσεις αλλαγής της ισχύος, κάτι το οποίο ανεβάζει ραγδαία την απόδοσης της παραγόμενης ισχύος. Επίσης, είναι δυνατόν να ελέγξουμε την ποσότητα νερού που κινείται στον ΥΣ Kaplan, αλλάζοντας τις τιμές που λαμβάνει η απόσταση των κατευθυντήριων πτερυγίων. Παράλληλα, θα πρέπει να πάρει κατάλληλες τιμές και ο αριθμός των πτερυγίων της προπέλας, διότι με την αλλαγή των κατευθυντήριων βανών αλλάζει και η ρύθμιση των πτερυγίων της, ώστε η απόδοση να πάρει

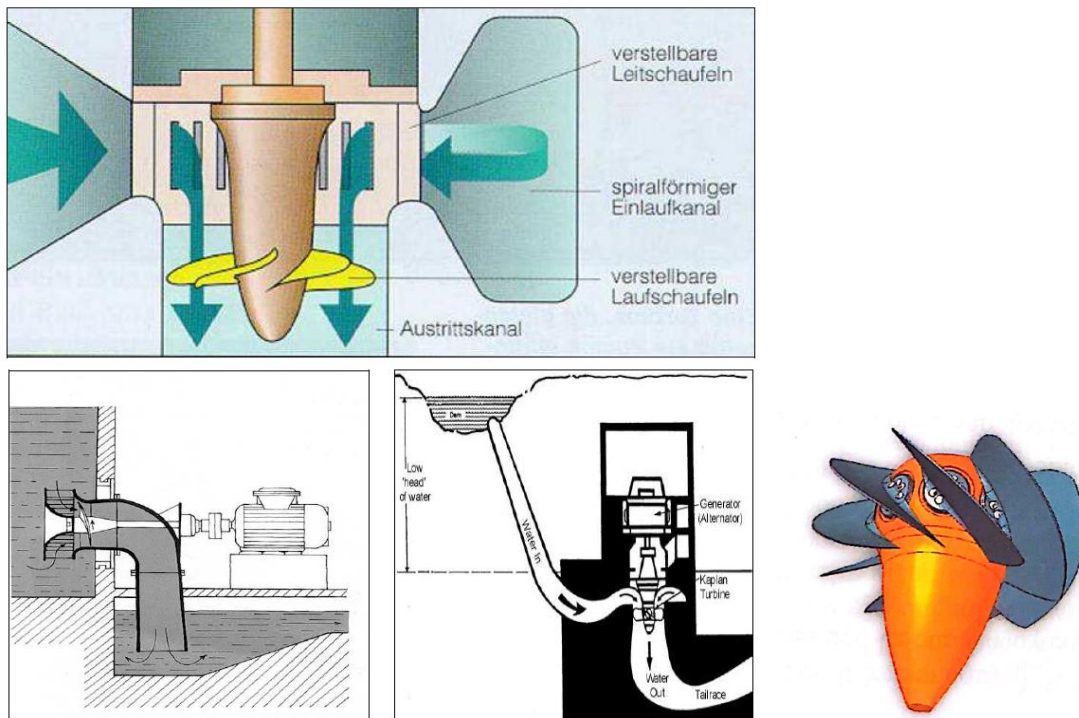
την μέγιστη τιμή της. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα των περυγίων είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του νερού. Τα περύγια του ΥΣ Kaplan προσαρμόζονται σε διάφορες κλίσεις και είναι δυνατόν να διαχειριστούν επιτυχώς μεγάλες τιμές αποκλίσεων που παρουσιάζει η ροή. Είναι ενδεικτικό ότι η απόδοση τους ξεπερνάει το 90% και προτιμώνται από υδροστροβίλους τύπου Francis. Παρότι το βασικό τους μειονέκτημα αφορά στο κόστος τους, δηλαδή είναι σχετικά ακριβοί, επιλέγονται σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι ακόμα και σε κλίμακα μερικού φορτίου παρουσιάζουν υψηλή απόδοση.



Εικόνα 47. Υδροστροβίλος τύπου Kaplan. (Πηγή: Σούλης, 2004)

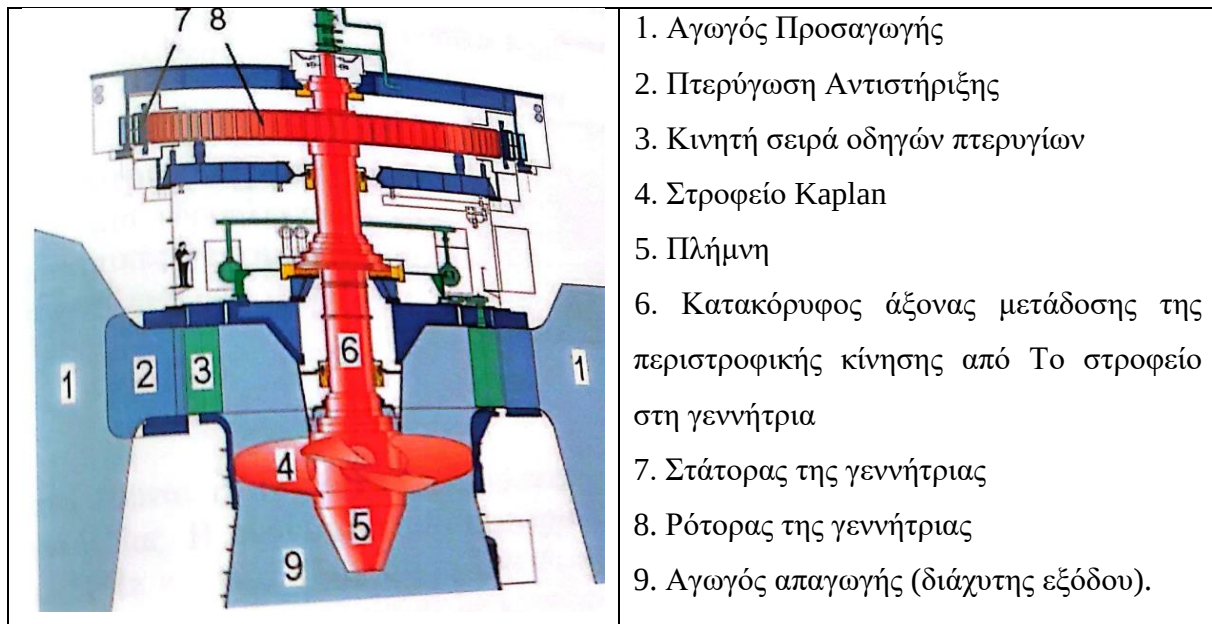


Εικόνα 48. Τομές υδροστροβίλων τύπου Kaplan. (Πηγή: www.toshiba.co.jp, 2009)



