ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ (ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ)
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :

Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού σε Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (ΜΥΗΕ)

Φοιτητής : Κολυβάς Αριστοτέλης

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Κατσαπρακάκης Δημήτρης

Ηράκλειο 2026

Περιεχόμενα

1. Ιστορική Αναδρομή στα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα 4
2. Εισαγωγή και Σκοπός Εργασίας 5
3. Περίληψη 6
4. Abstract 7
5. Ευχαριστίες 8
6. Τα Είδη Υδροηλεκτρικών Έργων και οι Κατηγορίες τους 9
6.1 Ταξινόμηση 9
6.2 Κατηγορίες 9
6.2.1 Κατηγορία Α1 9
6.2.2 Κατηγορία Α2 10
6.2.3 Κατηγορία Β 11
7. Υδροστρόβιλοι 14
7.1. Κατηγοριοποίηση 14
7.1.1. Στρόβιλοι δράσης 14
7.1.2 Στρόβιλοι αντίδρασης 17
8. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΜΥΗΕ 19
9. Χωροθέτηση και Περιγραφή του Υδροηλεκτρικού Έργου 20
9.1. Περιγραφή Υδροηλεκτρικού Έργου 20
9.2. Χωροθέτηση Υδροηλεκτρικού Έργου 21
10. Υδρολογική Ανάλυση 24
10.1. Υδρολογικά Δεδομένα 24
10.2. Ανάλυση Παροχών και Χρονοσειρά 25
10.3. Οικολογική Παροχή και Εκμεταλλεύσιμο Υδάτινο Δυναμικό 26
10.4. Βελτιστοποίηση Παροχής Σχεδιασμού 27
10.4.1. Επιλογή παροχής σχεδιασμού 28
11. Υδραυλικός Σχεδιασμός Υδροηλεκτρικού Έργου 29
11.1. Επιλογή Ταχύτητας Ροής Αγωγού (V) 29
11.2. Διαστασιολόγηση Αγωγού Προσαγωγής (D) 29
11.3. Απαιτούμενο Πάχος Αγωγού Προσαγωγής (e) 29
11.4. Υπολογισμός Αριθμού Reynolds 30
11.5. Υπολογισμός Συντελεστή Τριβής (f) 30

11.6. Υπολογισμός Γραμμικών Απωλειών (hf) 31
11.7. Υπολογισμός Τοπικών Απωλειών (hD) 31
11.8. Υπολογισμός Καθαρού Ύψους Πτώσης (hn) 32
11.9. Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος 32
12. Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Υδροηλεκτρικού Έργου 33
12.1. Παραδοχές Οικονομικής Ανάλυσης 33
12.2. Κοστολόγηση Συνολικής Εγκατάστασης Υδροηλεκτρικού Έργου 33
12.3. Υπολογισμός Εσόδων, Εξόδων και Περιόδου Αποπληρωμής 33
12.4. Αξιολόγηση Διαφορετικών Σεναρίων Εγκατεστημένης Ισχύος 35
13. Τεχνικά Σχέδια Υδροηλεκτρικού Έργου 37
13.1.1. Γενική Διάταξη Υδροηλεκτρικού Έργου 37
13.1.2. Μηκοτομή Φράγματος 38
13.1.3. Κάτοψη και τομή Ιχθυόδου 38
13.1.4. Τομή Εξαμμωτή-Αγωγού Προσαγωγής 39
13.1.5. Τομή Υδροστροβίλου Kaplan 4,5MW 40
13.1.6. Τομή Υδροηλεκτρικού Σταθμού 41
14. Συμπεράσματα Εργασίας 42
14.1. Συνοπτική Παρουσίαση της Μελέτης 42
14.2. Αποτελέσματα Σχεδιασμού υπό Μελέτη ΥΗΕ 42
14.3. Αποτελέσματα Οικονομικών και Ενεργειακών Αναλύσεων 43
15. Βιβλιογραφία 44

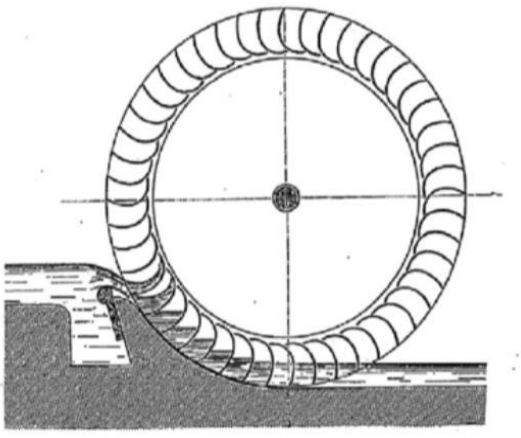
1. Ιστορική Αναδρομή στα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα

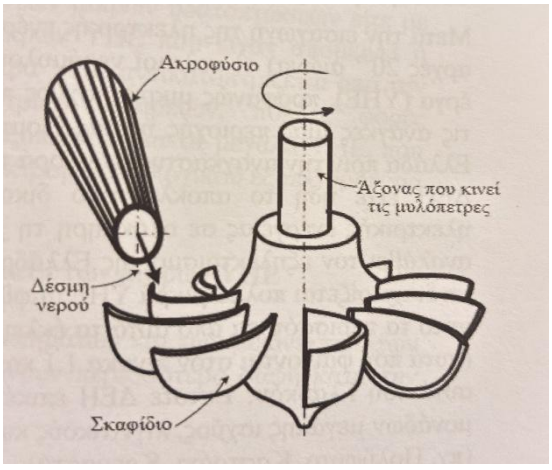
Η χρήση της υδραυλικής ενέργειας μέσω τροποποίησης της σε μηχανική ενέργεια προήλθε, από αρχαιοτάτων χρόνων, από τον ρωμαϊκό πολιτισμό οι οποίοι χρησιμοποιούσαν την κατασκευή νερόμυλων για άλεση σιτηρών. Η κατασκευή αυτή απαντάται στην αρχαία αγορά της Αθήνας, συγκεκριμένα στον Κεραμικό, όπου τα νερά τα οποία έρεαν για την κίνηση του νερόμυλου προέρχονταν από τον Ηριδανό ποταμό.

Η κατασκευή του νερόμυλου, εκείνης της εποχής, υλοποιούνταν από ξύλο και ενισχύονταν από μεταλλικά εξαρτήματα. Η ισχύς η οποία πρόσδιδε ήταν μηδαμινή με τα σημερινά δεδομένα (της τάξεως των 2kW) καθώς διακρίνονταν σε 2 βασικές κατηγορίες :

- **Του οριζόντιου άξονα** , ο οποίος λειτουργούσε με χαμηλή υψομετρική διαφορά , της κλάσης 2-4m και μεγάλης παροχής.
- **Του κατακόρυφου άξονα**, ο οποίος είχε την ικανότητα να λειτουργεί σε υψομετρικές διαφορές μεγαλύτερες των 6m και με χαμηλές παροχές.

Σήμερα, η Ελλάδα καλύπτεται από ένα μεγάλο ποσοστό ΜΥΗΕ τα οποία συμβάλουν ενεργά στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και αποτελούν τον βασικό λίθο των ελληνικών ΑΠΕ καθώς προσφέρουν αξιοπιστία και μια σταθερή παραγωγή έναντι άλλων τεχνολογιών.





Εικόνα 1.1 και 1.2 – Απεικόνιση νερόμυλου οριζόντιου άξονα τύπου Poncelet (αριστερή εικόνα) και νερόμυλου κατακόρυφου άξονα με ακροφύσιο (δεξιά εικόνα).

2. Εισαγωγή και Σκοπός Εργασίας

Η αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή καθαρής ενέργειας έχει ενισχύσει σε μεγάλο βαθμό την ιδέα αξιοποίησης μικρών υδροηλεκτρικών έργων (ΜΥΗΕ), τα οποία αποτελούν μια από τις πλέον ώριμες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Τα ΜΥΗΕ παρουσιάζουν λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σε αντίθεση με τα Μεγάλα ΥΗΕ, καθώς ο ταχύτερος χρόνος υλοποίησης τους και η ευελιξία χωροθετήσεων, τα καθιστούν ιδανικά για την ενεργειακή μετάβαση και για την ενδυνάμωση της αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός ΜΥΗΕ αποτελεί μια κρίσιμη δράση, καθώς ο βαθμός απόδοση και η αξιοπιστία του έργου καθορίζονται από την ενδεχόμενη μετατροπή, η οποία συμβάλλει άμεσα στο πεδίο της υδραυλικής, της ηλεκτρομηχανολογικής και της οικονομικής διαστασιολόγησης του έργου. Οι οριοθετήσεις του φυσικού περιβάλλοντος , η κατάλληλη διαθέσιμη υδάτινη ροή, η λειτουργία του έργου σε μεταβαλλόμενες υδρολογικές και ενεργειακές συνθήκες, καθιστούν τον σχεδιασμό λαβυρινθώδη και απαιτητικό.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιοποίηση των σχεδιαστικών δεδομένων ενός ΜΥΗΕ σε διαφορετική υδάτινη γεωγραφικά τοποθεσία, με γνώμονα την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του εφιστάμενου έργου, με βαρύτητα στην αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού. Παράλληλα, την βελτιστοποίηση του έργου σε σχεδιαστικό επίπεδο, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επένδυσης και λειτουργίας, αλλά και την βελτίωση της παραγόμενης ενέργειας.

3. Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον σχεδιασμό, την μελέτη και την τεχνοοικονομική ανάλυση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου (ΜΥΗΕ) το οποίο εγκαθιστάτε στον ποταμό Άραχθο, με σκοπό την πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υδρολογική ανάλυση της περιοχής, με σκοπό την εύρεση των δυνατοτήτων και των αποθεμάτων που εμφανίζονται στην κοίτη του ποταμού. Μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, προσδιορίστηκε η μέση ημερήσια παροχή, η οικολογική παροχή, η εκμεταλλεύσιμη παροχή καθώς και η παροχή σχεδιασμού του υδροηλεκτρικού έργου. Επιπλέον, συντελέστηκαν χρονοσειρές, καμπύλη διάρκειας παροχής, με σκοπό τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού το οποίο προσδίδονταν από τον ποταμό.

Παράλληλα, μέσω της υδραυλικής ανάλυσης επεξηγήθηκε η διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής καθώς και τα αποτελέσματα του καθαρού ύψους πτώσης, της ταχύτητας ροής των υδάτων εντός του αγωγού, των γραμμικών και τοπικών απωλειών. Επιπρόσθετα, μέσω των παραπάνω αποτελεσμάτων, προσδόθηκε η εγκατεστημένη ισχύς του έργου καθώς και η επιλογή του κατάλληλου υδροστροβίλου ώστε να παρέχει την πλήρη ισχύς, χωρίς να υπάρχουν απώλειες τόσο στην απόδοση, όσο και την παραγόμενη ενέργεια.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτικός σχεδιασμός κάθε μέλους του υδροηλεκτρικού έργου (φράγματος, υδροηλεκτρικού σταθμού, εξαμμωτή, ιχθυόδου), αλλά και τεχνοοικονομική ανάλυση με διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος, με πλήρης και αναλυτική απεικόνιση των επιμέρους εξοπλισμών του έργου, με αποτέλεσμα η επιλογή ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου εγκατεστημένης ισχύος 4,2MW, με ετήσια παραγωγή ενέργειας 18,3 GWh να είναι η ικανοποιητικότερη όλων.

Λέξεις κλειδιά : Μικρό υδροηλεκτρικό έργο, παροχή, υδροστρόβιλος Kaplan, υδραυλικός σχεδιασμός, τεχνοοικονομική ανάλυση, υδρολογική ανάλυση, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

4. Abstract

This thesis examines the design, study and techno-economic analysis of a small hydroelectric project (SHP) to be installed on the Arachthos River, with the aim of fully utilizing the available hydropower potential for the production of electricity.

Initially, a hydrological analysis of the area was carried out, with the aim of finding the potential and reserves that appear in the riverbed. Through the results obtained, the average daily flow, the ecological flow, the exploitable flow, as well as the design flow of the hydroelectric project were determined. In addition, time series, a flow duration curve, were created in order to determine and evaluate the available water potential provided by the river.

At the same time, through the hydraulic analysis, the dimensioning of the supply pipeline was explained as well as the effects of the net head, the water flow velocity within the pipeline, and the linear and local losses. Additionally, through the above results, the installed capacity of the project was determined as well as the selection of the appropriate hydroturbine in order to provide full power,

without any losses not only in efficiency but also in the energy produced.

Finally, a preliminary design of each member of the hydroelectric project (dam, hydroelectric station, sand trap, fish pass) was carried out, as well as a techno-economic analysis with different scenarios of installed capacity, with a complete and detailed depiction of the individual equipment of the project, resulting in the selection of a small hydroelectric project with an installed capacity of 4.2MW, with an annual energy production of 18.3GWh being the most satisfactory of all.

