

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΟΥ
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ»



Των φοιτητών
Κανιούρα Βασίλειου
Αρ. Μητρώου: 515324
Κιοπελή Ιωάννη
Αρ. Μητρώου: 518057

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο
Κιοσκερίδης Ιορδάνης
Καθηγητής

06/09/2026, Θεσσαλονίκη 2025

Ονοματεπώνυμο φοιτητή/τών
Κανιούρας Βασίλειος
Κιοπελής Ιωάννης
Ονοματεπώνυμο εισηγητή
Κιοσκερίδης Ιορδάνης
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 30/09/2024
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 05/09/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Κανιούρα Βασίλειου και Κιοπελή Ιωάννη που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιερώνουμε την παρούσα εργασία στις οικογένειες μας για την υποστήριξη που μας δείχνουν σε κάθε
μας βήμα.»*

Πρόλογος

Η αυξανόμενη ανάγκη για αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το βασικό κίνητρο για την επιλογή της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας. Ειδικότερα, η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το πεδίο των Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, καθώς η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού συνδυάζει ηλεκτρικές μηχανές, ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος, αισθητήρες, συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού, καθώς και διεργασίες μέτρησης και παρακολούθησης λειτουργικών παραμέτρων.

Η επιλογή του θέματος βασίστηκε, επομένως, στη δυνατότητα σύνδεσης της θεωρητικής γνώσης που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια των σπουδών με την πρακτική ανάπτυξη μιας εργαστηριακής υδροηλεκτρικής κατασκευής. Μέσω του σχεδιασμού και της κατασκευής της δόθηκε η δυνατότητα εφαρμογής γνώσεων σχετικών με τον έλεγχο ηλεκτροκινητήρων μέσω μετατροπέα, τη χρήση αισθητήρων και ηλεκτρονικών διατάξεων, τη λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτριας και τη διαχείριση των αντίστοιχων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Η διαδικασία αυτή συνέλαβε στην ανάπτυξη πρακτικών δεξιοτήτων σχεδιασμού, διασύνδεσης, ελέγχου και αξιολόγησης ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρομηχανολογικού συστήματος, ενισχύοντας παράλληλα την κατανόηση της εφαρμογής των ηλεκτρονικών συστημάτων στον τομέα της ενέργειας.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται τη μελέτη της υδροηλεκτρικής ενέργειας και την ανάπτυξη μιας λειτουργικής πειραματικής κατασκευής μικρής κλίμακας, με σκοπό την αναπαράσταση της μετατροπής της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των υδροηλεκτρικών συστημάτων, οι κύριοι τύποι εγκαταστάσεων και τα βασικά ηλεκτρομηχανολογικά τους στοιχεία.

Στο πρακτικό μέρος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε κλειστό υδραυλικό κύκλωμα, αποτελούμενο από δεξαμενές νερού, αντλία ελεγχόμενη μέσω μετατροπέα, σωληνώσεις, ψηφιακό μανόμετρο, ηλεκτροκίνητη βάνα και σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής τάσης. Κατά την ανάπτυξη πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες δοκιμές με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις. Η αρχική λύση, η οποία βασίστηκε σε πειραματικό υδροστρόβιλο τύπου Francis και ξεχωριστή γεννήτρια, δεν απέδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα παρά τις τροποποιήσεις στις συνθήκες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε τελικά αντλία ψυκτικού υγρού, η οποία αξιοποιήθηκε αντίστροφα ως μηχανή παραγωγής.

Οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν στην πίεση του υδραυλικού κυκλώματος και στην παραγόμενη ηλεκτρική τάση. Στη μέγιστη εξεταζόμενη πίεση των 1,34 bar καταγράφηκε τάση περίπου 77 V AC. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τη λειτουργικότητα της πειραματικής κατασκευής και τη δυνατότητα μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική, αναδεικνύοντας παράλληλα τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη μικρή κλίμακα και τον διαθέσιμο εξοπλισμό.

«Study and Desing of a small Hydroelectric Power Plant»

«Kaniouras Vasilios»

«Kiopelis Ioannis»

Abstract

This thesis focuses on the study of hydropower energy and the development of a functional small-scale experimental setup, aiming to demonstrate the conversion of water energy into electrical energy. Initially, the basic operating principles of hydropower systems, the main types of hydropower installations, and their basic electromechanical components are presented.

In the practical part, a closed-loop hydraulic system was designed and constructed, consisting of water tanks, a pump controlled through a variable frequency drive (VFD), piping, a digital pressure gauge, an electrically controlled valve, and an electrical generation system. During the development of the experimental setup, several tests were carried out using two different configurations. The first configuration was based on an experimental Francis-type hydraulic turbine connected to a separate generator. However, despite modifications to the operating conditions, the desired results were not achieved. Therefore, a coolant pump was finally selected and used in reverse as an electrical generating machine.

The measurements mainly focused on the pressure of the hydraulic circuit and the generated electrical voltage. At the maximum tested pressure of 1.34 bar, an output voltage of approximately 77 V AC was recorded. The results confirmed the functionality of the experimental setup and demonstrated the conversion of hydraulic energy into electrical energy. At the same time, the experimental procedure highlighted the limitations resulting from the small scale of the construction and the available equipment.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς μας ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κιοσκερίδη Ιορδάνη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, χάριν του οποίου καταφέραμε να ολοκληρώσουμε την παρούσα εργασία στα πλαίσια των σπουδών μας. Η καθοδήγησή του και η εμπιστοσύνη που μας έδειξε στάθηκαν σημαντικοί παράγοντες για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στις οικογένειες και στους φίλους μας, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας, προσφέροντας πολύτιμη υποστήριξη και ενθάρρυνση.

Ειδικές ευχαριστίες στον Βασίλη Σάντα για τη δωρεά εξοπλισμού που συντέλεσε στην ολοκλήρωση της πειραματικής κατασκευής. Τέλος, ευχαριστούμε όσους μας στήριξαν ηθικά για την ολοκλήρωση της συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iiiv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viiiviii
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες.....	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Τίτλος Κεφαλαίου	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας.....	3
1.3 Υδροηλεκτρική Ενέργεια	4
1.4 Υδροηλεκτρική Ενέργεια στην Ελλάδα	6
1.5 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί.....	7
1.5.1 Τμήματα Υδροηλεκτρικού Σταθμού	1Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.5.2 Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΜΥΣ).....	15
1.5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΜΥΣ).....	16
1.6 Σύγχρονες Εξελίξεις	18
Κεφάλαιο 2ο: Φράγματα Υδροηλεκτρικών Σταθμών	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Τύποι Φραγμάτων Υδροηλεκτρικών Σταθμών	22
2.3 Σύγχρονες Εξελίξεις και Προκλήσεις.....	25
Κεφάλαιο 3ο: Υδροστρόβιλοι	2Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.1 Εισαγωγή	227
3.2 Τύποι Υδροστροβίλων.....	2Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
3.2.1 Υδροστρόβιλοι αντίδρασης	29
3.2.1.1 Υδροστρόβιλοι Francis.....	30
3.2.1.2 Υδροστρόβιλοι Kaplan.....	32
3.2.1.3 Βολβοειδής Υδροστρόβιλος και Υδροστρόβιλος Αξονικής Ροής.....	33
3.2.2 Υδροστρόβιλοι Δράσεως.....	35
3.2.2.1 Υδροστρόβιλοι Pleton	35
3.2.1.2 Υδροστρόβιλοι Cross Flow ή Bianki	36

3.2.2.3	Υδροστρόβιλοι Turgo.....	37
3.3	Σύνοψη Υδροστροβίλων και Καμπύλες Απόδοσης	37
3.4	Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πλαστήρα.....	39
3.4.1	Φράγμα και Ταμιευτήρας Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ν. Πλαστήρα	39
3.4.2	Περιγραφή Μονάδων Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ν. Πλαστήρα.....	41
Κεφάλαιο 4ο:	Μεθοδολογία και Σχεδιασμός Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού.....	44
4.1	Σκοπός του Σχεδιασμού	44
4.2	Μεθοδολογία.....	44
4.3	Περιγραφή Κατασκευής.....	46
4.3	Περιγραφή Κατασκευής.....	46
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		57
ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....		61
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		64

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Ορόσημα στην ανάπτυξη των μηχανών υδροηλεκτρικής ενέργειας	2
Εικόνα 1.1: Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Έντισον στο Άπλετον του Ουισκόνσιν, το 1882.....	3
Εικόνα 1.3: Digital governor DGC-89 of Voest-Alpine M.C.E.....	4
Εικόνα 1.4: Turbine controlling system DTL 595 of Sulzer Escher	4
Εικόνα 1.5: Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας	5
Εικόνα 1.6: Διάγραμμα υδροηλεκτρικού σταθμού με το επίπεδο του προθαλάμου και το επίπεδο του κατωτάτου σημείου και το ύψος πτώσης	6
Εικόνα 1.7: Χάρτης της Ελλάδας με ένδειξη του ύψους βροχής και τα ΥΗΕ που είναι ήδη σε λειτουργία ή έχουν αδειοδοτηθεί.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 1.8: Κατασκευή συστήματος ακτινικό δίκτυο διανομής συνδεδεμένο με υδροηλεκτρικό σταθμό	9
Εικόνα 1.9: Typical reservoir-based hydropower project components	11
Εικόνα 1.10: Run-of-river hydropower designs. Left: a project with no dam (diversion-based); Right: a project with a dam that operates as a spillway	11
Εικόνα 1.11: Pumped storage hydropower.....	12
Εικόνα 2.1: Ιστορική αναδρομή της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τον όγκο αποθήκευσης των παγκόσμιων φραγμάτων	21
Εικόνα 2.2: Φράγμα Χούβερ.....	23
Εικόνα 2.3: Φράγμα Χούβερ.....	23
Εικόνα 2.4: Φράγμα Grand Coulee	24
Εικόνα 2.5: Φράγμα Itaipu	24
Εικόνα 2.6: Φράγμα των Τριών Φαραγγιών στην Κίνα.....	25
Εικόνα 3.1: Υδροστρόβιλος	27
Εικόνα 3.2: Υδροστρόβιλοι και γεννήτριες μέσα στο σταθμό	29
Εικόνα 3.3: Εγκατάσταση με τουρμπίνα αντίδρασης (Francis)	30
Εικόνα 3.4: Francis turbine	30
Εικόνα 3.5: Στρόβιλος Francis	31
Εικόνα 3.6: Κύρια μέρη τουρμπίνας Kaplan.....	33
Εικόνα 3.7: A turbine connected to a generator produces power inside a dam.....	34
Εικόνα 3.8: Στρόβιλος Pelton.....	36
Εικόνα 3.9: Εγκατάσταση με τουρμπίνα ώθησης (Pelton).....	36
Εικόνα 3.10: Υδροστρόβιλος Cross-Flow.....	3Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 3.11: Υδροστρόβιλος Cross-Flow.....	3Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Εικόνα 3.12: Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ν.ΠΛΑΣΤΗΡΑ	39
Εικόνα 3.13: Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ν.ΠΛΑΣΤΗΡΑ – Αξιοποίηση των υδάτων τη λίμνης Πλαστήρα	40
Εικόνα 4.1: Ηλεκτρικός πίνακας με μετατροπέα συχνότητας (inverter) για τον έλεγχο της αντλίας παροχής του υδραυλικού κυκλώματος.....	46
Εικόνα 4.2: Πίνακας διαχείρισης κυκλώματος και βάνας παροχής της τουρμπίνας.....	47
Εικόνα 4.3: Αντλία παροχής νερού και φωτοκύτταρο ένδειξης ύπαρξης νερού στο κύκλωμα	47
Εικόνα 4.4: Αντλία παροχής νερού και φωτοκύτταρο ένδειξης ύπαρξης νερού στο κύκλωμα	48
Εικόνα 4.5: Αντλία παροχής νερού και φωτοκύτταρο ένδειξης ύπαρξης νερού στο κύκλωμα	48
Εικόνα 4.6: Δοχείο νερού.....	49
Εικόνα 4.7: Μανόμετρο ένδειξης πίεσης κυκλώματος	49

Εικόνα 4.8: Βάνα Belimo LR24A-SR με ηλεκτρονικό χειρισμό από το κοντρόλερ του πίνακα.....	50
Εικόνα 4.9: Βάνα Belimo LR24A-SR με ηλεκτρονικό χειρισμό από το κοντρόλερ του πίνακα.....	50
Εικόνα 4.10: Αντλία ψύξης που χρησιμοποιείται σαν δυναμό	51
Εικόνα 4.11: Αντλία ψύξης που χρησιμοποιείται σαν δυναμό	51
Εικόνα 4.12: Κατασκευή τριών πυκνωτών χωρητικότητας 2 μF έκαστος στο ηλεκτρικό κύκλωμα της μηχανής που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια	52
Εικόνα 4.13: Πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis - τουρμπίνα (αλλά όχι με 100% ακρίβεια γιατί η πρωτότυπη έχει μεταβλητά πτερύγια)	53
Εικόνα 4.14: Πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis - τουρμπίνα (αλλά όχι με 100% ακρίβεια γιατί η πρωτότυπη έχει μεταβλητά πτερύγια)	53
Εικόνα 5.1: Μεταβολή της παραγόμενης τάσης (V AC) σε συνάρτηση με την πίεση του υδραυλικού κυκλώματος (bar)	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Summary of international SHP power capacity definitions.....	9
Πίνακας 1.2: Variation in SHP classification by power capacity.....	15
Πίνακας 3.1: Βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων	38
Πίνακας 5.1: Πειραματικές μετρήσεις συχνότητας λειτουργίας της αντλίας, πίεσης νερού και παραγόμενης τάσης AC.....	58

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
ΥΗΣ	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΜΥΣ	Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί
ΣΡ	Συνεχούς Ρεύματος
DGC	Digital Genset Controllers
CFD	Computational Fluid Dynamics
ROR	Run-of-river
PS	Pumped Storage
PHES	Pumped Hydro Energy Storage
RTDS	Real Time Digital Simulator
BEP	Best Efficiency Point

Κεφάλαιο 1ο: Υδροηλεκτρική Ενέργεια

1.1 Εισαγωγή

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας έχει αυξηθεί δραματικά και συνδέεται τόσο με την αύξηση του πληθυσμού, όσο και με την οικονομική ανάπτυξη. Η χρήση ορυκτών καυσίμων, κυρίως άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου, κυριάρχησε από τον 18ο αιώνα και μετά, προσφέροντας φθηνή ενέργεια αλλά με σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και το κλίμα, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας και αλλοιώσεις σε φυσικά συστήματα. Στις μέρες μας, το έντονο περιβαλλοντικό αντίκτυπο των συμβατικών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, το οποίο αδυνατεί πλέον να καλύψει τις πραγματικές ενεργειακές ανάγκες, απαιτεί προσπάθειες εύρεσης νέων τρόπων κάλυψης των αναγκών αυτών, χωρίς όμως να επιβαρύνεται το περιβάλλον. Σε αντίθεση με άλλες συμβατικές μορφές ενέργειας, όπως η ενέργεια που δημιουργείται μέσω ορυκτών πυρηνικών καυσίμων (mineral nuclear fuels), η χημική, το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, υπάρχουν μορφές ενέργειας που είναι ανεξάντλητες σε σχέση με τις προηγούμενες. Ταυτόχρονα, αποτελούν τις πιο καθαρές και περιβαλλοντικά φιλικές πηγές ενέργειας, οι οποίες υποστηρίζουν την ολοκληρωτική ενεργειακή μετάβαση σε τεχνολογίες μηδενικών ρύπων (Καραμάνης, 2022) [1]. Τέτοιες μορφές ενέργειας είναι γνωστές ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Renewable Energy Sources) και τα τελευταία χρόνια το ποσοστό συμμετοχής τους στη συνολική κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει συνεχή αύξηση (Καραμάνης, 2022) [1]. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν χώρες, όπως η Νορβηγία, η Ισλανδία, η Κόστα Ρίκα και η Ουρουγουάη, οι οποίες κατάφεραν να καλύψουν το 70% ή και σχεδόν το 100% των ενεργειακών τους αναγκών τους αντίστοιχα, μέσω της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Επίσης, πολλές χώρες θέτουν ως στόχο την κάλυψη μεγάλου μέρους της ενέργειάς τους από ΑΠΕ έως το 2050, με ενδιάμεσες αυξήσεις των ποσοστών μέχρι το 2030, ενόψει της ενεργειακής μετάβασης (Καραμάνης, 2022) [1]. Στην ΕΕ, παρατηρείται μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και σταδιακή στροφή προς ανανεώσιμες πηγές, αν και η εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα παραμένει υψηλή.

Στην Ελλάδα, η οικονομική κρίση της δεκαετίας 2009-2019 παρουσίασε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως λόγω της υποχώρησης της χρήσης πετρελαίου και λιγνίτη (Καραμάνης, 2022) [1]. Για την Ελλάδα, η παύση χρήσης λιγνίτη αποτελεί εθνικό στόχο έως το 2028 και κυρίως η ενεργειακή μετάβαση σε ΑΠΕ. Η ενεργειακή μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο και καθαρό σύστημα απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και τεχνογνωσία, αλλά προσφέρει και σημαντικά οικονομικά οφέλη, όπως μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας. Η στροφή προς ΑΠΕ δεν αποτελεί μόνο περιβαλλοντική ανάγκη, αλλά και οικονομική ευκαιρία για μακροπρόθεσμη

σταθερότητα και ανάπτυξη, ιδίως σε χώρες όπως η Ελλάδα. Η ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα το 2019 ανήλθε σε 15,41 Mtoe, με τις μεταφορές και τις κατοικίες να απορροφούν το 66% της τελικής κατανάλωσης. Το πετρέλαιο παραμένει ο κύριος ενεργειακός πόρος (53,5%), ενώ οι ΑΠΕ, παρά την πρόοδο, καλύπτουν μικρό ποσοστό των συνολικών αναγκών. Η εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και η ενεργοβόρα βιομηχανία αυξάνουν το ενεργειακό κόστος και περιορίζουν την ανταγωνιστικότητα. Η μετάβαση σε καθαρές μορφές ενέργειας, ειδικά στους τομείς των μεταφορών, των κατοικιών και της βιομηχανίας, αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για την οικονομική βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική ισορροπία της χώρας.

Στην κατηγορία των ΑΠΕ ανήκουν οι εξής (Καραμάνης, 2022; Niladri SR, 2022) [1,2]:

- **Ηλιακή Ενέργεια:** Χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και μπορεί να συλλεχθεί και να μετατραπεί σε χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμότητα ή ηλεκτρισμός, μέσω κατάλληλων τεχνολογικών συστημάτων.
- **Αιολική Ενέργεια:** Ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας που δημιουργείται από τον αέρα σε κίνηση. Ο άνεμος αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- **Υδροηλεκτρική Ενέργεια:** Ορίζεται η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την κινητική ενέργεια που προκαλείται μέσω της συνεχόμενης ροής του νερού (Niladri SR, 2022)[2], με την βοήθεια υδροστροβίλων και γεννητριών.
- **Γεωθερμική Ενέργεια:** Ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης εξαιτίας «της ηφαιστειότητας και των γεωτεκτονικών συνθηκών των περιοχών και δεν συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με την ηλιακή ακτινοβολία».
- **Βιομάζα:** Θεωρείται «το σύνολο της ύλης με οργανική προέλευση και περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό προέρχεται έμμεσα ή άμεσα από ζωντανούς οργανισμούς», που μετά από ειδική επεξεργασία παράγονται στερεά , υγρά ή αέρια καύσιμα.

Από τις παλαιότερες και πιο αξιόπιστες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια, με τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η βιβλιογραφία των τελευταίων ετών (2015-2026) παρέχει εκτενή τεκμηρίωση των φυσικών αρχών, των τεχνολογικών εξελίξεων και των μηχανισμών μετατροπής ενέργειας που χαρακτηρίζουν αυτά τα συστήματα. Η υδροηλεκτρική ενέργεια θεωρείται μια καθαρή πηγή που δεν παράγει ατμοσφαιρικούς ρύπους ή απόβλητα που σχετίζονται με την καύση καυσίμων (Tsotie & Wamkeue, 2016) [3]. Υπό αυτή την οπτική γωνία οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μικρής κλίμακας εγείρουν την διεθνή προσοχή καθώς αποτελούν αξιόπιστη και ευέλικτη επιλογή ανανεώσιμης ενέργειας (Klein & Fox, 2022) [4]. Το ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο ηλεκτρικό σύστημα αυξήθηκε από 20,4% το 2011 σε 28,3% το 2021, με την υδροηλεκτρική ενέργεια να κατέχει το

μεγαλύτερο μερίδιο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (Akbari et al., 2022; RGSR, 2022) [5,6].

1.2 Ιστορική αναδρομή Υδροηλεκτρικής Ενέργειας.

Σύμφωνα με τον Fasol, K. H. (2002) [7], η πορεία και η εξέλιξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας και των υδροδυναμικών μηχανών δεν είναι κάτι πρόσφατο, αλλά εκτείνεται από τους αρχαίους πολιτισμούς έως τις σύγχρονες ψηφιακές τεχνολογίες, γεγονός που την καθιστά την πλέον ώριμη και καθιερωμένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας. Ήδη από την αρχαιότητα, και σύμφωνα τον Steller J. (2013) [8] «η ιστορία της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρονολογείται από 5000 χρόνια πριν», με την αξιοποίηση της ροής των ποταμών μέσω νερόμυλων να αποτελεί το πρώτο στάδιο μιας μακρόχρονης τεχνολογικής πορείας, η οποία σήμερα κορυφώνεται με την εφαρμογή εξελιγμένων, ψηφιακών και προγραμματιζόμενων συστημάτων ελέγχου (Fasol, K. H. (2002; Sari et al., 2024) [7,9]. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο σε κείμενα των Φίλωνος του Βυζαντίου και Μάρκου Βιτρούβιου Πόλλιο (3ος αι. π.Χ. και 1ος αι. μ.Χ. αντίστοιχα), όσο και αρχαιολογικά ευρήματα επιβεβαίωσαν την πρώιμη χρήση νερόμυλων («που κινείται μέσω υδρότροχου και οδοντωτών τροχών») και πρώιμων τουρμπινών υδροηλεκτρικής ενέργειας να αξιοποιούνταν στην Κίνα. Ωστόσο αρχικά εμφανίστηκαν πριν από δύο χιλιετίες στην αρχαία Ελλάδα και στην Ρώμη, για την άλεση δημητριακών όσο και για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων (J. Raabe, 1987), (Fasol, K.H. 2002; Steller J., 2013) [7,8,10]. Επιπλέον, στην Ευρώπη κατά την περίοδο του Μεσαίωνα ο υδραυλικός τροχός ήταν το σημαντικότερο εργαλείο για την παραγωγή ισχύος, με σκοπό να κινηθούν ανελκυστήρες, σφυρόμυλοι, φουσητήρες για υψικαμίνους και μύλοι άλεσης, χρησιμοποιήθηκαν παλιρροιακοί μύλοι, και πλωτοί νερόμυλοι, οι οποίοι ήταν διαδεδομένοι έως και τον 18ο αιώνα (Fasol, K.H. 2002; Steller J., 2013) [7,8].

Η ταχεία ανάπτυξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας άρχισε με τη Βιομηχανική Επανάσταση, με την ανάπτυξη των Υδροστροβίλων να ξεκινά από τον 16^ο αιώνα και φτάνει μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα (Steller J., 2013) [8]. Κατά την περίοδο αυτή οι θεωρητικές και πρακτικές βελτιώσεις στους υδραυλικούς τροχούς αυξήθηκαν, θέτοντας τα θεμέλια για τη δημιουργία των πρώτων υδροστροβίλων, με τον Λεονάρντο ντα Βίντσι να δημιουργεί σκίτσα που μοιάζουν σχεδόν με τους υδροστροβίλους όπως παρουσιάζονται σήμερα (Fasol, K.H. 2002) [7]. Της χρονολογίας 1737 και 1738, ο B.F. Bélidor κατασκεύασε έναν υδροτροχό με καμπυλωτές λεπίδες, επιτυγχάνοντας καλύτερη αλληλεπίδραση με τη ροή του νερού και ο Daniel Bernoulli παρουσίασε μια πρωτοποριακή θεωρία υδροδυναμικής που επηρέασε βαθιά τον σχεδιασμό υδραυλικών μηχανισμών, αντίστοιχα. Ο πρώτος αντιδραστικός στρόβιλος κατασκευάστηκε από τον Johann Segner το 1750 και μετέπειτα, σημαντική ήταν και η συμβολή του Leonhard Euler, το 1754, διατυπώνοντας το θεωρητικό υπόβαθρο για υδρομηχανές με οδηγούς ροής, χωρίς να χρησιμοποιηθεί ο όρος «στρόβιλος» (Steller J., 2013) [8]. Μετά το 1770, παρατηρείται συνεχής βελτίωση των υδροτροχών, με τη χρήση νέων υλικών, όπως ο χυτοσίδηρος, ανάπτυξη μηχανισμών ρύθμισης ταχύτητας, χωρίς ωστόσο άμεση πρακτική εφαρμογή (Fasol, K.H. 2002) [7].

Η ουσιαστική μετάβαση από τον υδροτροχό στον στρόβιλο ξεκίνησε το 1825 με τον Jean Victoire Poncelet, ο οποίος σχεδίασε έναν υδροτροχό με καμπυλωμένες λεπίδες, μειώνοντας σημαντικά τις εσωτερικές απώλειες ενέργειας. Παράλληλα, εισήγαγε ένα μηχανικό σύστημα που επέτρεπε την τροποποίηση της ροής, προσομοιάζοντας στα μετέπειτα πετρώγια κατεύθυνσης (wicket gates). Κατά την ίδια περίοδο, άλλοι μηχανικοί εφάρμοσαν αντίστοιχες ιδέες, βασισμένες στη θεωρία του Euler, για την καθοδήγηση της ροής προς τη δρομέα, προετοιμάζοντας το έδαφος για την εμφάνιση των πρώτων πραγματικών στροβίλων. Αυτές οι μηχανές αρχικά δεν ονομάζονταν στρόβιλοι αλλά υδραυλικά γυροσκοπία ή προωθητήρες, με τον όρο «turbine» να αποδίδεται πιθανώς στον M. Burdin το 1824 (Fasol, K.H. 2002) [7].

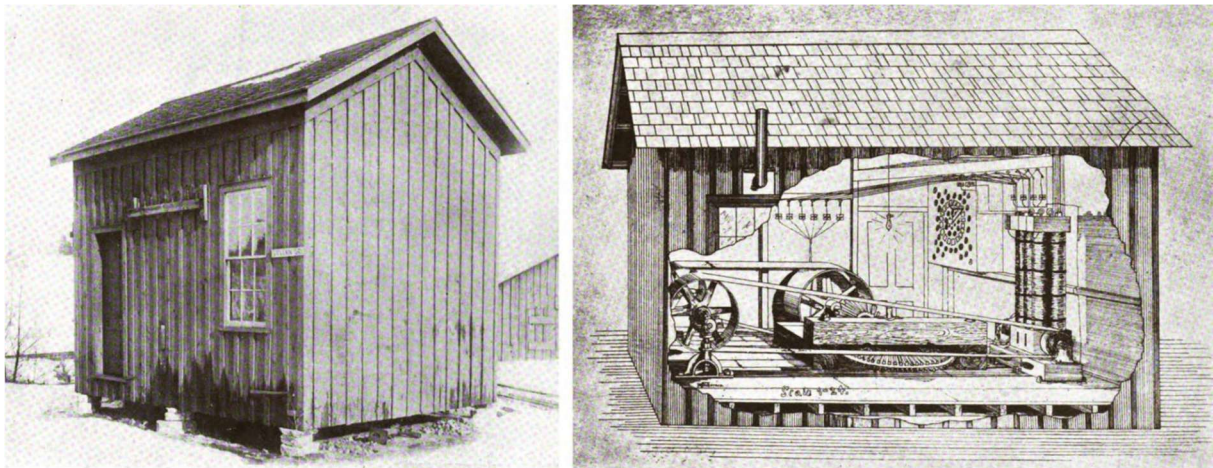
Year	Designer	Development essence
1750	J.A. Segner	Segner mill – the first reaction water turbine
1754	L. Euler	Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la force de réaction l'eau – fundamentals of the water turbine theory
1828	F.Girard	impulse turbine with vertical shaft and axial flow
1827	B. Fourneyron	high-head reaction turbine with radial guide vane and centrifugal runner with vertical axis
1836	S. Howd	reaction turbine with centrifugal runner (U.S. patent)
1837	C.A. Henschel	low-head vertical reaction turbine with axial-flow, the first use of a suction tube
1848	F.W. Schwamkrug	impulse turbine with horizontal axis, fed by nozzle from the shaft side
1848	J.B. Francis	research and upgrade of the Howd turbine (later known as Francis turbine)
1851	L. D. Girard	regulated impulse turbine with vertical shaft and axial flow
1859	C.L. Fink	Francis turbine distributor with adjustable vanes (patent)
1869	A.M. Swain	flow deflection in Francis runner in the axial direction
1880	Pfarr/J.M. Voith	spiral chamber upstream of Francis turbine distributor
1881	T. Edison	the first hydroelectric power plant (Appleton, Wisconsin, USA)
1883	L. Pelton	impulse turbine with the runner driven by liquid jet(s) directed tangentially to its circumference and striking the buckets placed on it
1904	F. Lawaczeck	reaction turbine with diagonal runner without outer ring (Harnrode, Germany)
1917	V. Kaplan	turbine with an axial runner with adjustable blade (Austrian Patent No. 74 244; August 1913)
1919	V.Kaplan/ I.Storek	the first hydroelectric set with Kaplan turbine (Velm, Lower Austria)
1919	L.S. Harza	tubular turbine (straflo) with runner blade tips mounted in the generator rotor (U.S. Patent No. 1 485 186)
1930	E. Wyss	the first axial pump-turbine (Baldeney, Germany)
1936	J.M. Voith	the first radial pump-turbines (Pedreira, Brazil)
1936	A. Fischer/ E. Wyss	the first bulb turbines (Roscino at the Parsęta River Pomerania)
1937–1951		73 straffo hydroelectric sets in the Lech, Iller and Sallach rivers (Germany)
1956	P. Deriaz	double-regulated diagonal pump-turbines (Niagara Falls)
1962	Neyrpic	bulb pump-turbines for La Rance tidal power station (pump and turbine operation in both directions)
1982	E. Wyss	the first straffo hydroelectric set with adjustable runner blades
1990	Toshiba	reversible hydroelectric set with variable rotation speed (Yasagawa)
after 1990	various	systems for sea wave energy conversion: Limpet (Wavegen/Voith), Wave Dragon (E.F. Madsen), Pelamis (Pelamis Wave Power) etc.
after 2000	various	underwater marine power plants with hydrokinetic turbines: SeaGen (MCT/Siemens), MeyGen (Andritz), OpenHydro, TGL etc.