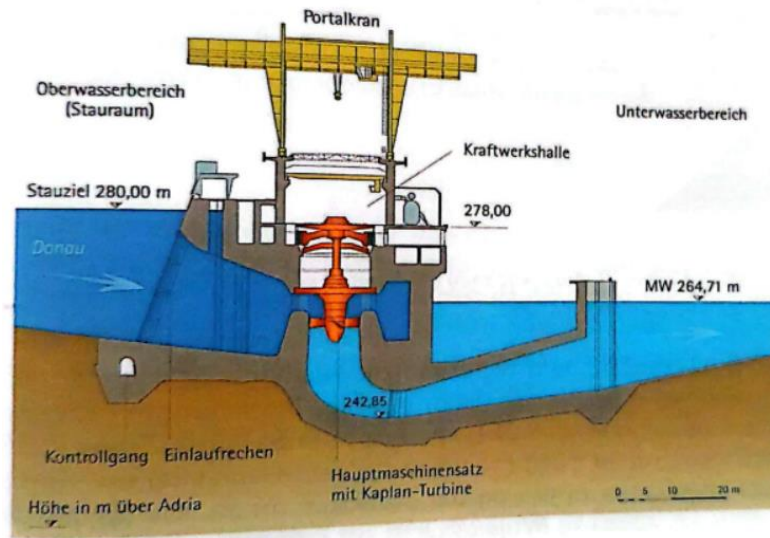
Εικόνα 49. Διαμόρφωση υδροστροβίλων τύπου Kaplan και στροφείο.
(<http://sfrang.com/historia/selida625.htm>, 2009)

Ακολουθεί η διαμήκης τομή του υδροστροβίλου Kaplan και το στροφείο του.



Εικόνα 50. Διαμήκης τομή του Υδροστροβίλου Kaplan. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το υδροηλεκτρικό σύστημα που χρησιμοποιεί ο υδροστροβίλος Kaplan.



Εικόνα 51. ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Kaplan κατακόρυφου άξονα. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019, Μέγα, Ν. Μ., 2009,

3.9. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.

Τα υδροηλεκτρικά έργα, αν εξαιρέσουμε τα πολύ μικρής ισχύος, λειτουργούν με τη χρήση σύγχρονων ηλεκτρικών γεννητριών, δηλαδή γεννητριών που περιστρέφονται με σύγχρονη ταχύτητα ω_s , η οποία έχει τύπο τον παρακάτω:

$$\omega_s = \frac{60 f}{p}$$

όπου f είναι η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της γεννήτριας. Η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος ενός διασυνδεδεμένου δικτύου όσον αφορά στην Ευρώπη είναι 50 Hz, ενώ όσον αφορά στις ΗΠΑ 60 Hz και είναι απαραίτητο να διατηρείται μονίμως σταθερή. Εάν έχουμε έστω και μια πολύ μικρή απόκλιση, αυτή μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων και των συσκευών εν γένει. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι και η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας του απευθείας συνδεδεμένου με αυτή υδροστρόβιλου, πρέπει να παραμένει σταθερή. Για να συμβαίνει αυτό, θα πρέπει η κινητήρια ροπή M του υδροστρόβιλου να είναι συνεχώς ίση προς τη ροπή αντιστάσεως M_{res} την οποία προβάλλει η γεννήτρια και είναι ανάλογη της ηλεκτρικής ισχύος που προσδίδει στο συνδεδεμένο δίκτυο, δηλαδή πρέπει να τηρείται η παρακάτω εξίσωση:

$$M - M_{res} = I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Τόσο η λειτουργία της γεννήτριας όσο και η λειτουργία του στροβίλου, επιβάλλεται να λαμβάνουν υπόψιν τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω του ρυθμιστή του υδροστροβίλου, ο οποίος στην πραγματικότητα είναι ένα σύστημα αυτοματισμού, που αφουγκράζεται την τάση επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης του υδροστροβίλου και ρυθμίζει ανάλογα τη γωνία κλίσης των ρυθμιστικών πτερυγίων.

- Εάν $\frac{d\omega}{dt} > 0$, σημαίνει ότι η μονάδα τείνει να επιταχύνει και τότε περιορίζει το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων, με συνέπεια να μειώνεται η παροχή και η ισχύς εξόδου.
- Εάν $\frac{d\omega}{dt} < 0$, σημαίνει ότι η μονάδα τείνει να επιβραδύνει και τότε αυξάνει το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων, οπότε ταυτόχρονα θα μειώνεται η παροχή και ισχύς εξόδου.

Αξίζει να αναφερθούμε στην ειδική ταχύτητα n_s ως προς την παροχή των υδροστροβίλων, η οποία ορίζεται στο σημείο σχεδιασμού με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στην περίπτωση των φυγόκεντρων αντλιών με τη σχέση που παρουσιάζεται παρακάτω:

$$n_s = n \frac{V_{DP}^{1/2}}{H_{an,DP}^{3/4}}$$

Η n_s εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου, του οποίου το σημείο λειτουργίας είναι η ογκομετρική παροχή $\dot{V} = 1$ και το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος πτώσης $H_{av} = 1$. Η τιμή της ειδικής αυτής ταχύτητας εξαρτάται από τις μονάδες μέτρησης. Συνήθως η παροχή και το ύψος πτώσης εκφράζονται σε m^3/s και mSY αντίστοιχα και η n_s σε rpm. Οι γεωμετρικά όμοιοι υδροστροβίλοι έχουν την ίδια n_s , όμως υδροστροβίλοι με την ίδια ειδική ταχύτητα, έχουν ίδια περίπου μεσημβρινοί τομή χωρίς απαραίτητα να είναι αυστηρά γεωμετρικά όμοιοι.

Μια άλλη ειδική ταχύτητα που χρησιμοποιείται στους υδροστροβίλους, είναι η ειδική ταχύτητα n_N ως προς την ισχύ, η οποία εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου, διαμέτρου στροφείου D_R , του οποίου το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι το ακόλουθο $\dot{W} = 1$ και $H_{av} = 1$.

$$\text{Η ειδική ταχύτητα } n_N \text{ εκφράζεται από την σχέση: } n_N = n \frac{W_{DP}^{1/2}}{H_{av,DP}^{5/4}}$$

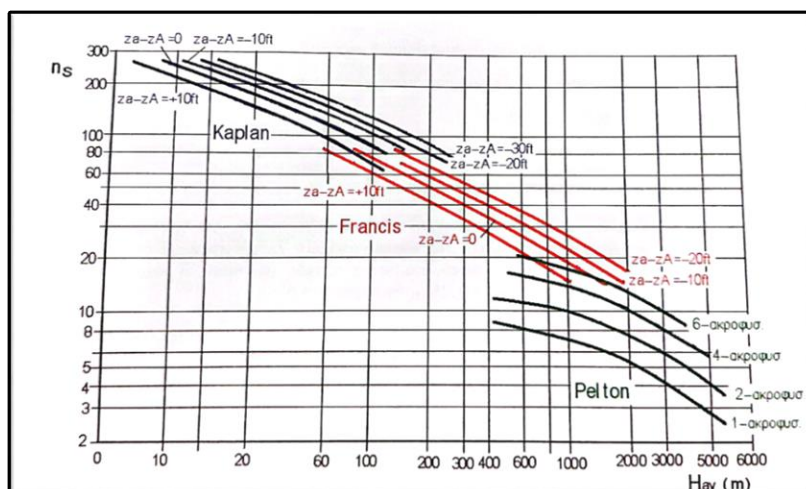
Η τιμή της n_N εξαρτάται από τις μονάδες μέτρησης. Τις περισσότερες φορές οι $\dot{V}$ & $\dot{W}$ εκφράζονται σε m^3/s & Kw και η n_N σε rpm . Η ειδική αυτή ταχύτητα υστερεί συγκριτικά με την n_s , διότι στον υπολογισμό της υπάρχει μια άγνωστη παράμετρος, ο ολικός βαθμός απόδοσης, μέσω της οποίας υπολογίζεται η ισχύς και η πυκνότητα του υγρού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι περιοχές χρήσης των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων σε συνάρτηση της ειδικής ταχύτητας, καθώς και οι ενδεικτικές τιμές του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή στο σημείο σχεδιασμού.