Keywords: Small hydroelectric project, flow, Kaplan turbine, hydraulic design, techno-economic analysis, hydrological analysis, Renewable Energy Sources

5. Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου Δρ. Κατσαπρακάκη Δημήτριο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την συνεχή υποστήριξη και εμψύχωση καθώς και για τις ωφέλιμες παρατηρήσεις του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεώργιο Καρμίρη, ο οποίο επιμελήθηκε για την επίσκεψη μου στο μικρό υδροηλεκτρικό έργου του Μέγα Ρέματος στην περιοχή της Ναύπακτου, καθώς και με πληροφόρησε και μου χορήγησε πληροφορίες και δεδομένα για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Jacob Van (μηχανολόγο μηχανικό της εταιρίας Geppert Hydro) ο οποίος μου παρείχε χρήσιμες πληροφορίες και τεχνικά σχέδια για το υδροηλεκτρικό έργο του Μέγα ρέματος, καθώς και μου παρουσίασε το έργο από τα αρχικά του στάδια έως και το στάδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Θεοδωρόπουλο Γιώργο (ιδιοκτήτη του υδροηλεκτρικού έργου και πολιτικός μηχανικός) ο οποίος μου παραχώρησε τεχνικά σχέδια και βασικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό της συνολικής εγκατάστασης ενός υδροηλεκτρικού έργου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Martin Boko (ηλεκτρολόγο μηχανικό της εταιρίας Geppert Electric) ο οποίος μου παρείχε χρήσιμε πληροφορίες για τον έλεγχο και την απομακρυσμένη εποπτεία (SCADA) του έργου καθώς και όσοι συνέβαλαν για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6. Τα Είδη Υδροηλεκτρικών Έργων και οι Κατηγορίες τους

6.1 Ταξινόμηση

Τα υδροηλεκτρικά έργα κατηγοριοποιούνται σε επιμέρους βαθμίδες, οι οποίες συμβάλουν στην διαφοροποίηση κάθε έργου αλλά και προσφέρουν άμεση πληροφόρηση για τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους. Η κατηγοριοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της περιβαλλοντικής αδειοδότησης (ν.4014/2011 και ΥΑ 1958/2012) όπου τα υδροηλεκτρικά έργα εμφανίζονται στη **κατηγορία Α**, δηλαδή στα έργα τα οποία προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η κατάταξη αυτή βασίζεται στις παρακάτω προϋποθέσεις ταξινόμησης :

1. Την εγκατεστημένη ισχύς
2. Το ύψος πτώσης
3. Την χρονική κατανομή της παραγόμενης ενέργειας
4. Την χρήση του υδάτινου πόρου

Μέσω των παραπάνω, δημιουργούνται 3 βασικές κατηγορίες οι οποίες βασίζονται στα προ-αναφερόμενα, καθώς μέσω αυτών επιτυγχάνεται η πρόσβαση στον νομοθέτη και στις αρμόδιες αρχές να διαχωρίζουν και να αξιολογούν την πολυπλοκότητα του έργου, να αξιολογούν το έργο σε οικονομικό και μηχανολογικό χαρακτήρα, αλλά και να κρίνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

6.2 Κατηγορίες

6.2.1 Κατηγορία Α1

Η κατηγορία Α1 συντίθεται από μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, της τάξεως άνω των 15 MW εγκατεστημένης ισχύς, τα οποία αποτελούν υψηλή περιβαλλοντική σημασία. Ο σχεδιασμός τους απαρτίζεται από φράγματα μεγάλων υψών με ευρείς δεξαμενές φόρτισης μεγάλης χωρητικότητας (V>2.000.000 m^3), ύψος πτώσης άνω των 300m καθώς και έργα αντλησιοταμίευσης τεράστιας κλίμακας με υπερσύγχρονα συστήματα εκτροπής. Επιπλέον, σύμφωνα με την τροποποίηση της υπουργικής απόφασης 1958/2012 του άρθρου 1 του ν.4014/2011 αν η λεκάνη κατάκλυσης, το τμήμα εκτροπής του υδατορέματος και τα υδραυλικά μέρη του έργου βρίσκονται εκτός περιοχής NATURA 2000 και αν το μήκος του αγωγού προσαγωγής είναι άνω των 15km, το ΗΥΕ χαρακτηρίζεται ως έργο κατηγορίας Α1, καθώς αν υπολογίζεται κάτω των 8km, τα παραπάνω οφείλουν να βρίσκονται εντός NATURA 2000 ώστε να βρίσκονται στην προ-αναφερόμενη κατηγορία.

Παράλληλα, τα εν λόγω έργα αντιμετωπίζουν ολοκληρωτική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αποτίμηση των υψηλών κινδύνων όπου με την πάροδο του χρόνου θα επιφέρει το έργο στην πανίδα και χλωρίδα της εκάστοτε περιοχής, καθώς και άτεγκτη διαδικασία ολοκλήρωσης της αδειοδότησης του υδροηλεκτρικού έργου λόγω της αυστηρότητας των κρατικών αρχών.

Τα «μεγάλα» υδροηλεκτρικά έργα, ένας άτυπο χαρακτηρισμός ο οποίος πλανάτε χωρίς η σημασία του επιθέτου να ορίζει κάποια αρχή σε τέτοιου είδους έργα, παρέχουν ευελιξία παραγωγής, με αποτέλεσμα να συμβάλουν σε χρονικά διαστήματα αιχμής ζήτησης, να λειτουργούν ως εφεδρεία σε περίπτωση άμεσης τροφοδοσία μιας περιοχής, ακόμα και μεγαλούπολης, καθώς και μέσω τον ταμιευτήρων που φέρουν η αποθήκευση και η ροή των υδάτων ελέγχεται εξολοκλήρου από το ΥΗΕ.



Εικόνα 6.1 - ΥΗΕ κατηγορίας Α1 με εγκατεστημένη ισχύς 320MW στο Καστράκι, Αχελώος.

6.2.2 Κατηγορία Α2

Η κατηγορία Α2 απαρτίζεται από ΥΗΕ μεσαίου τύπου, δηλαδή έργα τα οποία η ονομαστική τους ισχύς είναι μικρότερη των 15MW αλλά μεγαλύτερη του 10MW ($10 \leq P \leq 15$). Ο σχεδιασμός τους σύμφωνα με τον διαχωρισμό του ν.4014/2011 είναι παρόμοιος με τον σχεδιασμός των έργων της κατηγορίας Α1, με διαφορά όμως στην χωρητικότητα του όγκου λεκάνης κατάκλυσης V≤ 2.000.000 m^3, στο μήκος του αγωγού εκτροπής ο οποίος βρίσκεται μεταξύ $15km \leq L \leq 250m$ εκτός NATURA 2000 και $L \leq 8km$ εντός NATURA 2000. Επιπλέον, το ύψος φράγματος (H) βρίσκεται μεταξύ $15m \leq H \leq 50m$, ενώ το ύψος πτώσης είναι κάτω των 100m ($30m \leq Head \leq 300m$).

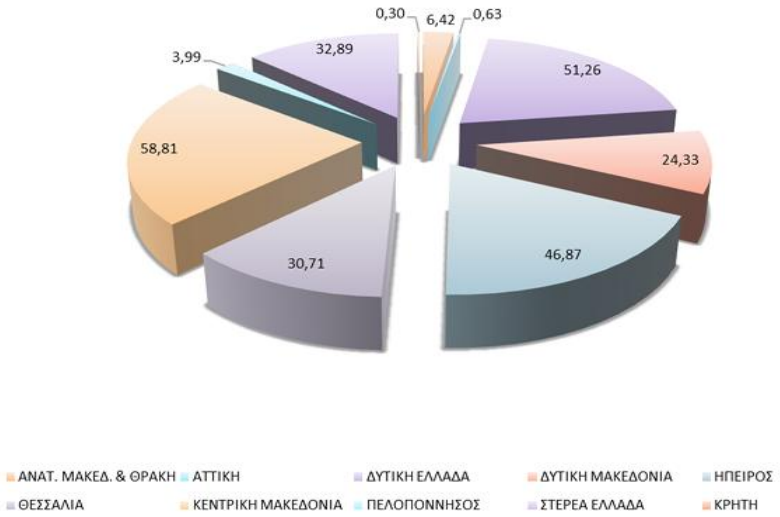
Παράλληλα τα μεσαία ΥΗΕ παραθέτουν, επίσης, μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση αρμόδιο φορέας κηρύσσεται η περιφέρεια και όχι το υπουργείο όπου είναι ο αρμόδιος για την κατηγορία Α1. Τα ΥΗΕ αυτής της κατηγορίας, επηρεάζουν εξίσου σημαντικά την ομαλή κατάσταση του φυσικού περιβάλλοντός και της ήδη υπάρχουσας ζωής μέχρι την εμφάνιση της υλοποίησης του έργου, καθώς όπως και στην κατηγορία Α1, ο εξοπλισμός και η δομές τεράστιας κλίμακας όπου φιλοξενεί το κάθε έργο έχουν ως αντίτυπο την «βεβήλωση» του περιβάλλοντος χώρου όπου εγκαθίσταται το έργο από την κατάσταση έδρασης του.



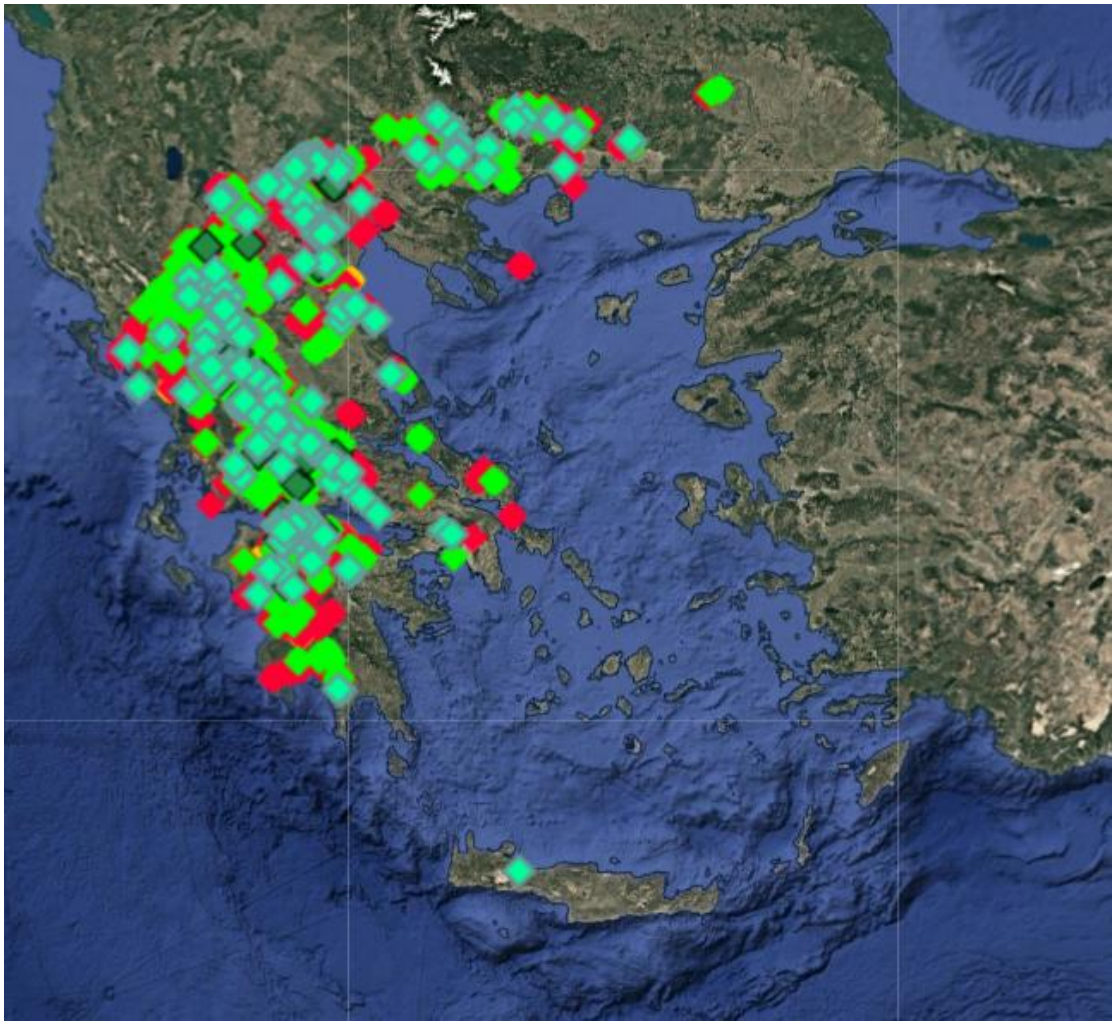
Εικόνα 6.2 - ΥΗΕ κατηγορίας Α2 με εγκατεστημένη ισχύς περίπου 10.3MW στο Λούρο, Λούρος.

6.2.3 Κατηγορία Β

Σε αυτή την κατηγορία παρουσιάζονται τα επονομαζόμενα Μικρά υδροηλεκτρικά έργα καθώς και έργα τα οποία δεν αναφέρονται στις κατηγορίες Α1, Α2. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα φιλοξενούνται και κοσμούν σχεδόν ολόκληρο τον ελλαδικό υδάτινο χώρο, καθώς η παρουσία τους είναι αισθητή σχεδόν σε κάθε νομό της Ελλάδος. Το σύνολο των ΜΥΗΕ στην Ελλάδα ανέρχεται στα 142, με το μεγαλύτερο από αυτά να βρίσκεται στον Νομό Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στην Καρδίτσα με εγκατεστημένη ισχύς 10MW.



Εικόνα 6.3 – Ποσοστιαία εγκατεστημένη ισχύς ανά περιφέρεια (σύμφωνα με τα δεδομένα του ΔΑΠΕΕΠ).



Χάρτης 6.1 – Κατανομή ΜΥΗΕ σύμφωνα με τα δεδομένα της ΡΑΑΕΥ στην Ελλάδα.

Τα ΜΥΗΕ κατέχουν εγκατεστημένη ισχύς κάτω των 10MW και άνω του 1MW ($1 \leq P \leq 10$), ενώ για έργα τα οποία η ονομαστική τους ισχύς δεν ξεπερνάει το 1MW, βρίσκονται σε υποκατηγορίες των ΜΥΗΕ οι οποίες είναι :

Πίνακας 6.1 - Διαχωρισμός ΜΥΗΕ κατηγορίας Β ανάλογα την εγκατεστημένη ισχύς που διαθέτουν .