Εικόνα 1.1. Ορόσημα στην ανάπτυξη των μηχανών υδροηλεκτρικής ενέργειας (Steller J., 2013) [8]

Το 1837, ο Carl A. Henschel ανέπτυξε έναν υδροστρόβιλο με σταθερό πετρώγιο κατεύθυνσης και ρύθμιση ροής μέσω βαλβίδας τύπου πεταλούδας, ενισχύοντας τον έλεγχο της υδραυλικής ενέργειας. Στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού, ο James B. Francis συνέβαλε σημαντικά στη βελτίωση των στροβίλων, ενσωματώνοντας κυκλικά πετρώγια κατεύθυνσης και σπειροειδές περιβλήμα. Περίπου το 1860, τα πετρώγια έγιναν ταυτόχρονα ρυθμιζόμενα, επιτρέποντας τη χρήση φυγοκεντρικών ρυθμιστών για τον έλεγχο της ταχύτητας. Αυτές οι καινοτομίες σηματοδότησαν την απαρχή της μετάβασης από μηχανικές σε πιο αυτοματοποιημένες μορφές ελέγχου, καθιερώνοντας την έννοια του υδροστρόβιλου ως βασικού στοιχείου για την εξέλιξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας (Fasol, K.H. 2002) [7].

Στο τέλος του 19ου αιώνα, η υδροηλεκτρική ενέργεια άρχισε να συνδέεται άμεσα με την παραγωγή και αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, σύμφωνα με τον Oud E., (2002) [11], το 1880 εμφανίστηκαν οι πρώτοι μονοσκοπικοί (single purpose) υδροηλεκτρικοί σταθμοί, οι οποίοι μετέπειτα

εξελίχθηκαν σε πολυλειτουργικά έργα (multi-purpose). Συγκεκριμένα, για πρώτη φορά το 1882, στην πόλη Άπλετον του Ουισκόνσιν (βλ. Εικόνα 1.), λειτούργησε ένα εμπορικό υδροηλεκτρικό εργοστάσιο, το οποίο αξιοποιούσε τη δύναμη της ροής του νερού για την περιστροφή στροβίλου, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (Steller J., 2013; Allerhand, A., 2020; Sari et al., 2024)[8,9,12]. Ένα χρόνο αργότερα, ο L. Pelton κατασκεύασε μία τουρμπίνη ώθησης την οποία απλοποίησε το 1919 ο G. Gilkes και της έδωσε το όνομα Turgo (Steller J., 2013).

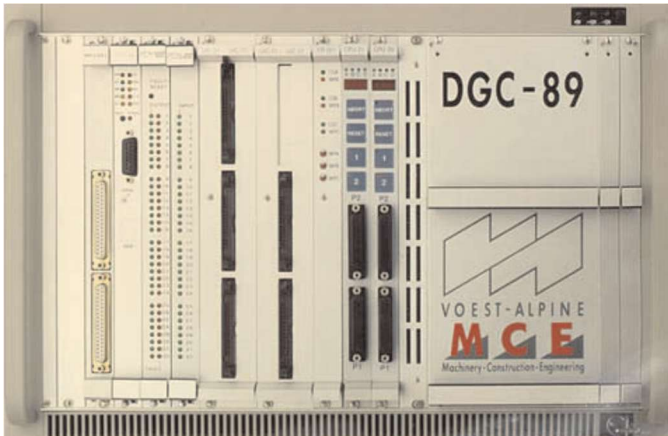


Εικόνα 1.2. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός του Έντισον στο Άπλετον του Ουισκόνσιν, το 1882. (W.M. Steuart, Central Electric Light and Power Stations. Washington, D.C.: Government Printing Office, 1902.), (Allerhand, A., 2020). [12,13]

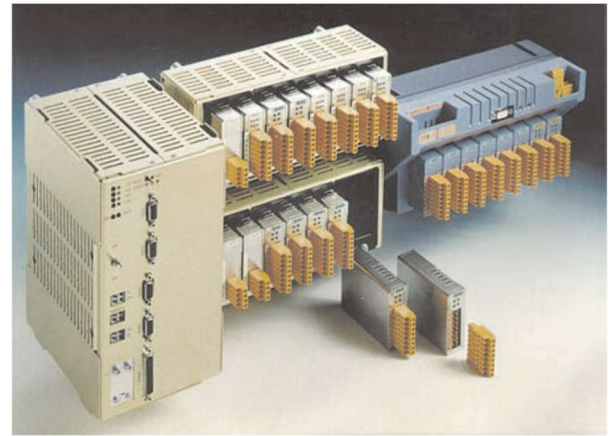
Η εφαρμογή αυτή αποτέλεσε ορόσημο, καθώς σηματοδότησε τη μετάβαση από την απλή μηχανική εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας τόσο στην πρακτική συμβολή της, όσο και στην ηλεκτροδότηση και την εκβιομηχάνιση. Περίπου την ίδια χρονική περίοδο (1880), καταγράφηκε αξιοποίηση συστημάτων ενίσχυσης ισχύος, γνωστών ως σερβοκινητήρες (servomotors), οι οποίοι κατέστησαν δυνατή την έμμεση ρύθμιση των πτερυγίων ή των βαλβίδων ροής, αντικαθιστώντας τους πρωτόγονους ρυθμιστές που απαιτούσαν άμεση μηχανική παρέμβαση. Η τεχνολογία αυτή συνέβαλε καθοριστικά στην αυτοματοποίηση των λειτουργιών των στροβίλων και στη βελτίωση της απόδοσης των υδροηλεκτρικών μονάδων (Fasol, K.H. 2002)[7].

Εν συνεχεία, κατά τον 20^ο αιώνα η υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσίασε ραγδαία ανάπτυξη σε επίπεδο τεχνικής υλοποίησης μέσω της κατασκευής μεγάλων φραγμάτων σε παγκόσμια κλίμακα, όπως τα εντυπωσιακά φράγματα Grand Coulee και Χούβερ στις Ηνωμένες Πολιτείες που ολοκληρώθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1930 και αποτέλεσαν δείγμα της τεχνολογικής ικανότητας της εποχής (Oud, E., 2002; Sari et al., 2024) [9,11]. Παράλληλα, έδωσε νέα ώθηση στην εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων, ενισχύοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συμβάλλοντας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Μέχρι τα μέσα του αιώνα, η υδροηλεκτρική ενέργεια εδραιώθηκε ως βασικός πυλώνας της παγκόσμιας ενέργειας, κατά τη δεκαετία του 1970 να αποτελεί το απόγειο της συνεισφοράς της (Sari et al., 2024) [9]. Στη χρονιά αυτή η κατασκευή του έργου Itaipu 12.000 MW στα σύνορα

Βραζιλίας-Παραγουάης αποτέλεσε ορόσημο και στα επόμενα χρόνια τέθηκαν σε λειτουργία τα περισσότερα υδροηλεκτρικά έργα (Oud, E., 2002)[11]. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 έως τα τέλη της δεκαετίας του 1990 η εξέλιξη των συστημάτων ελέγχου γεννητριών (Digital Genset Controllers, DGC) συνεχίστηκε με την εμφάνιση της τρίτης γενιάς ρυθμιστών – ψηφιακών, πολυεπεξεργαστικών μονάδων υψηλής ακρίβειας, με πρότυπα όπως το DGC-89, έως τα προηγμένα συστήματα (π.χ. DTL 595). Οι νέες τεχνολογίες παρέχουν δυνατότητες βελτιστοποίησης της λειτουργίας, προσαρμόζοντας τη γωνία των λεπίδων και των πτερυγίων κατεύθυνσης σε πραγματικό χρόνο (Fasol, K.H. 2002)[7].



Εικόνα 1.3. Digital governor DGC-89 of Voest-Alpine M.C.E., [7]



Εικόνα 1.4. Turbine controlling system DTL 595 of Sulzer Escher [7]

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η τεχνολογία των υδροστροβίλων γνώρισε σημαντική πρόοδο, με επίκεντρο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τον περιορισμό φαινομένων όπως η σπηλαίωση και την εφαρμογή προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics , CFD) για τον ακριβή σχεδιασμό τους. Η εντυπωσιακή ανάπτυξη του κλάδου καταδεικνύεται από την ολοκλήρωση του φράγματος Τριών Φαραγγιών στην Κίνα με ισχύ 22.500 MW, το 2012 (Steller J., 2013)[8].

Τα τελευταία χρόνια, η καινοτομία και η βιωσιμότητα αποκτούν πρωταγωνιστικό ρόλο στον σχεδιασμό υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Αυτό συμβαίνει λόγω των περιβαλλοντικών παραμέτρων και της αυξανόμενης οικολογικής ευαισθητοποίησης, οδηγώντας στην επανεξέταση των μεγάλων έργων και στην προώθηση πιο φιλικών λύσεων, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά συστήματα μικρής κλίμακας χωρίς σημαντική παρέμβαση στη φυσική ροή των ποταμών (Fasol, K.H. 2002)[7].

1.3 Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Οι Bahadori et al., (2013) και Aqel Mohammad et al., (2018) [14,15] θεωρούν ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ανανεώνονται φυσικά και δεν εξαντλούνται, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, και η βιοενέργεια. Αρκετές μελέτες αναδεικνύουν τη σημασία της υδροηλεκτρικής ενέργειας σε περιβαλλοντικό, οικονομικό και λειτουργικό επίπεδο καθώς θεωρείται μία από τις πιο ώριμες και

ανεπτυγμένες τεχνολογίες στον τομέα των ΑΠΕ και χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε πολλές χώρες, αφού αποτελεί καθαρή πηγή ενέργειας με χαμηλά ή και μηδαμινά επίπεδα επιπτώσεων σε ατμόσφαιρα, γη ή νερό, συνεισφέροντας στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Bahadori et al., 2013; Mohammad et al., 2018; Niladri SR, 2022) [2,14,15]. Οι Bahadori et al., (2013) και Aqel Mohammad et al., (2018) [14,15] σχολιάζουν πως η λειτουργία υδροηλεκτρικών σταθμών για την παραγωγή ρεύματος δεν καταναλώνει ούτε ρυπαίνει το νερό, γεγονός που επιτρέπει τη μελλοντική αξιοποίησή του και για άλλες χρήσεις. Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια θεωρείται ως ΑΕΠ παρέχει περίπου το 80% της ανανεώσιμης ενεργειακής ικανότητας, παράγοντας πάνω από το 16% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Andersson & Johansson, 2025) [16].

Ως Υδροηλεκτρική Ενέργεια ορίζεται η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας που προκαλείται μέσω της συνεχόμενης ροής του νερού από ρεύματα, ποτάμια ή παλίρροιες, με την βοήθεια υδροστροβίλων και γεννητριών (Saket, 2008; Mohammad et al., 2018; Καραμάνης, 2022; Niladri SR, 2022) [1,2,15,17]. Η βασική αρχή λειτουργίας της Υδροηλεκτρικής Ενέργειας, όπως περιγράφεται από τον Allerhand, A. (2020) [12], περιλαμβάνει την αξιοποίηση υδάτινων πόρων (π.χ. από μια λίμνη ή καταρράκτη), δηλαδή τη χρήση ενέργειας που προέρχεται από τον όγκο του νερού καθώς αυτό πέφτει ή ρέει. Έπειτα, το δεύτερο στάδιο της λειτουργίας της Υδροηλεκτρικής Ενέργειας είναι η χρήση στροβίλου (τουρμπίνας) που μετατρέπει την κινητική ενέργεια της δύναμης του νερού σε περιστροφική κίνηση. Το τρίτο στάδιο είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού που επιτυγχάνεται με την κίνηση που δίνει ο στρόβιλος σε μία δυναμοηλεκτρική γεννήτρια, ώστε να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, το παραγόμενο ρεύμα μεταδίδεται μέσω καλωδίων για χρήση σε φωτισμό ή άλλες εφαρμογές.



Εικόνα 1.5. Διάγραμμα μετατροπής ενέργειας

Οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται σε δύο κύριους παράγοντες: το υψόμετρο, δηλαδή την κατακόρυφη απόσταση πτώσης του νερού, και την παροχή, που αφορά τον ρυθμό εκφόρτισης. Η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού στην είσοδο του στροβίλου, που ονομάζεται στάθμη προθάλαμου, και της στάθμης του νερού στην έξοδο του στροβίλου, που ονομάζεται στάθμη εκροής καθορίζει τη δυναμική ενέργεια (βλ. Εικόνα 6) (Andersson & Johansson, 2025) [16]. Πιο συγκεκριμένα, παραγόμενη ισχύς από έναν στρόβιλο προσδιορίζεται από τη δυναμική ενέργεια που διαθέτει το νερό λόγω του υψομέτρου του. Η υψομετρική διαφορά (H) μαζί με

τη ροή του νερού μέσω του στροβίλου, που ονομάζεται παροχή (Q), η απόδοση του στροβίλου (η), η επιτάχυνση βαρύτητας (g) και η πυκνότητα του νερού (ρ) συνθέτουν την ισχύ (P) που παράγεται από έναν στρόβιλο και εκφράζεται από τις σχέσεις:

$$I = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{net}$$

I η ισχύς λειτουργίας (kW)

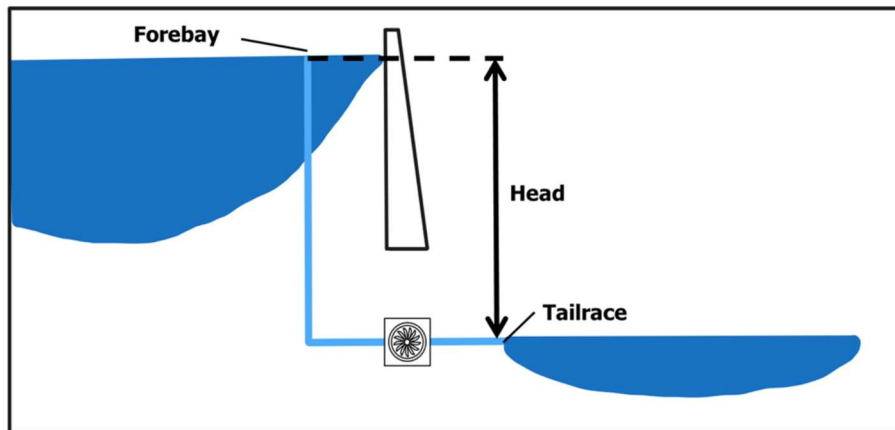
η ο βαθμός απόδοσης ($\eta = \eta_{\text{στροβίλου}} \cdot \eta_{\text{γεννήτριας}} \cdot \eta_{\text{μετασχηματιστή}}$)

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 εκ του στροβίλου παροχή (m^3/s)

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



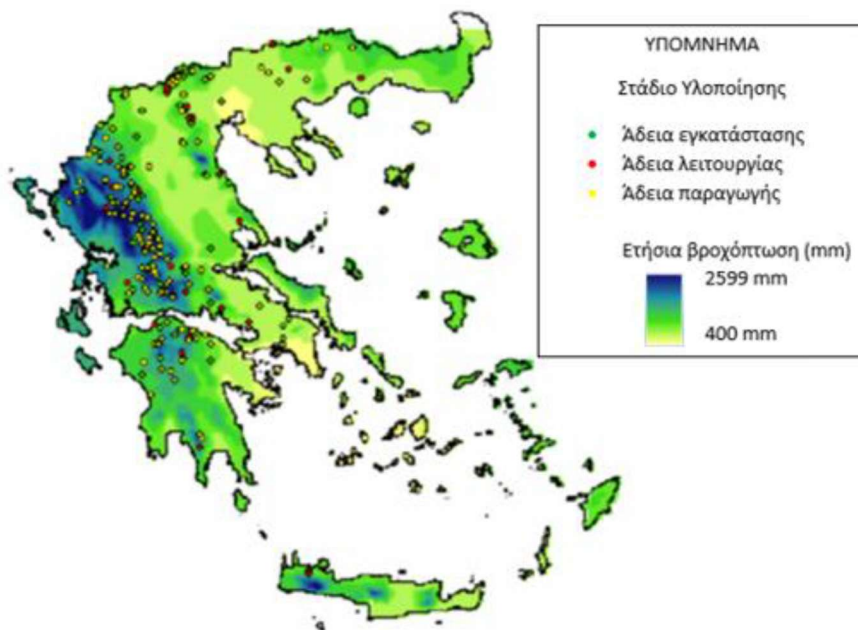
Εικόνα 1.6. Διάγραμμα υδροηλεκτρικού σταθμού με το επίπεδο του προθαλάμου και το επίπεδο του κατωτάτου σημείου και το ύψος πτώσης [16].

1.4 Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα ανήκει στις χώρες που διαθέτουν ενεργειακό πλεονέκτημα, με δυνατότητα ενεργειακής αυτονομίας. Ωστόσο, σε πρώτη θέση έρχεται η χρήση φυσικού αερίου και ακολουθούν οι υπόλοιπες μορφές ενέργειας, εκτός της πυρηνικής. Η ηλεκτρική επάρκεια της Ελλάδας καλύπτεται από ιδιωτικούς σταθμούς παραγωγής και από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

Η Ελλάδα ως χώρα χαρακτηρίζεται από υπέδαφος με σημαντικά κοιτάσματα λιγνίτη, που είναι ενεργειογόνο πέτρωμα με πολύ καλή θερμογόνο ικανότητα, από μεγάλα ποσοστά ηλιοφάνειας που καθιστούν την ηλιακή ενέργεια εφικτή και από έντονες βροχοπτώσεις και λεκάνες απορροής με έντονες κλίσεις, με αποτέλεσμα την υψηλή αποδοτική ενέργεια. Πιο πλούσιες σε βροχοπτώσεις είναι οι περιοχές της Δυτικής Ελλάδας όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη συνεισφορά της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ανέρχεται στο 8 - 10%, και προέρχεται από ΥΗΣ που καλύπτουν ηλεκτρικά φορτία αιχμής. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 3060 MW και η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας κυμαίνεται από 4000 έως 5000 GWh. Τα Κρεμαστά (437MW),

το) και το Πολύφυτο (375 MW) αποτελούν τα τρία μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα στην Ελλάδα (Μαμάσης κ.α., 2015) [18].



Εικόνα 1.7. Χάρτης της Ελλάδας με ένδειξη του ύψους βροχής και τα ΥΗΕ που είναι ήδη σε λειτουργία ή έχουν αδειοδοτηθεί (ΥΠ.ΑΝ. μετά από προσαρμογή).

1.5 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Οι Υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) αποτελούν συγκροτήματα πολιτικών έργων και ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού που μετατρέπουν την ενέργεια του νερού (υδραυλική ενέργεια) σε ηλεκτρική ενέργεια (Niladri et al., 2022)[2]. Πιο συγκεκριμένα, αποτελούν εγκαταστάσεις των οποίων η λειτουργία βασίζεται στη μετατροπή της κινητικής ή δυναμικής ενέργειας του νερού (hydropower) σε ηλεκτρισμό μέσω μηχανικών μέσων, με σκοπό να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (ισχύ) (Allerhand, A., 2020)[12]. Πλήθος επιστημονικών μελετών έχει εξετάσει τις βασικές αρχές λειτουργίας υδροηλεκτρικών σταθμών και τη σειρά με την οποία συνεργάζονται τα επιμέρους μέρη αυτών. Η υδροηλεκτρική ενέργεια βασίζεται σε μία τριπλή διαδικασία μετατροπής ενέργειας. Αρχικά, η δυναμική ενέργεια του αποθηκευμένου νερού, το οποίο ρέει μέσω σωλήνων ή αγωγών (penstocks) προς μία τουρμπίνα, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, η οποία περιστρέφει τα πτερύγια των υδραυλικών τουρμπινών (υδροστρόβιλοι) μετατρέποντας την σε μηχανική ενέργεια. Τελικά, η τουρμπίνα περιστρέφει το στροφέο της γεννήτριας (generator rotor) μέσω των γεννητριών που λειτουργούν με βάση την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια (CelsoPenche, 1998; Singh & Singal, 2017; USGS, 2018; Klein & Fox, 2022) [4,19-21].

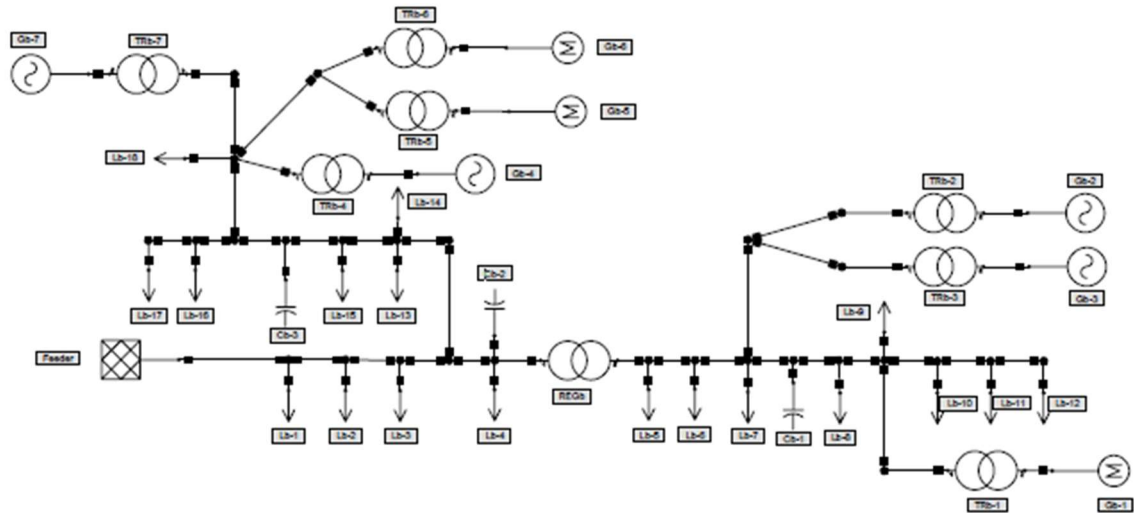
Οι ΥΗΣ χωρίζονται σε Ιδιωτικές Εγκαταστάσεις (Private installations), οι οποίες είναι σχεδιασμένες για την εξυπηρέτηση ενός μοναδικού χρήστη, όπως η έπαυλη του Sir William Armstrong το 1878 ή το ξενοδοχείο Engadiner Kulm το 1879 (Allerhand, A., 2020) [12]. Και σε Δημόσιους ή Εμπορικούς Κεντρικούς Σταθμούς (Public/Commercial central stations), οι οποίοι παρέχουν συνεχή

ενέργεια σε πολλούς χρήστες, με την ιστορία τους να ξεκινά εμπορικά το 1880 στο Grand Rapids του Μίσιγκαν (Allerhand, A., 2020) [12]. Επίσης, χωρίζονται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι απαιτούν τεράστιες εκτάσεις γης και φράγματα, και ελέγχουν τις πλημμύρες, καλύπτοντας το 16% της παγκόσμιας ζήτησης (ESHA, 2010; Nasir, 2013) [22,23]. Και σε μικρο-υδροηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι παράγουν μεταξύ 5 και 100 kW και είναι συνήθως τύπου «run-of-river», δηλαδή δεν απαιτούν μεγάλο απόθεμα (CelsoPenche, 1998; ESHA, 2010; Khurana & Kumar, 2011; Nasir, 2013).[19,22-24]

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (International Hydropower Association – “World Hydropower Outlook 2025” pipeline analysis)[25], ο παγκόσμιος στόλος υδροηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η συνολική εγκατεστημένη ισχύ των υδροηλεκτρικών σταθμών παγκοσμίως υπερβαίνει τα 1.075 GW, επιβεβαιώνοντας πως η υδροηλεκτρική ενέργεια παραμένει η μεγαλύτερη μεμονωμένη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων περίπου 600 GW αντλησιοταμίευσης και 475 GW συμβατικών έργων. Παράλληλα, τονίζει, τη σημαντικότητα των μεγάλων έργων σε χώρες όπως, η Κίνα, η Βραζιλία και η Παραγουάη, καθώς συμβάλλουν καθοριστικά τόσο στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όσο και στη διατήρηση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου, καθιστώντας τα βασικούς πυλώνες για την ενεργειακή μετάβαση.

Για την περίοδο 2022-2025 οι πιο σημαντικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, με βάση την εγκατεστημένη ισχύ και την ετήσια παραγωγή τους, ήταν ο σταθμός των Τριών Φαραγγιών στην Κίνα, ο οποίος κατέχει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ παγκοσμίως (22.500 MW) και συγκαταλέγεται στους πρώτους σε ετήσια παραγωγή (Shah et al., 2025)[26]. Επίσης, πέντε ακόμη μεγάλοι κινεζικοί σταθμοί –Baihetan, Xiluodu, Xiangjiaba, Wudongde και Gezhouba– σχηματίζουν τον λεγόμενο «διάδρομο καθαρής ενέργειας» στον ποταμό Γιανγκτσέ, συνολικής ισχύος 71,7 GW (Winterburn, 2024) [27]. Σε ότι αφορά τη σημαντικότητα σε περιφερειακό επίπεδο, το φράγμα Itaipu στα σύνορα Βραζιλίας–Παραγουάης αποτελεί βασική πηγή ηλεκτρισμού για την Παραγουάη και σημαντικό πυλώνα για τη Βραζιλία, ενώ το φράγμα Grand Coulee στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι ο μεγαλύτερος υδροηλεκτρικός σταθμός της χώρας, καθιστώντας τον σταθερή και ευέλικτη πηγή καθαρής ενέργειας στη Βόρεια Αμερική (Zhang et al., 2023; Shah et al., 2025) [27,28] καθώς αποτελείται από δύο σταθμούς παραγωγής ενέργειας που θα έχουν τελική εγκατάσταση ισχύος σχεδόν 2.000.000 kva (Denton 1948) [29].

Σε εθνικό επίπεδο, το δίκτυο της Ελλάδας περιλαμβάνει συνολικά 18 μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς, που χρησιμοποιούν σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες και οι οποίοι αποτελούν μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, συνδεδεμένες σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής 20 kV και βρίσκονται υπό τη διαχείριση της ΔΕΗ (Lettas et al., 2005; PPC, 2021) [30,31]. Τα μεγαλύτερα έργα βρίσκονται στον Αχελώο (Κρεμαστά, Καστράκι, Στράτος), τον Αλιάκμονα (Πολύφυτο, Σφηκιά) και τον Νέστο (Θησαυρός, Πλατανόβρυση) αποθηκεύοντας ενέργεια μέσω αντλησιοταμίευσης, με την εγκατεστημένη ισχύ να ανέρχεται σε 3217,4 MW. Το σύστημα περιλαμβάνει δύο υποσταθμούς με δύο κύριους μετασχηματιστές από 20 έως 150 kV, ισχύος από 40 έως 50 MVA ο καθένας καλύπτοντας μικρούς αστικούς και αγροτικούς οικισμούς (Lettas et al., 2005). [30]



Εικόνα 1.8. Κατασκευή συστήματος ακτινικό δίκτυο διανομής συνδεδεμένο με υδροηλεκτρικό σταθμό

Σε μεγάλο μέρος της σύγχρονης βιβλιογραφίας οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διαχωρίζονται συνήθως σύμφωνα με το **ύψος πτώσης των υδάτων** σε έργα χαμηλής, μέσης και υψηλής πτώσης. Επιπλέον, υπάρχουν τρεις τύποι υδροηλεκτρικών σταθμών που ταξινομούνται με βάση το ύψος της υδατόπτωσης ή υδραυλικής στήλης: Μικρού Ύψους (<20m), Μέσου Ύψους (20-150 m) και Μεγάλου ύψους (>150 m) (Hydropower plant) [32]. Το ύψος της πτώσης του νερού επηρεάζει την επιλογή τύπου υδροστρόβιλου, δηλαδή σε περιοχές με μεγάλη ή μέτρια υψομετρική διαφορά, χρειάζεται λιγότερη ποσότητα νερού για να παραχθεί η ίδια ισχύς, και για τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κυρίως στρόβιλοι τύπου Pelton, Turgo ή Francis (Alaba et al., 2022) [33].

Επίσης ένα άλλο **κριτήριο διαχωρισμού των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύ** (σε MW) που μπορεί μία μονάδα παραγωγής να αποδώσει υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (Klein & Fox 2022). Ως προς την ισχύ, ο διαχωρισμός γίνεται σε μεγάλη, μεσαία, μικρή, Micro (< 0.1 MW), Mini (0.1-1 MW) και Pico (1-10 MW) (Klein & Fox 2022) [4]. Ωστόσο, τα όρια ισχύος που ορίζουν την ταξινόμηση παρουσιάζουν διεθνή διακύμανση, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2, δημιουργώντας σύγχυση.

Πίνακας 1. 1. Summary of international SHP power capacity definitions.