Πίνακας 2. Περιοχές χρήσης των διαφόρων τύπων υδροστροβίλων σε συνάρτηση της ειδικής ταχύτητας καθώς και ενδεικτικές τιμές του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης.
(Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

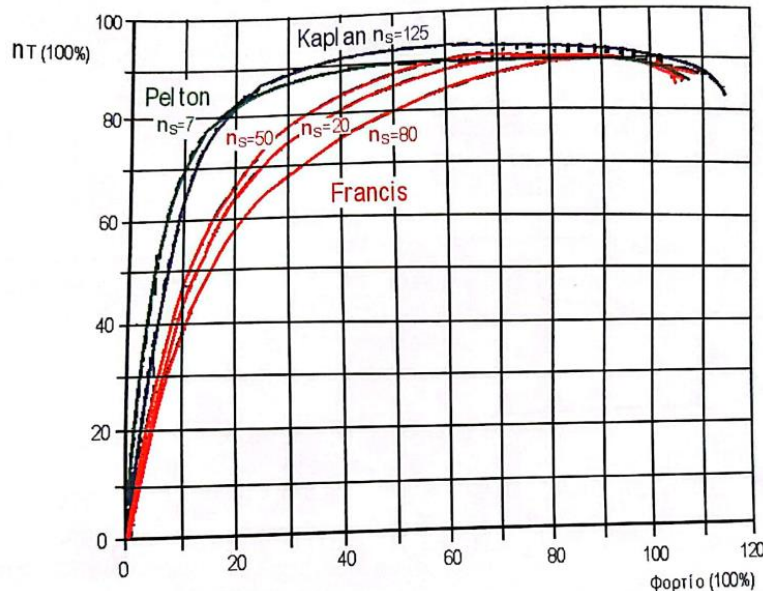
Υδροστρόβιλος	n_N	$\eta_{T,DP}$
Pelton	9-82	0.90-0.93
Francis	68-300	0.935-0.95
Kaplan	290-860	0.935-0.95

Οι μεγαλύτερες τιμές του ολικού βαθμού απόδοσης αντιστοιχούν σε υδροστρόβιλους μεγάλους μεγέθους. Στα παρακάτω σχήματα, παρατίθενται διαγράμματα, που μας βοηθούν στην κατάλληλη επιλογή υδροστροβίλου. Συγκεκριμένα, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ειδικές ταχύτητες n_s (καμπύλες) για διάφορες υδροστρόβιλους και διαθέσιμα ύψη. Εδώ φαίνεται η επίδραση του ύψους εξόδου του νερού από τον υδροστρόβιλο στην ειδική ταχύτητα καθώς και η επίδραση του αριθμού των ακροφυσίων για τον Pelton.



Εικόνα 52. Ειδικές ταχύτητες n_s (καμπύλες) για διάφορους υδροστρόβιλους και διαθέσιμα ύψη.

Φαίνεται η επίδραση του ύψους εξόδου του νερού από τον υδροστροβίλο στην ειδική ταχύτητα καθώς και η επίδραση του αριθμού των ακροφυσίων για τον Pelton. Στο επόμενο διάγραμμα, φαίνεται ο βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων στροβίλων προς το φορτίο, συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας n_s . (Πηγή: Πολυζάκης, 2019).



Εικόνα 53. Βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων στροβίλων προς το φορτίο συναρτήσει της ειδικής ταχύτητας n_s . (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

3.10. ΣΠΗΛΑΙΩΣΗ ΣΤΟΥΣ ΤΟΥΣ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ.

Ένα πάρα πολύ σημαντικό φαινόμενο αποτελεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η σπηλαίωση είναι απόρροια της πτώσης της στατικής πίεσης του νερού, κάτω από την πίεση ατμοποίησης, που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία νερού. Είναι λογικό επομένως, ότι πιο πιθανή περιοχή για να συμβεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης στο στροφέιο του υδροστροβίλου, είναι η περιοχή εξόδου του στροφείου, όπου εκεί η μέση στατική πίεση είναι αρκετά χαμηλή. Οπότε, για να μην εμφανιστεί σπηλαίωση στο στροφέιο θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση:

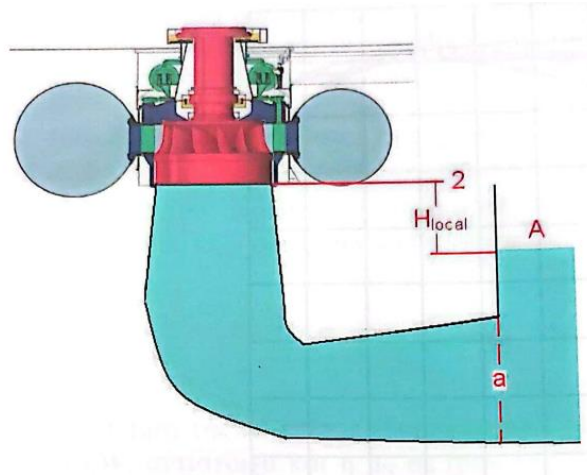
$$P_m > P_{steam} \rightarrow \frac{P_m}{\rho g} > \frac{P_{steam}}{\rho g}$$

Όπου η μέση P_m ελάχιστη στατική πίεση & P_{steam} η πίεση ατμοποίησης του υγρού.

Έστω ότι η H_d η διαφορά της ολικής πίεσης H_{oa} στη διατομή εξόδου του υδροστροβίλου ως προς την τάση ατμών του υγρού, δηλαδή ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$H_d = H_{oa} - H_{\text{steam}}$$

Σε αυτό το σημείο θα γίνει εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli, μεταξύ του σημείου αμέσως μετά την έξοδο του νερού από το στροφείο του υδροστροβίλου και της ελεύθερης επιφάνειας του κάτω ταμιευτήρα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 54. Τοποθέτηση υδροστροβίλου Francis σε σχέση με τη στάθμη του κάτω ταμιευτήρα. (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Η ταχύτητα του νερού στη θέση A είναι αμελητέα και η πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Ακόμα, η κινητική ενέργεια στη θέση 2 είναι μηδενική, οπότε:

$$H_{oa} = H_{\text{atm}} - H_{\text{local}},$$

$$H_{\text{local}} = z_2 - z_A.$$

Αντικαθιστούμε και προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$H_d = H_{\text{atm}} - H_{\text{local}} - H_{\text{steam}}$$