Κατηγορία ΜΥΗΕ	ΟΡΙΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΣ
Micro	$P \leq 1MW$
Mini	$P \leq 100kW$

Παράλληλα, ΜΥΗΕ τα οποία δεν περιλαμβάνουν ταμίευση διακρίνονται, εξίσου, σε έργα τα οποία είναι θεμελιωμένα επί του ρου του ποταμού, με αποτέλεσμα την εκμετάλλευση της υψομετρικής διαφοράς ή την μείωση της ενέργειας όπου κατέχει η ροή του ρευστού λόγω μη αντοχής των υδραυλικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον, έργα τα οποία βρίσκονται εκτός κοντινής θέση με τον υπάρχον ποταμό, πραγματοποιείται η εκτροπή του ποταμού, με μηδενική επιρροή της ροής του και της ήδη υπάρχουσας ζωής τον οποίο περιβάλλει (run-off-river).

Ο σχεδιασμός τους κρίνεται ίδιος με των έργων των προ-αναφερόμενων κατηγοριών, καθώς δεν διαφοροποιείται ο μηχανολογικός και υδραυλικός σχεδιασμός αλλά η κλίμακα του συνολικού έργου και η περιβαλλοντική βαρύτητα την οποία θα προσφέρει.



Εικόνα 6.4 - ΜΥΗΕ κατηγορίας Β με εγκατεστημένη ισχύς περίπου 5.9MW στο Σανίδι, Αχελώος.

7. Υδροστρόβιλοι

Ο υδροστρόβιλος είναι η βασική μηχανή μετατροπής ενέργειας σε κάθε κατηγορίας υδροηλεκτρικό έργο, καθώς έχει την ικανότητα να μετατρέπει την κινητική ενέργεια από την ροή του ρευστού σε μηχανική ενέργεια λόγω περιστροφής. Βρίσκεται εντός του σταθμού παραγωγής και αποτελείται από ένα αμετακίνητο τμήμα, τον «διανομέα», και την πτερωτή όπου μέσω του πρώτου μέρους, δηλαδή τον διανομέα, ρυθμίζεται και κατευθύνεται η ροή των υδάτων προς τα πτερύγια, τα οποία είναι εγκατεστημένα σε έναν περιστροφικό άξονα. Αφού προσβληθούν τα πτερύγια από το νερό, μέσω της κινητικής ενέργειας της ροής, πραγματοποιείται η μετατροπή της υπάρχουσας ενέργειας σε μηχανική και έπειτα ,μέσω της γεννήτριας που υπάρχει, σε ηλεκτρική.

Ο τύπος κάθε υδροστροβίλου σε ένα ΥΗΕ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες καθώς και κάθε εγκατάσταση εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες όπου επηρεάζουν σημαντικά την σωστή επιλογή ενός υδροστροβίλου. Η απόφαση μιας σωστής εγκατάστασης λαμβάνει τα εξής επιμέρους στοιχεία :

1. Το υδραυλικό ύψος πτώσης
2. Τον όγκο ροής
3. Τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας
4. Τον βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου

Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψιν και η μεταφορά του εξοπλισμού μέχρι των υπάρχων σταθμό παραγωγής καθώς και το συνολικό κόστος το οποίο θα αποφέρει ο υδροστρόβιλος (Συντήρηση, μεταφορά, εγκατάσταση).

7.1. Κατηγοριοποίηση

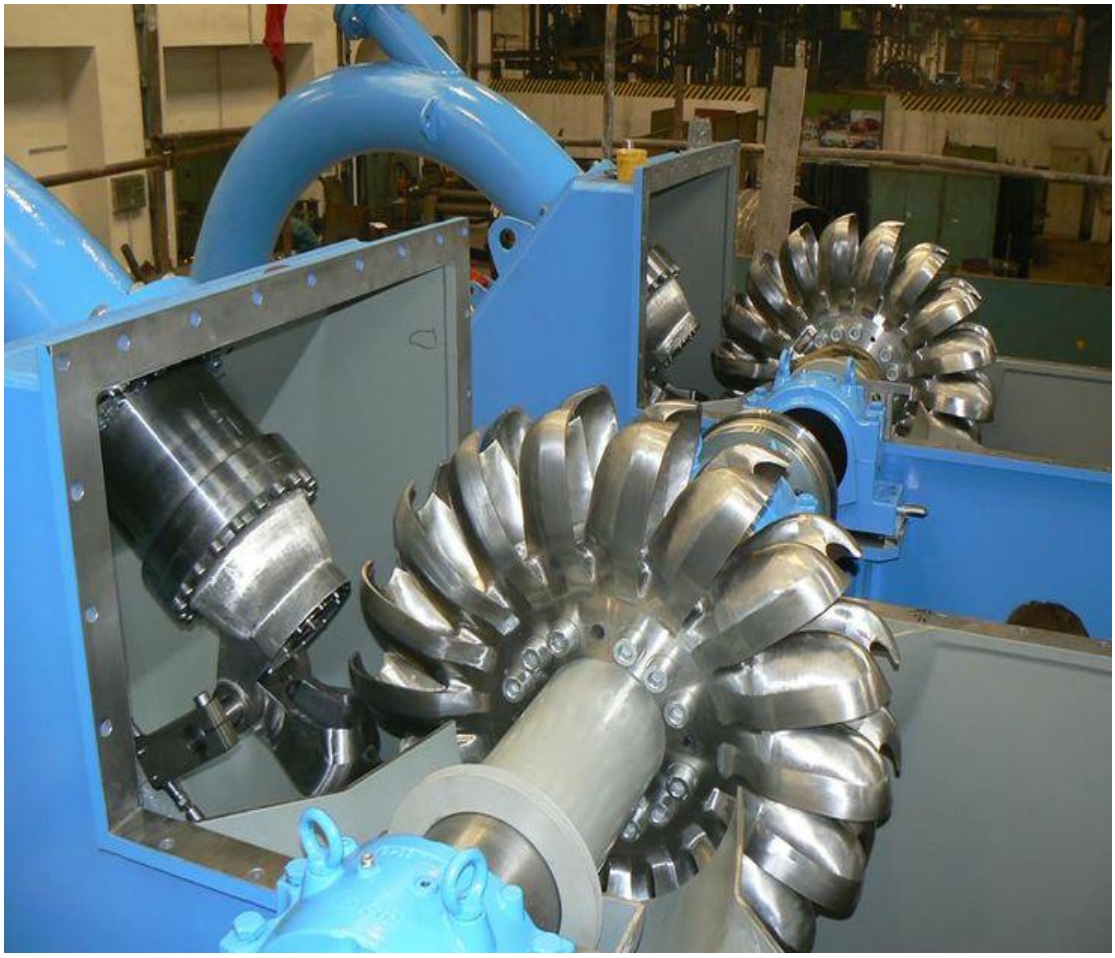
7.1.1. Στρόβιλοι δράσης

Οι υδροστρόβιλοι διαφοροποιούνται σε δύο κατηγορίες οι οποίες περιλαμβάνουν τους στροβίλους δράσης και τους στροβίλους αντίδρασης. Στην πρώτη περίπτωση, υδροστρόβιλοι δράσης λέγονται οι υδροστρόβιλοι όπου φέρουν στον δακτύλιο του δρομέα σκαφίδια τα οποία προσβάλλονται από μια τεράστια, τόσο σε ταχύτητα όσο και σε δύναμη, παροχή νερού μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου παροχής, το ακροφύσιο. Οι υδροστρόβιλοι δράσης είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν για ύψος πτώσης άνω των 130m, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης τους να ανέρχεται στο 90%. Χαρακτηριστικοί τύποι των προ-αναφερόμενων υδροστροβίλων είναι ο Pelton και ο Turgo.

Ο υδροστρόβιλος Pelton χαρακτηρίζεται άμεσα από την εμφάνιση των σκαφιδιών – πτερυγίων του, τα οποία είναι τοποθετημένα συμμετρικά σε ένα κυκλικό δίσκο που φέρει ο δρομέας. Κάθε σκαφίδιο απαρτίζεται από δύο ημικύκλια, εφαπτόμενα το ένα πάνω στο άλλο με τα καμπύλα μέρη τους να διαχωρίζονται από έναν διαχωριστή (splitter). Μέσω του ακροφυσίου, το οποίο είναι στραμμένο προς τα σκαφίδια του στροβίλου, προσβάλλονται τα καμπύλα σημεία από την παροχή που

προσφέρεται και πραγματοποιείται η περιστροφή του δακτυλίου, μετατρέποντας την υπάρχουσα ενέργεια σε μηχανική.

Επιπλέον, οι στρόβιλοι Pelton χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία παρουσιάζονται οι στρόβιλοι Pelton με οριζόντια άτρακτο, όπου 2 δρομείς βρίσκονται αμφίπλευρα της γεννήτριας και ο καθένας μπορεί να δεχτεί το πολύ 2 ακροφύσια, ενώ στην δεύτερη κατηγορία απαντώνται οι στρόβιλοι Pelton με κατακόρυφη άτρακτο, όπου επιλέγονται για την δυνατότητα τοποθέτησης περισσότερων ακροφυσίων, για οικονομία χώρου και εκμετάλλευσης του μεγάλου ύψους πτώσης. Ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων Pelton ανέρχεται στο 90% υπό συγκεκριμένες συνθήκες.



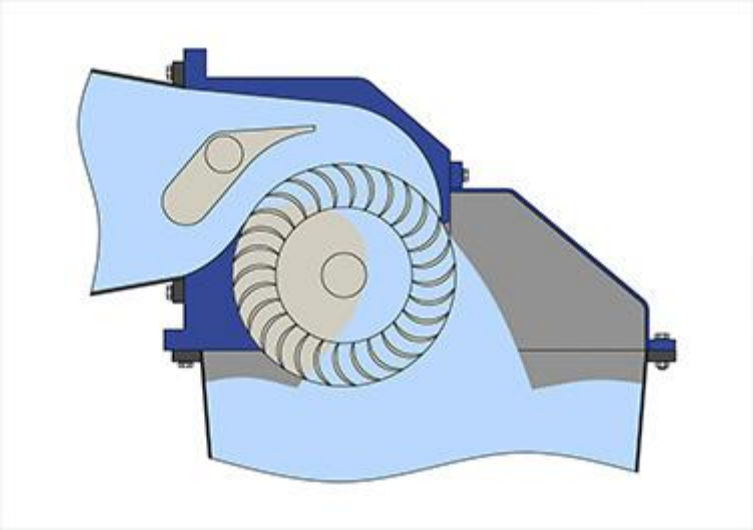
Εικόνα 7.1 – Παρουσίαση υδροστροβίλου Pelton οριζόντιας ατράκτου και των ακροφυσίων που τον προσβάλουν.

Ο υδροστρόβιλος Turgo έχει παρόμοια λειτουργεία με αυτή του υδροστροβίλου Pelton, με την μόνη διαφορά όμως ότι η δέσμη εκροής των υδάτων από το ακροφύσιο προσβάλει μια σειρά πτερυγίων και όχι σκαφιδιών όπως έχει ο Pelton, καθώς και ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων τύπου Turgo ανέρχεται στο 92%.



Εικόνα 7.2 - Παρουσίαση υδροστροβίλου Turgo με εμφανή τα πτερύγια.

Ο υδροστρόβιλος τύπου Cross-Flow, επανδρώνει την κατηγορία των υδροστροβίλων δράσης, με χαρακτηριστική την ορθογωνική διατομή η οποία τροφοδοτεί τον δρομέα του στροβίλου με νερό. Σε αντίθεση με τους προαναφερόμενους υδροστροβίλους, ο υδροστρόβιλος Cross-Flow έχει την δυνατότητα να λειτουργεί μόνο όταν ο άξονας του δρομέα βρίσκεται σε οριζόντια διάταξη. Η σχεδιαστική ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου τύπου υδροστροβίλου, πραγματοποιήθηκε ώστε να παρέχει επιπλέον χωρητικότητα για την παροχή του στροβίλου, με αποτέλεσμα τα μικρότερα υδραυλικά ύψη να μην αποτελούν μειονέκτημα για τα ΥΗΕ. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης του προαναφερόμενου τύπου ανέρχεται στην τάξη των 65%, λόγω της λαβυρινθώδους διαδρομής του νερού.



Εικόνα 7.3 - Παρουσίαση υδροστροβίλου Cross-Flow σε οριζόντια διευθέτηση.

7.1.2 Στρόβιλοι αντίδρασης

Στην δεύτερη περίπτωση, υδροστρόβιλοι αντίδρασης λέγονται οι στρόβιλοι όπου η εναλλαγή της υδραυλικής ενέργειας των υδάτων σε μηχανική, πραγματοποιείται εντός του κελύφους του στροβίλου κατά την πορεία του και την έξοδο του ρευστού από τον δρομέα τον οποίο φέρει η υδρομηχανή. Σε αντίθεση με τους υδροστροβίλους δράσης, τα πτερύγια προσβάλλονται πλήρως από το νερό, καθώς είναι βυθισμένα εντός των υδάτων, όπως και ο ίδιος ο στρόβιλος, με αποτέλεσμα να απαιτείται αγωγός εκροής για την ανάκτηση ενός ποσοστού της κινητικής ενέργειας. Η κατηγορία αυτή, χρησιμοποιείται κυρίως σε μεσαία ή χαμηλά ύψη πτώσης ώστε να παρέχουν υψηλές αποδόσεις μέσω οδηγών πτερυγίων τα οποία έχουν την δυνατότητα να κατευθύνουν την παροχή και να παρουσιάζουν σταθερή λειτουργία και απόδοση. Χαρακτηριστικοί τύποι υδροστροβίλων αντίδρασης αποτελούν ο Francis και ο Kaplan.