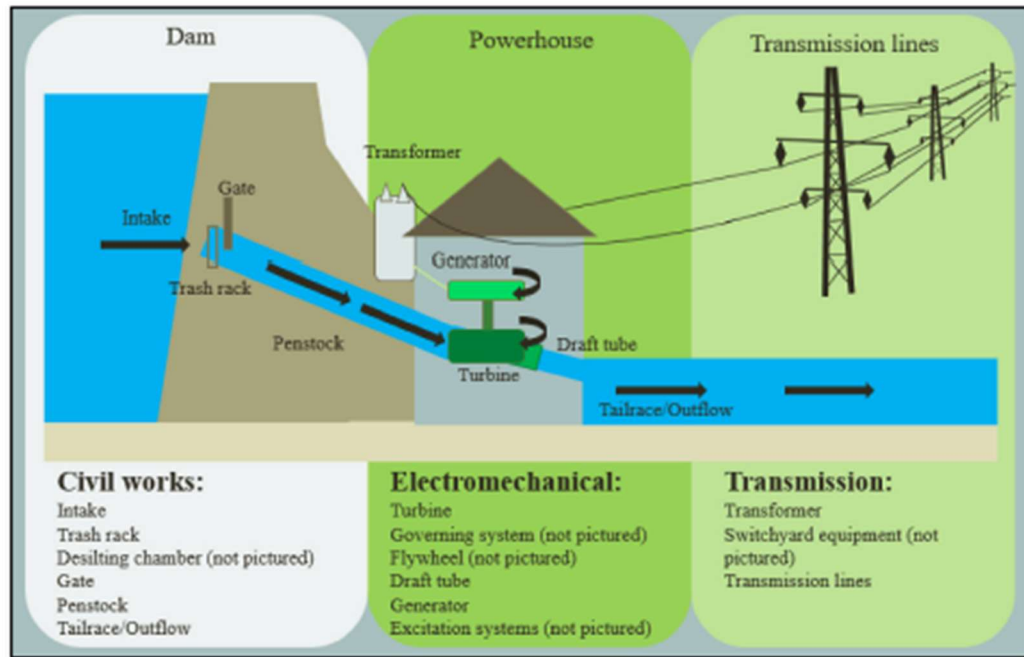
Country/Region	Power Capacity Limit (MW)	Reference
Germany	1	12
Sweden	1.5	13
Italy	3	12
United Kingdom	5	12
France	8	12
Norway	10	13
United States of America	60	6

Australia	20	12,14
Columbia	20	14
India	25	13,14
Vietnam	25	14
Brazil	30	14
Canada	50	12
New Zealand	50	12
China	50	12,13
Philippines	50	12
Indonesia	50	14

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση των υδροηλεκτρικών σταθμών κυμαίνεται μεταξύ 85% και 90% για τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, με την απόδοση να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού των στροβίλων. Η καταγραφή σε πραγματικό χρόνο κρίσιμων παραμέτρων, όπως τα ύψη στάθμης του άνω και κάτω νερού, οι ρυθμοί ροής, η παραγόμενη ισχύς, καθώς και ειδικά σήματα των στροβίλων, όπως η ταχύτητα περιστροφής και οι θέσεις των θυρίδων ελέγχου, αποτελούν προηγμένα συστήματα παρακολούθησης που αξιοποιούν οι σύγχρονες εγκαταστάσεις (Bacani et al., 2023; Davis, 2024; Andersson & Johansson, 2025). [16,34,35]

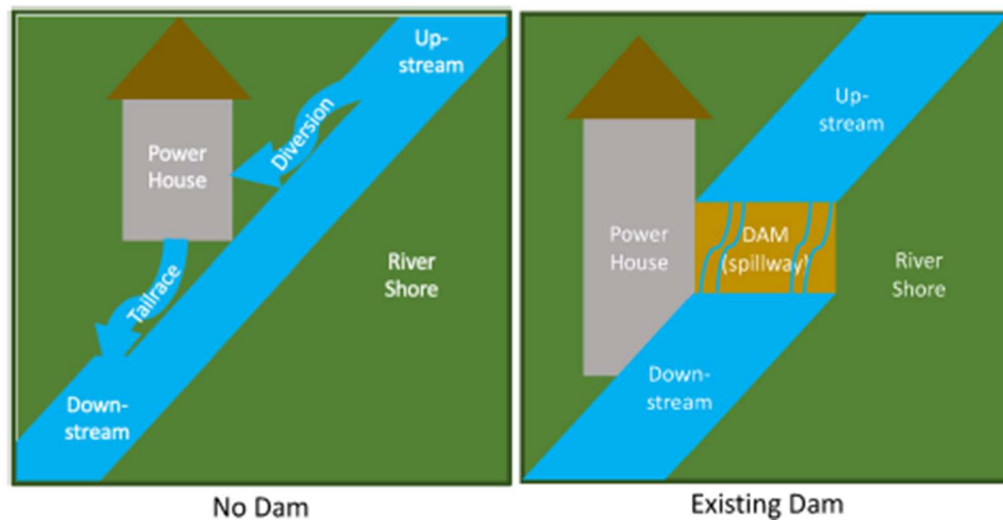
Ο τέταρτος τρόπος διάκρισης γίνεται με βάση τα σχεδιαστικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου (Klein & Fox 2022)[4]. Η μέχρι τώρα βιβλιογραφία κάνει λόγο για τέσσερις κύριους τύπους σχεδιασμού, με τους δύο πρώτους να είναι οι πιο διαδεδομένοι:

- Σταθμοί με Φράγμα - Δεξαμενή (Reservoir-based dams): Περιγράφονται τα έργα που εμποδίζουν (κατακρατούν) τη ροή του νερού προς τα κάτω για τον έλεγχο της εκροής μέσω των στροβίλων (Impoundment) και αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τύπο υδροηλεκτρικής παραγωγής, γνωστός και ως «συμβατικός» υδροηλεκτρικός σταθμός. Η λειτουργία αυτού του τύπου υδροηλεκτρικής μονάδας μπορεί να προσαρμόζεται ώστε να καλύπτει το βασικό φορτίο, να ακολουθεί τις διακυμάνσεις της ζήτησης ή να ανταποκρίνεται σε ώρες αιχμής. Αντίθετα, σε φράγματα με μικρή υψομετρική διαφορά, η λειτουργία συχνά βασίζεται στη συνεχή ροή του ποταμού, χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης (Okot, 2013; Kaunda et al., 2014; Klein & Fox 2022).[4,36,37] Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια με δεξαμενή μπορούν να αποθηκεύουν και να ρυθμίζουν τη ροή του νερού μέσω φράγματος (Andersson & Johansson, 2025)[16].



Εικόνα 1.9. Typical reservoir-based hydropower project components [4]

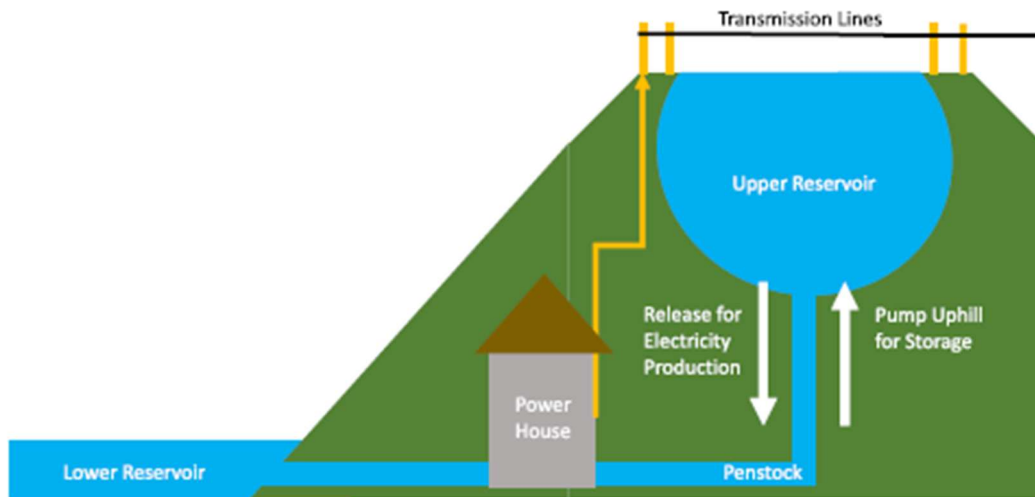
- Σταθμοί Ροής Ποταμού (Run-of-river - ROR): Περιγράφονται τα φράγματα που για την παραγωγή ενέργειας διοχετεύουν το νερό από ποτάμι και το επιστρέφουν πάλι πίσω μέσω του καναλιού εκροής. Η λειτουργία αυτού του τύπου υδροηλεκτρικής μονάδας επηρεάζεται από τις εποχιακές ροές και μπορεί να μην είναι συνεχής (Okot, 2013; Kelly-Richards et al, 2017; Klein & Fox 2022). [4,36,38]



Εικόνα 1.10. Run-of-river hydropower designs. Left: a project with no dam (diversion-based); Right: a project with a dam that operates as a spillway [4]

- Σταθμοί Αντλησιοταμίευσης (Pumped Storage - PS): Περιγράφονται τα έργα που παρακάμπτουν ή εκτρέπουν το νερό από ένα χαμηλότερο σημείο και το αντλεί προς τα πάνω σε δεξαμενή αποθήκευσης μέσω τουρμπινών για μέχρι να χρειαστεί. Τέτοια έργα μπορούν να

συνδυαστούν με ηλιακή ή αιολική ενέργεια για την τροφοδοσία ενεργητικής άντλησης. Η εφαρμογή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί ως υπόγειος υδροφορέας, ως ‘Energy Islands’ και μπορούν να λειτουργήσουν εξ ολοκλήρου εκτός ρεύματος, προστατεύοντας την υδρόβια πανίδα [4,39-41]. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αντλησιοταμίευσης διαθέτουν τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ σε σύγκριση με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, καλύπτοντας πάνω από το 90% της συνολικής σταθερής αποθηκευτικής ικανότητας παγκοσμίως το 2021(Akbari et al., 2022; RGSR, 2022) [5,6].



Εικόνα 1.11. Pumped storage hydropower [4]

- Υδροκινητικοί Στρόβιλοι (In-stream hydrokinetic turbines): Αφορούν συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας που αξιοποιούν άμεσα τη φυσική ροή του νερού χωρίς να απαιτείται αποθήκευση ή μεταβολή της υδατικής πορείας. Χρησιμοποιούν αντιδραστικούς στρόβιλους (π.χ. τύπου bulb ή ελεύθερης ροής – kinetic), οι οποίοι τοποθετούνται απευθείας στην κοίτη ή στη ροή του ποταμού καθιστώντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά εξαρτώμενη από τη διαθέσιμη παροχή νερού, χωρίς τη δυνατότητα ρύθμισης ή αποθήκευσης. Η μέθοδος εγκατάστασης περιλαμβάνει τοποθέτηση σε κανάλια, αγωγούς, στον πυθμένα (substrate-mounted) και επιπλέοντες σταθμούς. Παράλληλα τέτοια συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν και σε θαλάσσια περιβάλλοντα (tidal/ocean power) (Klein & Fox 2022) [4].

1.5.1 Τμήματα Υδροηλεκτρικού Σταθμού

Ένας ολοκληρωμένος υδροηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από πολλαπλά κρίσιμα και εξειδικευμένα μέρη και αφορούν έναν συνδυασμό κτιριακών εγκαταστάσεων και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, τα οποία συνεργάζονται για τη συλλογή, τη μεταφορά και τη μετατροπή της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Σύμφωνα με τον Allerhand, A. (2020) [12], η δομή ενός ΥΗΣ αποτελείται από τον μηχανισμό κίνησης, από μία γεννήτρια και ένα σύστημα

μετάδοσης του παραγόμενου ρεύματος. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης με υψηλή απόδοση που επιτυγχάνεται (95-98%) (Tsotie & Wamkeue, 2016)[3]. Αναλυτικότερα, τα κύρια μέρη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού περιλαμβάνουν δομές αποθήκευσης και υδροληψίας, συστήματα μεταφοράς του νερού, εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας, σύστημα εξόδου του νερού και σύστημα μεταφοράς ισχύος (CelsoPenche, 1998; ESHA, 2010; Khurana & Hardeep Singh, 2012; Nasir, 2013; Singh & Singal, 2017; Niladri et al., 2022). [2,19,20,22,23,42]

Στις δομές αποθήκευσης και υδροληψίας συγκαταλέγονται:

- το φράγμα (**Dam**) και ταμιευτήρας (**Reservoir**), όπου το φράγμα χρησιμοποιείται για την εκτροπή ή τη συγκράτηση του νερού δημιουργώντας έναν ταμιευτήρα, ο οποίος λειτουργεί ως «μπαταρία» αποθήκευσης ενέργειας, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.
- η τεχνητή δεξαμενή (**Forebay**) ή δεξαμενή φόρτισης, η οποία βρίσκεται μπροστά από την υδροληψία (αγωγός προσαγωγής) όπου το νερό αποθηκεύεται προσωρινά. Στην είσοδο υπάρχουν πύλες ελέγχου της ροής και σχάρες συγκράτησης φερτών υλικών (**trash racks**) οι οποίες τοποθετούνται σε εισόδους υδροληψίας (φράγματα) με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η διέλευση αντικειμένων μεγάλου μεγέθους. Πέρα από την αποφυγή φερτών υλικών, βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό της δεξαμενής φόρτισης είναι ο αποκλεισμός εισόδου αέρα στον αγωγό προσαγωγής, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σπηλαιώσης.
- οι δομές υδροληψίας (**Intake**), μέσω των οποίων αποσπάται η ενεργειακά εκμεταλλεύσιμη παροχή από την πηγή ύδατος και χωρίζεται σε η ορεινή (tyrolean intake), πλευρική (side intake) και υδροληψία τύπου σίφωνα (siphon intake). Χαρακτηριστικό τη υδροληψίας είναι η «οικολογική παροχή» μέσω της οποίας προστατεύεται το οικοσύστημα, καθώς μέρος της ποσότητας υδάτων επιστέφει στο φυσικό ποτάμι. Μάλιστα, όπου κρίνεται απαραίτητο, κατασκευάζεται ένα ειδικό τεχνικό έργο ώστε να μη διακόπτεται η φυσική μετακίνηση των ψαριών (Λαμπροπούλου και Κορνάρου, 2004) [43]. Αφού απομακρυνθεί το νερό από την κοίτη, οδηγείται με ελεύθερη ροή σε δεξαμενή καθίζησης ή εξαμμοτή (desilter), εκτός από τις περιπτώσεις υδροληψιών τύπου σίφωνα. Η δεξαμενή καθίζησης είναι σχεδιασμένη για να συγκρατεί τα φερτά υλικά που έχουν μέγεθος κόκκου μικρότερο ή ίσο με εκείνο που προβλέπουν οι τεχνικές απαιτήσεις του στροβίλου, διασφαλίζοντας έτσι την προστασία και ομαλή λειτουργία του εξοπλισμού.

Το σύστημα μεταφοράς του νερού περιλαμβάνει:

- Τον αγωγό πτώσης (**Penstock**), ο οποίος περιγράφεται ως κλειστός αγωγός ή σωλήνας υπό πίεση που μεταφέρει το νερό από τον ταμιευτήρα στον στροβίλο.

- Τη δεξαμενή εξισορρόπησης / πύργος ανάπτυξης (**Surge Tank**): Τοποθετείται στο άκρο μεγάλων αγωγών για να απορροφά τις απότομες μεταβολές της πίεσης όταν κλείνουν ξαφνικά οι βαλβίδες.
- Τη διώρυγα προσαγωγής/ κανάλι νερού (**Head Race**), η οποία είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά του νερού από τον ταμιευτήρα προς τον στρόβιλο και μπορεί να είναι ανοιχτό κανάλι ή σήραγγα. Με πιο απλά λόγια μεταφέρει το νερό από το φράγμα προς το σημείο παραγωγής ενέργειας. Η υφιστάμενη τοπογραφία, οι γεωλογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και οι αναμενόμενες καταπονήσεις καθορίζουν τα τεχνικά κριτήρια σχεδιασμού, υλικό κατασκευής (χάλυβας, συνθετικά υλικά, π.χ. PVC και GRP, οπλισμένο ή άοπλο σκυρόδεμα και, όχι τόσο συχνά, ξύλο) και διαστάσεις του αγωγού όδευσης, αφού επηρεάζεται η θέση της δεξαμενής φόρτισης και του σταθμού παραγωγής. Η εγκατάσταση του αγωγού προσαγωγής σε ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο γίνεται συνήθως υπόγεια, για λόγους προστασίας και περιβαλλοντικής ενσωμάτωσης (Μαμάσης κ.α., 2015)[18].
- Ανάμεσα στον αγωγό προσαγωγής και στον αγωγό πτώσης τοποθετείται δομές οι οποίες ονομάζονται δεξαμενές ανάπλασης ή πύργοι εξισορρόπησης και αποτελούν σημαντικό έργο ασφαλείας. Ο πύργος λειτουργεί σαν «βαλβίδα ασφαλείας» και προστατεύει το σύστημα από το φαινόμενο του υδραυλικού πλήγματος, δηλαδή από απότομες αυξομειώσεις της πίεσης που προκύπτουν όταν κλείνουν ξαφνικά τα περύγια ή τα ακροφύσια του στροβίλου, προκαλώντας ζημιές στον αγωγό. Ο ρόλος του είναι να απορροφά την πίεση, επιτρέποντας στο νερό να ανέβει μέσα σε αυτόν, διευκολύνοντας μικρότερες διαταραχές που συμβαίνουν κατά την εκκίνηση ή διακοπή της λειτουργίας.

Ο εξοπλισμός παραγωγής ενέργειας αποτελείται από:

- Τον στρόβιλο (**Turbine**), ο οποίος είναι μία περιστροφική μηχανή ή αλλιώς τουρμπίνα που περιστρέφεται από το κινούμενο νερό και ως αποτέλεσμα μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν οι στρόβιλοι ώσης (impulse) και αντίδρασης (reaction).
- Τη γεννήτρια (**Generator**), η οποία συνδέεται με τον στρόβιλο μέσω ενός άξονα και καθώς ο στρόβιλος περιστρέφεται, μεταφέρει τη κίνηση του ρότορα της γεννήτριας, με αποτέλεσμα να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται είναι τόσο σύγχρονες όσο και ασύγχρονες. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων γεννητριών είναι η απορρόφηση άεργου ισχύος από το δίκτυο για να λειτουργήσουν
- Τον κύριο ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό (**Powerhouse**), ο οποίος στεγάζει και προστατεύει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και αποτελείται από την υποδομή και την ανωδομή που περιλαμβάνει τον θάλαμο παραγωγής.

Τα συστήματα εξόδου του νερού και μεταφοράς ισχύος περιλαμβάνουν:

- Το σωλήνας αναρρόφησης (**Draft Tube**) και το κανάλι εκροής (**Tail Race**): Ο σωλήνας αναρρόφησης είναι ένας αεροστεγής σωλήνας στην έξοδο των στροβίλων αντίδρασης που οδηγεί το νερό στο κανάλι εκροής, το οποίο με τη σειρά του επιστρέφει το νερό στο ποτάμι αφού περάσει από τον στρόβιλο.
- Τους μετασχηματιστές, οι οποίοι αυξάνουν την τάση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος έτσι ώστε να είναι εφικτή η μεταφορά του για μεγάλες αποστάσεις.
- Τις γραμμές μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας από τον σταθμό προς το ηλεκτρικό δίκτυο και εν τέλει στους καταναλωτές.

1.5.2 Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΜΥΣ)

Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται από την ενεργειακή ισχύ (power capacity), δηλαδή, το ανώτατο όριο παραγωγής ενέργειας σε megawatt (MW). Ωστόσο, δεν υπάρχει διεθνώς ορισμένο αριθμητικό όριο που διαχωρίζει τα μικρά από τα μεγάλα έργα (Klein & Fox 2022)[4].

Τα δεδομένα που προκύπτουν από πολλές διαφορετικές πηγές υποστηρίζουν ότι η βιομηχανία συχνά υποδιαιρεί τα μικρά έργα σε περαιτέρω ποιοτικές κατηγορίες βάσει της ισχύος τους, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3, (Klein & Fox 2022)[4].

Πίνακας 1. 2. Variation in SHP classification by power capacity.

Class	Low (kW)	Medium (kW)	High (kW)
Small	200 to 25,000	<10,000	1,000 to 60,000
Mini	0.1 to 1,000	-	100 to 2,000
Micro	<0.1	5 to 100	-
Pico	<5	-	-

Συμπερασματικά, η διεθνής ονομασία ΜΥΣ χρησιμοποιείται για να περιγράψει υδροηλεκτρικές μονάδες οι οποίες θεωρούνται αξιόπιστες και ευέλικτες επιλογές ανανεώσιμης ενέργειας, με μικρότερες συνήθως απαιτήσεις υποδομών σε σχέση με τα τεράστια συμβατικά φράγματα (Klein & Fox 2022)[4].

Η εγκατάσταση ενός Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού (ΜΥΣ) βασίζεται στην αξιοποίηση της φυσικής υψομετρικής διαφοράς (πτώσης) των επιφανειακών νερών, μέσω ενός υδραυλικού συστήματος υπό πίεση που κατευθύνει τη ροή προς τον στρόβιλο. Τα βασικά τεχνικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα τέτοιο έργο είναι η υδροληψία (intake), το δίκτυο προσαγωγής του νερού και το κτίριο του σταθμού παραγωγής (power house), τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ο τρόπος λειτουργίας της υδροληψίας, εκτός του τυπικού ορίου των 15 MW εγκατεστημένης ισχύος, αποτελεί ειδοποιό διαφορά μεταξύ υδροηλεκτρικών σταθμών (έργων) μεγάλης και μικρής κλίμακας.

Η ενέργεια που παράγεται κατά τη χρονική περίοδο Δt προκύπτει από την χρονική ολοκλήρωση ισχύος ως προς τον χρόνο, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [44,45]:

$$E = \sum_{t=0}^{\Delta t} I * dt$$

E η παραγόμενη ενέργεια σε χρονικό διάστημα

Δt (kWh)

I η ισχύς λειτουργίας για κάθε στοιχειώδες

χρονικό διάστημα dt (kW)

dt το στοιχειώδες χρονικό διάστημα για το οποίο

η ισχύς θεωρείται σταθερή (h)

1.5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού

Η υδροηλεκτρική ενέργεια μικρής κλίμακας θεωρείται αξιόπιστη και ευέλικτη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας (Klein & Fox 2022) [4] και κρίσιμη για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως (Tinh και Minh, 2025)[46]. Οι Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΜΥΣ) παρουσιάζουν ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά υπό το πρίσμα της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής αποδοτικότητας. Από τη μία πλευρά, ως πλεονεκτήματα, επισημαίνονται:

- Θεωρείται καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια, σε σύγκριση με θερμικές μονάδες ή την καύση φυσικού αερίου (Tinh και Minh, 2025)[46].
- Τα έργα ροής ποταμού (ROR) θεωρείται ότι προκαλούν μικρότερη διαταραχή στους βιότοπους και στη μετακίνηση των ψαριών σε σύγκριση με τα μεγάλα φράγματα, καθώς εκτρέπουν μόνο μέρος της ροής (Khattak et al., 2016)[47].
- Υψηλή απόδοση για έργα μικρής κλίμακας. Όπως αναφέρουν οι Kaunda et al. (2012) [37] και το U.S. Bureau of Reclamation, η υδραυλική απόδοση των σύγχρονων στροβίλων κυμαίνεται μεταξύ 80-95%, με τους περισσότερους σύγχρονους σχεδιασμούς να ξεπερνούν το 90%. Η ηλεκτρική απόδοση των γεννητριών φτάνει το 95-98%, με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση του σταθμού (από το νερό στο ηλεκτρικό δίκτυο) να κυμαίνεται μεταξύ 85-90%. Αυτό αντιπροσωπεύει σημαντικά υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με θερμικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, οι οποίοι τυπικά επιτυγχάνουν αποδόσεις κάτω του 50% (Khattak et al., 2016; Skoric, 2017; Klein & Fox 2022). [4,47,48]
- Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παρουσιάζουν ταχύτητα απόκρισης μικρότερη των 10 λεπτών από κρύα εκκίνηση σε πλήρες φορτίο, σχεδόν άμεση δυνατότητα προσαρμογής της παραγόμενης ισχύος, διαθεσιμότητα άνω του 95% για σταθμούς με κατάλληλη συντήρηση, και λειτουργικό κύκλο ζωής 50-100+ ετών για τα κύρια συστατικά. Το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, που κυμαίνεται μεταξύ 1-4% του κεφαλαιουχικού κόστους ετησίως, αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα. Η υδροηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται συχνά για την κάλυψη της επιπλέον ενέργειας που χρειάζεται το σύστημα όταν η κατανάλωση ανεβαίνει ξαφνικά πάνω από το ελάχιστο επίπεδο και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να ενεργοποιηθούν πολύ γρήγορα και να συνδεθούν άμεσα στο δίκτυο όταν υπάρχει ανάγκη, βοηθώντας έτσι στη σταθεροποίηση της παροχής (Skoric, 2017).[48]

- Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στα συστήματα αντλησιοταμίευσης (pumped storage), τα οποία λειτουργούν ως μηχανισμοί αποθήκευσης ενέργειας. Η ΙΕΑ επισημαίνει ότι αυτά τα συστήματα αντλούν νερό σε ανώτερο ταμιευτήρα κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και το απελευθερώνουν για παραγωγή ηλεκτρισμού κατά τις περιόδους αιχμής, παρέχοντας κρίσιμες υπηρεσίες σταθερότητας στο δίκτυο [49].
- Κάλυψη έως και 90% της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια (Khattak et al., 2016) [47]
- Χαμηλό κόστος υδροηλεκτρικής ενέργειας (40% φθηνότερο από τη χρήση ορυκτών καυσίμων) εξαιτίας της υψηλής απόδοσης των τεχνολογιών (Khattak et al., 2016). [47]
- Εύκολος έλεγχος της αποθήκευσης και της επιτρεπόμενης ροής του νερού εντός του υδροηλεκτρικού συστήματος με αποτέλεσμα την επιλογή χρήσης της υδροηλεκτρικής ενέργειας όποτε κρίνεται απαραίτητο (Khattak et al., 2016). [47]
- Η συλλογή μηχανικής ενέργειας του νερού απαιτείται μικρότερη δύναμη για να περιστραφεί η τουρμπίνα, ό,τι θα χρειάζεται με τον αέρα, επειδή το νερό είναι πιο πυκνό, δίνοντας πλεονέκτημα έναντι της αιολικής ενέργειας (Khattak et al., 2016). [47]
- Συμβάλλουν στην τοπική οικονομική ανάπτυξη, τονώνοντας τον τουρισμό σε περιοχές όπου κατασκευάζονται και επιδρώντας θετικά στη διαβίωση (Tinh και Minh, 2025). [46]
- Αξιοποίηση υπαρχουσών υποδομών, όπως φράγματα τα οποία δεν παράγουν ενέργεια, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη για νέες κατασκευές σε παρθένα ποτάμια (Klein & Fox 2022). [4].
- Λειτουργούν σαν έργα πολλαπλού σκοπού όπως ύδρευση, άρδευση, αντιπλημμυρική προστασία, ξηρασία και παραγωγής ενέργειας (Klein & Fox 2022). [4]
- Πιθανά περιβαλλοντικά οφέλη, ειδικά όταν υιοθετούνται τεχνολογίες χαμηλής όχλησης (Klein & Fox 2022). [4]

Ωστόσο, παρά το πολλά πλεονεκτήματα των ΜΥΣ, η ανάπτυξη υδροηλεκτρικών σταθμών επιφέρει μειονεκτήματα και προκλήσεις που σχετίζονται με την απώλεια φυσικών πόρων και τη διατάραξη της ζωής των τοπικών κοινοτήτων (Tinh και Minh, 2025). [46]

- Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ΥΗΣ είναι το κόστος κατασκευής τους, καθώς και ο χρόνος κατασκευής τους (Klein & Fox 2022). [4]
- Η έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση της περιοχής του ταμιευτήρα που οδηγεί στην πιθανή υποβάθμιση της περιοχής του.
- Απώλεια φυσικού κεφαλαίου, δηλαδή, αποψίλωση των δασών και απώλεια γεωργικής γης (όπως ορυζώνες και εκτάσεις για κτηνοτροφία) (Tinh και Minh, 2025). [46]
- ηλεκτρικού συστήματος μεγάλης κλίμακας που διαθέτει φράγμα και ταμιευτήρα, επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Khattak et al., 2016). [47]
- Αυξημένο κόστος υλοποίησης υδροηλεκτρικού συστήματος και μακροπρόθεσμη επένδυση σε σχέση με το αρχικό κόστος (Khattak et al., 2016). [47]

- Κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η αναγκαστική μετεγκατάσταση πληθυσμών οδηγώντας σε απώλεια πολιτισμικής κληρονομιάς, εξαιτίας της κατασκευής φραγμάτων και ταμιευτήρων (Tinh και Minh, 2025). [46]
- Τα έργα ροής ποταμού και οι υδροκινητικοί στρόβιλοι είναι ευάλωτοι στις εποχιακές διακυμάνσεις του νερού, καθιστώντας τα εξαρτημένα από τη ροή και θέτοντας σε κίνδυνο τη λειτουργία τους (USEIA, 2022).[50]
- Οικονομική αβεβαιότητα με το πόσο κερδοφόρο είναι ένα έργο, το οποίο εξαρτάται από τα επιτόκια και από το πώς αλλάζουν οι τιμές του ρεύματος, επηρεάζοντας μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς (Klein & Fox 2022).[4]
- Πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό και στην τυποποίηση των έργων λόγω της γεωμορφολογικής μοναδικότητας κάθε περιοχής (Klein & Fox 2022). [4]
- Η επέκταση ενός παραδοσιακού σταθμού παραγωγής ενέργειας αποτελεί συνήθως μια χρονοβόρα διαδικασία, καθώς απαιτεί πολυετή στάδια σχεδιασμού, αδειοδότησης, εγκατάστασης και έναρξης λειτουργίας (Lettas et al., 2005, p. 1). [30]
- Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παρουσιάζουν προκλήσεις φθοράς και διαχείρισης σφαλμάτων:
 1. Σφάλματα στροβίλου (Runner faults), τα οποία αφορούν προβλήματα που προκύπτουν από την κατανομή της πίεσης ή της ροής του νερού – Υδραυλική ανισορροπία, προκλήσεις στη λειτουργία εκτός των βέλτιστων παραμέτρων που μπορεί να προκαλέσει καταπονήσεις ή προβλήματα που σχετίζονται με τον θάλαμο του στροβίλου.
 2. Σφάλματα οδηγού (Water Guide Faults), τα οποία αφορούν προβλήματα που επηρεάζουν τη σταθερότητα της κίνησης και σχετίζονται με τις ανοχές και τη λίπανση των και τις δονήσεις που καταγράφονται από τους αισθητήρες κατά μήκος του άξονα.
 3. Σφάλματα εισόδου του νερού (Water Inlet Faults), τα οποία σχετίζονται με το πλάτος δόνησης του άνω καλύμματος επηρεάζοντας τη ροή εισόδου.
 4. Σφάλματα στα πτερύγια κατεύθυνσης (Guide Vane Faults), τα οποία αφορούν τον έλεγχο της ποσότητας νερού που εισέρχεται στον στρόβιλο και εντοπίζονται στους μηχανισμούς ρύθμισης, σύνδεσης και ελέγχου των πτερυγίων.