Ακολουθεί η συνθήκη η οποία εφαρμόζεται για να μην εμφανιστεί σπηλαιώση στα στροφεία του υδροστροβίλου:

$$H_d > H_{cr} \rightarrow H_{\text{atm}} - H_{\text{local}} - H_{\text{steam}} > H_{cr}$$

όπου το H_d εξαρτάται μόνο από την τοποθέτηση του υδροστροβίλου ως προς την στάθμη z_A του κάτω ταμιευτήρα και το H_{cr} εξαρτάται μόνο από την λειτουργία του του υδροστροβίλου. Εάν H_{av} είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, τότε ορίζεται η παράμετρος Thomas ή παράμετρος σπηλαιώσης (cavitation factor) της εγκατάστασης από το λόγο:

$$S_{\text{thoma}} = \frac{H_d}{H_{av}} \rightarrow S_{\text{thoma}} = (H_{\text{atm}} - H_{\text{local}} - H_{\text{steam}}) / H_{av}$$

και η οποία εξαρτάται μόνο από την τοποθέτηση του στροβίλου. Οπότε, η συνθήκη μη εμφάνιση σπηλαίωσης

$$H_d > H_{cr} \rightarrow H_{atm} - H_{local} - H_{steam} > H_{cr}$$

μπορεί να αναδιαταχθεί και ως εξής:

$$S_{thoma} > S_{cr} \rightarrow \frac{H_d}{H_{av}} > \frac{H_{cr}}{H_{av}}$$

όπου S_{cr} η παράμετρος σπηλαίωσης του στροβίλου, που μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του εργαστηρίου πειραματικά, και χαρακτηρίζει την εμφάνιση της σπηλαίωσης εξόδου, η οποία είναι γεγονός ότι είναι η πιο βασική μορφή σπηλαίωσης στους υδροστροβίλους αντιδράσεως.

Αυτή προκαλεί την εμφάνιση φυσαλίδων στην κυρτή επιφάνεια των πτερυγίων, δηλαδή στην πλευρά υποπίεσης και κοντά στην ακμή εκφυγής. Η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη τοποθέτησης στροβίλου που λειτουργεί το περισσότερο χρόνο, καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_{thoma} > S_{cr} \rightarrow \frac{H_d}{H_{av}} > \frac{H_{cr}}{H_{av}}$$

Η σπηλαίωση εξόδου είναι σε μικρότερο βαθμό επικίνδυνη από πλευρά μηχανικής διάβρωσης και μάλιστα πολλές φορές μειώνεται όσο ελαττώνεται υδραυλική πτώση στους υδροστροβίλους Francis. Καταλάβουμε ότι για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης, το στροφείο δεν χρειάζεται να κατασκευάζεται από υλικά υψηλής μηχανικής αντοχής, αλλά μικρότερης. Εκτός βέβαια από τη σπηλαίωση εξόδου στους υδροστροβίλους, μπορούν να εμφανιστούν και άλλες μορφές σπηλαίωσης, οι οποίες δεν εξαρτώνται από την τιμή της S_{thoma} και εμφανίζονται, όταν ο υδροστροβίλος λειτουργεί εκτός του σημείου σχεδιασμού. Έχουμε τότε τις παρακάτω μορφές σπηλαίωσης:

1. Σπηλαίωση εξόδου εξωτερικής επιφάνειας. Αυτή μπορεί να βρεθεί κοντά στο σημείο εισόδου των πτερυγίων στην εξωτερική επιφάνεια και προς το μέρος της στεφάνης. Την συναντάμε κατά κύριο λόγο στους υδροστροβίλους Francis υψηλής ταχύτητας περιστροφής, λόγω της μεγάλης καμπυλότητας που παρατηρείται στην εγκάρσια τομή της στεφάνης και οφείλεται στην περιρροή της ακμής εισόδου των πτερυγίων σε υψηλές τιμές της παραμέτρου ύψους ψ , δηλαδή σε υψηλές τιμές διάθεσης υδραυλικής πτώσης. Ακόμα, η σπηλαίωση εξόδου στην εξωτερική επιφάνεια του πτερυγίου προκαλεί ζώνες φθοράς μικρής έκτασης, αλλά σημαντικού βάθους σε υδροστροβίλους Francis.

2. Σπηλαιώση λόγω στροβίλων Karman. Σχηματίζεται κατάντι του στροφείου του στροβίλου τύπου Karman ανάλογα με τη μορφή της ακμής εκφυγής των πτερυγίων που δημιουργούν τη σπηλαιώση, η οποία είναι υπεύθυνη για την πρόκληση ταλαντώσεων.
3. Σπηλαιώση στήλης. Μπορεί να σχηματιστεί μια στήλη σπηλαιώσης κάτω από την πλήμνη και της οποίας η φορά περιστροφής να είναι αντίστοιχη με τη φορά της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο του στροφείου, για παροχές μικρότερης της κανονικής και αντίθετη με αυτή (τη φορά της περιφερειακής ταχύτητας στην έξοδο του στροφείου) για παροχές μεγαλύτερες της κανονικής.

Ιδιαίτερως για τους υδροστροβίλους Kaplan, αναφέρουμε ότι αυτοί εμφανίζουν και άλλες ειδικές μορφές σπηλαιώσης όπως παρακάτω:

1. **Σπηλαιώση πλήμνης.** Μπορεί να παρατηρηθεί κοντά στο σφαιρικό τμήμα της πλήμνης και δημιουργεί σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης. Όμως αυτό, δεν σημαίνει ότι δημιουργεί και φθορά. Η έκταση της σπηλαιώσης αυτής έχει να κάνει σε σχέση με την τιμή του S_{thoma} .
2. **Σπηλαιώση ακροπτερυγίων.** Δημιουργείται από σημαντικές ταχύτητες της ροής που αναπτύσσονται μεταξύ των άκρων πτερυγίων και του εξωτερικού κελύφους. Μόνο για χαμηλές τιμές του S_{thoma} η σπηλαιώση αυτή είναι υπεύθυνη για σημαντικές φθορές, χωρίς όμως να προκαλεί μείωση και στην απόδοση του υδροστροβίλου.