Ο υδροστρόβιλος Francis αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους στροβίλους αντίδρασης, προβάλλοντας υψηλά ποσοστά βαθμών απόδοσης (88%-93%), με αποτέλεσμα να τον αναδεικνύει στον χώρο της υδροηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηρίζεται από την μικτή ροή των υδάτων όπου στην εισροή παρουσιάζει ακτινική ροή, ενώ στην εκροή αξονική καθώς είναι ευάλωτος από το φαινόμενο της σπηλαίωσης το οποίο δημιουργείται λόγω της μεταβαλλόμενης πίεσης που εμφανίζει.

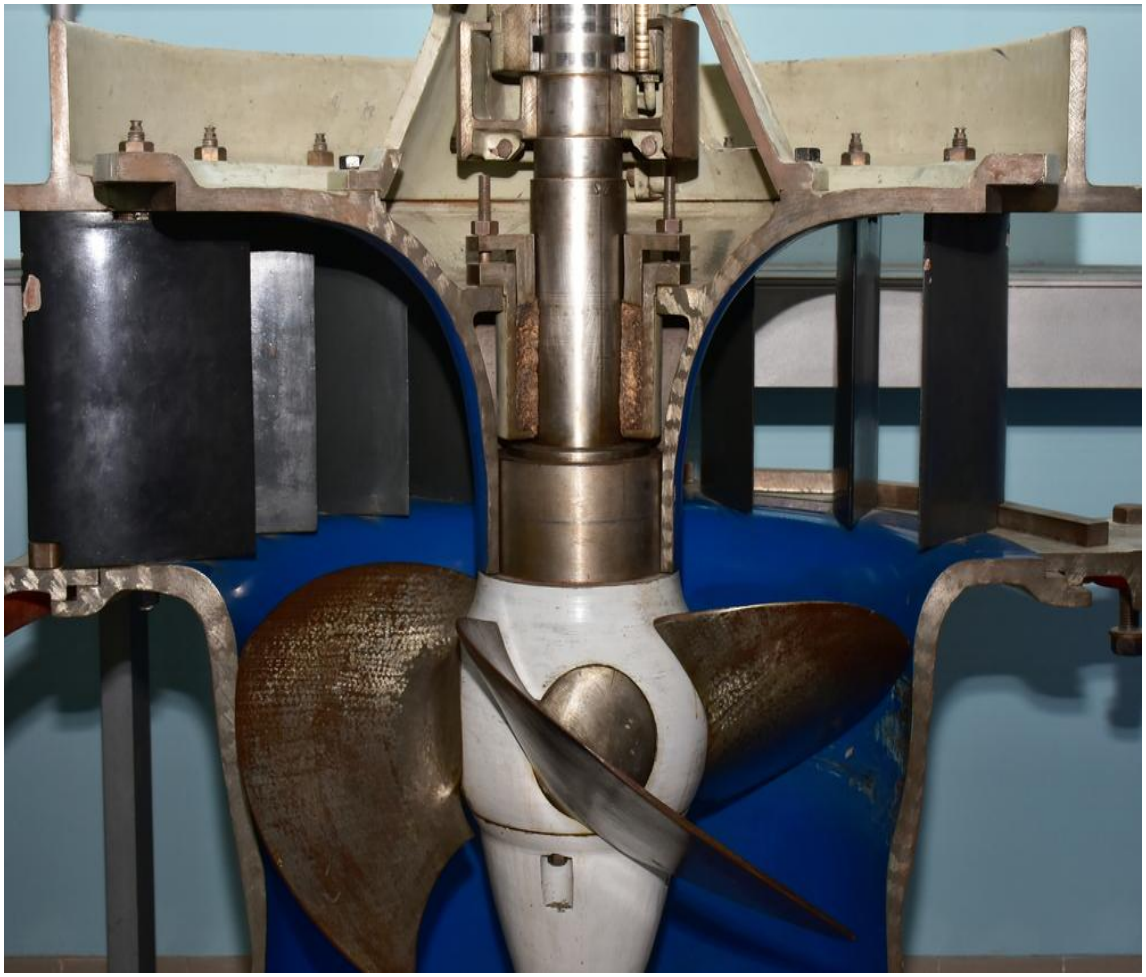
Παράλληλα, ο υδροστρόβιλος Francis διαθέτει ρυθμιστικά πτερύγια για την προσαρμογή της κατεύθυνσης και λειτουργίας της παροχής, ενώ τα κύρια πτερύγια του στροβίλου βρίσκονται βυθισμένα και προσβάλλονται πλήρως από τα ύδατα. Χρησιμοποιείται , κατά κύριο λόγο σε ΥΗΣ μεσαίων υψών πτώσης και παροχών, όπου απαιτείται αξιοπιστία, αποδοτικότητα και ευέλικτη λειτουργία.



Εικόνα 7.4 - Παρουσίαση υδροστροβίλου Francis και απεικόνιση των ρυθμιστικών και κύριων πτερυγίων εντός του κελύφους .

Ο υδροστρόβιλος Kaplan χαρακτηρίζεται εξίσου ως μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες των υδροστροβίλων αντίδρασης αξονικής ροής. Η ροή των υδάτων πραγματοποιείται παράλληλα με τον δρομέα, σε αντίθεση με των υδροστρόβιλο Francis, όπου υπάρχει μικτή ροή, ενώ ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου ανέρχεται στο 90-95%. Παράλληλα, επανδρώνεται από ρυθμιστικά πτερύγια δρομέα και οδηγούς πτερυγίων, με αποτέλεσμα να παρέχει υψηλό βαθμό απόδοσης σε οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε ΥΗΣ και φράγματα χαμηλών υψών πτώσης και μεγάλων παροχών, όπου όπως και στην κατηγορία του στροβίλου Francis, απαιτείται ευελιξία, αξιοπιστία, σταθερή λειτουργία και υψηλή απόδοση.



Εικόνα 7.5 - Παρουσίαση υδροστροβίλου Kaplan και απεικονίσει των μεταβαλλόμενων ρυθμιστικών και κύριων πτερυγίων εντός του κελύφους .

8. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ΜΥΗΕ

Η αναφορά του συγκεκριμένου κεφαλαίου πραγματοποιείται ώστε να αποτυπωθεί και να καταγραφεί αναλυτικά ο σκοπός όπου δημιουργούνται τέτοιου είδους έργα, καθώς και για να αποδοθεί η τεράστια ενεργειακή τους αποδοτικότητα και αξιοπιστία σε βάθος χρόνου. Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί πως οι υδατοπτώσεις, οι οποίες αποτελούν κύριο ρόλο στην ανανέωση και διατήρηση του υδάτινου ορίζοντα του ΥΗΕ, είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειες και δεν αποτελούν προϊόν με ορατό κίνδυνο όπως τα ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, δεν αποτελούν απειλή προς το περιβάλλον καθώς τέτοιου είδους έργα δεν περιέχουν ούτε αποβάλλουν απόβλητα ή λύματα, τα οποία θα μόλυναν την χλωρίδα και πανίδα του τόπου αλλά και θα κατέστρεφαν τα ύδατα. Τα ΥΗΕ συμβάλλουν στην διατήρηση και στην αποτύπωση ενός πράσινου περιβάλλοντος, καθώς αποτρέπουν τις συνθήκες πλημμύρας, προσφέρουν ελεγχόμενη παροχή, αλιεία και εμπλουτισμό του οικοσυστήματος. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής των ΜΥΗΕ ανέρχεται στα 20-30 χρόνια, ενώ τα μεγαλύτερα ΥΗΕ είναι της τάξης των 50 χρόνων, αριθμητικά δεδομένα τα οποία παρουσιάζουν την αξιοπιστία και την στιβαρότητα του γενικού έργου συμπεριλαμβανομένου και των υπαρχόντων στροβίλων.

Παρόλα αυτά όμως, η ετήσια παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει διακύμανσης, καθώς τα ΥΗΕ εξαρτώνται από το υδάτινο ποσό το οποίο είναι αποθηκευμένο στον ταμιευτήρα του έργου ή από την παροχή που προσβάλει τον υδροστρόβιλο. Επίσης, ο ταμιευτήρας μεγάλης χωρητικότητας ο οποίος συναντάται κυρίως σε μεγάλα ΥΗΕ , αποτελεί αρνητικό δεδομένο το οποίο ευθύνεται για περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως για την μετανάστευση των ζώων της περιοχής ή την διαμόρφωση της χλωρίδας του τόπου. Τέλος, κατέχουν τεράστιο κόστος κατασκευής λόγω του μεγάλου μεγέθους που έχουν, καθώς και των εξοπλισμών όπου το επανδρώνουν για την αξιόπιστη και πλήρης αποδοτική λειτουργία τους.

Συμπερασματικά, τα υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν τα ακόλουθα θεμελιώδη χαρακτηριστικά :

1. Αποτελούν μια πρωταρχική και ώριμη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Χαρακτηρίζονται ως έργα τα οποία συμβάλουν στην μείωση των ρύπων, συντελούν στην αύξηση και στην προώθηση της πράσινης ενέργειας.
3. Η διαθεσιμότητα κατάλληλου ποσοστού υδάτινου δυναμικού συμβάλλει άμεσα στην λειτουργική απόδοση της συνολικής εγκατάστασης.
4. Απαιτούν πλήρης προσοχή στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό του έργου, καθώς και υψηλό αρχικό κεφάλαιο λειτουργίας.
5. Χαρακτηρίζονται από τον υψηλό βαθμό απόδοσης που διακατέχουν αλλά και από την διάρκεια ζωής της συνολικής εγκατάστασης.
6. Συναινούν στον εμπλουτισμό της χλωρίδα και πανίδα του τόπου μέσω της διαχείρισης των υδάτων.

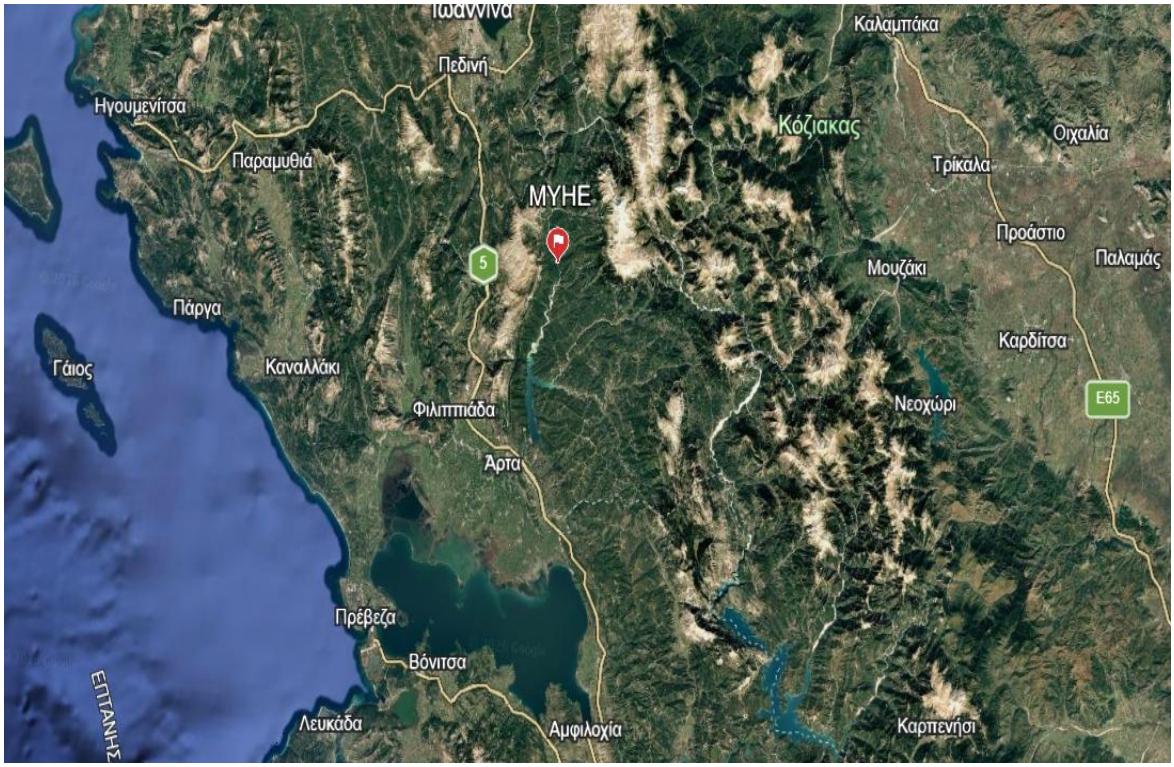
9. Χωροθέτηση και Περιγραφή του Υδροηλεκτρικού Έργου

9.1. Περιγραφή Υδροηλεκτρικού Έργου

Κατά την έναρξη της παρούσας εργασίας , η θέση όπου θα τοποθετούνταν το υδροηλεκτρικό έργο πρόβαλλε καθοριστικό ρόλο για την συνέχεια της μελέτης καθώς μέσω των υδρολογικών δεδομένων του ποταμού, θα προσδίδονταν η ακριβής εγκατεστημένη ισχύς και η αποδοτικότητα που θα προσέφερε το εφιστάμενο έργο. Το παρόν προς μελέτη υδροηλεκτρικό έργο αφορά μια εγκατάσταση μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 4 MW, αξιοποιώντας μέσω φράγματος ελάχιστου ύψους, υδάτινο δυναμικό το οποίο περιστρέφει έναν υδροστρόβιλο τύπου Kaplan. Η επιλογή του στροβίλου, πραγματοποιήθηκε λόγω της υψηλής παροχής όπου διαθέτει ο συγκεκριμένος ποταμός καθώς και λόγω του ελάχιστου υδραυλικού ύψους όπου ακολουθεί η μορφολογία της κοίτης του ποταμού και το ανάγλυφο της περιοχής.