Συμπερασματικά, η απόδοση και βιωσιμότητα των ΜΥΣ εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθός τους και τις τοπικές υδρολογικές παραμέτρους. (Klein & Fox 2022). [4]

1.6 Σύγχρονες εξελίξεις

Για την επίλυση των παραπάνω και την καλύτερη υποστήριξη της ασφαλούς λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου και των υδροηλεκτρικών μονάδων γενικότερα, οι Chen et al., 2022, [51] παρουσίασαν μία μέθοδο βασισμένη σε σύστημα που χρησιμοποιεί δεδομένα από τους αισθητήρες (όπως οι κυματομορφές δόνησης που φαίνονται στα διαγράμματα) και τα επεξεργάζεται μέσω του XGBoost. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο σύστημα, συγκρίνει τις τρέχουσες τιμές με αυτές που υπάρχουν στη βάση δεδομένων και τις πραγματοποιεί σύγκριση με τα όρια ασφάλειας, πρόβλεψη

μελλοντικής συμπεριφοράς και ανάγκη προληπτικής συντήρησης των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ενέργειας, με στόχο την πρόβλεψη της φθοράς του άξονα στους υδροστροβίλους και τον έγκαιρο εντοπισμό βλαβών στα υδροηλεκτρικά συγκροτήματα.

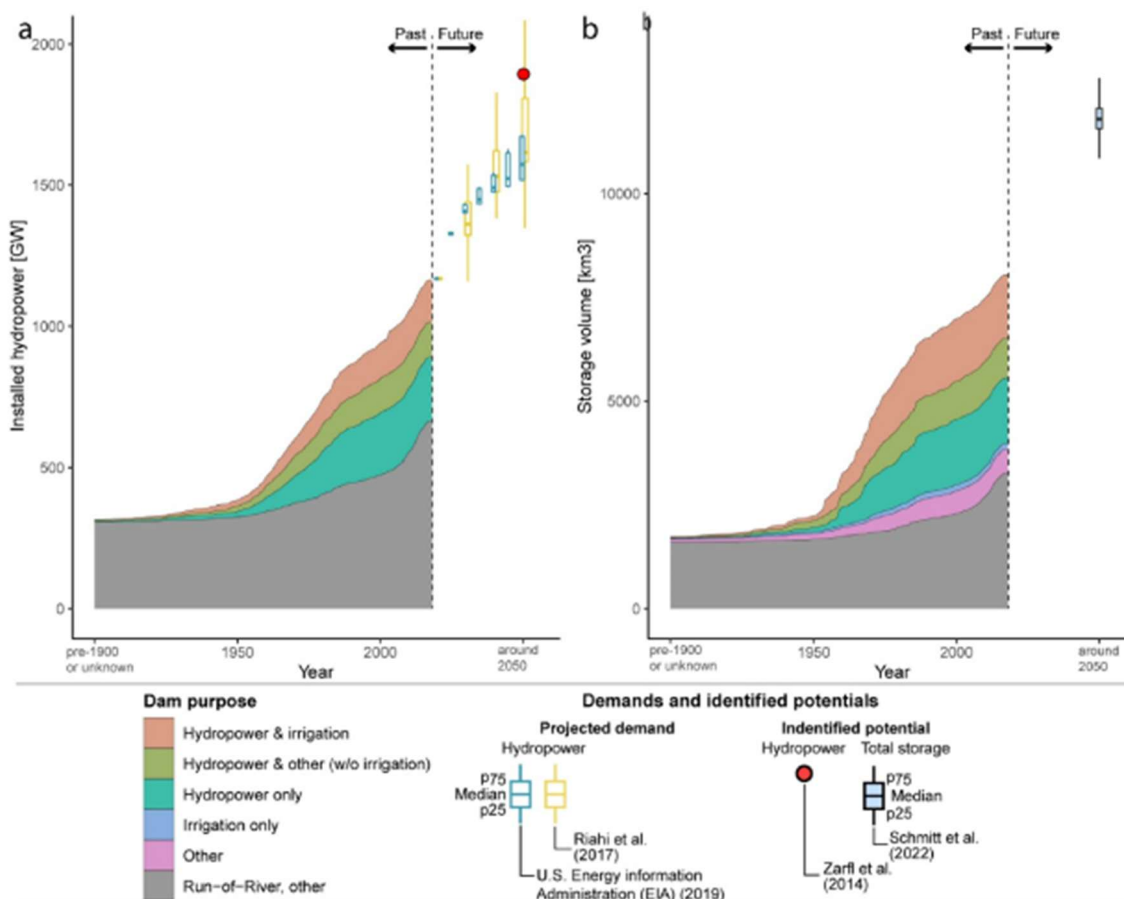
Πρόσφατες εξελίξεις επικεντρώνονται στη βελτίωση της ευελιξίας και της βιωσιμότητας των υδροηλεκτρικών συστημάτων. Ο Abed Ismail (2025) [52] εξετάζει θέματα βιωσιμότητας και σύγχρονες τάσεις στην τεχνολογία υδροηλεκτρικών σταθμών, επισημαίνοντας τη σημασία της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτινων πόρων και την ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ παραγωγής ενέργειας και περιβαλλοντικής προστασίας. Οι Sun (2021) [53] αναλύει σύγχρονες αρχές σχεδιασμού, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προοπτικές ανάπτυξης, τονίζοντας τη σημασία της καινοτομίας στον σχεδιασμό στροβίλων και την ενσωμάτωση έξυπνων συστημάτων ελέγχου.

Κεφάλαιο 2ο: Φράγματα Υδροηλεκτρικών Σταθμών

2.1 Εισαγωγή

Για την υδροηλεκτρική ενέργεια η αποθήκευση νερού αποτελεί βασικό σημείο στον υδροηλεκτρικό κύκλο και βασίζεται σε τεχνικές κατασκευές μεγάλης κλίμακας, οι οποίες ονομάζονται φράγματα (Schmitt και Rosa, 2024) [54] γνωστές και ως «γκρι υποδομές» (Wesener και McWilliam, 2020). [55] Οι βασικοί λόγοι χρήσης των φραγμάτων είναι για την ανάπτυξη της άρδευσης, της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, καθώς και για τον έλεγχο των πλημμυρών μέσω ελέγχου της φυσικής ροής του νερού, προστατεύοντας κατοικημένες περιοχές και υποδομές από καταστροφικές πλημμύρες (Molle et al, 2009; Lehner et al., 2011; Schmitt και Rosa, 2024) [54,56,57]. Τα φράγματα συνήθως ενσωματώνουν reservoir έναν ταμιευτήρα νερού ή μίας τεχνητής λίμνης, στα οποία συγκεντρώνεται νερό και συγκρατείται από το φράγμα. Η συγκέντρωση νερού αποτελεί τον κύριο σκοπό των φραγμάτων είτε με στόχο να το εμποδίσει εντελώς, να το ανακατευθύνει σε συγκεκριμένες περιοχές, είτε ακόμα και να μειώσει την ταχύτητά του.

Ο αριθμός των φραγμάτων καθώς και των μεγάλων ταμιευτήρων εκτιμάται σε 6000 και 60.000 παγκοσμίως και προσφέρουν συνολική αποθηκευτική ικανότητα 8000 km³ (Lehner et al., 2011; Schmitt και Rosa, 2024) [54,57]. Με γνώμονα την οικονομική ανάπτυξη, την αύξηση του πληθυσμού αλλά και τη ανάγκη μετάβασης σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρατηρείται αυξητική τάση στην κατασκευή μεγάλων υδροηλεκτρικών φραγμάτων (Zarfl et al., 2014;) [58]. Μάλιστα, έως το 2050 η παγκόσμια ζήτηση για υδροηλεκτρική ενέργεια παρουσιάζει αυξητική τάση, της τάξεως το 56%. Η ιστορική τάση της αποθηκευτικής ικανότητας των φραγμάτων παρουσιάζει αύξηση, καθώς πριν από το 1900 η παγκόσμια χωρητικότητα ήταν πολύ περιορισμένη (α) (Lehner et al., 2011) [57], ενώ άρχισε να αυξάνεται στις αρχές του 20ού αιώνα (β), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα (Παγκόσμιο τεχνικό δυναμικό υδροηλεκτρικής ενέργειας αποτυπώνεται με κόκκινο κύκλο, οι προβλεπόμενες απαιτήσεις αποτυπώνονται με boxplot (Riahi et al., 2017; USEIA, 2019).[50,59]



Εικόνα 2.1. Ιστορική αναδρομή της υδροηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τον όγκο αποθήκευσης των παγκόσμιων φραγμάτων [54]

Η σημαντικότητα των φραγμάτων έγκειται στη δυνατότητα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή, λόγω του χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα, και στην ενίσχυση της ευστάθειας του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ρυθμιζόμενη πηγή που ανταποκρίνεται στη ζήτηση, με την αντλησιοταμίευση να διευκολύνει την ομαλή ενσωμάτωση μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών, όπως η αιολική και η ηλιακή (Barbour et al., 2016; Rosa, 2022; Schmitt και Rosa, 2024). [54,60,61] Για την επίτευξη παραγωγής καθαρής και σταθερής ενέργειας με μειωμένες αρνητικές επιπτώσεις οι Schmitt και Rosa, 2024, [54] επισημαίνουν την ανάγκη για εναλλακτικές στρατηγικές και προσεγγίζουν τον σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη μελέτη των φραγμάτων, επικεντρώνοντας την προσπάθειά τους σε μία στρατηγική μετατόπιση από τις μεμονωμένες «γκρίζες» υποδομές προς ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που συνεκτιμά τις εναλλακτικές λύσεις, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τις οικονομικές παραμέτρους και τις ανάγκες πολλαπλών τομέων. Ακολουθούν οι βασικοί άξονες επικέντρωσης για έναν σωστό σχεδιασμό σύμφωνα με τις πηγές με στόχο την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων και τη μεγιστοποίηση των οφελών για την κοινωνία στο σύνολό της:

- στρατηγική επιλογή των έργων με τον ελάχιστο αντίκτυπο (least-impact subsets) και σχεδιασμός σε επίπεδο λεκάνης απορροής και όχι για μεμονωμένα έργα, επιτρέποντας την επιλογή έργων χαμηλού αντίκτυπου και την προστασία ποταμών με υψηλή οικολογική αξία,

- κρίνεται αναγκαία η διαχείριση τη ζήτησης, ενσωματώνοντας τον δεσμό νερού-ενέργειας-τροφίμων στον σχεδιασμό, με στόχο τη διαχείριση πιθανών συγκρούσεων και την ανάπτυξη πολυλειτουργικών υποδομών.
- προτεραιότητα στις εναλλακτικές και πράσινες λύσεις, όπως οι υγρότοποι, η τεχνητή εμπλουτισμός υπόγειων υδάτων και η συνδυαστική χρήση με ανανεώσιμες πηγές όπως ηλιακή και αιολική ενέργεια,
- βελτιστοποίηση των υπαρχουσών υποδομών μπορεί να επιτευχθεί μέσω προσθήκης υδροηλεκτρικών μονάδων σε υπάρχοντα φράγματα, αλλαγής λειτουργίας ή χρήσης υβριδικών συστημάτων όπως πλωτά φωτοβολταϊκά και
- περιφερειακή συνεργασία με το διασυνοριακό εμπόριο ενέργειας προσφέροντας λύσεις σε περιοχές με ενεργειακό έλλειμμα, χωρίς να απαιτείται κατασκευή νέων, επιβαρυντικών έργων.

2.2 Τύποι Φραγμάτων Υδροηλεκτρικών Σταθμών

Τα φράγματα υδροηλεκτρικών σταθμών κατέχουν καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια ηλεκτροδότηση και βιομηχανική ανάπτυξη κατά τον 20ό αιώνα. Από τα πρώιμα έργα ροής ποταμού όπως το Croton το 1908, που έθεσε νέα πρότυπα για τη μετάδοση υψηλής τάσης, μέχρι τα σύγχρονα γιγάντια έργα όπως το Φράγμα των Τριών Φαραγγιών, η τεχνολογία των φραγμάτων έχει εξελιχθεί σημαντικά. Τα φράγματα που χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς κατηγοριοποιούνται κυρίως με βάση τη λειτουργία τους και τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού. Τα έργα ροής ποταμού, που κυριάρχησαν στις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, δεν διέθεταν σημαντική ικανότητα αποθήκευσης νερού και βασίζονταν στη φυσική ροή του ποταμού για την παραγωγή ενέργειας. Η χαμηλή ζήτηση της ενέργειας για την εποχή κατέστησε τα φράγματα με χαμηλό συντελεστή φορτίου να αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία στις αρχές της υδροηλεκτρικής ανάπτυξης. Τα φράγματα ροής ποταμού (Run-of-river - ROR), αντλησιοταμίευσης (Pumped Storage - PS) και φράγμα - δεξαμενή (Reservoir-based dams) προσφέρουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες στο ενεργειακό σύστημα (Okot, 2013; Kaunda et al., 2014; Kelly-Richards et al, 2017; Akbari et al., 2022; Klein & Fox 2022; RGS, 2022).[4-6, 36-38].

Η κατασκευή φραγμάτων για υδροηλεκτρικούς σταθμούς απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση πολύπλοκων τεχνικών διαδικασιών. Οι κύριες μέθοδοι κατασκευής εξαρτώνται από τον τύπο του φράγματος, τις τοπογραφικές συνθήκες, τη διαθεσιμότητα υλικών και σαφώς το μέγεθος του έργου (Tamaddun et al. 2023) [62]. Τα φράγματα με μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης ανήκουν στις τις μεγαλύτερες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις παγκοσμίως και παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης σημαντικής ενέργειας σε μορφή βαρυτικής δυναμικής ενέργειας του νερού, μετατρέποντας την αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια σε ηλεκτρική (μονής κατεύθυνσης) (Guarnieri, 2023). [63] Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- το Φράγμα Croton, ανήκει στην παγκόσμια ιστορία της υδροηλεκτρικής ενέργειας ως πρωτοποριακό έργο, καθώς χτίστηκε στον ποταμό Muskegon, στο Μίσιγκαν των ΗΠΑ, και η

κατασκευή του σταθμού ξεκίνησε τον Ιούνιο του 1906, αποτελώντας κομβικό σημείο για την εξέλιξη της υδροηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας (Allerhand, A., 2020; Guarnieri, 2023) [12,63]. Το εργοστάσιο ήταν εξοπλισμένο με δύο στροβιλοκίνητες γεννήτριες της Westinghouse, καθεμία με ονομαστική ισχύ 3.750 kVA, τάση 7,5 kV και συχνότητα 60 Hz (Guarnieri, 2023)[63]. Οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης για την τροφοδοσία της γραμμής Croton-Grand Rapids μήκους 80 km που λειτουργούσε στην ρεκόρ τάση των 100 kV, η οποία αυξήθηκε σε 110 kV το 1909, ανοίγοντας το δρόμο για τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας πολύ υψηλής τάσης σε μεγάλες αποστάσεις (Allerhand, A., 2020; Guarnieri, 2023) [12,63]. Η λειτουργία σε 100-110 kV επέτρεψε την οικονομικά βιώσιμη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε περιφερειακά κέντρα κατανάλωσης, καθιστώντας εφικτή την ηλεκτροδότηση βιομηχανικών και αστικών περιοχών που βρίσκονταν μακριά από τις πηγές υδροηλεκτρικής παραγωγής, με την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας να αυξάνεται από 5% το 1899 σε 85% έως το 1929.

- το Φράγμα Hoover ανήκει και αυτό στα πιο εμβληματικά μηχανικά έργα διαχείρισης υδάτινων πόρων (Storey και Rogers, 2022).[64] Το 1936 διέθετε αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια ύψους 1.345 MW, το 1993 αναβαθμίστηκε σε 2.08 GW. Το φράγμα Hoover ανήκει στα φράγματα βαρύτητας, κατασκευασμένο από σκυρόδεμα, και κατά την κατασκευή του Hoover Dam το 1935, αναπτύχθηκαν καινοτόμες τεχνικές για τη διαχείριση της θερμότητας που παράγεται κατά την πήξη του σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένης της ενσωμάτωσης σωλήνων ψύξης και της σταδιακής χύτευσης σε κατακόρυφα τμήματα που αργότερα γέμιζαν καθώς το έργο προχωρούσε (Guarnieri, 2023) [63],



Εικόνα 2.2. Φράγμα Χούβερ [65]



Εικόνα 2.3. Φράγμα Χούβερ [65]

- το Φράγμα Grand Coulee (6.809 GW) βρίσκεται και αυτό στις ΗΠΑ και αποτελεί τον μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό σταθμό της χώρας, καθιστώντας τον σταθερή και ευέλικτη πηγή καθαρής ενέργειας στη Βόρεια Αμερική (Zhang et al., 2023; Shah et al., 2025) [26,28]. Στόχος του φράγματος είναι η αύξηση της,



Εικόνα 2.4. Φράγμα Grand Coulee [66]

- το Φράγμα Itaipu (14 GW) (σύνορα Βραζιλίας–Παραγουάης) αποτελεί βασική πηγή ηλεκτρισμού για την Παραγουάη και σημαντικό πυλώνα για τη Βραζιλία,



Εικόνα 2.5. Φράγμα Itaipu [67]

- το Φράγμα των Τριών Φαραγγιών στην Κίνα, ο οποίος κατέχει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ παγκοσμίως (22.500 MW) και συγκαταλέγεται στους πρώτους σε ετήσια παραγωγή (Shah et al., 2025). Το συγκεκριμένο φράγμα τροφοδοτεί τον υδροηλεκτρικό σταθμό παρέχοντας 32 μονάδες εγκατεστημένης ισχύος 700 MW, καθώς και δύο μονάδες ισχύος 50 MW (Skoric, 2017).[48]



Εικόνα 2.6. Φράγμα των Τριών Φαραγγιών στην Κίνα [68]

2.3 Σύγχρονες Εξελίξεις και Προκλήσεις

Σήμερα, ο τομέας των υδροηλεκτρικών φραγμάτων, παρά τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει η κατασκευή και λειτουργία του, δεν είναι απαλλαγμένος από τη σύγκρουση μεταξύ περιβαλλοντικών επιπτώσεων και βιωσιμότητας, με αποτέλεσμα να καλείται να αντιμετωπίσει μια σειρά από νέες προκλήσεις και αλλαγές (Schmitt και Rosa, 2024). [54] Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο να επισημανθούν οι επιπτώσεις της κατασκευής φραγμάτων που αφορούν διαδικασίες σε παραποτάμιες και χερσαίες τοποθεσίες.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, τα μεγάλα φράγματα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή οικολογική υποβάθμιση, όπως απώλειες στη βιοποικιλότητα των γλυκών υδάτων η αλλοίωση στη ροή και θερμοκρασία του νερού, η αλλοίωση στη μεταφορά ιζημάτων και η μείωση της ελεύθερης ροής των μεγάλων ποταμών του πλανήτη κατά περίπου 21%, αποτέλεσμα της αποδάσωσης και της διαταραχής των υδρόβιων οικοσυστημάτων (Zarfl et al., 2014; Moran et al., 2018) [58,69]. Οι αλλαγές στη μορφολογία του εδάφους και τα προβλήματα ποιότητας νερού αποτελούν και αυτά συνέπειες της κατασκευής φραγμάτων (Schmitt και Rosa, 2024) [54]. Όταν οι ανθρώπινες ανάγκες για ενέργεια ελέγχουν τη ροή του νερού και όχι οι φυσικές εποχιακές διακυμάνσεις τότε προκαλείται αλλοίωση του υδρολογικού κύκλου (Baldassarre et al., 2018; Schmitt και Rosa, 2024)[54,70]. Επιπρόσθετες επιπτώσεις σχετίζονται με τον εκτοπισμό πληθυσμών, καθώς η κατασκευή φραγμάτων οδηγεί στην αναγκαστική μετεγκατάσταση ανθρώπων, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τους αυτόχθονες πληθυσμούς (Zarfl et al., 2014)[58]. Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οικονομικοί παράμετροι, καθώς παρατηρείται δυσανάλογη κατανομή των οικονομικών κερδών και του κόστους μεταξύ των διεθνών εταιρειών, των τοπικών κυβερνήσεων και των πληθυσμών (Stone, 2010; Zarfl et al., 2014)[58,71]. Παράλληλα, η μείωση του ρυθμού κατασκευής νέων έργων παγκοσμίως λόγω έλλειψης χώρου και κοινωνικών ανησυχιών, οδηγεί τη βιομηχανία να στραφεί προς τις λεκάνες απορροής όπως, ο Αμαζόνιος, ο Κονγκό και ο Μεκόνγκ (Moran et al., 2018)[69]. Επιπρόσθετη πρόκληση αποτελεί το υψηλό κόστος επισκευής και συντήρησης των φραγμάτων, καθώς και αυξανόμενη ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και τη φθορά των παλιών υποδομών (Ansar et al., 2014; Moran et al., 2018).[69,72]

Την ίδια στιγμή, η τεχνολογία εξελίσσεται, με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την παρακολούθηση των εγκαταστάσεων και την ενίσχυση της αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης να αποτελούν βασικές τάσεις του κλάδου. Μια εξέλιξη της τεχνολογίας φραγμάτων είναι τα συστήματα αντλησιοταμίευσης (pumped hydro energy storage - PHES), τα οποία επιτρέπουν αμφίδρομη μετατροπή ενέργειας χρησιμοποιούν την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης για να αντλούν νερό από μια κατώτερη δεξαμενή σε μια ανώτερη μέσω αγωγών υπό πίεση, και στη συνέχεια επιτρέπουν στο νερό να ρέει προς τα κάτω για να παράγει ενέργεια κατά τις περιόδους αιχμής (Guarnieri, 2023)[63]. Την εμφάνισή τους έκαναν αρχικά στις Άλπεις στις αρχές του 20ού αιώνα, με ένα εργοστάσιο υδροαντλίας περίπου 1 MW να τίθεται σε λειτουργία στο Schaffhausen της Ελβετίας το 1909. Πλέον, η αντλησιοταμίευση αποτελεί τη μεγαλύτερη μορφή αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως, με 165 GW εγκατεστημένης ισχύος και 1.6 TWh ενεργειακής αποθήκευσης το 2020, αντιστοιχώντας σε 96% και 99% των παγκόσμιων μεγεθών αποθήκευσης αντίστοιχα.

Επιπλέον, καινοτόμα εργαλεία αξιολόγησης με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης / επιστημονικών εργαλείων και μεθοδολογιών στοχεύουν στη βελτίωση της διαχείρισης και της βιωσιμότητας των φραγμάτων για πιο αποτελεσματική λήψη αποφάσεων (Moran et al., 2018)[69]. Τέτοια εργαλεία είναι:

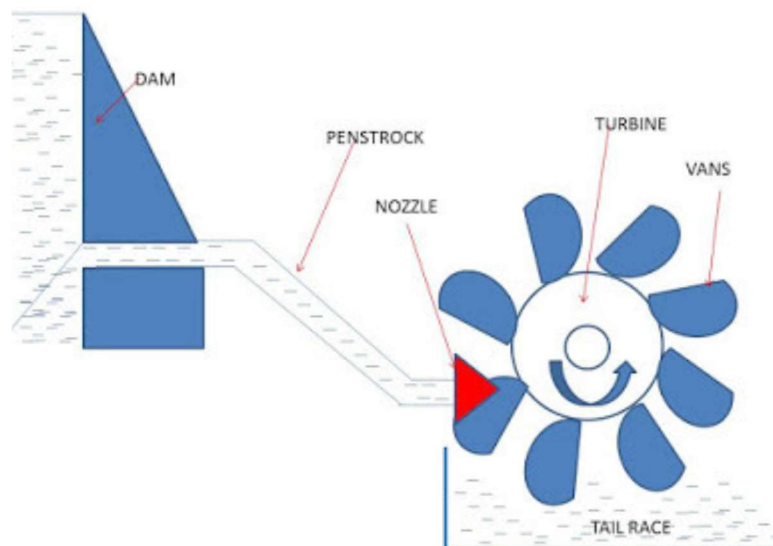
- ο δείκτης περιβαλλοντικής τρωτότητας φραγμάτων (Dam Environmental Vulnerability Index - DEVI), ο οποίος αποτελεί επιστημονικό εργαλείο χρησιμοποιείται από διεθνείς ομάδες εμπειρογνομόνων για τον ακριβή προσδιορισμό και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών κινδύνων σε επίπεδο κατασκευής και λειτουργίας των φραγμάτων (Latrubesse et al., 2017),[73]
- οι βελτιωμένες μελέτες επιπτώσεων (EIA & SIA), οι οποίες μελετούν το μέγεθος των κινδύνων κατασκευής ενός φράγματος (Larsen et al., 2016),[74]
- οι τεχνολογικές παρεμβάσεις – αναβαθμίσεις (Retrofits), οι οποίες πραγματοποιούνται σε υπάρχοντα φράγματα, παράδειγμα αποτελεί το φράγμα Hoover, και αφορούν την τοποθέτηση στροβίλων σε χαμηλότερο υψόμετρο για την αντιμετώπιση της μειωμένης στάθμης των υδάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Υδροστροβίλοι

3.1 Εισαγωγή

Οι υδροστροβίλοι (ή υδροτουρμπίνες) είναι τα βασικά μηχανικά εξαρτήματα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού που μετατρέπουν την ενέργεια του κινούμενου νερού σε μηχανική ενέργεια. Η περιστροφική κίνηση του στροβίλου μεταδίδεται σε μια γεννήτρια, η οποία στη συνέχεια μετασχηματίζει αυτή τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ (Klein & Fox, 2022)[4]. Η λειτουργία ενός υδροστροβίλου, με σκοπό τη παραγωγή ενέργειας, βασίζεται στη ροή του νερού εντός του αγωγού πτώσης (penstock), της οποίας η πίεση ή ταχύτητα αναγκάζει τον στροβίλο να περιστραφεί (Okot, 2013; Klein & Fox, 2022).[4,36]

Οι υδροστροβίλοι χαρακτηρίζονται ως περιστρεφόμενες μηχανές που διαθέτουν πτερύγια και όταν πέσει πάνω νερό με δύναμη τα αναγκάζει να περιστραφούν.



Εικόνα 3.1. Υδροστροβίλος [47]

Αρχικά, ο υδροστροβίλος είναι μία κατασκευή η οποία τοποθετείται κατά την ροή του νερού και καθώς το νερό διέρχεται από τον υδροστροβίλο τον αναγκάζει να περιστρέφει γύρω από τον άξονα του με αποτέλεσμα να μπορούμε να αντλούμε ενέργεια από το νερό. Οι υδροστροβίλοι κατηγοριοποιούνται σε υδροστροβίλους δράσεως και υδροστροβίλους αντίδρασης ανάλογα με την διαδικασία που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια.

3.2 Τύποι Υδροστροβίλων

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σαφής στροφή προς καινοτόμες τεχνολογίες στον τομέα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, με αυξανόμενο ενδιαφέρον για λύσεις που δεν απαιτούν την κατασκευή φραγμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι στροβίλοι εντός ροής (instream turbines), οι

οποίοι είναι λιγότερο παρεμβατικοί και έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, επιτρέποντας τη λειτουργία σε αρμονία με το υδάτινο οικοσύστημα. «Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω ροής του υγρού και περιστροφικής κίνησης» (Κατσανεβάκη, 2018).[75] Οι υδροστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες ομάδες: τους στροβίλους ώθησης ή δράσεως (impulse turbines) και τους στροβίλους αντίδρασης (reaction turbines). Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στο είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται στην είσοδο του στροβίλου και τον τρόπο με τον οποίο το νερό αλληλοεπιδρά με τον δρομέα (runner) (Židonis et al., 2015; Khattak et al., 2016)[47,76]. Επίσης, ο διαχωρισμός εξαρτάται από το διαθέσιμο ύψος πτώσης (head) και τον ρυθμό ροής (flow rate) του νερού (Židonis et al., 2015)[76]. Για παράδειγμα, οι στροβίλοι Francis και Pelton χρησιμοποιούνται σε έργα με υψηλό ή μεσαίο ύψος πτώσης (high/medium-head storage projects) για παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο, ενώ οι στροβίλοι Kaplan είναι κατάλληλοι για έργα συνεχούς ροής (run-of-river) λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν αποδοτικά σε ευρύ φάσμα ροής (USDE, 2015). [77]

Σύμφωνα με Khattak et al., (2016)[47], οι υδροστρόβιλοι παρουσιάζουν υψηλότερο εύρος απόδοσης, μεταξύ 83 και 93%, από άλλους τύπους στροβίλων, όπως οι ατμοστρόβιλοι, οι αεριοστρόβιλοι και οι ανεμογεννήτριες, εξαιτίας της πυκνότητας του νερού και της δύναμης της βαρύτητας.

Η απόδοση των υδροστροβίλων μπορεί να εξελιχθεί μέσω λεπτομερής ανάλυσης και βελτιστοποίησης του σχεδιασμού τους, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας τεχνολογίες όπως (Khattak et al., 2016)[47]:

- η υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD Analysis), με αριθμητική ανάλυση πολύπλοκων ροών, όπως η υψηλή ταχύτητα, η έντονη τυρβώδης ροή και η πολυφασική ροή (νερό και αέρας) πάνω στα πτερύγια και ακρίβεια σχεδιασμού και υπολογισμού της παραγόμενης ροπής και της απόδοσης σε πολύ συντομότερους χρόνους,
- οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, δηλαδή εξελιγμένοι κώδικες (όπως οι Eulerian και Lagrangian κώδικες) που εξερευνούν τον ιδανικό γεωμετρικό σχεδιασμό, και αλγόριθμοι μοντελοποίησης πλήρους κλίμακας, αναλύοντας μεμονωμένα εξαρτήματα ολόκληρου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των εγχυτήρων (injectors), της φτερωτής (runner) και του περιβλήματος (casing),
- φυσικά η χρήση εξελιγμένων υλικών και η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών επιφέρουν μείωση κόστους έως και 40%, επιδρώντας θετικά στην αύξηση της απόδοσης των υδροστροβίλων και παράλληλα στην οικονομική βιωσιμότητα.