Σε γενικά πλαίσια, τα στροφεία είναι γεγονός ότι ελέγχονται κάθε 5000-10.000 ώρες λειτουργίας, με σκοπό να αξιολογηθούν επαρκώς τα αποτελέσματα της σπηλαιώσης. Η φθορά μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστιαία απώλεια μάζας του στροφείου. Τέλος, έχοντας δεδομένη την τιμή του s_{cr} μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος τοποθέτησης και τη στάθμη τοποθέτησης του στροβίλου, για την αποφυγή σπηλαιώσης, ως εξής:

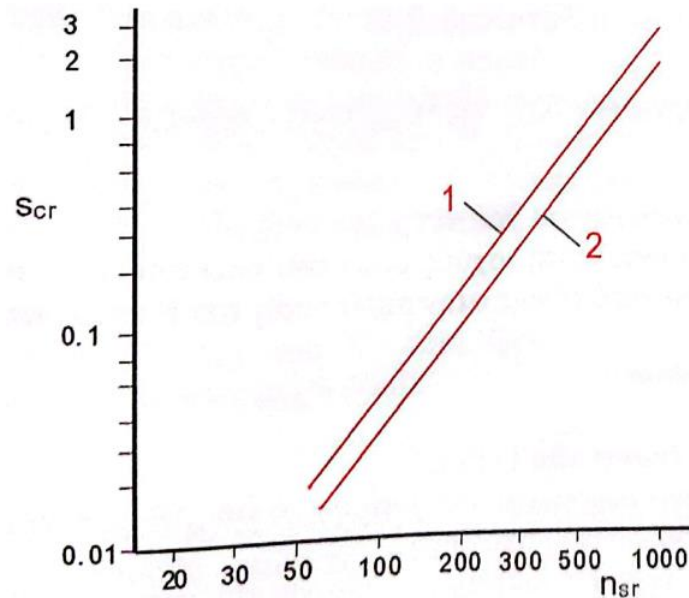
$$H_d > H_{cr} \rightarrow H_{atm} - H_{local} - H_{steam} > H_{cr}$$

μπορεί να αναδιαταχθεί και ως εξής:

$$s_{cr} = \frac{H_{cr}}{H} \rightarrow H_d > s_{cr} H \rightarrow H_{atm} - H_{local} - H_{steam} > s_{cr} H \rightarrow H_{local} < H_{atm} - H_{steam} - s_{cr} H \rightarrow$$

$$\Rightarrow H_{local} = Z_2 - Z_A < H_{atm} - H_{steam} - s_{cr} H \rightarrow \underline{Z_2 < H_{atm} + Z_A - H_{steam} - s_{cr} H}$$

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατηρείται η συνάρτηση του s_{cr} με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών n_s , όπως προκύπτει από την ανάλυση των χαρακτηριστικών μεγάλου αριθμού υδροστροβίλων. [Πολυζάκης Απ., 2019].



Εικόνα 55. s_{cr} συναρτήσει του n_s . (Πηγή: Πολυζάκης, 2019)

Στο διάγραμμα αυτό περιγράφεται η χάραξη δύο ευθειών που ορίζουν μια περιοχή τιμών του s_{cr} . Η ευθεία 1 αντιστοιχεί σε συνηθισμένη κατασκευή στροφείου υδροστροβίλου από ορείχαλκο ή ανοξείδωτο χάλυβα, εν αντιθέσει με την ευθεία 2, η οποία είναι ένα όριο που είναι δυνατό να επιτευχθεί μόνο με ειδική σχεδίαση και κατασκευή του στροφείου. Από το σχήμα εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι, όσο αυξάνει η τιμή του n_s τόσο αυξάνει και η τιμή του s_{cr} και άρα καταλαβαίνουμε ότι τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου, ώστε να ισχύει η αρχική μας σχέση,

$$s_{thoma} > s_{cr} \rightarrow \frac{H_d}{H_{av}} > \frac{H_{cr}}{H_{av}}$$

Γενικώς συμπεραίνουμε, ότι η αύξηση της τιμή του n_s έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι εσκαφές για την κατασκευή του ΥΗΣ. Από την άλλη η αύξηση του, σημαίνει αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου για το διάστημα λειτουργίας και άρα απαιτείται ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός μικρότερων διαστάσεων, μικρότερου κόστους και λιγότερες σε όγκο εσκαφές.

3.11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των 3 τύπων υδροστροβίλων που μελετήσαμε:

Υδροστρόβιλος Pelton (δράσης)

- Κατάλληλος για πολύ υψηλές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H > 300 \text{ mSY}$).
- Ισχύς μέχρι 400 MW.
- Άριστη προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή $\dot{V}$.
- Κακή προσαρμογή σε λειτουργία μεταβαλλόμενης υδραυλικής πτώσης H .

Υδροστρόβιλος Francis (αντίδρασης)

- Κατάλληλος για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H=150 \text{ με } 750 \text{ mSY}$).
- Ισχύς μέχρι 800 MW.
- Αργόστροφος (χαμηλός ειδικός αριθμός στροφών) ή υψηλόστροφος (υψηλός ειδικός αριθμός στροφών).
- Μέτρια ως καλή προσαρμογή σε λειτουργία υπό μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή $\dot{V}$.
- Μέτρια ως καλή προσαρμογή σε λειτουργία μεταβαλλόμενης υδραυλικής πτώσης H .

Υδροστρόβιλος Kaplan (αντίδρασης)

- Κατάλληλος για μικρές έως μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H=10\text{-}150 \text{ mSY}$).
- Ισχύς μέχρι 800 MW.
- Πολύστροφος (υψηλός ειδικός αριθμός στροφών).
- Καλή προσαρμογή σε λειτουργία με μεταβαλλόμενη ογκομετρική παροχή $\dot{V}$.
- Σχετικά καλή προσαρμογή σε λειτουργία μεταβαλλόμενης υδραυλικής πτώσης H .

Σε πρώτο στάδιο, συγκρίνουμε τους υδροστροβίλους Pelton και Francis. Για να είναι τα αποτελέσματά μας αποδεκτά, θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι και οι δύο υδροστρόβιλοι έχουν υδραυλική πτώση 400 mSY και παράγουν ισχύ 800 MW.

Ας αναλύσουμε τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο υδροστρόβιλος Pelton έναντι του Francis:

- Η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου Pelton είναι πιο υψηλή από αυτή του Francis και εννοείται πως είναι υψηλότερη από τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα. Το σημείο

αυτό στο οποίο υπερτερεί ο Pelton, είναι πολύ σημαντικό στην περίπτωση κατά την οποία ο ΥΗΣ είναι υπέργειος και λιγότερης σημασίας όταν είναι υπόγειος.

- Στον υδροστροβίλο Pelton, δεν υπάρχει κανένας κίνδυνος πλημμύρας ούτε ανάντη ούτε από κατάντη.
- Στον Pelton, στον αγωγό προσαρμογής είναι ελεγχόμενες και μικρότερης έντασης οι υπερπίεσεις λόγω της διάταξης εκτροπής της δέσμης όταν συμβαίνουν μεταβατικά φαινόμενα, δηλαδή δεν απαιτείται άλλη διάταξη προστασίας ακόμα και αν το μήκος του αγωγού προσαρμογής είναι αξιοσημείωτο. Στην ίδια περίπτωση για τον Francis, είναι τις περισσότερες φορές απαραίτητη η κατασκευή του πύργου ανάπλασης για να μειωθούν οι εντάσεις των πιέσεων και υπό πιέσεων κατά τη μεταβατική λειτουργία.
- Στον ίδιο υδροστροβίλο, στα μερικά φορτία ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι καλύτερος και η περιοχή λειτουργίας είναι πολύ εκτεταμένη.
- Στον Pelton, είναι πιο εύκολη η αποσυναρμολόγηση και σε χρόνο και σε κόπωση.
- Στον Pelton επίσης, είναι εύκολη η εν κενώ λειτουργία, για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ του ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς να χρειάζεται να γίνει εκκένωση του υδροστροβίλου από το νερό όπως αυτό πρέπει να γίνει στην περίπτωση του Francis, επειδή το στροφείο είναι πάντοτε και συνεχώς έξω από το νερό.
- Στον Pelton, δεν θα συναντήσουμε ποτέ το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

Στη συνέχεια, θα επεξεργαστούμε τα πλεονεκτήματα του υδροστροβίλου Francis έναντι του Pelton.