Η επιλογή της θέσης του υπό μελέτη έργου , πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την διαθεσιμότητα επαρκούς υδάτινου πόρου ώστε το έργο να λειτουργεί στο 80-90% του χρονικού διαστήματος ενός έτος, χωρίς να υπάρχουν υπερβολικές διακυμάνσεις , πέραν των διαφορών μεταξύ θερινών και χειμερινών μηνών, στην ποσότητα των υδάτων. Επιπλέον, η μορφολογία της κοίτης του ποταμού , ώστε το έργο να μην υπερβεί σε υπερβολικό βαθμό το κόστος κατασκευής και συντήρησης, συνέβαλε καθοριστικά στην επιλογή της τοποθέτησης του φράγματος αλλά και του ΥΗΣ καθώς λόγω των προαναφερόμενων παραγόντων , επιλέχθηκε η μέγιστη κοντινή απόσταση μεταξύ του φράγματος και του υδροηλεκτρικού σταθμού, με την βέλτιστη υψομετρική διαφορά η οποία θα πρόσδιδε την εν λόγω εγκατεστημένη ισχύς.

Η γεωμετρία της περιοχής επέτρεπε την δημιουργία ενός φράγματος όπου κατάντη της θέσης του , σε υψομετρική διαφορά , είχε δυνατότητα να φέρει υδροηλεκτρικό σταθμό , με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους κατασκευής αλλά και των υδραυλικών απωλειών που θα κυριαρχούσαν σε διαφορετική προσέγγιση χωροθέτησης του έργου. Επιπρόσθετα, η τοποθεσία εγκατάστασης του ΥΗΕ απαντάται εκτός περιοχών που κρίνονται ως προστατευόμενες ή χαρακτηρίζονται ως ζώνες Natura 2000 , με αποτέλεσμα το υπό-μελέτη έργο να μην απειλεί σπάνια χλωρίδα και πανίδα της περιοχής ή γενικότερα του περιβάλλοντος.



Χάρτης 9.1 – Θέση εγκατάστασης του υπό-μελέτη υδροηλεκτρικού έργου επί του ποταμού Άραχθου.

9.2. Χωροθέτηση Υδροηλεκτρικού Έργου

Το παρόν υδροηλεκτρικό έργο, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο υπό-κεφάλαιο, φέρει υδροστρόβιλο τύπου Kaplan εγκατεστημένης ισχύος 4,5 MW λόγω της υψηλής σε αριθμό παροχής που διαθέτει και εγκαθίσταται κατάντη του φράγματος σε υψομετρική διαφορά από την στάθμη του σημείου υδροληψίας περίπου 10 μέτρων.

Παράλληλα, η λειτουργία του έργου βασίζεται στη δημιουργία ενός μικρού ταμιευτήρα μέσω φράγματος ύψους 14 μέτρων , όπου με τη χρήση εσχαρών στην θέση της υδροληψίας, θα αποτρέπεται η πρόσβαση φερτών υλικών και το υδάτινο δυναμικό θα εισχωρεί στον χώρο του εξαμμωτή, με σκοπό την απομάκρυνση στερεών σωματιδίων, άμμου ή άλλων υλικών τα οποία κρίνονται επικίνδυνα για την αξιόπιστη λειτουργία και την διάρκεια ζωής του υδροστροβίλου. Έπειτα, μέσω της απομόνωσης του υδάτινου δυναμικού προς χρήση και την καθίζηση υλικών όπου απειλούν την λειτουργία του στροβίλου, το νερό θα εισέρχεται στον αγωγό προσαγωγής αφού πρώτα διατρέξει δεύτερο στάδιο εσχαρών με τελικό προορισμό την προσβολή του υδροστρόβιλου Kaplan, με αποτέλεσμα την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.



Εικόνα 9.1 – Παρουσίαση εξαμμωτή και αγωγού υδροληψίας στο ανατολικό σημείο του φράγματος.

Για την απομάκρυνση των φερτών υλικών και την γενική συντήρηση του εξαμμωτή όπως και για την διαχείριση-ρύθμιση της παροχής που εισέρχεται προς τον αγωγό προσαγωγής, προστίθενται θυροφράγματα, κατάντη του αγωγού προσαγωγής και στο αρχικό σημείο υδροληψίας έναντί των πρώτων εσχαρών. Το θυρόφραγμα έναντι του σημείου υδροληψίας, κατά την διάρκεια της υδροληψίας, θα παραμένει ανοιχτό ρυθμίζοντας, με την περιοχή ελευθερίας που παρέχει στο νερό να εισχωρεί στον εξαμμωτή, την παροχή και την ταχύτητα εισόδου, ενώ το δεύτερο θυρόφραγμα θα παραμένει πλήρως κλειστό, με γνώμονα την άνοδο του υδροφόρου ορίζοντα και την κατεύθυνση του προς τον αγωγό προσαγωγής. Κατά την συντήρηση και τον καθαρισμό του εξαμμωτή, τα δύο θυροφράγματα θα παραμένουν ανοικτά, χωρίς να παρεμποδίζουν τον υδάτινο πόρο, με σκοπό την αποφυγή ανόδου της στάθμης του νερού.

Επιπλέον , για την διασφάλιση της στατικότητας και την ασφαλή διαφυγή των υδάτων από τον χώρο του φράγματος , εγκαθίσταται στο σημείο του εξαμμωτή, ένας υπερχειλιστής, με σκοπό την έξοδο του νερού σε περιπτώσεις πλήρους πλήρωσης κατά την διάρκεια της υδροληψίας. Επίσης, για την αποφυγή επηρεασμού του πυθμένα από τα ύδατα κατά την εφαπτόμενη ροή τους στο φράγμα και την επανασύνδεση τους με την ροή του ποταμού, εγκαθίσταται λιθορρίπη και στρώματα Reno κατάντη της κοίτης του φράγματος.



Εικόνα 9.2 – Θυρόφραγμα ρύθμισης παροχής έναντι του σημείου εσχαρών υδροληψίας.

Ταυτόχρονα, για την δίοδο των ιχθύων και την τροφοδοσία του ποταμού, μέσω της οικολογικής παροχής, εγκαθίσταται ιχθυόσκαλα και επιπλέον θυρόφραγμα στο βόρειο-δυτικό σημείο του φράγματος. Κατά την διάρκεια της υδροληψίας και εξαρτώμενο από την παροχή του ποταμού, το συγκεκριμένο θυρόφραγμα, θα προσθέτει μια επιπλέον διέξοδο του υδάτινου πόρου χωρίς να επηρεάζει την υδροληψία, με αποτέλεσμα την αποφυγή πιέσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται κρίσιμες για την στατικότητα και την αντοχή του φράγματος.

10. Υδρολογική Ανάλυση

10.1. Υδρολογικά Δεδομένα

Για την διαστασιολόγηση αλλά και για την επιλογή των συστημάτων λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου, αναζητήθηκαν δεδομένα επιφανειακών απορροών για τον ποταμό Άραχθο για χρονικό διάστημα τουλάχιστον δέκα (10) ετών. Τα υδρολογικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση της υδρολογικής συμπεριφοράς του ποταμού κατά τους θερινούς και χειμερινούς μήνες , καθώς και για τον καθορισμό της παροχής του.

Μέσω της επεξεργασίας των προαναφερόμενων υδρολογικών στοιχείων προέκυψαν τα εξής :

- Η ημερήσια παροχή του ποταμού.
- Η μέγιστη και ελάχιστη παροχή.
- Η εποχιακή μεταβολή της απορροής του ποταμού Άραχθου.
- Η οικολογική παροχή.

Ταυτόχρονα, μέσω των παραπάνω δεδομένων αξιολογήθηκε η δυνατότητα εγκατάστασης ενός ΥΗΕ με την βέλτιστη δυνατή ισχύς όπου θα πρόσδιδε η παροχή του ποταμού, με αποτέλεσμα να προκύπτει ότι λόγω του χαμηλού διαθέσιμου υδραυλικού ύψους και της υψηλής παροχής , η χρήση ενός υδροστροβίλου Kaplan αποτελούσε την βέλτιστη λύση για την υπό μελέτη εφαρμογή.

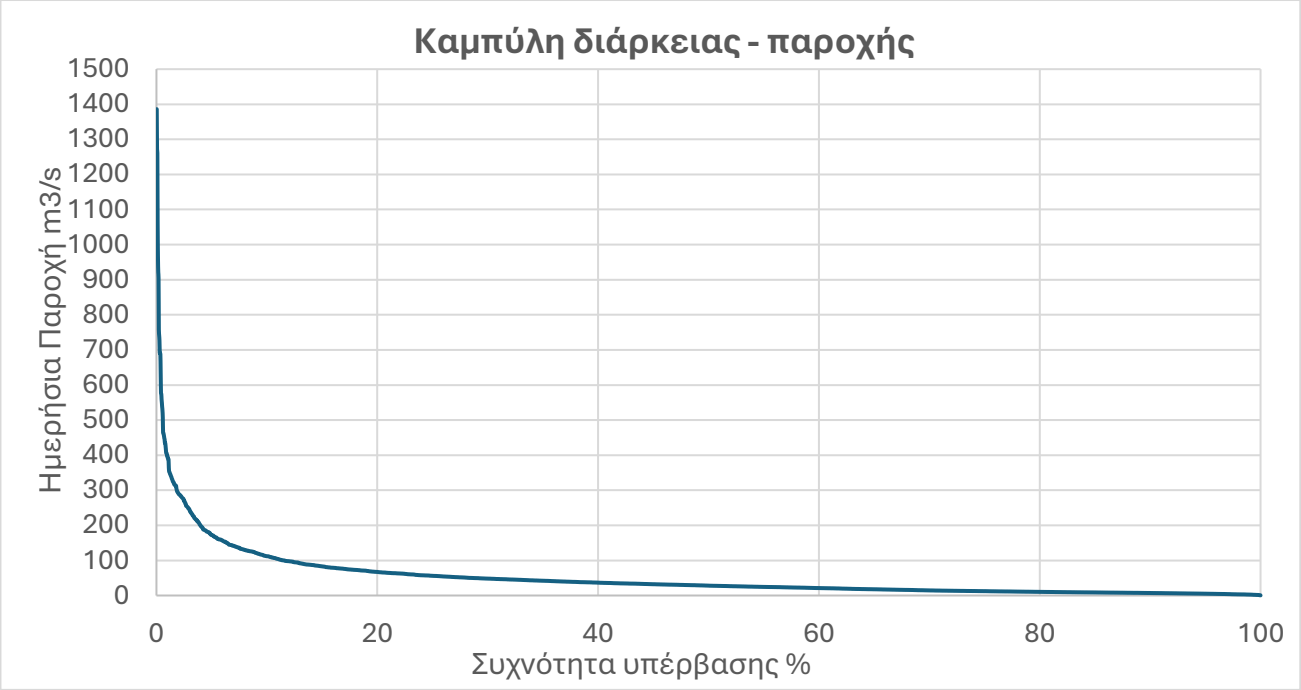
Τα υδρολογικά δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 10.1), προσδίδουν την μέση ημερήσια παροχή ανά μήνα και ανά έτος, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παροχής **51,72** m^3/s για όλα τα έτη.

Πίνακας 10.1 – Μέση επιφανειακή απορροή ανά μήνα, ανά έτος και για όλα τα έτη.

	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Έτος
2011-12	12,37	7,85	44,69	58,25	52,63	58,76	35,73	40,09	21,54	11,75	8,72	10,88	30,27
2012-13	47,54	56,08	162,85	46,01	77,02	66,86	123,5	65,49	31,09	12,93	10,5	9,96	59,15
2013-14	17,02	70,01	46,4	216,1	158,69	192,9	98,63	59,1	28,05	13,17	7,81	10,92	76,56
2014-15	27,42	36,6	112,63	78,85	60,95	76,15	84,68	72,08	31,74	13,68	9,29	16,66	51,73
2015-16	40,76	73,6	27,94	94,5	176,28	107	71,69	39,54	21,71	12,93	9,32	17,61	57,74
2016-17	43,58	108,86	26,43	158,4	152,59	121,4	60,19	71,92	26,93	15,3	10,47	41,8	69,82
2017-18	5,03	30,7	149,89	63,93	90,41	43,61	27,57	24,44	17,22	7,23	4,11	3,42	38,96
2018-19	6,45	39,15	39,06	63,71	198,17	177,1	71,45	37,7	23,79	17,46	12,14	10,71	58,08
2019-20	11,19	112,47	151,84	127,7	59,32	29,42	41,57	39,71	20,99	8,14	5,46	6,88	51,23
2020-21	24,85	13,02	72,94	34,47	30,74	44,08	37,9	16,42	15,73	8,46	7,34	10,59	26,38
Μέση ημερ./ μήνα (m^3/s)	**23,621**	**54,834**	**83,467**	**94,19**	**105,68**	**91,73**	**65,291**	**46,65**	**23,879**	**12,11**	**8,516**	**13,94**	**51,99**

10.2. Ανάλυση Παροχών και Χρονοσειρά

Μέσω των αποτελεσμάτων του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 10.1), καθώς και την αποτύπωση των ημερήσιων επιφανειακών απορροών από το έτος 2011 έως το 2020, δημιουργήθηκε το διάγραμμα καμπύλης διάρκειας – παροχής και οι αντίστοιχες χρονοσειρές παροχής του ποταμού.