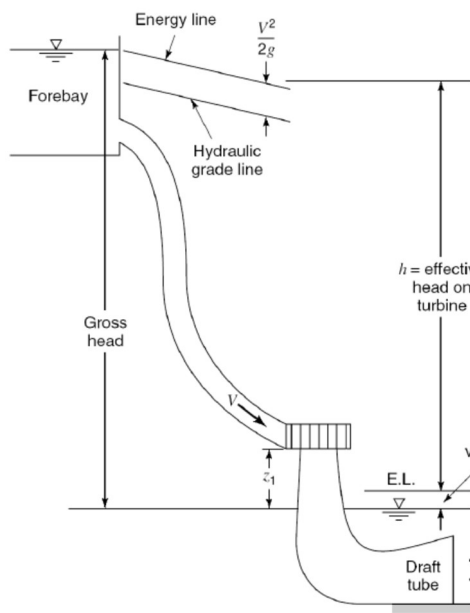
Εικόνα 3.2. Υδροστροβίλοι και γεννήτριες μέσα στο σταθμό[75]

3.2.1 Υδροστροβίλοι αντίδρασης

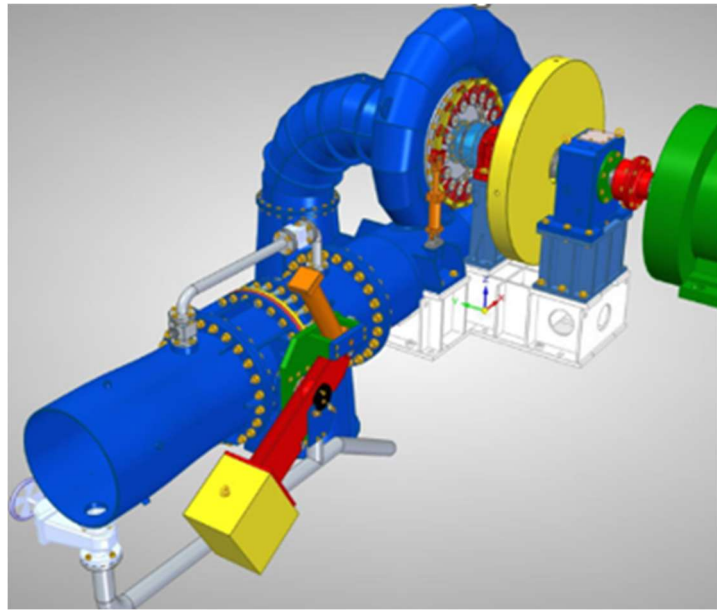
Στην περίπτωση των υδροστροβίλων αντίδρασης, επειδή η ροή νερού περνάει πάνω από όλα τα πτερύγια την ίδια στιγμή, μεταβάλλοντας συνεχώς την πίεση του νερού, ο δρομέας τοποθετείται, τεχνικά και σχεδιαστικά, απευθείας μέσα στο ρεύμα του νερού, τονίζοντας την άμεση σχέση της πίεσης και της κίνησης του νερού (μόνο ένα τμήμα του ολικού φορτίου μετατρέπεται σε κινητικό ύψος πριν προσκρούσει πάνω στον δρομέα) (Židonis et al., 2015)[76]. Η ανάπτυξη ισχύς σε υδροστροβίλους αντίδρασης απαιτούν τη χρήση ειδικών εξαρτημάτων όπως το περίβλημα (scroll case) και ο σωλήνας απαγωγής (draft tube) και ιδανικές συνθήκες, όπως τοποθεσίες με χαμηλότερο ύψος πτώσης και υψηλότερους ρυθμούς ροής σε σύγκριση με τους στροβίλους δράσεως (Khattak et al., 2016)[47].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των στροβίλων αντιδράσεως είναι το γεγονός ότι πετυχαίνουν ένα μεγάλο ποσοστό απόδοσης και πιάνουν μεγάλο ρυθμό περιστροφής. Στα μειονεκτήματα είναι ότι πρέπει να υπάρχει στεγανοποίηση μεταξύ του δρομέα και του στροβίλου, αφού η διαρροή του νερού συνεπάγεται από μεγάλη απώλεια ισχύος. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι ότι χρειάζονται τεράστιες ποσότητες νερού για να λειτουργήσουν και να είναι αποδοτικές. Οι υδροστροβίλοι αντιδράσεως είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι στροβίλοι καθώς είναι ικανοί να δέχονται φορτία σε ελάχιστο χρόνο με ικανοποιητική απόδοση και επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ευρεία κλίμακα υψών πτώσεως. Τέτοιοι τύποι υδροστροβίλων είναι οι Francis, Kaplan, ο Βολβοειδής Υδροστροβίλος και ο Υδροστροβίλος αξονικής ροής.

3.2.1.1 Υδροστρόβιλοι Francis



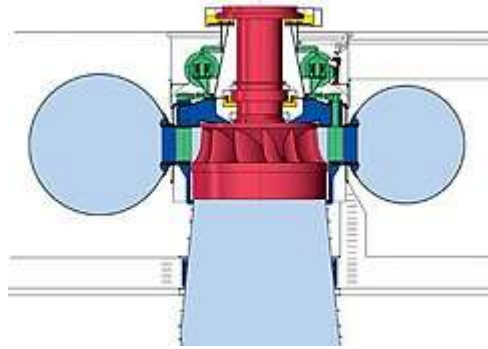
Εικόνα 3.3. Εγκατάσταση με τουρμπίνα αντίδρασης (Francis) [75]



Εικόνα 3.4. Francis turbine [78]

Οι στρόβιλοι Francis, οι πιο διαδεδομένοι παγκοσμίως, είναι στρόβιλοι αντίδρασης που λειτουργούν σε μεσαία υδραυλικά ύψη (50-500 m) και μεσαίες παροχές. Όπως τεκμηριώνει η βιβλιογραφία (Mishra et al., 2017; Abed Ismail, 2025)[52,76], οι στρόβιλοι Francis χρησιμοποιούν τόσο την πίεση όσο και την ταχύτητα του νερού για την παραγωγή ενέργειας, με σταθερές περυγωτές και αποδόσεις που υπερβαίνουν το 90%, καλύπτοντας περιοχή ισχύος από 100 περίπου kW μέχρι 10 ή 15 MW. Οι στρόβιλοι Francis, προσφέρονται σε ποικιλία διατάξεων και κυρίως διεύθυνσης του άξονα περιστροφής, ο οποίος μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος (Παπαντώνης, 2008)[80]. Επίσης, οι στρόβιλοι Francis αποτελούνται από το δρομέα, τα σταθερά πτερύγια (stay vanes), τα οδηγία πτερύγια (guide vanes), το σπειροειδές κέλυφος (spiral case) και τον αγωγό απαγωγής (draft tube). Αναλυτικότερα, ένας δρομέας απαρτίζεται από την κορώνα (crown), τον δακτύλιο (band), ο οποίος αφαιρείται σε περίπτωση που ο δρομέας λειτουργεί σε μικρό ύψος πτώσης, και τα πτερύγια (blades).

Επίσης, η διανομή του νερού περιμετρικά του δρομέα, στην περίπτωση των στροβίλων Francis πραγματοποιείται μέσω ενός σπειροειδούς περιβλήματος, κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο ή χάλυβα και το νερό αλλάζει τρεις φορές την φορά του. Όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα , ο δρομέας απαρτίζεται από καμπυλωτούς κάδους (Hou et al., 2024)[81].



Εικόνα 3.5. Στρόβιλος Francis [78]

Με την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας να αυξάνεται σημαντικά και τους σταθμούς αντλησιοταμίευσης να κατέχουν πάνω από 90% της παγκόσμιας αποθηκευτικής ικανότητας, η ακριβής μοντελοποίηση καθίσταται απαραίτητη για τη σταθερότητα του δικτύου και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών (Akbari et al., 2022; IEA) [5,49]. Συνεπώς, η μοντελοποίηση των στροβίλων Francis με τη χρήση ψηφιακών προσομοιωτών πραγματικού χρόνου (real time digital simulator - RTDS) είναι κρίσιμη για την ασφαλή δοκιμή πραγματικού εξοπλισμού σε προσομοιωμένες συνθήκες δικτύου, αποφεύγοντας κινδύνους ζημιάς σε πραγματικές εγκαταστάσεις (Akbari et al., 2022)[5]. Οι Ψηφιακοί Προσομοιωτές Πραγματικού Χρόνου (Real Time Digital Simulator – RTDS) προσφέρουν οικονομία χρόνου και κόστους σε σχέση με δοκιμές σε πραγματικούς σταθμούς, επιταχύνοντας την έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που είναι απαραίτητες για την ενεργειακή μετάβαση. Σύμφωνα με τους Akbari et al. (2022)[5], υπάρχουν τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες μοντελοποίησης των υδροστρόβιλων FRANCIS με διαφορετικά χαρακτηριστικά ακρίβειας και υπολογιστικής επιβάρυνσης:

- Μέσω του υπολογισμού της δυναμικής πίεσης της τουρμπίνας, βασιζόμενος στην εισερχόμενη ροή στις τουρμπίνα και στη θέση του ανοίγματος των πτερυγίων (guide vane opening), προσέγγιση που προτείνεται από «Working Group Prime Mover and Energy Supply» [82].

$$h = \left| \left(\frac{q}{gvo} \right)^2 \right|$$

$$t = h \cdot q \cdot \eta$$

h = δυναμική πίεση τουρμπίνας

q = ροή εισόδου τουρμπίνας

gvo = θέση ανοίγματος πτερυγίων
καθοδήγησης

t = ροπή τουρμπίνας

η = απόδοση τουρμπίνας

- Μέσω του γραμμικού μοντέλου που εξετάζει δύο επιλεγμένα σημεία λειτουργίας της τουρμπίνας, το σημείο σταθερής κατάστασης και ένα αυθαίρετο σημείο λειτουργίας, χρησιμοποιώντας εξισώσεις που αντιπροσωπεύσουν τη συμπεριφορά της τουρμπίνας μεταξύ των δύο επιλεγμένων σημείων (Shanab et al, 2020) [83]:

$$\Delta q = \frac{\partial q}{\partial h} \cdot \Delta h + \frac{\partial q}{\partial n} \cdot \Delta n + \frac{\partial q}{\partial gvo} \cdot \Delta gvo$$

$$\Delta t = \frac{\partial t}{\partial h} \cdot \Delta h + \frac{\partial t}{\partial n} \cdot \Delta n + \frac{\partial t}{\partial gvo} \cdot \Delta gvo$$

Δq = μεταβολή ροής

Δh = δυναμική μεταβολή πίεσης

Δn = μεταβολή ταχύτητας

Δgvo = μεταβολή θέσης ανοίγματος πτερυγίων καθοδήγησης

Δt = μεταβολή ροπής

- Μέσω της χρήσης του διαγράμματος Hill, στο οποίο παρέχονται πειραματικά αποτελέσματα της αντλίας-στρόβιλου κατά τη διάρκεια διαφορετικών συνθηκών δοκιμής και δίνεται η δυνατότητα εντοπισμού διαφορετικών τιμών για διαφορετικά σημεία λειτουργίας του υδροστρόβιλου. Για την αποτελεσματική χρήση του, προτείνεται η εφαρμογή πολικών συντεταγμένων, όπως παρουσιάζονται στη σχετική βιβλιογραφία (Perez-Diaz & Sarasua, 2015) [84].

$$\theta(q, n) = \tan^{-1} \left(\frac{q}{n} \right)$$

$$W_h(\theta) = \frac{h}{q^2 + n^2}$$

$$W_t(\theta) = \frac{t}{q^2 + n^2}$$

θ = πολική γωνία του σημείου λειτουργίας με τη μονάδα ροής q11 και τη μονάδα ταχύτητας n11.

$W_h(\theta)$ = παράμετρος δυναμικής πίεσης τουρμπίνας

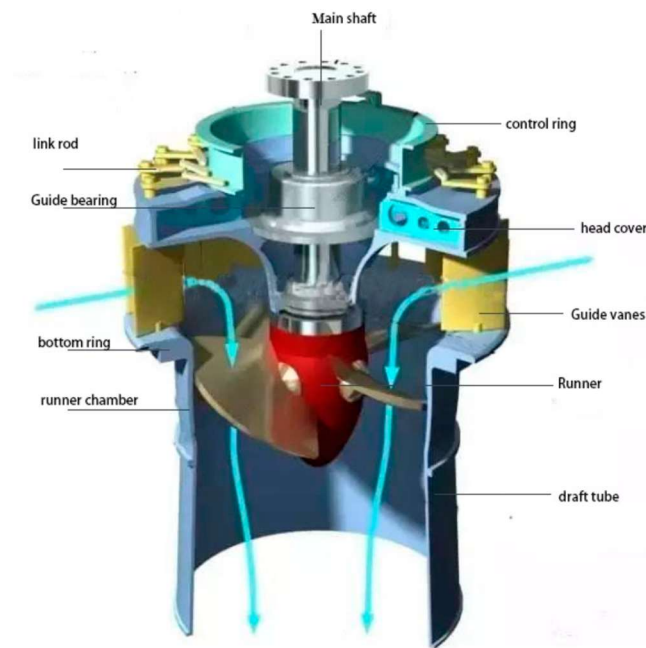
και υπολογίζει τη ροπή εξόδου της τουρμπίνας σε σημείο λειτουργίας

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής εξαρτάται από τον στόχο της μελέτης, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και την απαιτούμενη ακρίβεια, με τα αποτελέσματα από το σύστημα Power Hardware in the Loop (PHIL) να επιβεβαιώνουν ότι όλα τα μοντέλα παρέχουν ίδια απόκριση ενεργού ισχύος όταν ο στρόβιλος συνδέεται με ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο.

3.2.1.2 Υδροστρόβιλοι Kaplan

Οι στρόβιλοι Kaplan, επίσης στρόβιλοι αντίδρασης, είναι ιδανικοί για χαμηλά ύψη (<70 m) και υψηλές παροχές (70-1000 m³/s), διαθέτουν ρυθμιζόμενες πτερυγωτές για διατήρηση της μέγιστης απόδοσης σε ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, και μπορούν να παράγουν ισχύ έως 200 MW (Ghenaiet & Bakour, 2020; U.S. DOE, 2025)[85,86]. Ένας στρόβιλος Kaplan αποτελείται από έναν δρομέα και τα οδηγία ρυθμιζόμενα περύγια, τα οποία ελέγχουν την κατεύθυνση και την ποσότητα του νερού που φτάνει στον δρομέα. Η διατήρηση της πλήρους ροής στο εσωτερικό του στροβίλου εξασφαλίζεται από τη ρύθμιση των πτερυγίων του δρομέα, καθυστερώντας σημαντικά την εμφάνιση σπηλαιώσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτική λειτουργία του στροβίλου ακόμα σε περίπτωση μειωμένης ροής του ποταμού. Ο στρόβιλος τύπου Kaplan διατίθεται σε διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με τη θέση και τη κατασκευή της γεννήτριας. Αυτές περιλαμβάνουν τον τύπο προπέλας, τους βολβοειδείς (bulb), τους

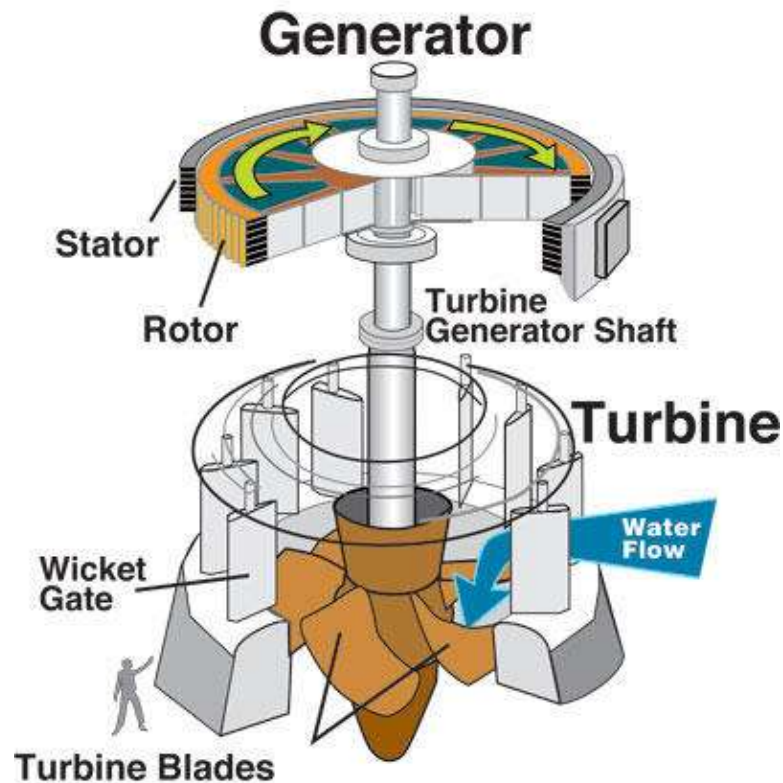
Straflo, VLH-turbine, Dive-turbine και Tyson-turbine. Οι Kaplan και Kaplan propeller-type διαθέτουν ελικοειδές περίβλημα (spiral) και αγωγό φυγής (draft tube) για την απομάκρυνση του νερού (Sathish et al., 2024).[87]



Εικόνα 3.6. Κύρια μέρη τουρμπίνας Kaplan [88]

3.1.1.3 Βολβοειδής Υδροστρόβιλος και Υδροστρόβιλος Αξονικής Ροής

Οι βολβοειδείς υδροστρόβιλοι (bulb turbines) αποτελούν μία ειδική κατηγορία υδροστροβίλων αντίδρασης οριζόντιου τύπου Kaplan και προορίζονται για εκμετάλλευση πολύ χαμηλών υδραυλικών υψών ($\leq 30\text{m}$) [89]. Η εφαρμογή τους πραγματοποιείται κυρίως σε έργα ροής ποταμού (run-of-river) και σε εγκαταστάσεις παραγωγής παλιρροϊκής ενέργειας για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης σε χαμηλά υδραυλικά ύψη. Είναι σχεδιασμένοι για μεγάλες παροχές νερού και χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι η βολβοειδής υδατοστεγής θήκη που περιέχει τη γεννήτρια και βρίσκεται τοποθετημένη σε οριζόντιο άξονα απευθείας εντός της ροής του νερού, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα .



Εικόνα 3.7. A turbine connected to a generator produces power inside a dam [89].

Η βολβοειδής θήκη λειτουργεί ως ακροφύσιο, αυξάνοντας την ταχύτητα του νερού καθώς πλησιάζει τα περύγια του στροβίλου, γεγονός που συμβάλλει στην υψηλή απόδοση του συστήματος, με τιμές που ξεπερνούν το 90% υπό βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (Quartier et al., 2022) [90].

Οι βολβοειδείς υδροστροβίλοι αποτελούνται από ενσωματωμένα μέρη, γεννήτριες, υδροδότη, κύριο άξονα, ρουλεμάν, δρομέα και στοιχεία από σκυρόδεμα, με όλα τα εργαζόμενα μέρη να βρίσκονται στον ίδιο άξονα [90].

Η κύρια διαφορά από τον κλασικό υδροστροβίλο Kaplan είναι ότι το νερό ρέει σε μικτή αξονική-ακτινική κατεύθυνση προς τον υδροδότη και όχι μέσω σπειροειδούς κελύφους. Τα κατευθυντήρια περύγια σε σχέση με τον άξονα του στροβίλου έχουν κλίση 60° , σχηματίζοντας έναν κωνικό υδροδότη σε αντίθεση με άλλους τύπους στροβίλων.

Οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής προορίζονται για εκμετάλλευση μικρών και μεσαίων υψομετρικών πτώσεων και αποτελούν την δεύτερη ειδική κατηγορία υδροστροβίλων αντίδρασης οριζόντιου τύπου Kaplan (Κοντίνη, 2016)[44]. Στην περίπτωση αυτών των υδροστροβίλων η κατεύθυνση της ροής του νερού παραμένει σχεδόν παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής του δρομέα και αυτή η δυνατότητα προσαρμογής καθιστά τον αξονικό στροβίλο ιδανικό για έργα τύπου run-of-river, όπου οι συνθήκες ροής δεν είναι σταθερές. Συνήθως, στους υδροστροβίλους αξονικής ροής η τοποθέτηση της γεννήτριας γίνεται κάθετα πάνω από τον στροβίλο, μέσα σε ξεχωριστό θάλαμο. Αντίθετα, στην περίπτωση των βολβοειδών υδροστροβίλων, η γεννήτρια τοποθετείται οριζόντια μέσα σε έναν υδατοστεγές περίβλημα, ο οποίος βρίσκεται εντός της ίδιας υδατοροής με τον στροβίλο. Αυτή

η σχεδιαστική διαφοροποίηση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση υδραυλικών απωλειών, επιτρέποντας πιο συμπαγείς κατασκευές, και καθιστώντας τους βολβοειδείς στροβίλους κατάλληλους για εφαρμογές με χαμηλό ύψος πτώσης και υψηλές παροχές. Η βασική διαφορά, μεταξύ των δύο κατηγοριών, έγκειται στη κατασκευή της γεννήτριας και στον τρόπο ενσωμάτωσης της ροής του νερού (στους αξονικούς στροβίλους βρίσκεται εκτός της ροής, ενώ στους βολβοειδείς εντός αυτής). Επιπλέον, οι βολβοειδείς απαιτούν ειδική μελέτη για θέματα συντήρησης και πρόσβασης, λόγω της θέσης της γεννήτριας, ενώ οι αξονικοί διευκολύνουν τις παρεμβάσεις στον μηχανολογικό εξοπλισμό (Κοντίνη, 2016) [44].

3.2.2 Υδροστροβίλοι Δράσεως

Σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους αντίδρασης, στους στροβίλους δράσεως κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα τμήμα της φτερωτής συμμετέχει στην μετατροπή της ενέργειας, χρησιμοποιώντας την κινητική ενέργεια του νερού που εκτοξεύεται μέσω ενός ακροφυσίου πάνω σε πετύργια (buckets) στον δρομέα του στροβίλου ενέργειας (Klein & Fox, 2022) [4]. Οι Khattak et al., 2016, [47] εξηγούν ότι στους στροβίλους δράσεως, χρησιμοποιείται η ταχύτητα του νερού (μία δέσμη υψηλής ταχύτητας) για την κίνηση του δρομέα σε ατμοσφαιρική πίεση, χωρίς να αναρροφάται στην κάτω πλευρά του στροβίλου και με το νερό εξέρχεται από το κάτω μέρος του περιβλήματος μετά την πρόσκρουση. Οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας τέτοιων υδροστροβίλων είναι οι τοποθεσίες με χαμηλό ρυθμό ροής και μεγάλο ύψος πτώσης. Οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι υδροστροβίλων δράσεως είναι οι τύπου Pelton, Cross Flow και Turgo.

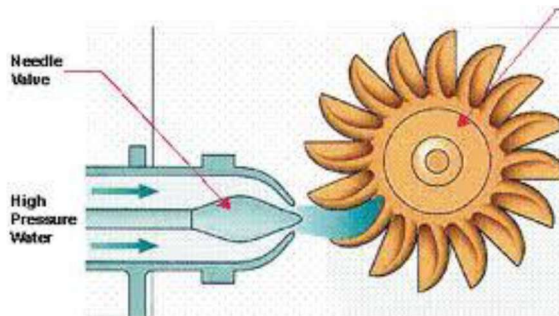
3.2.2.1 Υδροστροβίλοι Pelton

Οι στροβίλοι Pelton ανήκουν στην κατηγορία ώθησης και λειτουργούν σε υψηλά υδραυλικά ύψη (>300 m) με χαμηλές παροχές, μετατρέποντας την ταχύτητα των πιδάκων νερού σε μηχανική δύναμη μέσω πρόσκρουσης σε κοιλότητες (buckets), επιτυγχάνοντας αποδόσεις άνω του 90%. U.S. Department of Energy (2025) [86]. Η απόδοση των υδροστροβίλων Pelton μπορεί να αυξηθεί μέσω της παραμετρικής βελτιστοποίησης σχεδιασμού και των προσομοιώσεων λειτουργίας πολλαπλών ακροφυσίων (multi-jet) (Židonis et al., 2015) [76]. Στους υδροστροβίλους Pelton δεν υπάρχει αναρρόφηση καθώς το νερό εξέρχεται από το περίβλημα (Klein & Fox, 2022) [4]. Οι στροβίλοι Pelton διαθέτουν υδραυλική ισχύς η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια P_i και εκφράζεται από τη σχέση:

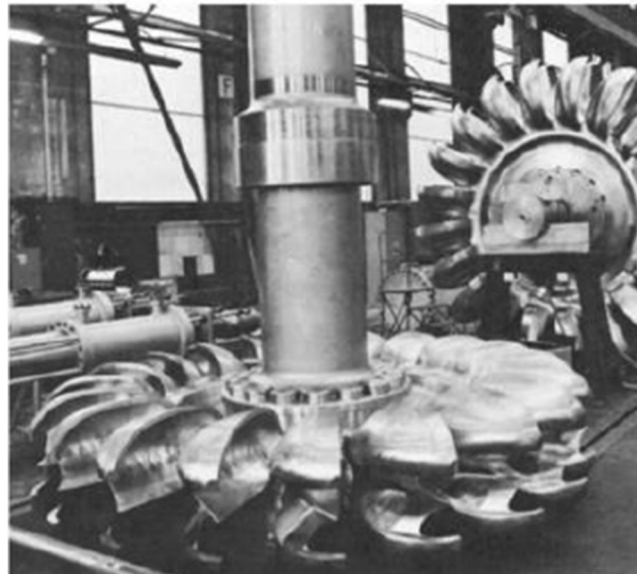
$$P_i = \gamma H Q$$

Όπου,

$\gamma = \rho \cdot g$ το ειδικό βάρος του υγρού



Εικόνα 3.8. Στρόβιλος Pelton [80].



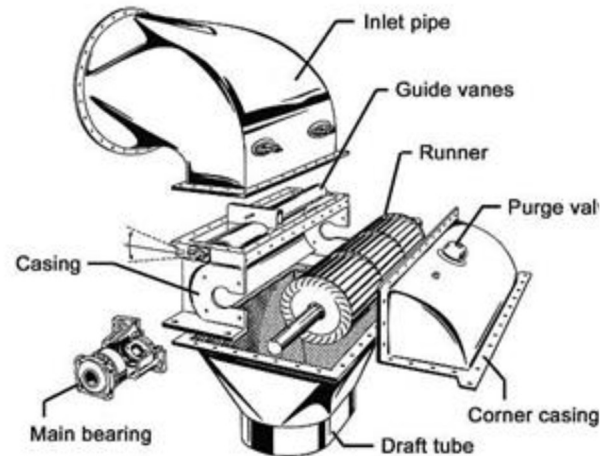
Εικόνα 3.9. Εγκατάσταση με τουρμπίνα ώθησης (Pelton) [76]

3.2.2.2 Υδροστρόβιλος Cross Flow ή Bianki

Οι υδροστρόβιλοι τύπου δράσης Cross Flow ή Bianki ενδείκνυνται για μικρές έως μεσαίες υψομετρικές διαφορές ($\leq 200\text{m}$) και ισχύς που μπορεί να φτάσει έως και 3 MW. Αποτελείται από έναν κυλινδρικό δρομέα με κυρτά περύγια, τα οποία εκτείνονται οριζόντια, από τη μία πλευρά στην άλλη, τοποθετημένα περιμετρικά ώστε να σχηματίζουν έναν κύλινδρο. Επίσης, αποτελείται και ένα οδηγό περύγιο, το οποίο ρυθμίζει τη ροή του νερού προς τον δρομέα, ελέγχοντας έτσι την ισχύ παραγωγής. Όλη η κατασκευή βρίσκεται μέσα σε κέλυφος, το οποίο στην αρχή έχει κυκλική διατομή για να συνδεθεί με τον αγωγό προσαγωγής και στη συνέχεια πλαταίνει, ώστε να προσαρμοστεί στο πλάτος του κυλίνδρου.



Εικόνα 3.10. Υδροστροβίλος Cross-Flow [44]



Εικόνα 3.11. Υδροστροβίλος Cross-Flow [80]

3.2.2.3 Υδροστροβίλος Turgo

Οι υδροστροβίλοι Turgo χρησιμοποιούνται σε μεσαίο ύψος πτώσης (15-300m) και αποτελούνται από τον τροχό Turgo και ένα ακροφύσιο. Το ακροφύσιο ρυθμίζει την ποσότητα νερού που εκτοξεύεται προς τον τροχό μέσω μιας κινούμενης βελόνας και εισέρχεται υπό γωνία 20° από τη μία πλευρά των σκαφιδίων. Έπειτα, εξέρχεται από την άλλη, επιτρέποντας στον στροβίλο Turgo να χειρίζεται μεγαλύτερη ροή από έναν Pelton της ίδιας διαμέτρου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση του μεγέθους της απαιτούμενης γεννήτριας, η απλότητα κατασκευής και κατά συνέπεια το κόστος εγκατάστασης, αποτελώντας και πλεονέκτημα. Οι υδροστροβίλοι Turgo είναι κατάλληλοι για μικρά υδροηλεκτρικά έργα χαμηλού κόστους, ωστόσο δεν χρησιμοποιούνται ευρέως. Η απόδοση των υδροστροβίλων Turgo μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση CFD για την πλήρη ανάλυση της πολυφασικής ροής στις λεπίδες (Khattak et al., 2016) [47].