- Στον Francis, είναι πιο μεγάλη η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, εάν πάρουμε δεδομένο ότι το στροφείο του Pelton πρέπει να τοποθετείται υψηλότερα από τη μέγιστη δυνατή στάθμη του αγωγού απαγωγής.
- Στον υδροστροβίλο Francis, στο κανονικό σημείο λειτουργίας και στην περιοχή από 65-100% της μέγιστης ισχύος, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι ο πιο υψηλός.
- Η ταχύτητα περιστροφής του Francis είναι υψηλότερη από του Pelton, που συνεπάγεται ότι το μέγεθος, το βάρος και συνεπώς και το κόστος του Francis θα είναι μικρότερα. Το ίδιο συμβαίνει και για τη γεννήτρια, ειδικά για ταχύτητες περιστροφής μικρότερες 750 ή 1000 rpm, οπότε δεν ερχόμαστε αντιμέτωποι με προβλήματα συντονισμού (κρίσιμης ταχύτητας περιστροφής).

- Στον Francis, είναι αισθητά μικρότερο το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού του ΥΗΣ.
- Το κόστος του αγωγού απαγωγής στον Francis είναι πιο μικρό και αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες και μικρότερες διατομές.
- Στον υδροστρόβιλο Francis, η ρύθμιση μέσω της στεφάνης των ρυθμιστικών περυγίων είναι περισσότερο αποτελεσματική, ιδιαίτερα όσον αφορά στη διατήρηση συχνότητας του ρεύματος σε αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Η μηχανική διάβρωση που συμβαίνει στα διαρρέομενα στοιχεία επηρεάζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά λιγότερο από τη φθορά των ακμών των σκαφιδίων ή της ακίδας τροφοδοσίας του Pelton. Αναφέρεται ότι η επιμετάλλωση ρυθμιστικού περυγίου είναι πιο εύκολη στον Francis από αυτήν ενός σκαφιδίου Pelton.
- Υστερεί όσον αφορά το πρόβλημα κόπωσης του στροφείου, ο Pelton, επειδή απαιτεί πιο συχνούς προληπτικούς ελέγχους από ότι ο Francis, κάτι το οποίο οφείλεται στις εναλλασσόμενες φορτίσεις.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συνήθως οι υδροστρόβιλοι Francis προτιμώνται σε μεσαίες και υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, ενώ αντίθετα οι υδροστρόβιλοι Pelton επικρατούν μόνο για πολύ υψηλές τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης.

Κλείνοντας, καταλήγουμε ότι σε μια κοινή περιοχή διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, αν χρειαστεί να διαλέξουμε μεταξύ Pelton και Francis, θα προτιμήσουμε τον Francis. [Πολυζάκης Απ., 2019].

Θα συνεχίσουμε, με τη σύγκριση των υδροστρόβιλων Francis και Kaplan. Ο Francis υπερτερεί στα ακόλουθα έναντι του Kaplan:

- Έστω ότι η εφαρμογή είναι η ίδια, η διάμετρος του στροφείου και το μέγεθος του σπειροειδούς κελύφους, είναι μικρότερα των αντίστοιχων του Kaplan.
- Σε μηχανικό επίπεδο ο Francis είναι λιγότερο πολύπλοκος. Ο υδροστρόβιλος Kaplan είναι μεγάλης πολυπλοκότητας και κόστους και αυτό οφείλεται στα περιστρεφόμενα περύγια του στροφείου του.
- Η αξονική δύναμη του Francis είναι μικρότερη, άρα το μέγεθος του ωστικού εδράνου είναι μικρότερο.

- Στον Francis, η παράμετρος της σπηλαίωσης είναι μικρότερη, οπότε οι εσκαφές για την ασφαλή τοποθέτηση του υδροστροβίλου είναι επίσης μικρότερες (υψηλότερη στάθμη τοποθέτησης).
- Στον Francis τα μεταβατικά φαινόμενα δεν τόσο έντονα, οπότε μπορούν να ελέγχονται πιο εύκολα και άρα δεν απαιτείται συνδυασμός στην κλίση πτερυγίων στροφείου και της στεφάνης ρυθμιστικών πτερυγίων.
- Σε αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο με διατήρηση σταθερής συχνότητας, η δυνατότητα λειτουργίας του Francis είναι πολύ πιο εύκολη ακόμα και σε δίκτυο με έντονες διαταραχές.
- ΥΗΣ με υδροστρόβιλους Francis, έχουν συνολικά μικρότερο κόστος.

Παρουσιάζονται, στη συνέχεια, τα πλεονεκτήματα του Kaplan έναντι του Francis:

- Η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης στον υδροστρόβιλο Kaplan είναι λίγο υψηλότερη, της αντίστοιχης του Francis.
- Επιπλέον είναι περισσότερο επίπεδη η καμπύλη του τελικού βαθμού απόδοσης, οπότε διατηρούνται σταθερές οι υψηλές τιμές του βαθμού απόδοσης σε ευρεία περιοχή γύρω από το κανονικό σημείο λειτουργίας.
- Ο στρόβιλος Kaplan μπορεί να λειτουργεί ομαλά ακόμα και σε μερικά φορτία ή σημαντικά μειωμένες τιμές της υδραυλικής πτώσης, σε αντίθεση με τον Francis, ο οποίος στα μερικά φορτία πρέπει να τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω των κραδασμών και της ασταθούς λειτουργίας που τον διέπει.

Εάν λάβουμε υπόψη μας και τα αποτελέσματα της δεύτερης σύγκρισης, θα διαπιστώσουμε ότι και πάλι υπερτερεί ο υδροστρόβιλος Francis, ειδικά για υδραυλική πτώση μεγαλύτερη του 30mΣΥ. Παρόλα αυτά αξίζει να τονιστεί ότι η επιλογή του Kaplan είναι απαραίτητη για υδραυλικές πτώσεις μέχρι 50mΣΥ.

3.12. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΥΠΩΝ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.

Ο σχεδιασμός και η επιλογή του τύπου και του αριθμού των υδροστροβίλων, αποτελεί κρίσιμο και καθοριστικό στοιχείο της μελέτης ενός υδροηλεκτρικού συστήματος. Ο υδροστρόβιλος πρέπει να λειτουργεί κοντά στις τιμές των σχεδιαστικών του παραμέτρων, εκεί όπου υπάρχει ταμιευτήρας, ώστε να επιτύχει υψηλό και σταθερό βαθμό απόδοσης.