Σχήμα 10.1 – Διάγραμμα καμπύλης διάρκειας – παροχής με χρονολογικά δεδομένα από το 2011-2020.

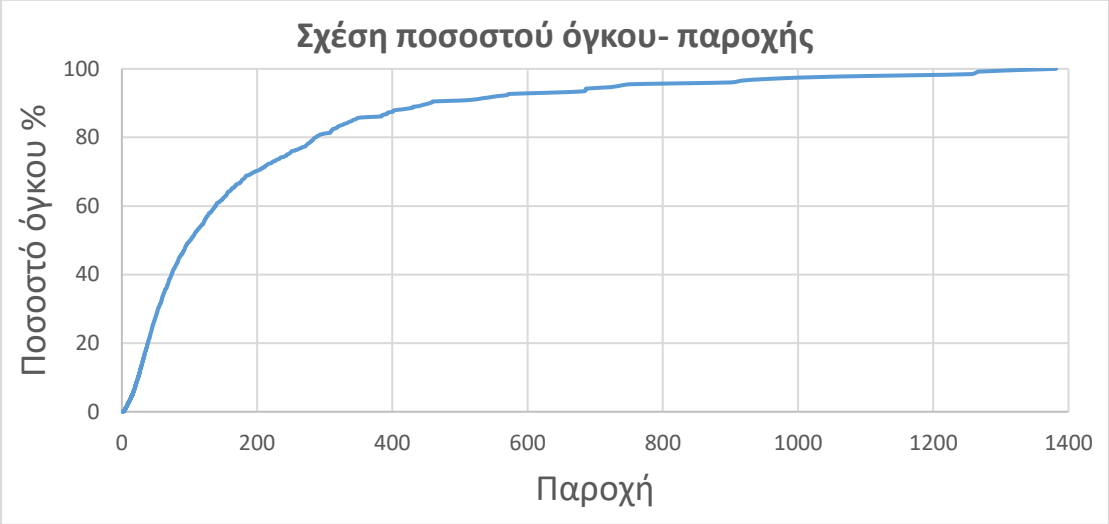


Σχήμα 10.2 – Χρονοσειρά ημερήσιων παροχών με χρονολογικά δεδομένα από το 2011-2020.

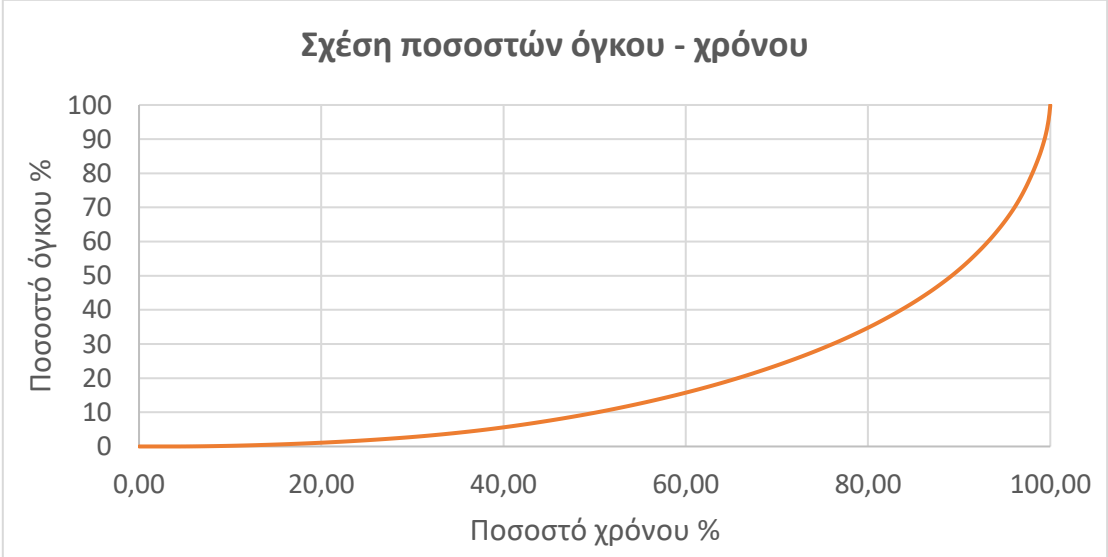
10.3. Οικολογική Παροχή και Εκμεταλλεύσιμο Υδάτινο Δυναμικό

Για την πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς του ποταμού και την βέλτιστη αξιολόγηση της παροχής σχεδιασμού όπου επιλέγει, μέσω των υδρολογικών δεδομένων (Πίνακας 1) χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των μηνών Ιουλίου, Αυγούστου, Σεπτεμβρίου όπου εμφανίζονται οι χαμηλότερες επιφανειακές απορροές κατά την δεδομένη περίοδο, με αποτέλεσμα η μέση οικολογική παροχή που οφείλει να διαπερνά το φράγμα να ανέρχεται στα 3,46 m^3/s.

Παράλληλα, η μέση εκμεταλλεύσιμη παροχή, η οποία προκύπτει μέσω της αφαίρεσης της μέσης οικολογικής παροχής από την μέση ημερήσια παροχής, ανέρχεται στα 48,28 m^3/s, με αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα δεδομένα να αξιοποιούνται για την δημιουργία των διαγραμμάτων σχέσης ποσοστού όγκου και χρόνου – παροχής, με γνώμονα την απεικόνιση και την πλήρης κατανόηση της δράσης του ποταμού.



Σχήμα 10.3 – Κατανομή ποσοστού όγκου συναρτήσει της παροχής.

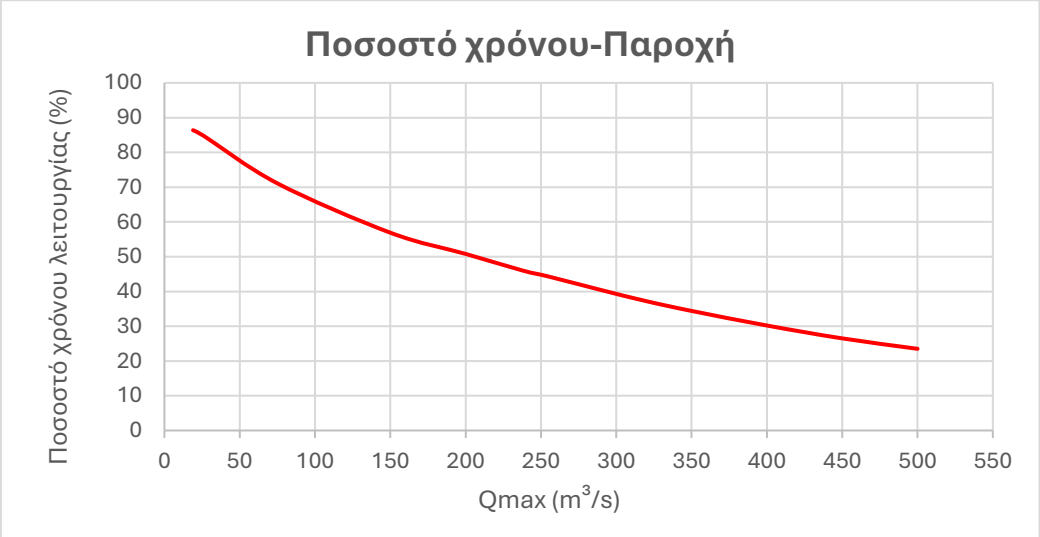


Σχήμα 10.4 – Σχέση αθροιστικού ποσοστού όγκου και ποσοστού χρόνου.

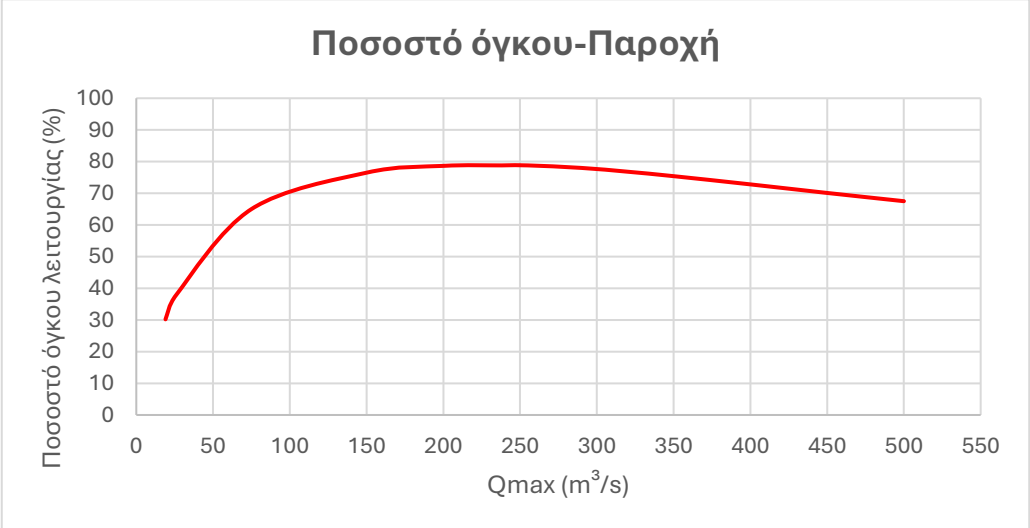
Από την ανάλυση των διαγραμμάτων, είναι εμφανή ότι το μεγαλύτερο ποσοστό υδάτινου όγκου παρουσιάζεται σε σχετικά χαμηλές και μεσαίες τιμές παροχής, ενώ οι υψηλές τιμές διακατέχουν περιορισμένο χρόνο εμφάνισης στο χρονικό διάστημα το οποίο μελετάτε.

10.4. Βελτιστοποίηση Παροχής Σχεδιασμού

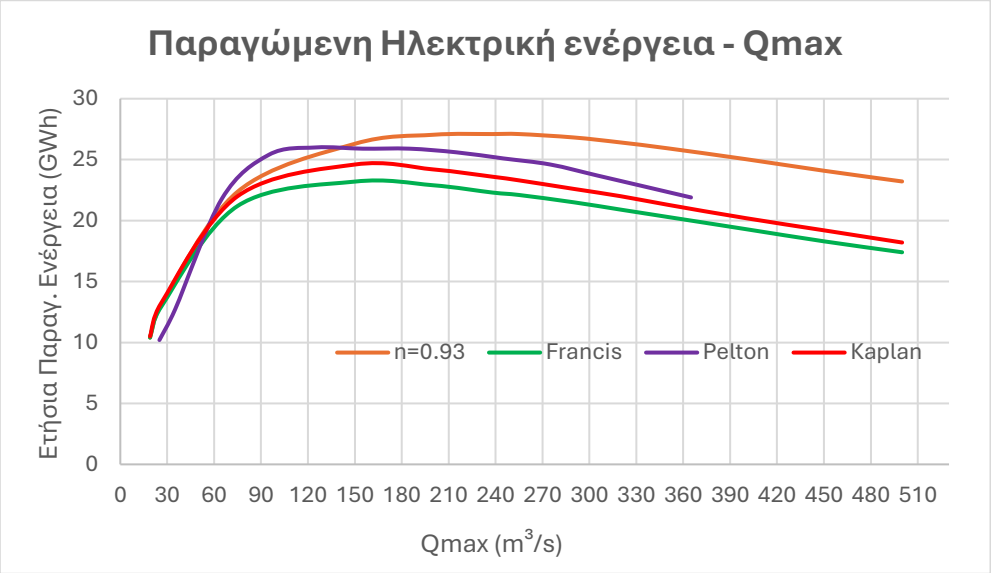
Για την επιλογή της βέλτιστης παροχής σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε τεχνοενεργειακή εκτίμηση διαφορετικών τιμών παροχής λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου, με σκοπό την πλήρης απεικόνιση της διάρκειας λειτουργίας του έργου, την επίδραση της μέγιστης παροχής λειτουργίας στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια, το ποσοστό όγκου υδάτινου δυναμικού για αξιοποίηση και την απόδοση του έργου στο εύρος των τιμών αυτών για το χρονικό διάστημα το οποίο εξετάζεται (Σχήμα 10.2). Επιπλέον, με βάσει τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων για την κατάλληλη και αποδοτικότερη λειτουργία ολόκληρου του έργου.



Σχήμα 10.5 – Μεταβολή ποσοστού χρόνου λειτουργίας και μέγιστης παροχής λειτουργίας του ΥΗΕ.



Σχήμα 10.6 – Μεταβολή ποσοστού όγκου λειτουργίας και μέγιστης παροχής λειτουργίας του ΥΗΕ.



Σχήμα 10.7 – Μεταβολή ετήσιας παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει του εύρους τιμών μέγιστης παροχής που εξετάζεται για διαφορετικούς τύπους υδροστροβίλων.

Μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων και των δεδομένων όπου αναφέρονται στο Κεφάλαιο περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου, παρατηρείται ότι η αύξηση της μέγιστης παροχής πέραν των χαμηλών τιμών μεταξύ 30-90 m^3/s, τείνει προς ελάχιστη αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας. Παράλληλα, αυξάνει τις οικονομικές απαιτήσεις σχεδιασμού του έργου, με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης να μην είναι εφικτό προς την δημιουργία ενός τέτοιου είδους έργου καθώς η απόσβεση της δαπάνης θα είναι μακροχρόνια.