3.3 Σύνοψη Υδροστροβίλων και Καμπύλες Απόδοσης

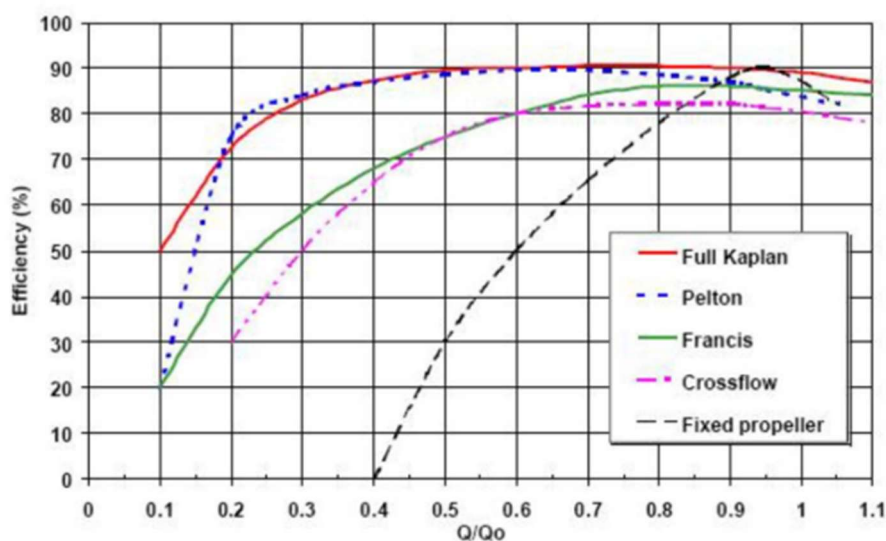
Οι καμπύλες απόδοσης αποτελούν βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των υδροστροβίλων, καθώς αποτυπώνουν τη μεταβολή της απόδοσης σε σχέση με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Η βασική έννοια των καμπυλών αυτών είναι κοινή για όλους τους τύπους υδροστροβίλων, είτε πρόκειται για στροβίλους δράσεως είτε για στροβίλους αντίδρασης· ωστόσο, διαφοροποιείται ως προς τη μορφή και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή τους.

Η διαφορά μεταξύ των επιπέδων εισροής αλλά και εκροής στην δεξαμενή, καθώς και η παραγωγική ικανότητα των μονάδων παραγωγής είναι άμεσα συνυφασμένα με το επίπεδο παραγωγής

υδροηλεκτρικής ενέργειας (Diniz 2007)[91]. Η απόδοση δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται κυρίως από την παροχή (q), δηλαδή τη ροή που διέρχεται από τη τουρμπίνα, το υψομετρικό φορτίο (h) και παράλληλα από τις απώλειες πίεσης στον αγωγό και τον συντελεστή απόδοσης της μονάδας παραγωγής (Diniz 2007)[91]. Η μεταβολή στις καμπύλες απόδοσης αποτυπώνεται μέσω των ονομαζόμενων hill curves ή αλλιώς hill diagrams, τα οποία παρουσιάζουν γραφικά περιοχές ίσης απόδοσης (level sets) και επιτρέπουν την πληρέστερη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της μονάδας (Diniz 2007)[91]. Η ονομασία προέρχεται από μορφή «λόφου» που έχει το σχήμα, απεικονίζοντας το σημείο μέγιστης απόδοσης.

Τα hill diagrams παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού του σημείου βέλτιστης απόδοσης (Best Efficiency Point – BEP), στο οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη ενεργειακή μετατροπή. Η σημασία τους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στον προγραμματισμό και τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών, καθώς η χρήση μίας σταθερής ή μέσης τιμής απόδοσης αποτελεί σημαντική απλοποίηση που ενδέχεται να οδηγήσει σε αποκλίσεις από τη βέλτιστη λειτουργία. Για τον λόγο αυτό, οι Diniz et al. (2007) [91] προτείνουν τη μαθηματική προσέγγιση των καμπυλών απόδοσης μέσω πολυωνυμικών συναρτήσεων, επιτρέποντας την ακριβέστερη προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς της μονάδας υπό μεταβαλλόμενες υδραυλικές συνθήκες.

Πίνακας 3.1. Βαθμός απόδοσης διαφόρων τύπων υδροστροβίλων [80]



Η παραπάνω θεωρητική προσέγγιση επιβεβαιώνεται και από μελέτες που αφορούν στροβίλους δράσεως, όπου η απόδοση εκφράζεται ως συνάρτηση διαφορετικών, αλλά αντίστοιχων λειτουργικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, οι (Thakker 2005) [92] δείχνουν ότι η απόδοση ενός στροβίλου ώθησης εξαρτάται από τον συντελεστή ροής (flow coefficient ϕ), τη ροπή, την πτώση πίεσης και την παροχή, παρουσιάζοντας χαρακτηριστική μορφή με ένα μέγιστο σημείο λειτουργίας ($\eta = T \cdot \omega / \Delta p \cdot Q$). Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι η απόδοση αυξάνεται έως ένα βέλτιστο σημείο και στη

συνέχεια μειώνεται, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη του BEP. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι γεωμετρικοί παράγοντες, όπως ο λόγος πλήμνης προς άκρο πτερυγίου και το διάκενο ακροπτερυγίου, επηρεάζουν σημαντικά τη μορφή των καμπυλών απόδοσης. Συνεπώς, παρά τις διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους και στα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται, η θεμελιώδης αρχή παραμένει κοινή: η απόδοση των υδροστροβίλων αποτελεί μεταβλητό μέγεθος που πρέπει να μελετάται μέσω κατάλληλων καμπυλών, οι οποίες αποτυπώνουν τη συμπεριφορά της μηχανής σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Thakker et al., 2005) [92].

3.4 Υδροηλεκτρικός Σταθμός Πλαστήρα



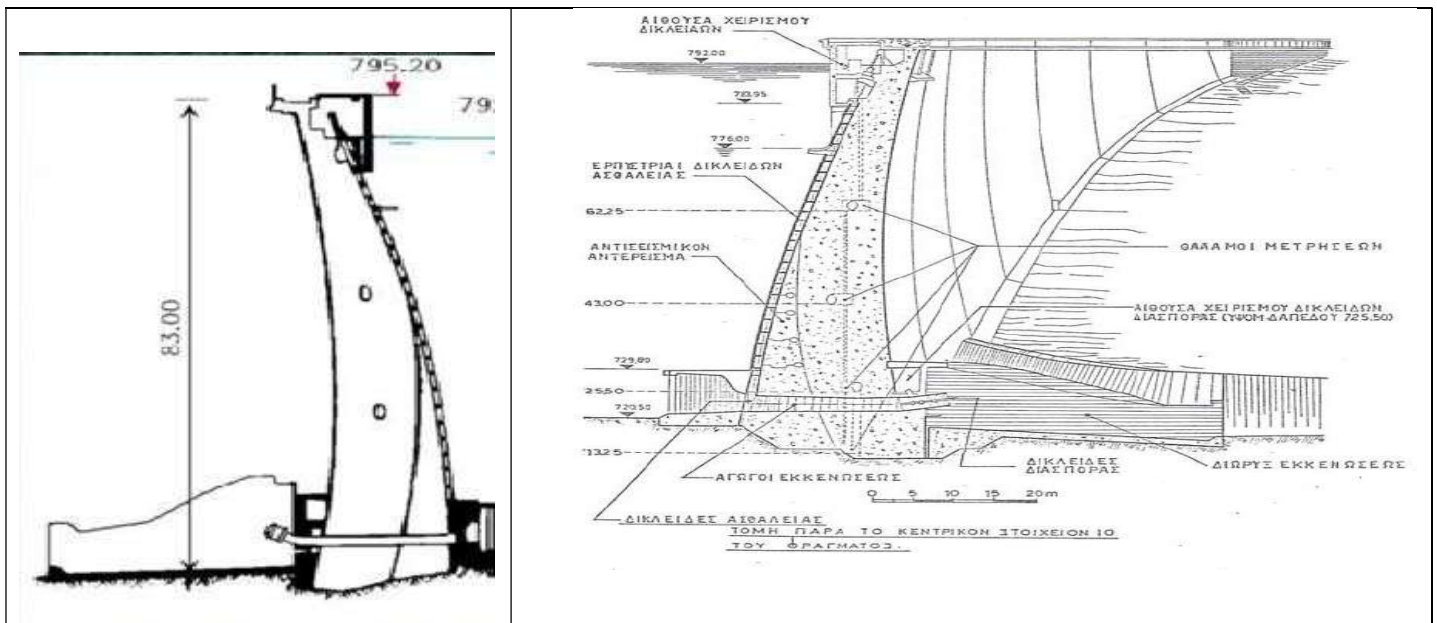
Εικόνα 3.12. Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ν.ΠΛΑΣΤΗΡΑ

Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ν.ΠΛΑΣΤΗΡΑ εγκατεστημένης ισχύς 120MW βρίσκεται 12Km έξω από την πόλη της Καρδίτσας και είναι έργο πολλαπλού σκοπού (παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας, ύδρευση ,άρδευση), το οποίο συνδυάζει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, άρδευση, ύδρευση και περιβαλλοντική αξιοποίηση της περιοχής. Η λειτουργία του βασίζεται στην εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας του αποθηκευμένου νερού, το οποίο διοχετεύεται ελεγχόμενα προς τους στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η εγκατάσταση αξιοποιεί το νερό της τεχνητής λίμνης, το οποίο μεταφέρεται μέσω αγωγού μεγάλου μήκους προς τον σταθμό παραγωγής, όπου μετατρέπεται η υδραυλική ενέργεια σε ηλεκτρική [93,94].

3.4.1. Φράγμα και Ταμιευτήρας Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ν. Πλαστήρα

Την ιδέα για την κατασκευή του Φράγματος και την δημιουργία της τεχνητής λίμνης συνέβαλε ο στρατηγός Πλαστήρας το 1925. Ο σταθμός παραγωγής τέθηκε σε λειτουργία σταδιακά, με την πρώτη

μονάδα να λειτουργεί για πρώτη φορά στις 10 Οκτωβρίου 1960, την δεύτερη στις 10 Οκτωβρίου 1961 και η τρίτη στις 10 Οκτωβρίου 1962. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Το φράγμα του Ν. Πλαστήρα διαθέτει ανώτατη στάθμη 792.00m, κατώτατη στάθμη 776.00m, επιφάνεια 25.20Km², περιεχόμενο 400X10⁶ m³ και εκμεταλλεύσιμο περιεχόμενο 300X10⁶ m³(ΔΕΗ) [95]. Οι υπερχειλιστές του φράγματος Πλαστήρα είναι ανοικτού τύπου χωρίς θύρες, με στόμια κοντά στη στέψη του φράγματος, παροχής 230 m³/s, διαστάσεων 7×2,5 m και υψόμετρο στέψης στα 792,00 m. Ο τύπος του φράγματος είναι τσιμεντένιο τοξωτό, με συνολικό όγκο 100X10³ m³, ύψος 83.00m, στέψη μήκος 220.00m, πλάτος 4.00m και υψόμετρο 795.20 m (Municipality of Plastiras, MoP, Region of Thessaly, RoT, 2020) [93]. Το φράγμα μεταφέρει τα φορτία στα πλευρικά αντερείσματα, μειώνοντας τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Ο ταμιευτήρας εξασφαλίζει την αποθήκευση νερού και τη ρύθμιση της παροχής, ώστε να καλύπτονται τόσο ενεργειακές όσο και υδρολογικές ανάγκες.



Εικόνα 3.13. Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ν.ΠΛΑΣΤΗΡΑ – Αξιοποίηση των υδάτων τη λίμνης Πλαστήρα

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός αξιοποιεί τα ύδατα της λίμνης Πλαστήρα, το οποίο μεταφέρεται μέσω αγωγού μήκους 5.670 m, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 120 MW με ταυτόχρονη λειτουργία των τριών μονάδων. Ο σταθμός αποτελείται από ένα κύριο κτίριο με δύο επίπεδα (ισόγειο και υπόγειο) και δύο επιμέρους ενσωματωμένα κτίρια που φιλοξενούν το μηχανουργείο, το ηλεκτρολογείο και το κέντρο ελέγχου με τα τεχνικά γραφεία. Στο ισόγειο βρίσκονται τρεις ίδιες μονάδες, καθεμία με δύο στροβίλους τύπου Pelton, δύο ακροφύσια ανά στρόβιλο, μία γεννήτρια ισχύος 40 MW, ρυθμιστή στροφών, καθώς και αντλίες ελαίου και εδράνων. Στο υπόγειο περιλαμβάνονται τα υδραυλικά εξαρτήματα, όπως σφαιρικές βαλβίδες, σερβοκινητήρες και συστήματα παράκαμψης, καθώς και αντλίες αποστράγγισης. Επιπλέον, υπάρχουν συστήματα ψύξης με αντλίες και ψυγεία για τη σωστή

λειτουργία των γεννητριών (Προκοπίου, 2021) [94]. Τα στροφεία τύπου Pelton είναι κατασκευασμένα από ειδικό κράμα ανοξείδωτου χάλυβα (περιεκτικότητας 13% σε χρώμιο), αποτελείται από 21 πτερύγια χωρισμένα στο μέσο διά μιας αιχμής, σχηματίζοντας δύο μικρότερα κυκλώματα. Το νερό προσπίπτει στα σκαφίδια του στροβίλου, διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα και εκτρέπεται κατά περίπου 180° , μετατρέποντας την κινητική του ενέργεια σε περιστροφική κίνηση του δρομέα. Τα σκαφίδια διαθέτουν διπλή κοιλότητα για ομαλή ροή και μείωση αξονικών δυνάμεων. Η παροχή του νερού ρυθμίζεται μέσω βελόνων κωνικής μορφής, οι οποίες κινούνται με πίεση λαδιού, ενώ η διακοπή της λειτουργίας επιτυγχάνεται με ακροφύσια πέδησης που δρουν αντίθετα στα πτερύγια. Η ροή ελέγχεται επίσης με σφαιρικές δικλείδες, ενώ η προπλήρωση του αγωγού γίνεται μέσω παρακαμπτήριων σωλήνων (bypass). Ο δρομέας συνδέεται με τη γεννήτρια μέσω άξονα που στηρίζεται σε έδρανα, τα οποία λιπαίνονται με λάδι για τη μείωση των τριβών, μέσω συστήματος αντλιών που εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία και προστασία του εξοπλισμού.

3.4.2. Περιγραφή Μονάδων Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ν. Πλαστήρα

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα διαθέτει τρεις μονάδες και κάθε μονάδα εμπεριέχει δύο στροβίλους(τουρμπίνες), που βρίσκονται εκατέρωθεν της Γεννήτριας (Καλαντζής, Α., 2025)[96]. Εντός του κελύφους υπάρχουν τα στροφεία, τα οποία κινούν περιστροφικά την μονάδα. Αντίστοιχα σε κάθε στροφείο καταλήγουν, σε γωνία μεταξύ τους, τα δύο ακροφύσια, απ' τα οποία φεύγει το νερό και δίδει την περιστροφική κίνηση σ' αυτά. Η παροχή ύδατος σ' ένα στροφείο όταν η μονάδα εργάζεται υπό πλήρες φορτίο είναι $4,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Τα στροφεία αυτά είναι τύπου PELTON, είναι κατασκευασμένα από ειδικό κράμα ανοξείδωτου χάλυβα (περιεκτικότητας 13% σε χρώμιο), και το κάθε στροφείο αποτελείται από 21 πτερύγια. Τα πτερύγια αυτά είναι χωρισμένα στο μέσο διά μιας αιχμής, ούτως ώστε να σχηματίζουν δύο μικρότερα κυκλώματα. Το νερό χτυπά επάνω στις αιχμές, κόβοντας η δέσμη στα δύο και εκτελεί κίνηση 180° ώσπου να χάσει την κινητική του ενέργεια, δίνοντας έτσι στα στροφεία περιστροφική κίνηση. Κάθε σκαφίδιο έχει διπλή κοιλότητα για διαχωρισμό της ροής και εξάλειψη των αξονικών δυνάμεων. Οι βελόνες είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό με τα στροφεία, στο μπροστινό μέρος έχουν κωνικό σχήμα, μετακινούνται με πίεση λαδιού από τις αντλίες ρυθμιστού και μένουν ή φεύγουν από τις αντίστοιχες υποδοχές αφήνοντας ελευθερία στην έξοδο του νερού. Εν συνεχεία, τα ακροφύσια πεδήσεως χτυπούν από την αντίθετη πλευρά τα πτερύγια, με αποτέλεσμα την απενεργοποίηση του στροφείου.

Με σκοπό να ελευθερωθεί η ροή του νερού, έχουν τοποθετηθεί σε κάθε μονάδα δύο σφαιρικές δικλείδες και για να γίνει η προπλήρωση του αγωγού σε κάθε μονάδα υπάρχουν δύο by – pass ή παρακαμπτήριοι σωλήνες, οι οποίοι συγκοινωνούν πριν και μετά την σφαιρική δικλείδα. Επιπρόσθετα, τα στροφεία συνδέονται μέσω ενός άξονα, ο οποίος στηρίζεται πάνω σε δύο έδρανα, με την Γεννήτρια, η οποία αποτελείται από ένα κινητό (δρομέας ή ρότορας) και ένα σταθερό μέρος (στάτης).

Το σύστημα διεγέρσεως της Γεννήτριας του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα περιλαμβάνει την Βοηθητική Διεγέρτρια της Γεννήτριας, την αμπλιντίνη (amplidyne) με τον κινητήρα της και την Κύρια Διεγέρτρια. Αρχικά, η Βοηθητική Διεγέρτρια είναι μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος με το ρεύμα της οποίας κινείται ο κινητήρας της αμπλιντίνης (ρεύμα 125V), που βρίσκεται σε σειρά συνδεδεμένη με το στροφείο, και δίνει ένα συνεχές ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται η Γεννήτρια. Σε σειρά επίσης με τους στροβίλους είναι και η μαγνητοηλεκτρική Γεννήτρια, με μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή παραμένοντα μαγνητισμό, η οποία παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 25 Hz με το οποίο εκκινεί τον κινητήρα του ρυθμιστού στροφών της Γεννήτριας. Ο μηχανισμός υπερταχύνσεως, που αποτελείται από μία συσκευή η οποία ελέγχει τις στροφές της Γεννήτριας και δίνει εντολή γενικής κρατήσεως μόλις αυτές υπερβούν τις 575 στροφές στο λεπτό, βρίσκεται επίσης στον ίδιο άξονα. Η Γεννήτρια μένει πάντα στις 500 στροφές εξαιτίας του μηχανισμού ρυθμιστή στροφών, ο οποίος διαθέτει σύστημα φυγοκεντρικού μηχανισμού και ορισμένες βαλβίδες και δίνει εντολή στους εκτροπείς και αυτοί με την σειρά τους στις βελόνες. Επιπρόσθετα, Η βοηθητική διεγέρτρια είναι γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες, η οποία με την κίνηση της μονάδος παράγει 115 V, και δίνει τάση στον κινητήρα της amplidyne ενισχύοντας τους πόλους της Κύριας Διεγέρτριας (Σ.Ρ. στα δακτυλίδια – δακτύλιο διέγερσης) και διεγείροντας τη μονάδα.

Στη συγκεκριμένη κατασκευή σύγχρονης μηχανής του υδροηλεκτρικού σταθμού Πλαστήρα, οι πόλοι είναι τοποθετημένοι στον δρομέα και περιστρέφονται, ενώ τα επαγωγικά «τύλιγματα» παραμένουν ακίνητα στον στάτη. Ο δρομέας φέρει το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα μέσω δακτυλίων και ψηκτρών, ενώ στάτης και δρομέας διαθέτουν ίσο αριθμό πόλων. Κατά τη φόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας, στο τύλιγμα του στάτη αναπτύσσεται ρεύμα, ακόμη και απουσία διέγερσης, λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης. Σε περιπτώσεις απότομου βραχυκυκλώματος, εμφανίζονται υψηλά ρεύματα που σταδιακά μειώνονται προς τη μόνιμη τιμή βραχυκύκλωσης· η μέγιστη (κρουστική) τιμή μπορεί να προκαλέσει έντονες ηλεκτρομαγνητικές καταπονήσεις και μηχανικές βλάβες, ιδιαίτερα στις κεφαλές των τυλιγμάτων. Η μηχανή ενδέχεται να φέρει τύλιγμα αποσβέσεως, το οποίο τοποθετείται στα πέλματα των πόλων (σε έκτυπους πόλους με ελάσματα) και αποτελείται από χάλκινες ράβδους συνδεδεμένες με δακτυλίου, σχηματίζοντας κλωβό ή πολικό πλέγμα, συμβάλλοντας στη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς και της ευστάθειας της μηχανής.

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Πλαστήρα διαθέτει συνολικά 162 αυλάκια ή $162/3=54$ αυλάκια ανά φάση. Ο αριθμός αγωγών σε κάθε φάση είναι $54 \times 2=108$, δηλαδή 2 αγωγοί σε κάθε αυλάκι.

$$E_{\pi} = 1.73 * E_{\phi} = 15 \text{ KV (φάση με φάση)}.$$

$$E_{\phi} = 15 \text{ KV} / 1.73 = 8.67 \text{ KV (φάση με ουδέτερο)}.$$

$I = I_\phi$ (η ένταση που περνά από το τύλιγμα μιας φάσεως).

Κάθε φάση του τυλίγματος αποτελείται από δώδεκα συγκροτήματα, αριθμός που αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό των πόλων, τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά. Στην περίπτωση τριφασικών τυλιγμάτων δύο στρώσεων, ο συνολικός αριθμός των ομάδων ισούται με τον αριθμό των αυλακιών του στάτη. Συνεπώς, για 162 αυλάκια προκύπτουν 162 ομάδες τυλίγματος, δηλαδή 54 ομάδες ανά φάση. Το πολικό βήμα, εκφρασμένο σε αριθμό αυλακιών, υπολογίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού αυλακιών προς τον αριθμό των πόλων ($162/12$), και ισούται με 13,5 αυλάκια. Αντίστοιχα, ο αριθμός αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση προκύπτει ίσος με 4,5 ($13,5/3$). Αυτό σημαίνει ότι κάθε ομάδα τυλίγματος μίας φάσης κατανέμεται σε 4,5 αυλάκια, ενώ η αρχή της επόμενης ομάδας της ίδιας φάσης εμφανίζεται μετά από μετατόπιση ίση με ένα πολικό βήμα, δηλαδή 13,5 αυλάκια.

$$N = \text{αυλακώσεις στάτη} = 162$$

$$m = \text{φάσεις} = 3$$

$$2p = \text{ζεύγη πόλων} = 6, p=6$$

$$q = N / 2pm = 4,5 \text{ αυλάκια ανά πόλο και φάση.}$$

Ως πόλος ορίζεται η περιοχή της κυλινδρικής επιφάνειας της ηλεκτρικής μηχανής, εντός της οποίας όλες οι πλευρές των πηνίων που βρίσκονται σε αυτή διαρρέονται από ρεύμα ίδιας κατεύθυνσης. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει συγκεκριμένο αριθμό αυλακώσεων, μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι αγωγίμες πλευρές των πηνίων, διαμορφώνοντας την αντίστοιχη μαγνητική πολική κατανομή. Στις σύγχρονες μηχανές απαντώνται συχνά τυλίγματα με κλασματικό συντελεστή κατανομής (q), καθώς η επιλογή αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της μορφής της επαγόμενης τάσης, προσεγγίζοντας περισσότερο την ιδανική ημιτονοειδή κυματομορφή. Επιπλέον, η χωρική απόσταση μεταξύ των αρχών των τυλιγμάτων των τριών φάσεων, η οποία αντιστοιχεί σε ηλεκτρική γωνία 120 μοιρών, μπορεί να εκφραστεί σε αριθμό αυλακιών μέσω της σχέσης $N/(p \cdot m)$. Για δεδομένα μεγέθη $N = 162$, $p = 6$ και $m = 3$, η απόσταση αυτή προκύπτει ίση με 9 αυλάκια. Κατά συνέπεια, η αρχή του τυλίγματος μιας φάσης απέχει από την αντίστοιχη της επόμενης φάσης κατά εννέα αυλάκια, εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη συμμετρία και ισορροπία στο τριφασικό σύστημα.

Κεφάλαιο 4ο: Μεθοδολογία και Σχεδιασμός Μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού

Σε αυτήν την ενότητα αναλύονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις βελτίωσης της.

4.1 Σκοπός του σχεδιασμού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού και η τεχνική περιγραφή της υπό μελέτη κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Σκοπός είναι η εφαρμογή των θεωρητικών αρχών σε μία κατασκευαστική κατασκευή, μέσω της οποίας αναπαρίσταται η διαδικασία μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας του νερού σε μηχανική και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική ενέργεια. Για τον σκοπό αυτό παρουσιάζονται διαδοχικά η συνολική κατασκευή του συστήματος, τα επιμέρους μηχανικά και ηλεκτρικά στοιχεία που το αποτελούν, η αρχή λειτουργίας του, καθώς και οι βασικές παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό. Παράλληλα, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης.

4.2. Μεθοδολογία

Ο σχεδιασμός του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού οργανώθηκε σε διαδοχικά λειτουργικά στάδια, με βάση τη λειτουργική αλληλουχία ενός κλειστού υδραυλικού κυκλώματος και τη σταδιακή μετατροπή της ενέργειας μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης.

Αρχικά, διαμορφώθηκε το σύστημα αποθήκευσης και κυκλοφορίας του νερού, αποτελούμενο από το δοχείο νερού, την αντλία παροχής και το δίκτυο σωληνώσεων. Για τη δυνατότητα ελεγχόμενης μεταβολής των υδραυλικών συνθηκών, η αντλία συνδέθηκε με μετατροπέα, ενώ στο κύκλωμα ενσωματώθηκαν μανόμετρο για την παρακολούθηση της πίεσης και ηλεκτροκίνητη βάνα Belimo για τη ρύθμιση της ροής προς τον υδροστρόβιλο.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε ο ηλεκτρικός πίνακας διαχείρισης, στον οποίο συγκεντρώθηκαν τα στοιχεία χειρισμού, προστασίας, τροφοδοσίας και επιτήρησης της εγκατάστασης, καθώς και το σύστημα ένδειξης παρουσίας νερού. Στη συνέχεια ενσωματώθηκε ο πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis, ώστε η ενέργεια του κινούμενου νερού να μετατρέπεται σε περιστροφική μηχανική ενέργεια. Η περιστροφή του άξονα μεταφέρεται μέσω μηχανικής σύζευξης στην ηλεκτρική μηχανή, η οποία προέρχεται από αντλία ψυκτικού υγρού και αξιοποιείται στην κατασκευή ως γεννήτρια.

Τέλος, στο ηλεκτρικό τμήμα ενσωματώθηκαν τρεις πυκνωτές χωρητικότητας 2 μF έκαστος, οι οποίοι συμμετέχουν στο κύκλωμα λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής, ενώ κατά τις αρχικές δοκιμές καταγράφηκε τάση της τάξης των 65 V. Η συνολική σχεδιαστική λογική ακολουθεί,

συνεπώς, τη διαδρομή αποθήκευση νερού → δημιουργία και έλεγχος ροής → μετατροπή υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική → μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική → μέτρηση και έλεγχος της λειτουργίας.

Με βάση τη λειτουργία τους, τα επιμέρους στοιχεία της πειραματικής κατασκευής μπορούν να οργανωθούν ως εξής:

5. Σύστημα αποθήκευσης και κυκλοφορίας νερού: δοχείο νερού χωρητικότητας 20 L, με πρόβλεψη προσθήκης δεύτερου συνδεδεμένου δοχείου ως συγκοινωνούντα δοχεία, αντλία παροχής νερού και δίκτυο σωληνώσεων με τα απαραίτητα εξαρτήματα σύνδεσης και χειροκίνητες βάνες.
6. Σύστημα ρύθμισης υδραυλικών συνθηκών: μετατροπέας συχνότητας (inverter) για τον έλεγχο της αντλίας και ηλεκτροκίνητη βάνα με ενεργοποιητή Belimo LR24A-SR, η οποία ελέγχεται από τον πίνακα και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ροής προς τον υδροστρόβιλο.
7. Σύστημα μέτρησης και επιτήρησης: μανόμετρο για την ένδειξη της πίεσης του κυκλώματος και σύστημα αισθητήρα/ένδειξης παρουσίας νερού.
8. Σύστημα ελέγχου και προστασίας: ηλεκτρικοί πίνακες με στοιχεία χειρισμού, προστατευτικές διατάξεις, τροφοδοτικό 24 V, ηλεκτρονόμους, κλέμμες διασύνδεσης, ενδεικτικές λυχνίες και τα σχετικά στοιχεία ελέγχου.
9. Σύστημα μετατροπής υδραυλικής σε μηχανική ενέργεια: πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis, ο οποίος προσεγγίζει τη λειτουργική αρχή ενός Francis χωρίς να αποτελεί πλήρη αναπαραγωγή συμβατικού βιομηχανικού στροβίλου.
10. Σύστημα μηχανικής μετάδοσης: άξονας εξόδου του υδροστροβίλου και σύστημα τροχαλίας/μετάδοσης για τη μεταφορά της περιστροφικής κίνησης προς την ηλεκτρική μηχανή.
11. Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής: ηλεκτρική μηχανή προερχόμενη από coolant pump, η οποία αξιοποιείται στην πειραματική κατασκευή ως γεννήτρια, και τρεις πυκνωτές χωρητικότητας 2 μF έκαστος, συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό της κύκλωμα.
12. Ηλεκτρική έξοδος: κύκλωμα από το οποίο λαμβάνεται η παραγόμενη ηλεκτρική τάση, η οποία στις αρχικές δοκιμές αναφέρθηκε ότι έφθασε περίπου τα 65 V, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

4.3. Περιγραφή Κατασκευής

Η πειραματική κατασκευή αναπτύχθηκε με σκοπό την αναπαράσταση, σε εργαστηριακή κλίμακα, της βασικής αρχής λειτουργίας ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού και της διαδοχικής μετατροπής της ενέργειας του νερού σε μηχανική και, τελικά, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία της βασίζεται σε κλειστό κύκλωμα ανακυκλοφορίας νερού, στο οποίο η απαιτούμενη υδραυλική ενέργεια παρέχεται μέσω ηλεκτροκίνητης αντλίας, προσομοιώνοντας ελεγχόμενα τις συνθήκες τροφοδοσίας που σε έναν πραγματικό υδροηλεκτρικό σταθμό διαμορφώνονται από τη διαθέσιμη παροχή και το υδραυλικό φορτίο.