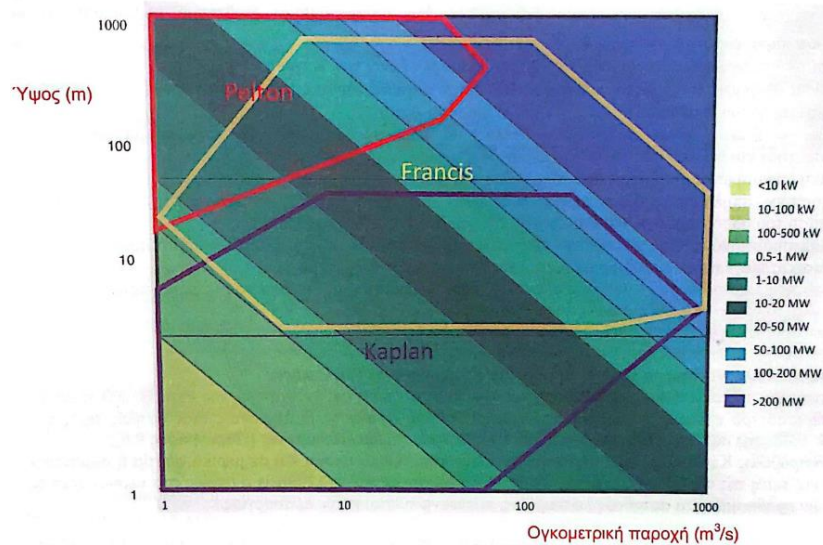
Είναι δυνατό να εκμεταλλευτούμε όλη την ετήσια παροχή με ικανό ταμιευτήρα χωρίς να γίνει υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος του υδροστρόβιλου προσαγωγής. Επίσης μπορεί να ρυθμίσουμε την παραγόμενη ενέργεια ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Όταν δεν υπάρχει ταμιευτήρας, τότε σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του νερού διέρχεται κατευθείαν μέσα από τον υδροστρόβιλο, με αποτέλεσμα η παροχή να είναι μερικώς ελεγχόμενη και ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου να αλλάζει, οπότε έχουμε τη μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αντιλαμβανόμαστε, ότι σε περιπτώσεις έντονης ροής, ένα κομμάτι της παροχής παρακάμπτεται στο βαθμό που ξεπερνάει το τεchnοοικονομικό μέγιστο του υδροστροβίλου, ενώ όταν η παροχή είναι πολύ μικρή ο υδροστρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργήσει. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί ότι ο υδροστρόβιλος δεν μπορεί να γίνει πολύ μεγάλος, διότι θα είναι υπέρογκο το κόστος του και ακόμα όταν λειτουργεί σε χαμηλή παροχή θα ελαττώνεται σε μεγάλο βαθμό η απόδοσή του. Επίσης, ενώ η χρήση του ταμιευτήρα έχει πολλά πλεονεκτήματα, ταυτόχρονα απαιτεί μεγάλο κόστος κατασκευής του φράγματος και παράλληλα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις το καθιστούν εφικτό βασικά σε μεγάλα έργα που εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς και εντάσσονται σε γενικότερους ενεργειακούς και υδροδοτικούς σχεδιασμούς.

A. Επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου

Η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, είναι ιδιαίτερος σημαντική, γιατί ο υδροστρόβιλος αποτελεί την καρδιά του ΥΗΣ. Σύμφωνα με αυτόν σχεδιάζονται όλα τα λειτουργικά μέρη της μηχανής όπως σπειροειδές κέλυφος, στεφάνη, ρυθμιστικά πτερύγια, γεννήτρια κ.α. αλλά και τα έργα του πολιτικού μηχανικού. Ο καθορισμός του τύπου και το μέγεθος του στροβίλου, βασίζονται κυρίως σε οικονομοτεχνικά κριτήρια. Επισημαίνουμε ότι βαρύνουσα σημασία έχει το ωφέλιμο ύψος της εγκατάστασης. Για την επιλογή λοιπόν του κατάλληλου στροβίλου, για μια δεδομένη εγκατάσταση, καταφεύγουμε στη χρήση διαγραμμάτων όπως αυτό που παρουσιάζεται στη συνέχεια, τα οποία προκύπτουν από την εφαρμογή των νόμων ομοιότητας

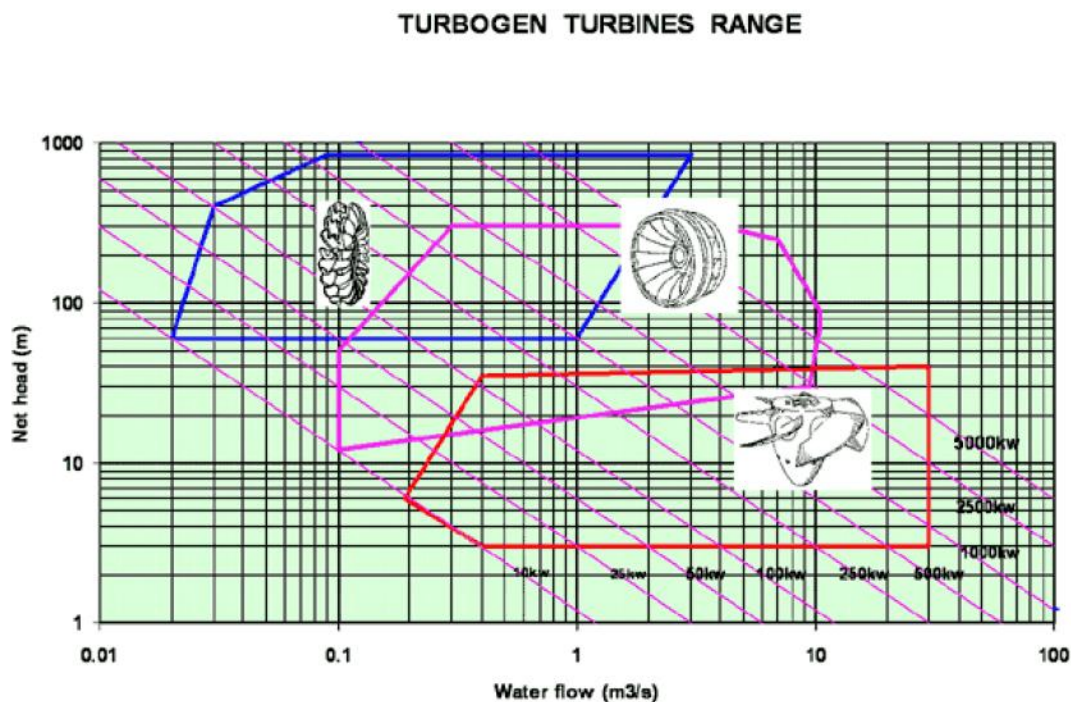
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

και βασίζονται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά ορισμένων προτύπων υδροστροβίλων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρατηρούμε ότι σε συγκεκριμένα σημεία εντοπίζεται αλληλοκάλυψη περιοχών που αντιστοιχούν σε 2 διαφορετικά είδη υδροστροβίλων.