Επιπλέον, από την σύγκριση των διαφορετικών τύπων υδροστροβίλων εντός του ίδιου εύρους τιμών μέγιστης παροχής προκύπτει ότι ο υδροστρόβιλος δράσης τύπου Kaplan παρουσιάζει την βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά σε συνθήκες χαμηλών υδραυλικών υψών και υψηλών επιπέδων παροχής μεταξύ των άλλων τύπων υδροστροβίλων, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 10.7.

10.4.1. Επιλογή παροχής σχεδιασμού

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, επιλέχθηκε η παροχή σχεδιασμού η οποία ανέρχεται στα 46 m^3/s και επιτρέπει την αξιοποίηση σημαντικού ποσοστού υδάτινου πόρου που προσφέρεται από τον ποταμό. Παράλληλα, όπως έχει αναφερθεί και σε ανώτερα κεφάλαια, λόγω του χαμηλού υδραυλικού ύψους και της υψηλής παροχής εγκαθίσταται υδροστρόβιλος τύπου Kaplan, ο οποίος μέσω της επιλεγμένης παροχής σχεδιασμού, εκτιμάτε ότι η εγκατεστημένη ισχύς η οποία έχει την δυνατότητα να προσδώσει μέσω της εξίσωση της υδροηλεκτρικής ισχύος $P = \eta\rho gQH$ (Περιγραφή σε παρακάτω κεφάλαιο) ανέρχεται στα 4,2MW.

Παράλληλα, μέσω των αποτελεσμάτων του Σχήματος 10.7, παρατηρείται ότι η ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται στις 18,3 GWh/έτος, γεγονός που προσδίδει έναν αξιόλογο συντελεστή χρήσης του υδάτινου δυναμικού με ποσοστό λειτουργίας περίπου στο 80% εντείνοντας επιπλέον και την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

11. Υδραυλικός Σχεδιασμός Υδροηλεκτρικού Έργου

11.1. Επιλογή Ταχύτητας Ροής Αγωγού (V)

Για τον αρχική διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής επιλέχθηκε αρχική ταχύτητα ροής **3 m/s**, τιμή η οποία επιλέγεται σε υψηλό ποσοστό για την κατασκευή αγωγών σε υδροηλεκτρικά έργα παρόμοια με το έργο το οποίο μελετάτε. Η επιλογή της συγκεκριμένης ταχύτητας ροής πάρθηκε με σκοπό την αποφυγή υψηλών υδραυλικών απωλειών, καθώς αυξημένες ταχύτητες τείνουν να αυξάνουν τις υδραυλικές απώλειες, με αποτέλεσμα να μειώνεται ραγδαία το καθαρό ύψος πτώσης. Παράλληλα, δεν χρησιμοποιήθηκαν ταχύτητες χαμηλότερες της επιλεγμένης τιμής, καθώς τα αποτέλεσμα αυτών θα οδηγούσαν σε αυξημένη διατομή αγωγού, το οποίο συνεπάγεται και αυξημένο κόστος κατασκευής, με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου να υπερβαίνει τα φυσιολογικά επίπεδα.

11.2. Διαστασιολόγηση Αγωγού Προσαγωγής (D)

Η διαστασιολόγηση του αγωγού προσαγωγής πραγματοποιήθηκε μέσω της εξίσωσης συνέχεια της ροής, με δεδομένη την ταχύτητα ροής ίση με 3 m/s και την παροχή σχεδιασμού ίση με 46 m^3/s.

Με την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας της ροής και λύνοντας ως προς την διατομής του αγωγού $D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$, προσδόθηκε το αποτέλεσμα της διατομής η οποία είναι ίση με D = 4.42m ή DN4420 και εμπορικά DN4500. Το υλικό κατασκευής του αγωγού προσαγωγής επιλέχθηκε να είναι χάλυβας, καθώς λόγω της μεγάλης διατομής του αγωγού και της υψηλής παροχής που ρέει εντός αυτού οι μηχανικές αντοχές είναι αυξημένες, με αποτέλεσμα η χρήση του υλικού αυτού να καθίσταται μονόδρομος για την ολοκληρωμένη διαστασιολόγηση και αξιόπιστη χρήση του αγωγού προσαγωγής.

Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται αποδεκτό, καθώς επιτυγχάνει το κατάλληλο ποσοστό μεταφορά υδάτινου δυναμικού προς τον υδροστρόβιλο με τα δεδομένα τα οποία έχουν επιλεγεί, αλλά και διατηρεί τις υδραυλικές απώλειες σε χαμηλό ποσοστό, χωρίς να επηρεάζεται η συνολική εγκατάσταση του έργου.

11.3. Απαιτούμενο Πάχος Αγωγού Προσαγωγής (e)

Το απαιτούμενο πάχος e χαλυβδοσωλήνα για να ανταπεξέλθει σε μέγιστη πίεση p_{max} δίνεται από τη σχέση:

$$e = \frac{D \cdot p_{max}}{2 \cdot \frac{k_1 \cdot \sigma_{max}}{k_2}} + e_1 + e_2$$

όπου τα δεδομένα τα οποία αναγράφονται στην παραπάνω εξίσωση είναι τα εξής :

- e το απαιτούμενο πάχος της σωλήνωσης (σε mm)
- D η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης (σε mm)
- p_{max} η μέγιστη αναπτυσσόμενη πίεση στη σωλήνωση (σε MPa)
- σ_{max} το όριο διαρροής (yield point) του υλικού της σωλήνωσης (σε MPa)
- k_1 = 0,7 συντελεστής ασφαλείας
- k_2 = 1,7 συντελεστής ασφαλείας
- e_1 = 1,0mm προσαύξηση ασφαλείας πάχους για λόγους γήρανσης του υλικού
- e_2= 1,0mm προσαύξηση ασφαλείας πάχους για λόγους πιθανής ατέλειας κατασκευής.

Μέσω των παραπάνω το αποτέλεσμα το οποίο προκύπτει είναι e = 2 mm αλλά μέσω εμπορικών επιλογών και επιπλέον παραδοχών, όπως συγκολλήσεις, κατασκευαστικές ανοχές, πιθανά συμβάντα υδραυλικών πληγμάτων και δυναμικές καταπονήσεις που δέχεται στο εσωτερικό του ο αγωγός, το πάχος ανέρχεται σε e = 18mm.

11.4. Υπολογισμός Αριθμού Reynolds

Για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds χρησιμοποιήθηκε η σχέση $Re = \frac{VD}{\nu}$, όπου μέσω των παραπάνω δεδομένων η ταχύτητα ροής είναι ίση με 3 m/s, η παροχή σχεδιασμού ανέρχεται στα 46 m^3/s , ενώ λαμβάνεται η παραδοχή ότι το νερό βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασίας 20 °C και το κινηματικό ιξώδες του νερού είναι ίσο με $1X10^{-6}$.

Μέσω των παραπάνω δεδομένων και των παραδοχών, προέκυψε ότι $Re = 1.33 \times 10^7$, γεγονός που αναδεικνύει πλήρης τυρβώδης ροή εντός του αγωγού προσαγωγής.

11.5. Υπολογισμός Συντελεστή Τριβής (f)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής χρησιμοποιήθηκε η ρητή σχέση Swamee-Jain, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις πλήρους τυρβώδους ροής εντός κυκλικών αγωγών και συγκροτεί την εξίσωση Colebrook-White. Η εξίσωση δίνεται από την σχέση :

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2}$$

όπου D και Re είναι τα αριθμητικά αποτελέσματα των παραπάνω κεφαλαίων για τον υπολογισμό της διατομής του αγωγού και του αριθμού Reynolds, f ο συντελεστής τριβής Darcy-Weisbach και μέσω παραδοχής $\varepsilon = 4,5 \times 10^{-5}$ η απόλυτη τραχύτητα του αγωγού. Μέσω της παραπάνω σχέσης και των δεδομένων που προέκυψαν, το αποτέλεσμα το οποίο λαμβάνεται για τον συντελεστή τριβής είναι $f = 0,00889$, το οποίο κρίνεται αποδεκτό βάσει της επιλογής υλικού για τον αγωγό προσαγωγής.

11.6. Υπολογισμός Γραμμικών Απωλειών (h_f)

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Darcy-Weisbach, όπου το μήκος του αγωγού (βάσει σχεδιασμού) L= 40m , ενώ τα δεδομένα διατομής, παροχής και συντελεστή τριβής αντλήθηκαν από τα αντίστοιχα κεφάλαια που έχουν αναλυθεί. Η εξίσωση δίνεται από :

$$h_f = \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$$

Μέσω των προαναφερόμενων το αποτέλεσμα που δίνεται από την εξίσωση για το ύψος των γραμμικών απωλειών είναι $h_f = 0{,}037\text{m}$.

11.7. Υπολογισμός Τοπικών Απωλειών (h_D)

Ο υπολογισμός των τοπικών απωλειών πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την μεταφορά του υδάτινου πόρου από διαφορετικά εξαρτήματα τα οποία απαρτίζουν το υδροηλεκτρικό έργο, όπως εσχάρες, θυροφράγματα, διαφορετικές διατομές κατά την πορεία του αγωγού προς τον υδροστρόβιλο, μεταβολές της κατεύθυνσης του αγωγού, είσοδοι και έξοδοι του αγωγού. Μέσω αυτών των μεταβολών, η ροή και η ταχύτητα του νερού επηρεάζονται με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μείωση στο συνολικό καθαρό ύψος, το οποίο συνεπάγεται μειωμένη εγκατεστημένη ισχύς.

Για την αποφυγή υψηλών τοπικών απωλειών, επιλέχθηκε ο υδροηλεκτρικός σταθμός να εγκατασταθεί κατάντη του φράγματος σε κοντινή απόσταση από αυτό, με αποτέλεσμα οι απώλειες οι οποίες λαμβάνονται να είναι οι εξής :

- Η είσοδος και η έξοδος από τον αγωγό, με συντελεστή απωλειών K = 1
- Η εσχάρα υδροληψίας, με συντελεστή απωλειών K = 0,80
- Θυρόφραγμα πλήρως ανοικτό, με συντελεστή απωλειών K = 0,20
- Η είσοδος και η έξοδος από τον εξαμμωτή, με συντελεστή απωλειών K = 0,40
- Εισροή σε σχάρα ανάντη του αγωγού προσαγωγής, με συντελεστή απωλειών K = 0,80
- Η δικλείδα ασφαλείας, με συντελεστή απωλειών K = 0,30

Μέσω των παραπάνω, η συνολική τιμή του συντελεστή απωλειών είναι K = 3,5 ενώ το ύψος των τοπικών απωλειών υπολογίζεται από την σχέση :

$$h_D = K \frac{V^2}{2\text{g}}$$

όπου προκύπτει το αποτέλεσμα $h_D = 1{,}61m.$

11.8. Υπολογισμός Καθαρού Ύψους Πτώσης (h_n)

Μέσω των αποτελεσμάτων των γραμμικών και τοπικών απωλειών του υπό μελέτη υδροηλεκτρικού έργου, όπου προέκυψε ότι $\underline{h_D = 1{,}61m}$ και $h_f = 0{,}037$m, δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού του καθαρού υδραυλικού ύψους, με την χρήση της σχέσης :

$$h_n = h_{geo} - h_f - h_D$$

όπου το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι $\underline{h_n = 9{,}35m.}$

11.9. Υπολογισμός Εγκατεστημένης Ισχύος

Η εγκατεστημένη ισχύς του υδροηλεκτρικού έργου, μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υδρολογική και υδραυλική ανάλυση για την παροχή σχεδιασμού, την διάμετρο του αγωγού, την ταχύτητας ροής των υδάτων αλλά και το καθαρό υδραυλικό ύψος υπολογίζεται μέσω της σχέσης $P = \eta\rho gQH$ και ανέρχεται στα 4,2MW.

Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται εξαιρετικά αποδεκτό μέσω των υδρολογικών δεδομένων της περιοχής, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αξιοποίηση υψηλού ποσοστού υδάτινου πόρου για την σωστή λειτουργία του έργου και την βέλτιστη απόδοση του. Επιπλέον, η ροή του ποταμού δεν παρεμποδίζεται σε υψηλό βαθμό, με αποτέλεσμα να διατηρείται σε ενεργή δράση η λειτουργία του υδροβιότοπου αλλά και να συνεισφέρει στην διατήρηση της χλωρίδας και πανίδας του τόπου.

Παράλληλα, η εγκατεστημένη ισχύς 4,2 MW καθιστούν το έργο τεχνικά και οικονομικά βιώσιμο, καθώς εξασφαλίζει ικανοποιητικά επίπεδα ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα η απόσβεση του συνολικού κόστους κατασκευής να μην τείνει να είναι μακροχρόνια, καθώς και μέσω της επιτυχής ισορροπίας μεταξύ της ενεργειακής αξιοποίησης του υδάτινου δυναμικού και της περιβαλλοντικής προστασίας, το έργο κρίνεται αξιόπιστο και αποδοτικό.

12. Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Υδροηλεκτρικού Έργου

Με την λήψη των αποτελεσμάτων της υδρολογικής και υδραυλικής ανάλυσης του υπό μελέτη υδροηλεκτρικού έργου, διεξήχθη τεχνοοικονομική ανάλυση η οποία αποτελείτε από την καθαρή παρούσα αξία, τα έσοδα και τα έξοδα που θα προσδίδονταν από το έργο, το χρονικό διάστημα αποπληρωμής καθώς και την εκτίμηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) του έργου σε διαφορετικές πτυχές εγκατεστημένης ισχύς, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης οικονομικά και τεχνικά λύσεις για την άριστη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδάτινου πόρου του ποταμού Άραχθου.