Εικόνα 4.1. Ηλεκτρικός πίνακας με μετατροπέα συχνότητας (inverter) για τον έλεγχο της αντλίας παροχής του υδραυλικού κυκλώματος.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

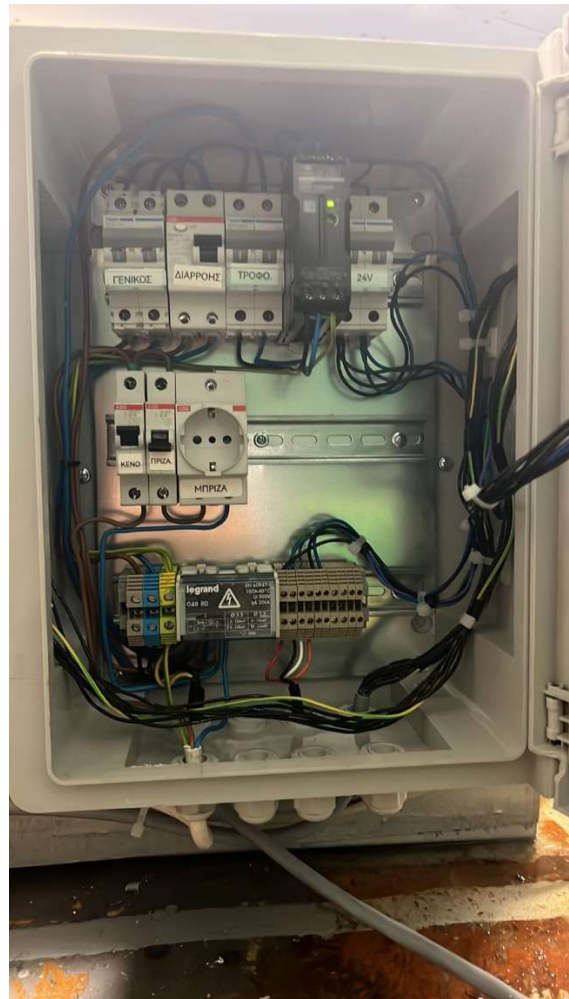
Για την κατασκευή της πειραματικής κατασκευής εγκαταστάθηκε ηλεκτρικός πίνακας με σκοπό τον έλεγχο της αντλίας παροχής του υδραυλικού κυκλώματος, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα X**. Βασικό κομμάτι του πίνακα αποτελεί ο μετατροπέας συχνότητας (Variable Frequency Drive – VFD/Inverter), μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο έλεγχος της λειτουργίας της αντλίας, καθώς διαθέτει ψηφιακή μονάδα χειρισμού και ενδείξεων για την

παρακολούθηση και παραμετροποίηση της λειτουργίας του. Ειδικότερα, ο μετατροπέας επιτρέπει τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας του ηλεκτροκινητήρα και, κατά συνέπεια, τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας. Στο εσωτερικό του πίνακα έχουν τοποθετηθεί διακόπτες και προστατευτικά στοιχεία, καθώς και κλέμμες μέσω των οποίων πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις της κατασκευής. Ο εξοπλισμός είναι τοποθετημένος εντός μεταλλικού ηλεκτρικού ερμαρίου, ώστε να επιτυγχάνεται οργανωμένη εγκατάσταση και προστασία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Η συγκεκριμένη κατασκευή αποτελεί μέρος του συστήματος ηλεκτρικού ελέγχου της κατασκευής και συνδέεται λειτουργικά με τον υπόλοιπο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του υπό μελέτη συστήματος.



Εικόνα 4.2. Πίνακας διαχείρισης κυκλώματος και βάνας παροχής της τουρμπίνας.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.



Εικόνα 4.3. Αντλία παροχής νερού και φωτοκύτταρο ένδειξης ύπαρξης νερού στο κύκλωμα.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Για τον έλεγχο και τη διαχείριση της λειτουργίας της πειραματικής κατασκευής χρησιμοποιείται ανεξάρτητος ηλεκτρικός πίνακας, μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο χειρισμός της βάνας που ρυθμίζει την παροχή νερού προς τον υδροστρόβιλο. Στην πρόσοψη του πίνακα έχουν τοποθετηθεί στοιχεία χειρισμού και ένδειξης, επιτρέποντας στον χειριστή να ελέγχει τις επιμέρους λειτουργίες του συστήματος και να παρακολουθεί την κατάσταση λειτουργίας του. Εν συνεχεία, στο εσωτερικό του πίνακα υπάρχουν διακόπτες και προστατευτικά στοιχεία, βοηθητικά ηλεκτρικά κυκλώματα, τροφοδοτικό 24 V, ηλεκτρονόμοι και κλέμμες διασύνδεσης του εξοπλισμού. Η συγκέντρωση των επιμέρους κυκλωμάτων σε έναν κεντρικό πίνακα διευκολύνει τον έλεγχο της εγκατάστασης και παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης της παροχής προς τον στρόβιλο κατά τη λειτουργία της πειραματικής κατασκευής.



Εικόνα 4.4. και 4.5 Αντλία παροχής νερού και φωτοκύτταρο ένδειξης ύπαρξης νερού στο κύκλωμα

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Στο σημείο αυτό περνάμε από τον ηλεκτρικό έλεγχο στο πραγματικό υδραυλικό κύκλωμα. Στην εσωτερική πλευρά της πόρτας του ηλεκτρικού πίνακα είναι εγκατεστημένα τα στοιχεία σύνδεσης και ελέγχου που αντιστοιχούν στις ενδείξεις και στα χειριστήρια της εμπρόσθιας όψης. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται το κύκλωμα ένδειξης παρουσίας νερού, το οποίο επιτρέπει την επιτήρηση της παρουσίας νερού στο κύκλωμα και παρέχει στον χειριστή σχετική οπτική ένδειξη μέσω του πίνακα. Παράλληλα, στην εσωτερική πλευρά της πόρτας έχουν τοποθετηθεί οι ηλεκτρικές συνδέσεις των διακοπών και των υπόλοιπων στοιχείων χειρισμού, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η διαχείριση των επιμέρους λειτουργιών της πειραματικής κατασκευής.



Εικόνα 4.6. Δοχείο νερού.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

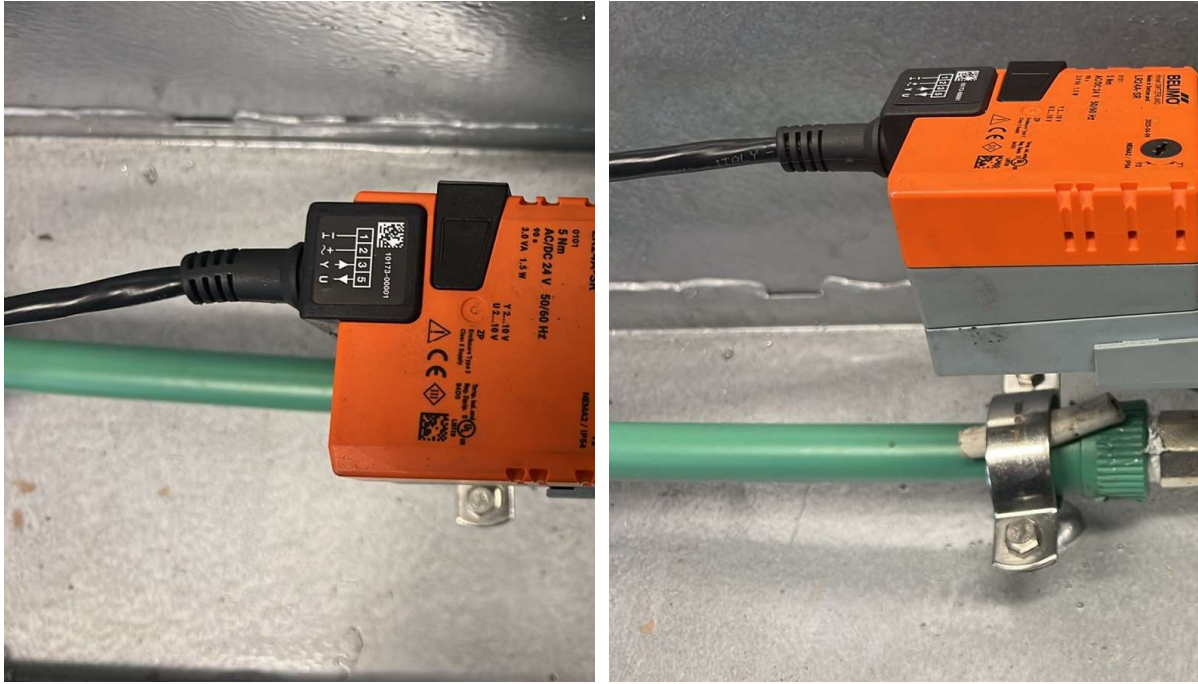


Εικόνα 4.7. Μανόμετρο ένδειξης πίεσης κυκλώματος.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Για την αποθήκευση και την τροφοδοσία του νερού της πειραματικής κατασκευής χρησιμοποιήθηκε δοχείο χωρητικότητας 20 L, το οποίο αποτελεί μέρος του κλειστού υδραυλικού κυκλώματος. Από το δοχείο τροφοδοτείται νερό στην αντλία και, μέσω του δικτύου σωληνώσεων, οδηγείται προς το τμήμα παραγωγής της εγκατάστασης.

Η παρακολούθηση της πίεσης του νερού στο υδραυλικό κύκλωμα πραγματοποιείται από εγκατεστημένο μανόμετρο επί της σωλήνωσης προσαγωγής. Το συγκεκριμένο όργανο παρέχει ένδειξη της πίεσης σε συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος και επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών της κατά τη λειτουργία της αντλίας και τη ρύθμιση της παροχής. Η μέτρηση της πίεσης αποτελεί σημαντική παράμετρο για την αξιολόγηση των υδραυλικών συνθηκών της πειραματικής κατασκευής, καθώς μπορεί, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες μετρήσεις του συστήματος, να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου υδραυλικού φορτίου και την αξιολόγηση της λειτουργίας του υδροστροβίλου.



Εικόνα 4.8. και 4.9. Βάνα Belimo LR24A-SR με ηλεκτρονικό χειρισμό από το κοντρόλερ του πίνακα.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

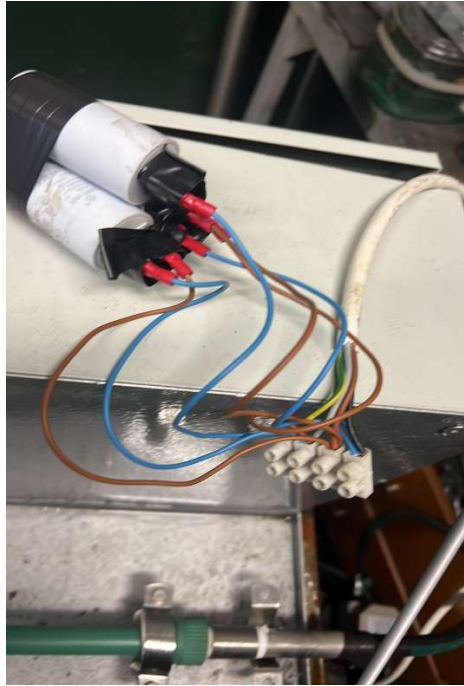
Για τη ρύθμιση της ποσότητας νερού που κατευθύνεται προς τον υδροστρόβιλο έχει εγκατασταθεί ηλεκτροκίνητη βάνα στο δίκτυο σωληνώσεων της πειραματικής κατασκευής. Η βάνα είναι εξοπλισμένη με ηλεκτρικό ενεργοποιητή Belimo LR24A-SR και ο χειρισμός της πραγματοποιείται ηλεκτρονικά μέσω του συστήματος ελέγχου που βρίσκεται στον κεντρικό πίνακα της εγκατάστασης. Μέσω της μεταβολής της θέσης της βάνας επιτυγχάνεται η ρύθμιση της διερχόμενης ροής νερού και η μεταβολή των υδραυλικών συνθηκών τροφοδοσίας του υδροστροβίλου.



Εικόνα 4.10. & Εικόνα 4.11. Αντλία ψύξης που χρησιμοποιείται σαν δυναμό

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Εν συνεχεία, η μετατροπή της παραγόμενης μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω ηλεκτρικής αντλίας ψυκτικού υγρού (coolant pump), η οποία αξιοποιείται με αντίστροφη λειτουργία ως ηλεκτρογεννήτρια. Κατά την κανονική της λειτουργία, η συγκεκριμένη ηλεκτρική μηχανή καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια για την περιστροφή της περρωτής και την κυκλοφορία του ρευστού. Στην υπό μελέτη κατασκευή εφαρμόζεται η αντίστροφη ενεργειακή διαδικασία, καθώς η περιστροφική κίνηση που παρέχεται από το υδροδυναμικό σύστημα αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, η μηχανική ενέργεια που αναπτύσσεται από την κίνηση του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική, επιτρέποντας την πειραματική αναπαράσταση του τελικού σταδίου ενεργειακής μετατροπής ενός υδροηλεκτρικού συστήματος. Η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί προσαρμογή εμπορικά διαθέσιμου εξοπλισμού στις απαιτήσεις της εργαστηριακής κατασκευής και όχι συμβατική υδροηλεκτρική γεννήτρια.



Εικόνα 4.12 Κατασκευή τριών πυκνωτών χωρητικότητας $2\ \mu\text{F}$ έκαστος στο ηλεκτρικό κύκλωμα της μηχανής που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια.

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα της μηχανής που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια έχουν συνδεθεί τρεις όμοιοι πυκνωτές, χωρητικότητας $2\ \mu\text{F}$ έκαστος. Οι πυκνωτές αποτελούν μέρος του κυκλώματος λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής και συμβάλλουν στη διαμόρφωση των απαιτούμενων ηλεκτρικών συνθηκών κατά τη λειτουργία της ως γεννήτριας.



Εικόνα 4.13 & Εικόνα 4.14. Πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis - τουρμπίνα (αλλά όχι με 100% ακρίβεια γιατί η πρωτότυπη έχει μεταβλητά πτερύγια)

Πηγή: Φωτογραφικό υλικό της κατασκευής.

Βασικό στοιχείο μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας του νερού σε μηχανική είναι ο υδροστρόβιλος, η κατασκευή του οποίου προσεγγίζει τη λειτουργική αρχή ενός στροβίλου τύπου Francis. Το νερό εισέρχεται στο σώμα του στροβίλου και αλληλοεπιδρά με τα πτερύγια της πτερωτής, προκαλώντας την περιστροφή της και, κατ' επέκταση, του άξονα εξόδου. Με τον τρόπο αυτό, μέρος της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε μηχανική περιστροφική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται στη μηχανή που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια. Η συγκεκριμένη κατασκευή δεν αποτελεί πιστή αναπαραγωγή ενός συμβατικού υδροστροβίλου Francis, αλλά εργαστηριακή προσέγγιση της αντίστοιχης αρχής λειτουργίας. Ειδικότερα, διαφοροποιείται ως προς τη γεωμετρία και τον τρόπο ελέγχου της ροής, καθώς δεν διαθέτει το πλήρες σύστημα ρυθμιζόμενων οδηγών πτερυγίων (wicket/guide vanes) που χαρακτηρίζει έναν συμβατικό στρόβιλο Francis. Για τον λόγο αυτό, ο χαρακτηρισμός «τύπου Francis» χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την περιγραφή

της λειτουργικής προσέγγισης του πρωτοτύπου και όχι για την πλήρη ταύτισή του με έναν τυποποιημένο βιομηχανικό στρόβιλο Francis.

Συνολικά, η κατασκευή αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαστηριακό σύστημα στο οποίο συνδυάζονται επιμέρους υδραυλικά, μηχανικά, ηλεκτρικά και συστήματα ελέγχου, με στόχο την πειραματική προσομοίωση της λειτουργίας ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Η δυνατότητα μεταβολής της λειτουργίας της αντλίας και του ανοίγματος της ηλεκτροκίνητης βάνας επιτρέπει τη διαμόρφωση διαφορετικών συνθηκών τροφοδοσίας του υδροστροβίλου, ενώ τα διαθέσιμα όργανα μέτρησης παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης βασικών λειτουργικών παραμέτρων. Η κατασκευή δεν αποσκοπεί στην πλήρη αναπαραγωγή ενός πραγματικού υδροηλεκτρικού σταθμού, αλλά στη δημιουργία ενός ελεγχόμενου πειραματικού μοντέλου μέσω του οποίου μπορούν να μελετηθούν η αλληλεπίδραση των επιμέρους υποσυστημάτων, η ακολουθία μετατροπής της ενέργειας και η απόκριση της εγκατάστασης υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η παραπάνω δομή αποτελεί, επομένως, τη βάση για την πειραματική διαδικασία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

4.4. Τεχνικοί υπολογισμοί και σχεδιαστικές παράμετροι

Πριν από την έναρξη της κατασκευής πραγματοποιήθηκε ο αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής κατασκευής σε ψηφιακή μορφή, με σκοπό τον καθορισμό της θέσης και της λειτουργικής σύνδεσης των βασικών επιμέρους τμημάτων. Η αρχική κατασκευή οργανώθηκε σύμφωνα με την ακολουθία δεξαμενή → αντλία → βάνα ρύθμισης → υδροστροβίλος → γεννήτρια, ώστε να αναπαριστά, σε μικρή εργαστηριακή κλίμακα, τη διαδρομή του νερού και τα διαδοχικά στάδια μετατροπής της ενέργειας. Μετά την ολοκλήρωση του αρχικού σχεδίου και την αξιολόγησή του σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή, ο σχεδιασμός χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την κατασκευή και τη σταδιακή ανάπτυξη της πειραματικής εγκατάστασης.

Μία από τις σημαντικότερες σχεδιαστικές παραμέτρους ήταν η πίεση λειτουργίας του υδραυλικού κυκλώματος. Σε μία πραγματική υδροηλεκτρική εγκατάσταση η διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια συνδέεται, μεταξύ άλλων, με την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων υδροληψίας και αξιοποίησης του νερού. Στην παρούσα κατασκευή, λόγω των περιορισμένων διαστάσεων και της απουσίας πραγματικής υψομετρικής διαφοράς, επιλέχθηκε η προσομοίωση του υδραυλικού φορτίου μέσω ηλεκτροκίνητης αντλίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες του διαθέσιμου εξοπλισμού, η μέγιστη πίεση λειτουργίας του κυκλώματος καθορίστηκε και επιβεβαιώθηκε πειραματικά περίπου στα 1,7 bar.

Για την εκτίμηση του ισοδύναμου ύψους στήλης νερού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$H = \frac{p}{\rho g}$$

όπου H είναι το ισοδύναμο ύψος στήλης νερού, p η πίεση, ρ η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Για πίεση $p = 1,7 \text{ bar} = 170.000 \text{ Pa}$, θεωρώντας $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ και $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, προκύπτει:

$$H = \frac{170000}{1000 \cdot 9,81} \approx 17,3 \text{ m}$$

Επομένως, η μέγιστη πίεση των 1,7 bar αντιστοιχεί θεωρητικά σε περίπου 17,3 m στήλης νερού. Η τιμή αυτή δεν αποτελεί πραγματικό ύψος πτώσης της πειραματικής κατασκευής, αλλά χρησιμοποιείται ως θεωρητικό ισοδύναμο της πίεσης που δημιουργείται από την αντλία. Στην πραγματική λειτουργία, το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο στην είσοδο της τελικής μηχανής είναι μικρότερο λόγω απωλειών που προκαλούνται από τις σωληνώσεις, τις γωνίες, τις βάνες και τις μεταβολές της διατομής. Οι συγκεκριμένες απώλειες δεν υπολογίστηκαν αναλυτικά στο πλαίσιο της εργασίας.

Στον σχεδιασμό λήφθηκαν επίσης υπόψη οι διάμετροι των σωληνώσεων, οι οποίες επιλέχθηκαν σύμφωνα με τη γεωμετρία της κατασκευής και τις διαστάσεις των διαθέσιμων εξαρτημάτων. Χρησιμοποιήθηκε σωλήνωση Φ25 μέχρι την αντλία, η οποία στη συνέχεια μειώνεται σε Φ20 μέχρι το τελικό τμήμα της εγκατάστασης και σε περίπου Φ10 στην είσοδο της μηχανής που χρησιμοποιείται ως τουρμπίνα-γεννήτρια. Παράλληλα, η χρήση μετατροπέα για την αντλία και ηλεκτροκίνητης βάνας επέτρεψε τη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας χωρίς να απαιτείται αλλαγή της βασικής γεωμετρίας του συστήματος.

4.5. Πειραματική διαδικασία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δοκιμές, με σκοπό τον έλεγχο της λειτουργίας του υδραυλικού κυκλώματος και της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά ελέγχθηκαν η κυκλοφορία του νερού, η λειτουργία της αντλίας μέσω του μετατροπέα, η ηλεκτροκίνητη βάνα και τα συστήματα μέτρησης και προστασίας. Η συνολική λειτουργία της μακέτας κρίθηκε ικανοποιητική, καθώς ήταν δυνατή η ελεγχόμενη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις παραγωγής. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκε ο κατασκευασμένος πειραματικός υδροστρόβιλος τύπου Francis σε συνδυασμό με

την αρχικά επιλεγμένη γεννήτρια. Μεταβλήθηκαν παράμετροι όπως η πίεση, οι στροφές της αντλίας, καθώς και η διάμετρος και η διαδρομή των αγωγών. Παρά τις τροποποιήσεις, δεν επιτεύχθηκαν τα επιθυμητά αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε δεύτερη λύση, με χρήση αντλίας ψυκτικού υγρού ως μηχανής παραγωγής ηλεκτρικής τάσης. Οι μετρήσεις επικεντρώθηκαν κυρίως στην πίεση του κυκλώματος και στην παραγόμενη τάση. Η πίεση καταγραφόταν μέσω ψηφιακού μανομέτρου, ενώ η τάση εξόδου μετρήθηκε με πολύμετρο. Στη μέγιστη εξεταζόμενη πίεση των 1,7 bar καταγράφηκε τάση περίπου 65 V AC. Δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρεύματος υπό φορτίο και παροχής νερού και, επομένως, δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος και του συνολικού βαθμού απόδοσης της κατασκευής.

4.6 Επεξεργασία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δοκιμές για τον έλεγχο της λειτουργίας του υδραυλικού και ηλεκτρικού τμήματος. Αρχικά δοκιμάστηκε ο κατασκευασμένος υδροστρόβιλος σε συνδυασμό με την πρώτη ηλεκτρική μηχανή και κατά τις δοκιμές μεταβλήθηκαν παράμετροι όπως, η πίεση του κυκλώματος, οι στροφές της αντλίας και η διαμόρφωση των αγωγών. Καθώς η συγκεκριμένη λύση δεν λειτούργησε επιθυμητά, η κατασκευή διαμορφώθηκε με χρήση της αντλίας ψυκτικού υγρού ως μηχανής παραγωγής.

Στην τελική κατασκευή πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων με σταδιακή μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας της αντλίας μέσω του μετατροπέα. Για κάθε σημείο λειτουργίας καταγράφηκαν η συχνότητα της αντλίας (Hz), η πίεση του υδραυλικού κυκλώματος (bar) με τη χρήση ψηφιακού μανομέτρου και η παραγόμενη εναλλασσόμενη τάση (V AC) μέσω πολυμέτρου. Με τον τρόπο αυτό συγκεντρώθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της κατασκευής

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η ολοκλήρωση της πειραματικής κατασκευής οδήγησε στην ανάπτυξη ενός λειτουργικού μοντέλου μικρής κλίμακας, μέσω του οποίου κατέστη δυνατή η αναπαράσταση της βασικής διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την κίνηση του νερού. Βασικός στόχος της κατασκευής δεν ήταν η ακριβής αναπαραγωγή μιας πραγματικής υδροηλεκτρικής μονάδας, αλλά η πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας και της μετατροπής της αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η αρχική ιδέα της εργασίας συνδέθηκε με τη δυνατότητα αξιοποίησης φυσικών υδάτινων ροών, όπως εκείνων που συναντώνται σε περιοχές με πηγές και καταρράκτες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περιοχή των Λουτρών Πόζαρ. Ωστόσο, λόγω της εργαστηριακής κλίμακας και της αδυναμίας πραγματοποίησης δοκιμών σε φυσική ροή, επιλέχθηκε η δημιουργία ελεγχόμενου κλειστού υδραυλικού κυκλώματος. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η πραγματοποίηση επαναλαμβανόμενων δοκιμών και η μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης. Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω δύο δοχείων χωρητικότητας 20 L έκαστο, τα οποία συνδέθηκαν παράλληλα σύμφωνα με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων. Η κυκλοφορία του νερού επιτεύχθηκε με ηλεκτροκίνητη αντλία, η ταχύτητα περιστροφής της οποίας ρυθμίζεται μέσω μετατροπέα. Η χρήση της αντλίας αποτέλεσε πρακτικό τρόπο προσομοίωσης του διαθέσιμου υδραυλικού φορτίου, καθώς δεν υπήρχε πραγματική υψομετρική διαφορά στην εργαστηριακή εγκατάσταση. Σε πλήρη ένταση δημιουργεί μέγιστη πίεση της τάξης 1,7 bar.

Η πίεση παρακολουθείται μέσω ψηφιακού μανομέτρου, ενώ η ποσότητα νερού που κατευθύνεται προς το τελικό τμήμα μετατροπής της ενέργειας ελέγχεται με ηλεκτροκίνητη βάνα. Η θέση της βάνας μεταβάλλεται μέσω ποτενσιομέτρου από τον ηλεκτρικό πίνακα και εμφανίζεται ψηφιακά, επιτρέποντας τον έλεγχο της εγκατάστασης χωρίς χειροκίνητη επέμβαση στο σημείο της βάνας. Επιπλέον, αισθητήριο παρουσίας νερού λειτουργεί ως στοιχείο προστασίας, καθώς η απουσία νερού οδηγεί στη διακοπή λειτουργίας του αντίστοιχου κυκλώματος.

Κατά την ανάπτυξη της πειραματικής εγκατάστασης πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές δοκιμές και τροποποιήσεις, καθώς η αρχική διαμόρφωση δεν παρείχε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην πρώτη εκδοχή χρησιμοποιήθηκε κατασκευασμένος πειραματικός υδροστρόβιλος, η γεωμετρία του οποίου βασίστηκε, με ορισμένες διαφοροποιήσεις, στη λειτουργική αρχή ενός στροβίλου Francis. Με την τελική διαμόρφωση πραγματοποιήθηκε οργανωμένη σειρά μετρήσεων. Η συχνότητα λειτουργίας της αντλίας μεταβαλλόταν μέσω του μετατροπέα και για κάθε σημείο λειτουργίας καταγράφονταν η αντίστοιχη πίεση του νερού και η παραγόμενη εναλλασσόμενη τάση. Η συχνότητα της αντλίας μεταβλήθηκε από 0 έως 56 Hz, ενώ η πίεση του κυκλώματος αυξήθηκε από 0,014 έως 1,34 bar (βλ. Πίνακας 5.1).

Κατά τις δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η διαθέσιμη παροχή και πίεση δεν ήταν επαρκείς ώστε το συγκεκριμένο σύστημα υδροστροβίλου και ηλεκτρικής μηχανής να αναπτύξει τις απαιτούμενες στροφές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις στο τμήμα της σωλήνωσης μεταξύ της ηλεκτροκίνητης βάνας και του υδροστροβίλου. Ειδικότερα, μειώθηκε η διατομή της σωλήνωσης και χρησιμοποιήθηκε ακροφύσιο οπής περίπου 8 mm, με στόχο την καλύτερη κατεύθυνση της δέσμης του νερού προς τα πτερύγια και την αύξηση της ταχύτητας εξόδου του νερού. Παρά τις αλλαγές, η απόδοση του συνδυασμού υδροστροβίλου–γεννήτριας παρέμεινε ανεπαρκής για τον σκοπό της κατασκευής. Το αποτέλεσμα αυτό οδήγησε σε σημαντική τροποποίηση του αρχικού σχεδιασμού. Ο ανεξάρτητος υδροστροβίλος και η αντίστοιχη ηλεκτρική μηχανή αντικαταστάθηκαν, ως προς το τελικό στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από μία ηλεκτρική αντλία ψυκτικού υγρού, η οποία χρησιμοποιήθηκε αντίστροφα ως πειραματική ηλεκτρική μηχανή παραγωγής. Η επιλογή αυτή επέτρεψε την άμεση αλληλεπίδραση της ροής του νερού με την ενσωματωμένη πτερωτή της μηχανής, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις για ξεχωριστή μηχανική μετάδοση.