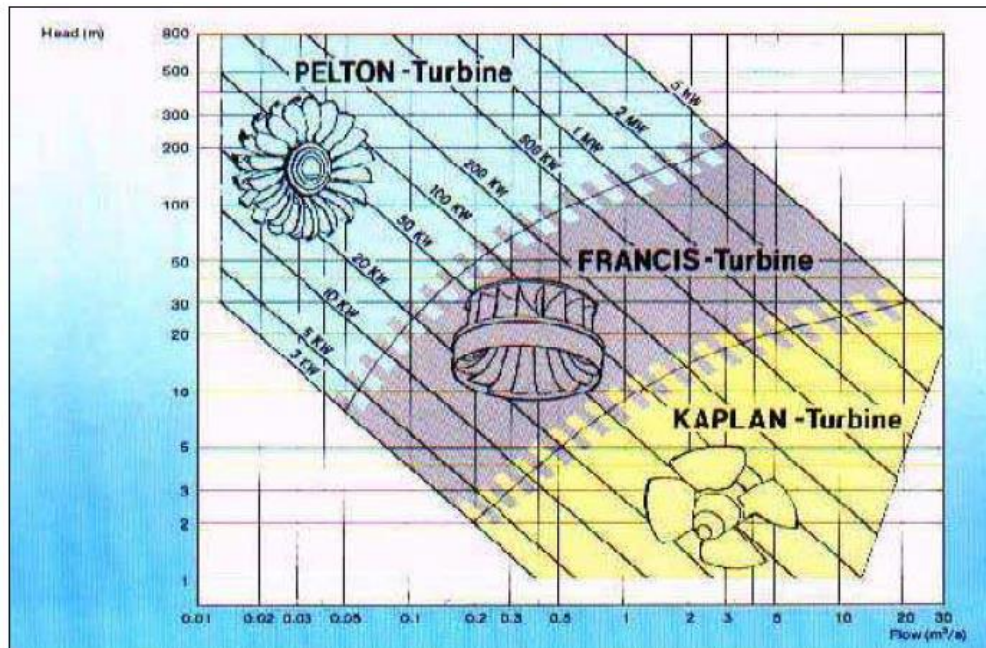


Εικόνα 56. Εύρος λειτουργίας των τύπων υδροστροβίλων ως προς την παροχή και το ύψος.

(Πηγή: Πολυζάκης, 2019)



Εικόνα 57. Νομογράφημα Ροής – Καθαρού πιεζομετρικού φορτίου (Πηγή: www.turbogen-engineering.com, 2009)



Εικόνα 58. Νομογράφημα Ροής – Πιεζομετρικού Φορτίου (Πηγή: www.energotech.com, 2009)

Β. Επιλογή του αριθμού των μονάδων του ΥΗΕ

Αρχικά ως μονάδα, χαρακτηρίζουμε το αυτοτελές συγκρότημα που αποτελείται από τον υδροστροβίλο και όλες τις διατάξεις Η/Μ και τα έργα πολιτικού μηχανικού που τον συνδέουν στη λειτουργία του. Η ευελιξία και η απόδοση αυξάνονται με τη χρήση πολλαπλών υδροστροβίλων. Έτσι στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, δηλαδή στα έργα μεγάλης παροχής, προτείνεται η ύπαρξη υψηλού αριθμού υδροστροβίλων. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται ίδιοι υδροστροβίλοι για λόγους οικονομίας, δηλαδή για επίτευξη μικρότερου κόστους.

Ο αριθμός των μονάδων εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- ✓ Τη διαθέσιμη παροχή, από την οποία εξαρτάται και η συνολική εγκατεστημένη ισχύ.
- ✓ Την επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών του υδροστροβίλου.
- ✓ Την ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου, που με τη σειρά της συμβάλει στον καθαρισμό του μεγέθους, του βάρους και του κόστους των Η/Μ και των έργων πολιτικού μηχανικού.
- ✓ Τη μορφολογία και τη γεωλογία της περιοχής, που προσδιορίζει το πλήθος των αγωγών προσαγωγής, τη διάταξη του ΥΗΣ (χώρος των βαννών, χώρος συναρμολόγησης, βοηθητικοί χώροι κλπ.) και την κατασκευή του ΥΗΕ σε περισσότερες από μία φάσεις
- ✓ Τη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα και την καμπύλη διάρκειας της παροχής.

[Πολυζάκης Απ., 2019]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπανίκας Δ., (2010), Εφαρμοσμένη Ρευστομηχανική, Φ. ΠΑΠΑΝΙΚΑΣ & ΣΙΑ Ο.Ε., Media Guru, Ελλάδα,
 2. Παπαντώνης Δ., (2009), Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστροβίλοι. Υδροδυναμικές Μεταδόσεις, Εκδόσεις Συμεών, Ελλάδα,
 3. Πολυζάκης Απ., (2019), Ρευστοδυναμικές Μηχανές: Στροβιλομηχανές – Υδροδυναμικές Μηχανές (Θεωρία – Λυμένες Ασκήσεις), Heat Cool Power, Ελλάδα,
 4. Σούλης Ι., (2004), Υδραυλικαί Στροβιλομηχαναί – Μηχανική Ρευστών 1ος Τόμος – Υδροστροβίλοι, Εκδόσεις Αϊβάζης, Ελλάδα
 5. Γεωργίτσας Α. & Σίννης Α., (2010), Μελέτη και Περιγραφή του Μύης Γλαύκου, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, pp.33-52
 6. Ευαγγελάτος Α., (2016), Μελέτη Εγκατάστασης Παραγωγής Ενέργειας Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου Γλαυκού, Τεχνολογικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., pp. 26-45 & 100-127
 7. Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ. & Μαμάσης Ν. (2018), Ανανεώσιμη Ενέργεια και Υδροηλεκτρικά Έργα - Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, pp.1-15
 8. Μέγα, Ν. Μ., (2009), Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα στις Ορεινές Περιοχές και Επιπτώσεις τους στο Περιβάλλον, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Δ.Π.Μ.Σ.) "Περιβάλλον Και Ανάπτυξη" 2η Κατεύθυνση Σπουδών «Περιβάλλον Και Ανάπτυξη Των Ορεινών Περιοχών», pp. 14-30 & 33-71
 9. Μένου Ελ., (2023), Τα Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα της Ελλάδας και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Διαχείριση Τεχνικών Έργων», pp. 14-30
 10. Τζαμάκου Ευτ., (2018), Στοιχεία Σχεδιασμού Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων Με Εφαρμογή Στο Νομό Άρτας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείριση Τεχνικών Έργων, pp. 31-41
 11. Χαλακατεβάκη Μ., (2020), Αρχές Σχεδίασης Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, pp.14-29, 44-54 & 125-133,
 12. Andaroodi M., (2005), Standardization of civil engineering works of small hydropower plants and development of an optimization tool, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland,
 13. Betamio A. & Ramos H., (1998), Hydraulic Computational Advances In The Design Of Small Hydropower Plants, W.R. BLAIN, Wessex Institute of Technology, United Kingdom,
- Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας ΕΑΠ

14. Petley S. M., (2018), Numerical and Experimental Investigation of Flow in Horizontal Axis Pelton, Lancaster University, United Kingdom

Αναφορά σε Ιστοσελίδες

1. www.youtube.com/watch?v=_m2zJEi4Awg
2. www.bflhydro.com
3. www.geocities.com
4. www.toshiba.co.jp
5. www.sfrang.com/historia/selida625.htm
6. www.turbogen-engineering.com
7. www.energotech.com