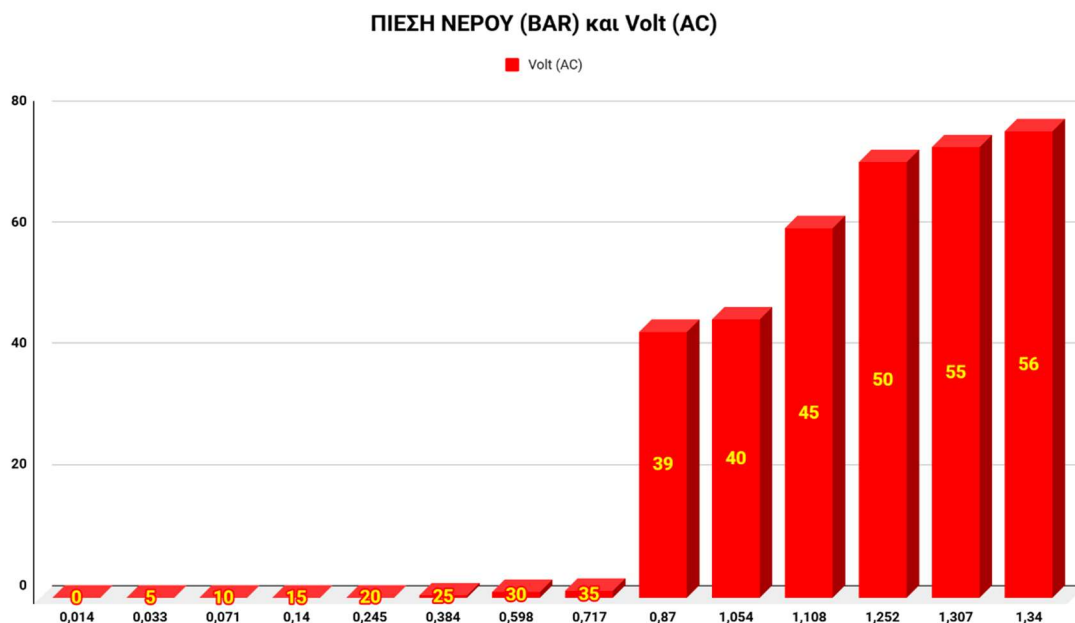
Κατά τη λειτουργία της τελικής κατασκευής, το νερό διέρχεται από την ηλεκτροκίνητη βάνα και οδηγείται στην είσοδο της μηχανής που χρησιμοποιείται ως γεννήτρια. Η διάμετρος του κύριου δικτύου είναι Φ25 μέχρι την αντλία κυκλοφορίας και Φ20 στο επόμενο τμήμα, ενώ στην είσοδο της τελικής μηχανής η διατομή περιορίζεται περίπου στα Φ10. Η διέλευση του νερού προκαλεί την περιστροφή της εσωτερικής πτερωτής και, μέσω του άξονα, την περιστροφή του ηλεκτρικού μέρους της μηχανής.

Πίνακας 5.1. Πειραματικές μετρήσεις συχνότητας λειτουργίας της αντλίας, πίεσης νερού και παραγόμενης τάσης AC. Πηγή: Πειραματικές μετρήσεις της κατασκευής.

Hz Αντλίας	Πίεση Νερού (Bar)	Volt (AC)
0	0,014	0
5	0,033	0
10	0,071	0
15	0,14	0
20	0,245	0,1
25	0,384	0,4
30	0,598	0,9
35	0,717	1,2
39	0,87	44
40	1,054	46
45	1,108	61

50	1,252	72
55	1,307	74,5
56	1,34	77

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη λειτουργία του μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού. Καταγράφηκε η συχνότητα λειτουργίας της αντλίας μέσω του μετατροπέα, της αντίστοιχης πίεσης το υδραυλικού κυκλώματος και της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης. Στις χαμηλές συχνότητες λειτουργίας η παραγόμενη τάση ήταν μηδενική ή ιδιαίτερα μικρή. Συγκεκριμένα, μέχρι τα 15 Hz δεν καταγράφηκε τάση, ενώ στα 20, 25, 30 και 35 Hz μετρήθηκαν αντίστοιχα 0,1, 0,4, 0,9 και 1,2 V AC. Σημαντική μεταβολή εμφανίστηκε στα 39 Hz, όπου η πίεση έφτασε τα 0,87 bar και η παραγόμενη τάση αυξήθηκε στα 44 V AC. Μετά το συγκεκριμένο σημείο παρατηρήθηκε γενικά συνεχής αύξηση της ηλεκτρικής τάσης. Στα 40 Hz και πίεση 1,054 bar καταγράφηκαν 46 V AC, ενώ στα 45 Hz και 1,108 bar η τάση αυξήθηκε στα 61 V AC. Αντίστοιχα, στα 50 Hz και 1,252 bar καταγράφηκαν 72 V AC, στα 55 Hz και 1,307 bar καταγράφηκαν 74,5 V AC, ενώ η μεγαλύτερη τιμή της συγκεκριμένης σειράς μετρήσεων σημειώθηκε στα 56 Hz, όπου για πίεση 1,34 bar η παραγόμενη τάση έφτασε τα 77 V AC.



Εικόνα 5.1. Μεταβολή της παραγόμενης τάσης (V AC) σε συνάρτηση με την πίεση του υδραυλικού κυκλώματος (bar). Πηγή: Πειραματικές μετρήσεις της κατασκευής.

Το σημαντικότερο μετρημένο αποτέλεσμα προέκυψε στη μέγιστη πίεση λειτουργίας της πειραματικής εγκατάστασης. Για ένδειξη πίεσης περίπου 1,7 bar, στην ηλεκτρική έξοδο μετρήθηκε

εναλλασσόμενη τάση περίπου 65 V AC. Το αποτέλεσμα επιβεβαίωσε ότι η συγκεκριμένη κατασκευή μπορούσε να μετατρέψει μέρος της παρεχόμενης υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Ωστόσο, δεν πραγματοποιήθηκε αξιόπιστη μέτρηση του παραγόμενου ρεύματος υπό συγκεκριμένο ηλεκτρικό φορτίο. Για τον λόγο αυτό, από τα διαθέσιμα δεδομένα δεν μπορεί να υπολογιστεί η πραγματική ηλεκτρική ισχύς εξόδου ούτε ο συνολικός βαθμός απόδοσης της κατασκευής. Η τιμή των 65 V θα πρέπει επομένως να αντιμετωπιστεί ως αποτέλεσμα μέτρησης τάσης και όχι ως πλήρης ένδειξη της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την επιστημονική εγκυρότητα: 65 V χωρίς μέτρηση ρεύματος και φορτίου δεν σημαίνει ότι γνωρίζουμε πόση ηλεκτρική ισχύ παράγεται.

Η μέγιστη μετρούμενη πίεση των 1,7 bar μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία θεωρητική προσέγγιση του αντίστοιχου υδραυλικού φορτίου. Αγνοώντας προς το παρόν τις απώλειες και θεωρώντας ότι η πίεση μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος στήλης νερού, προκύπτει:

$$H = \frac{p}{\rho g}$$

Και για $p = 1,7 \text{ bar} = 170.000 \text{ Pa}$, $\rho \simeq 1000 \text{ kg/m}^3$ και $g = 9,81 \text{ m/s}^2$:

$$H \simeq 17,3 \text{ m}$$

Επομένως, η μέγιστη πίεση της κατασκευής αντιστοιχεί θεωρητικά σε περίπου 17,3 m στήλης νερού. Η τιμή αυτή αποτελεί ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο πίεσης και όχι πραγματική υψομετρική διαφορά της κατασκευής. Στην πραγματική κατασκευή αναμένονται απώλειες λόγω τριβών στις σωληνώσεις, αλλαγών διεύθυνσης, τοπικών στενώσεων, βανών και μεταβολών της διατομής. Καθώς οι συγκεκριμένες απώλειες δεν μετρήθηκαν ούτε υπολογίστηκαν αναλυτικά, δεν είναι ορθό να θεωρηθεί ότι ολόκληρο το θεωρητικό φορτίο των 17,3 m είναι διαθέσιμο στην τελική μηχανή.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι επιτεύχθηκε ο βασικός λειτουργικός στόχος της εργασίας, δηλαδή η ανάπτυξη μιας μικρής πειραματικής εγκατάστασης στην οποία η ελεγχόμενη κίνηση του νερού μπορεί να προκαλέσει περιστροφική κίνηση και τελικά παραγωγή ηλεκτρικής τάσης. Ιδιαίτερα σημαντικό αποτέλεσμα αποτελεί η καταγραφή περίπου 65 V AC στη μέγιστη εξεταζόμενη πίεση των 1,7 bar. Επίσης, η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας της αντλίας μέσω του μετατροπέα συνοδεύεται από αύξηση της πίεσης του υδραυλικού κυκλώματος, επιτρέποντας τη δημιουργία διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας. Παράλληλα, από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η αύξηση της πίεσης δεν οδηγεί σε αντίστοιχη γραμμική αύξηση της παραγόμενης τάσης σε ολόκληρο το εξεταζόμενο εύρος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή μεταξύ 35 και 39 Hz. Στα 35 Hz, με πίεση 0,717 bar, η παραγόμενη τάση ήταν μόλις 1,2 V AC, ενώ στα 39 Hz και σε πίεση 0,87 bar αυξήθηκε απότομα στα 44 V AC. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει την ύπαρξη μιας περιοχής μετάβασης μεταξύ 0,717 και 0,87 bar, πάνω από την οποία η ηλεκτρική μηχανή αρχίζει να αναπτύσσει σημαντικά μεγαλύτερη τάση. Δεν είναι, ωστόσο, δυνατό να προσδιοριστεί με ακρίβεια η αιτία αυτής της απότομης μεταβολής μόνο από τις διαθέσιμες μετρήσεις, καθώς δεν καταγράφηκαν ταυτόχρονα η παροχή του νερού και η ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής.

Η αρχική προσδοκία ήταν η επίτευξη υψηλότερης τάσης, περίπου 110 V, ώστε να καταστεί δυνατή η σύνδεση κατάλληλου φορτίου για την επίδειξη της παραγόμενης ενέργειας. Η τιμή αυτή δεν επιτεύχθηκε, γεγονός που μπορεί να συσχετιστεί με τους περιορισμούς της διαθέσιμης υδραυλικής τροφοδοσίας και της ίδιας της κατασκευής. Η περιορισμένη παροχή, οι πολυάριθμες γωνίες του δικτύου, οι μεταβολές της διαμέτρου των σωληνώσεων και η μικρή διάσταση της περωτής αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος. Ιδιαίτερα σημαντικός περιορισμός είναι ότι η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει σχεδιαστεί εξ αρχής ως υδροστρόβιλος και γεννήτρια. Πρόκειται για προσαρμογή διαθέσιμου εξοπλισμού στις ανάγκες ενός πρωτοτύπου μικρής κλίμακας. Συνεπώς, το αποτέλεσμα των 65 V δεν πρέπει να αξιολογείται με βάση τις προδιαγραφές μιας πραγματικής υδροηλεκτρικής μονάδας, αλλά σε σχέση με το πείραμα, τις διαστάσεις και τον διαθέσιμο εξοπλισμό της κατασκευής. Παράλληλα, η αποτυχία της πρώτης διαμόρφωσης δεν αποτελεί αρνητικό αποτέλεσμα της εργασίας. Αντίθετα, ανέδειξε στην πράξη τη σημασία της σωστής αντιστοίχισης μεταξύ διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας, χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου, ταχύτητας περιστροφής και χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η αλλαγή της τελικής μηχανής μετά από επαναλαμβανόμενες δοκιμές αποτελεί μέρος της διαδικασίας ανάπτυξης και βελτιστοποίησης του πρωτοτύπου.

Τέλος, τα 77 V AC αποτελούν μέτρηση τάσης χωρίς γνωστό ηλεκτρικό φορτίο και δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως μέτρο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Για τον προσδιορισμό της πραγματικής ισχύος θα ήταν απαραίτητη η μέτρηση της τάσης και του ρεύματος υπό ελεγχόμενο φορτίο. Αντίστοιχα,

χωρίς μέτρηση της παροχής δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί με ακρίβεια η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς και, κατά συνέπεια, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

Περιορισμοί και Μελλοντικές Έρευνες

Ο σημαντικότερος περιορισμός της εργασίας σχετίζεται με τη μικρή κλίμακα της εγκατάστασης, γεγονός που απαιτούσε μικρή παραλλαγή στον υδροστροβίλο τύπου Francis. Καθότι αποτελεσματικός δεν ταίριαζε απόλυτα με τον τύπο γεννήτριας που απαιτείται για την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, δεν υπήρχε πραγματική υψομετρική διαφορά με αποτέλεσμα το απαιτούμενο υδραυλικό φορτίο έπρεπε να προσομοιωθεί μέσω αντλίας. Πρόσθετος περιορισμός ήταν η αδυναμία δοκιμής της εγκατάστασης σε πραγματική φυσική ροή. Σε μία πραγματική εφαρμογή η παροχή και το διαθέσιμο υδραυλικό φορτίο θα μεταβάλλονταν ανάλογα με τις τοπικές και χρονικές υδρολογικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της παρούσας κατασκευής δεν μπορούν να μεταφερθούν απευθείας σε μία φυσική τοποθεσία χωρίς προηγούμενες υδρολογικές και τεχνικές μετρήσεις. Τέλος, η απουσία μέτρησης παροχής, ταχύτητας περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής και ηλεκτρικού ρεύματος υπό γνωστό φορτίο δεν επιτρέπει τον πλήρη ενεργειακό χαρακτηρισμό της εγκατάστασης. Επομένως, δεν είναι δυνατός ο αξιόπιστος υπολογισμός της υδραυλικής ισχύος εισόδου, της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου και του συνολικού βαθμού απόδοσης.

Μία μελλοντική εξέλιξη της κατασκευής θα μπορούσε να βασιστεί σε ισχυρότερη αντλία, ικανή να δημιουργεί μεγαλύτερη πίεση και παροχή, ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του αρχικά κατασκευασμένου υδροστροβίλου υπό ευνοϊκότερες συνθήκες λειτουργίας. Παράλληλα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική γεννήτρια κατάλληλα επιλεγμένη ή κατασκευασμένη για τις στροφές και τη μηχανική ισχύ που μπορεί πραγματικά να παρέχει ο πειραματικός υδροστροβίλος. Η χρήση συστήματος οδοντωτού ιμάντα και κατάλληλης σχέσης μετάδοσης θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει καλύτερη προσαρμογή των στροφών του υδροστροβίλου στις απαιτήσεις της γεννήτριας. Εξίσου σημαντική βελτίωση θα ήταν η προσθήκη περισσότερων σημείων μέτρησης. Ειδικότερα, η εγκατάσταση παροχόμετρου, αισθητήρα στροφών και συστήματος μέτρησης τάσης, ρεύματος και ηλεκτρικής ισχύος υπό ελεγχόμενο φορτίο θα επέτρεπε την ποσοτική αξιολόγηση της κατασκευής. Με τις μετρήσεις αυτές θα μπορούσαν να προσδιοριστούν η υδραυλική ισχύς εισόδου, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου και ο συνολικός βαθμός απόδοσης, καθώς και να δημιουργηθούν χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία οδήγησε στην επιτυχή ανάπτυξη μιας λειτουργικής πειραματικής κατασκευής υδροηλεκτρικού σταθμού μικρής κλίμακας, μέσω της οποίας διερευνήθηκε η δυνατότητα μετατροπής της ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή επέτρεψε τον έλεγχο της υδραυλικής τροφοδοσίας μέσω μετατροπέα και ηλεκτροκίνητης βάνας, την παρακολούθηση της πίεσης και την καταγραφή της παραγόμενης εναλλασσόμενης τάσης. Κατά την ανάπτυξη της κατασκευής δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές λύσεις. Η αρχική διαμόρφωση με τον πειραματικό υδροστροβίλο και την πρώτη ηλεκτρική μηχανή δεν έδωσε τα επιθυμητά αποτελέσματα υπό τις διαθέσιμες συνθήκες λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στην τροποποίηση του σχεδιασμού και στην τελική επιλογή της αντλίας ψυκτικού υγρού ως μηχανής παραγωγής, η οποία παρουσίασε καλύτερη λειτουργική συμπεριφορά.

Από την τελική σειρά πειραματικών μετρήσεων διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας της αντλίας συνοδεύτηκε από αύξηση της πίεσης του κυκλώματος και, μετά από συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας, από σημαντική αύξηση της παραγόμενης τάσης. Ιδιαίτερα έντονη μεταβολή καταγράφηκε μεταξύ 35 και 39 Hz, όπου η τάση αυξήθηκε από 1,2 σε 44 V AC. Η μεγαλύτερη τιμή της σειράς μετρήσεων ήταν 77 V AC, σε συχνότητα αντλίας 56 Hz και πίεση 1,34 bar. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την επίτευξη του βασικού στόχου της εργασίας, δηλαδή την ανάπτυξη ενός λειτουργικού πειράματος που αναδεικνύει τη δυνατότητα αξιοποίησης της κίνησης του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης. Παράλληλα, οι δοκιμές ανέδειξαν τη σημασία της κατάλληλης επιλογής και αντιστοίχισης του υδροστροβίλου, της ηλεκτρικής μηχανής και των υδραυλικών συνθηκών λειτουργίας. Λόγω της απουσίας μετρήσεων παροχής και ηλεκτρικού ρεύματος υπό φορτίο, δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης. Ωστόσο, η κατασκευή μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω ανάπτυξη, πληρέστερη πειραματική αξιολόγηση και ενσωμάτωση πρόσθετων συστημάτων μέτρησης και αυτοματισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Καραμάνης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Κάλλιπος, 2022. Available: <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-45>
- [2] N. S. R. Deepak and Raghvendra, “Hydropower plants and their process of electricity production,” *J. Nucl. Energy Sci. Power Generat. Technol.*, vol. 11, no. 6, 2022.
- [3] J. W. Tsotie and R. Wamkeue, “Advanced model of synchronous generator for hydropower plants numerical simulations,” *Electric Power Systems Research*, vol. 140, pp. 663–670, 2016.
- [4] S. J. W. Klein and E. L. B. Fox, “A review of small hydropower performance and cost,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112898, 2022.
- [5] H. Akbari *et al.*, “Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART),” pp. 1–6, 2022. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9990493/>
- [6] REN21, *Renewables Global Status Report*, 2022. Available: https://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf
- [7] K. H. Fasol, “A short history of hydropower control,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 68–76, 2002.
- [8] J. Steller, “Hydropower and its development,” *Acta Energetica*, no. 3, pp. 7–31, 2013.
- [9] D. P. Sari, D. Adanta and I. Syofii, “Comprehensive overview of hydropower technology,” *Indonesian Journal of Engineering and Science*, vol. 5, no. 3, pp. 119–123, 2024.
- [10] J. Raabe, “Great names and the development of hydraulic machinery,” in *Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review*, Rotterdam: Balkema, 1987, pp. 251–266.
- [11] E. Oud, “The evolving context for hydropower development,” *Energy Policy*, vol. 30, no. 14, pp. 1215–1223, 2002.
- [12] A. Allerhand, “Hydroelectric power: The first 30 years,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 76–87, 2020.
- [13] W. M. Steuart, *Central Electric Light and Power Stations*. Washington, DC: Government Printing Office, 1902.
- [14] A. Bahadori, G. Zahedi and S. Zendehboudi, “An overview of Australia’s hydropower energy: Status and future prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 565–569, 2013.
- [15] M. O. Aqel *et al.*, “Hydroelectric generation from water pipelines of buildings,” in *Proc. ICPET*, 2018, pp. 63–68.
- [16] A. Andersson and H. Johansson, *Hydropower optimization with detailed reservoir representation*, Master’s thesis, Chalmers Univ., 2025.
- [17] R. K. Saket, “Design, development and reliability evaluation of micro hydro power generation system,” in *Proc. IEEE EPEC*, 2008, pp. 1–8.

- [18] N. Μαμάσης *et al.*, *Υδροηλεκτρικά Έργα*. Αθήνα: ΕΜΠ, 2015.
- [19] C. Penche, *Layman's guidebook on how to develop a small hydro site*. ESHA, 1998.
- [20] V. K. Singh and S. K. Singal, "Operation of hydro power plants – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 610–619, 2017.
- [21] U.S. Geological Survey, "Hydroelectric power: How it works." [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/hydroelectric-power-how-it-works> [Accessed: Jan. 15, 2026].
- [22] European School Heads Association, "ESHA magazine," Mar. 2010. [Online]. Available: <https://www.fedadi.org/wp-content/uploads/2009/11/Esha-Magazine-March-2010.pdf>
- [23] B. A. Nasir, "Hydropower," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 2, no. 5, 2013.
- [24] S. Khurana and A. Kumar, "Small hydro power – A review," *International Journal of Thermal Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 107–110, 2011.
- [25] International Hydropower Association, "World hydropower outlook 2025." [Online]. Available: <https://www.hydropower.org/publications/2025-world-hydropower-outlook>
- [26] J. Shah, J. Hu, O. Y. Edelenbosch and M. T. H. van Vliet, "Global dataset combining open-source hydropower plant and reservoir data," *Scientific Data*, vol. 12, no. 1, p. 646, 2025.
- [27] P. Winterburn, "China is dominating global hydropower generation," *International Banker*. [Online]. Available: <https://internationalbanker.com/finance/china-is-dominating-global-hydropower-generation/>
- [28] A. T. Zhang and V. X. Gu, "Global Dam Tracker: A database of more than 35,000 dams," *Scientific Data*, vol. 10, p. 111, 2023.
- [29] S. M. Denton, "The Grand Coulee power development," *Electrical Engineering*, vol. 67, no. 7, p. 661, 1948.
- [30] N. Lettas *et al.*, "Impacts of small hydro power plants on distribution networks," in *Proc. IEEE PowerTech*, 2005, pp. 1–7.
- [31] Public Power Corporation, "Υδροηλεκτρική ενέργεια." [Online]. Available: <https://www.ppcgroup.com/el/omilos-dei/tomeis-drastiriotitas/ananeosimes-piges-energeias/ydroilektriki-energeia/> [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [32] Elsevier, "Hydropower plant," *ScienceDirect Topics*. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydropower-plant> [Accessed: Mar. 4, 2026].
- [33] F. A. Alaba, M. Othman, I. A. T. Hashem and F. Alotaibi, "Blockchain technology in smart city: Security and privacy in the Internet of Things," in *Smart Cities: Cybersecurity and Privacy*. Amsterdam: Elsevier, 2022, pp. 265–285.
- [34] J. Q. Bacani *et al.*, "A proposed pico-hydropower technology applying Heron's siphon," *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, vol. 9, no. 2, p. 1333, 2023.
- [35] S. Davis, "What effects does hydropower have on the environment," PCI Energy Solutions, 2024. [Online]. Available: <https://www.pcienergysolutions.com/2024/03/20/how-to-improve-hydropower-generation-while-managing-environmental-impacts/>

- [36] D. K. Okot, “Review of small hydropower technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26, pp. 515–520, 2013.
- [37] C. S. Kaunda, C. Z. Kimambo and T. K. Nielsen, “Micro hydropower technology and turbines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 445–459, 2014.
- [38] S. Kelly-Richards *et al.*, “Governing the transition to renewable energy,” *Energy Policy*, vol. 101, pp. 251–264, 2017.
- [39] U.S. Department of Energy, *Hydropower Vision*. Washington, DC, 2016.
- [40] B. Antal, *Pumped storage hydropower: A technical review*. University of Colorado, 2014.
- [41] J. Margeta and B. Đurin, “Hydrological indicators of hybrid energy systems,” *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 33, pp. 827–841, 2014.
- [42] S. Khurana and H. Singh, “Effect of cavitation on hydraulic turbines,” *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 172–177, 2012.
- [43] Β. Λαμπροπούλου *et al.*, “Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς,” *Τεχνικά Χρονικά TEE*, 2004.
- [44] Α. Κοντίνη, *Λογισμικό προσομοίωσης λειτουργίας μικρού υδροηλεκτρικού έργου*, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2016.
- [45] W. H. Hayt, J. E. Kemmerly and S. M. Durbin, *Engineering Circuit Analysis*, 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2018.
- [46] B. D. Tinh and D. D. Minh, “Small-scale hydropower dams: Pros and cons,” *Multidisciplinary Science Journal*, vol. 7, no. 11, 2025.
- [47] M. A. Khatkhat *et al.*, “Common type of turbines in power plant: A review,” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 77–100, 2016.
- [48] M. Skoric, “Falling water, rising power,” *IEEE Potentials*, vol. 36, no. 5, pp. 30–31, 2017.
- [49] International Energy Agency, “Hydropower generation in the sustainable development scenario.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydropowergeneration-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
- [50] U.S. Energy Information Administration, *International energy outlook 2019*. Washington, DC, 2019.
- [51] Z. Chen *et al.*, “Shaft run-out trend prediction of water turbine generators,” in *Proc. ICMTMA*, 2022, pp. 430–434.
- [52] B. I. A. Ismail, “Performance and design aspects of hydro-turbines,” in *Advances in Hydropower Technologies*. IntechOpen, 2025.
- [53] Y. Sun, Z. Yang and Z. Zhou, “Hydroelectric power plants: Design principles and prospects,” in *Proc. Int. Conf. E-Business and Internet*, 2021, pp. 46–55.
- [54] R. J. P. Schmitt and L. Rosa, “Dams for hydropower and irrigation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, p. 114439, 2024.
- [55] A. Wesener and W. McWilliam, “Integrated urban green and grey infrastructure,” in *The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures*. Springer, 2020.

- [56] F. Molle, P. P. Mollinga and P. Wester, “Hydraulic bureaucracies and the hydraulic mission,” *Water Alternatives*, vol. 2, pp. 328–349, 2009.
- [57] B. Lehner *et al.*, “High-resolution mapping of the world’s reservoirs and dams,” *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 9, pp. 494–502, 2011.
- [58] C. Zarfl *et al.*, “A global boom in hydropower dam construction,” *Aquatic Sciences*, vol. 77, pp. 161–170, 2014.
- [59] K. Riahi *et al.*, “Shared socioeconomic pathways and implications,” *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 153–168, 2017.
- [60] E. Barbour *et al.*, “Pumped hydro energy storage development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 421–432, 2016.
- [61] L. Rosa, “Adapting agriculture to climate change,” *Environmental Research Letters*, 2022.
- [62] K. Tamaddun *et al.*, “Hydropower potential at non-powered dams,” in *World Environmental and Water Resources Congress*, 2023, pp. 23–31.
- [63] M. Guarnieri, “The development of hydroelectricity after 1900,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 66–96, 2023.
- [64] B. Storey and J. R. Rogers, “Photo essay of Hoover Dam construction,” in *Environmental and Water Resources: Milestones in Engineering History*.
- [65] Wikipedia, “Φράγμα Χούβερ.” [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Φράγμα_Χούβερ [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [66] Wikipedia, “Grand Coulee.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Coulee [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [67] Wikipedia, “Φράγμα Ιταϊπού.” [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Φράγμα_Ιταϊπού [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [68] Wikipedia, “Φράγμα των Τριών Φαραγγιών.” [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Φράγμα_των_Τριών_Φαραγγιών [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [69] E. F. Moran *et al.*, “Sustainable hydropower in the 21st century,” *PNAS*, vol. 115, no. 47, pp. 11891–11898, 2018.
- [70] G. Di Baldassarre *et al.*, “Water shortages worsened by reservoir effects,” *Nature Sustainability*, vol. 1, p. 617, 2018.
- [71] R. Stone, “Severe drought puts spotlight on Chinese dams,” *Science*, vol. 327, p. 1311, 2010.
- [72] A. Ansar *et al.*, “Should we build more large dams?,” *Energy Policy*, vol. 69, pp. 43–56, 2014.
- [73] E. M. Latrubesse *et al.*, “Damming the rivers of the Amazon basin,” *Nature*, vol. 546, pp. 363–369, 2017.
- [74] S. V. Larsen *et al.*, “Social impact assessment in Europe,” *J. Environ. Assess. Policy Manage.*, vol. 17, 2016.
- [75] Α. Κατσαβενάκη, *Συστήματα αντλησιοταμίευσης – εφαρμογή σε υφιστάμενες υποδομές, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ*, 2018.

- [76] A. Židonis, D. S. Benzon and G. A. Aggidis, “Development of hydro impulse turbines and new opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1624–1635, 2015.
- [77] U.S. Department of Energy, *Hydropower Technology*, Quadrennial Technology Review, 2015.
- [78] Wikipedia, “Francis turbine.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Francis_turbine [Accessed: Jan. 16, 2026].
- [79] S. Mishra, S. K. Singal and D. K. Khatod, “Cost optimization of high head run-of-river small hydropower projects,” in *Application of GIS and Soft Computing Techniques*. Singapore: Springer, 2017, pp. 141–166.
- [80] Δ. Παπαντώνης, *Υδροδυναμικές Μηχανές (Αντλίες - Υδροστρόβιλοι)*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών, 1994.
- [81] Y. Hou *et al.*, “Internal flow characteristics in the draft tube of a Francis turbine,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 10, 2024.
- [82] Working Group Prime Mover and Energy Supply, “Hydraulic turbine and turbine control models,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 167–179, 1992.
- [83] B. H. Shanab, M. E. Elrefaie and A. A. El-Badawy, “Active control of variable geometry Francis turbine,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 1080–1090, 2020.
- [84] J. I. Perez-Diaz and J. I. Sarasua, “Failures during load-frequency control maneuvers,” *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 10584–10604, 2015.
- [85] A. Ghenaiet and M. Bakour, “Simulation of flows through a Kaplan turbine,” *Engineering Reports*, vol. 2, no. 2, 2020.
- [86] U.S. Department of Energy, *Hydropower Vision*. Washington, DC, 2016.
- [87] K. Sathish *et al.*, “Design and characteristics of Kaplan turbines,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 3221, 2024.
- [88] W. K. M. Ridha, K. R. Kashyzadeh and S. Ghorbani, “Failures in Kaplan turbine blades,” *Materials*, vol. 16, no. 9, p. 3303, 2023.
- [89] U.S. Geological Survey, “A turbine connected to a generator produces power inside a dam.” [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/media/images/a-turbine-connected-a-generator-produces-power-inside-a-dam>
- [90] G. Quartier *et al.*, “A review of small hydropower performance and cost,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112723, 2022.
- [91] A. L. Diniz, P. P. I. Esteves and C. A. Sagastizabal, “A mathematical model for the efficiency curves of hydroelectric units,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, 2007, pp. 1–7.
- [92] A. Thakker *et al.*, “Design and performance analysis of impulse turbine,” *International Journal of Energy Research*, vol. 29, no. 1, pp. 13–36, 2005.
- [93] Municipality of Plastiras, “The dam.” [Online]. Available: <https://plastiras-ota.gr/en/building/the-dam/> [Accessed: Feb. 24, 2026].
- [94] Σ. Προκοπίου, *Εκτίμηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων από την κατασκευή φραγμάτων*, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021. Available: <https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/56888/23300.pdf>

- [95] Public Power Corporation (ΔΕΗ), “Ημέρα Νερού.” [Online]. Available: <https://www.dei.gr/media/523kwtz4/imeranerou.pdf> [Accessed: Feb. 24, 2026].
- [96] A. Καλαντζής *et al.*, “Αρχεία ΥΗΣ Ν. Πλαστήρα,” 2025.