12.1. Παραδοχές Οικονομικής Ανάλυσης

Για την τεχνοοικονομική ανάλυση του υδροηλεκτρικού έργου δόθηκαν συγκεκριμένες τεχνικά και οικονομικά παραδοχές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό βασικών παραμέτρων της οικονομικής ανάλυσης.

Συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε η παραδοχή των 25 χρόνων διάρκειας ζωής του έργου καθώς και η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία του οργανισμού ΔΑΠΕΕΠ, ανέρχεται στα 90€/MWh. Παράλληλα, τέθηκε το επιτόκιο εξόφλησης 6%, ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του υδροηλεκτρικού έργου λογίσθηκε ίσο με 3%.

12.2. Κοστολόγηση Συνολικής Εγκατάστασης Υδροηλεκτρικού Έργου

Η κοστολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τον παρακάτω πίνακα, μέσω του οποίου αναφέρεται το κόστος, η ποσότητα και το είδος κάθε τεμαχίου που συνέβαλε στην δημιουργία του υπό μελέτη έργου. Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης ενός υδροηλεκτρικού έργου εγκατεστημένης ισχύος 4,2MW στον υπό μελέτη ποταμό ανέρχεται στην τιμή των 14.342.000€ μέσω των οποίων συμπεριλαμβάνονται οι ενέργειες των πολιτικών μηχανικών καθώς και για την άρτια σύνδεση του έργου με το δίκτυο, ώστε να πραγματοποιείται η αγορά της παραγόμενης ενέργειας , συμπεριλαμβάνονται και οι δράσεις των ηλεκτρολόγων μηχανικών μέσω εφαρμογών SCADA και των διάφορων τύπων αυτοματισμών.

12.3. Υπολογισμός Εσόδων, Εξόδων και Περιόδου Αποπληρωμής

Για τον υπολογισμό των εσόδων του έργου, χρησιμοποιήθηκε η παραδοχή της τιμής αγοράς της παραγόμενης ενέργειας καθώς πολλαπλασιάστηκε με την τιμή της ετήσιας παραγόμενη ενέργειας 18,3 GWh/έτος, προκύπτοντας πως το σύνολο των εσόδων ανέρχεται στο 1.647.900€/ετησίως.

Λόγω της παραδοχής του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης του έργου το οποίο θεωρείτε ίσο 3%, οι λειτουργικές δαπάνες ανέρχονται 430.000€/ετησίως, ενώ η καθαρή ταμειακή ροή υπολογίζεται 1.217.640€/ετησίως με αποτέλεσμα η περίοδος αποπληρωμής του υδροηλεκτρικού έργου να είναι 11,8 χρόνια.

Πίνακας 12.1 – Αναλυτική κοστολόγηση συνολικού υδροηλεκτρικού έργου 4 MW

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΣ.	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ (€)	ΜΟΝΑΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ	ΣΥΝ. ΚΟΣΤΟΣ (€)
INPUT	Εγκατεστημένη Ισχύς	4,2	MW			
INPUT	Net Head	10	m			
INPUT	Ταχύτητα Ροής	3	m/s			
INPUT	Μήκος Αγωγού	40	m			
INPUT	Όγκος Εκσκαφών	5.000	m^3			
INPUT	Όγκος Σκυροδέματος	2.500	m^3			
INPUT	Μήκος Γραμμής ΜΤ	0,3	km			
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**	**ΠΟΣΟΤΗΤΑ**	**ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΣ.**	**ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ (€)**	**ΜΟΝΑΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ**	**ΣΥΝ. ΚΟΣΤΟΣ (€)**
ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ	Παροχή Σχεδιασμού Q	46	m^3/s			
ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ	Διάμετρος Αγωγού D	4,5	m			
ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ	Κόστος Αγωγού ανά m	6.200	€/m			
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**	**ΠΟΣΟΤΗΤΑ**	**ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΣ.**	**ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ (€)**	**ΜΟΝΑΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ**	**ΣΥΝ. ΚΟΣΤΟΣ (€)**
ΠΟΛΙΤΙΚΑ ΕΡΓΑ	Φράγμα / Weir	4,2	MW	700.000	€/MW	2.940.000
ΠΟΛΙΤΙΚΑ ΕΡΓΑ	Υδροληψία	4,2	MW	180.000	€/MW	756.000
ΠΟΛΙΤΙΚΑ ΕΡΓΑ	Powerhouse	4,2	MW	300.000	€/MW	1.260.000
ΕΚΣΚΑΦΕΣ	Εκσκαφές	5.000	m^3	35	€/m^3	175.000
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	2.500	m^3	350	€/m^3	875.000
ΑΓΩΓΟΙ	Χαλύβδινος Αγωγός	40	m	6.200	€/m	248.000
ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ	Kaplan Turbine	4.200	kW	1.100	€/kW	4.620.000
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	Σύγχρονη Γεννήτρια	4.200	kW	350	€/kW	1.470.000
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ	Ηλ. Εξοπλισμός	4.200	kW	250	€/kW	1.050.000
ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	Υποσταθμός 20kV	4.200	kW	120	€/kW	504.000
ΓΡΑΜΜΗ ΜΤ	Γραμμή Μέσης Τάσης	0,3	km	80.000	€/km	24.000
ΜΕΛΕΤΕΣ	Μελέτες & Άδειες	4,2	MW	60.000	€/MW	252.000
ΛΟΙΠΑ	SCADA / Αυτοματισμοί	4.200	kW	40	€/kW	168.000

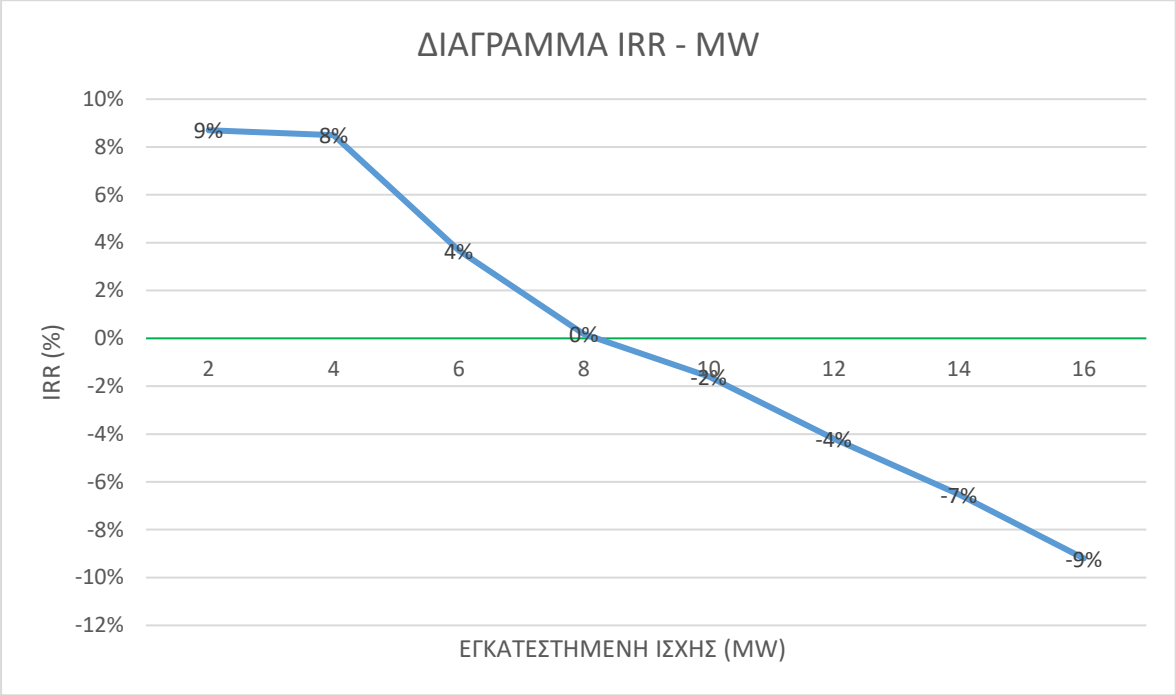
12.4. Αξιολόγηση Διαφορετικών Σεναρίων Εγκατεστημένης Ισχύος

Μέσω των προαναφερόμενων αποτελεσμάτων της οικονομικής αξιολόγησης του έργου με εγκατεστημένη ισχύς 4,2MW, για την πλήρης απεικόνιση αλλά και την τεκμηρίωση της επιλογής της συγκεκριμένης εγκατεστημένης ισχύς, πραγματοποιήθηκε παρόμοια μεθοδολογία και θεωρήθηκαν διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος για το υπό μελέτη έργο, χωρίς την εναλλαγή των εφιστάμενων παραδοχών.

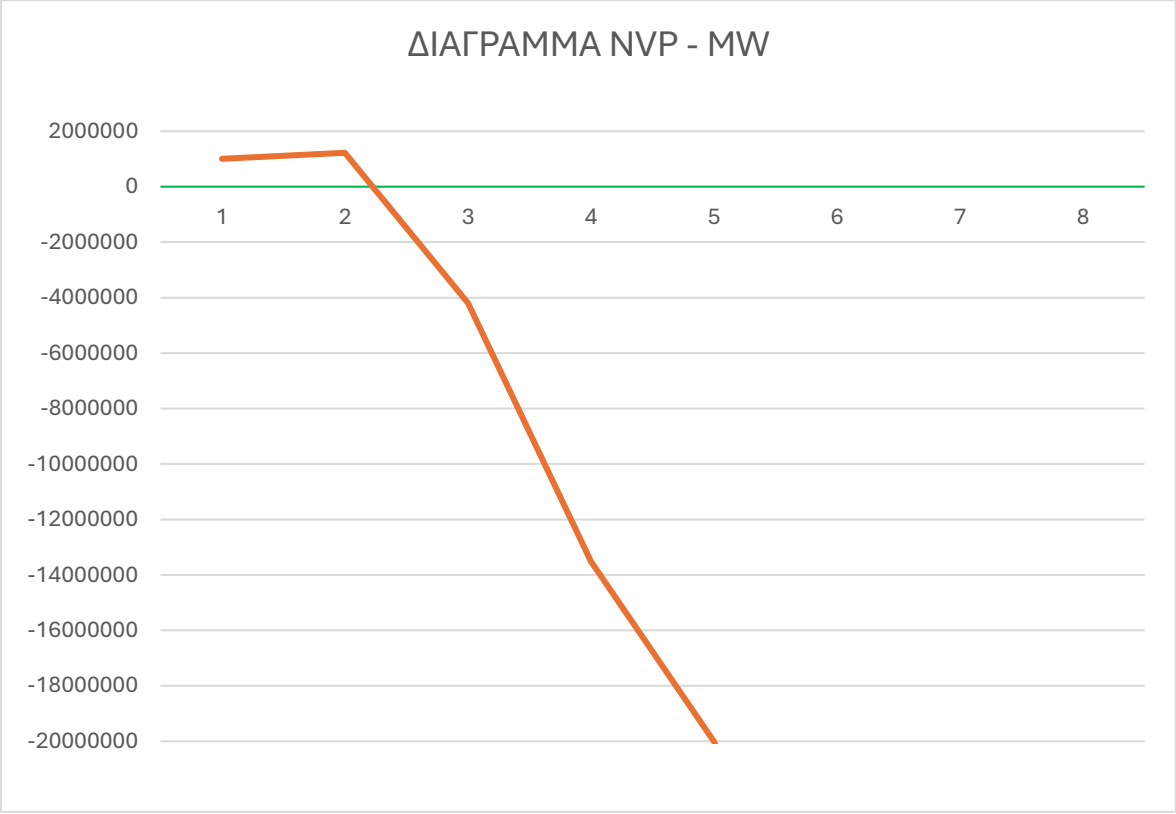
Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν αναδεικνύουν την ικανότητα του έργου, που επιλέγει, να αξιοποιεί πλήρως το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό, καθώς και να προσφέρει ένα πιο σύντομο χρονικό διάστημα απόσβεσης της επένδυσης που πραγματοποιήθηκε για την δημιουργία του έργου.

Πίνακας 12.2 – Αναλυτική αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων εγκατεστημένης ισχύος.

SCENARIO	MW	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (GWh/y)	CAPEX (€)	ΕΣΟΔΑ (€)	Λειτουργικές Δαπάνες (€)	ΚΑΘΑΡΗ ΤΑΜΕΙΑΚΗ ΡΟΗ (€)	PAYBACK (έτη)	Σταθμ. Κόστος Ενέργειας
1	2	11,7	9 εκ.	1.053.000	270.000	783.000	11,5	53,85
2	4	18,3	14,3 εκ.	1.647.900	430.000	1.217.640	11,8	54,83
3	6	20,4	20 εκ.	1.836.000	600.000	1.236.000	16,2	68,63
4	8	22,4	28,4 εκ.	2.016.000	852.000	1.164.000	24,4	88,75
5	10	23,5	34 εκ.	2.115.000	1.020.000	1.095.000	31	101,28
6	12	24,2	42 εκ.	2.178.000	1.260.000	9.18.000	45,8	121,5
7	14	24,5	49,2 εκ.	2.205.000	1.476.000	729.000	67,5	140,6
8	16	24,6	56,7 εκ.	2.214.000	1.701.000	513.000	110,2	161,34
9	18	24,5	63,8 εκ.	2.205.000	1.914.000	291.000	219,2	182,3
10	20	24,2	72,6 εκ.	2.178.000	2.178.000	-	-	210



Σχήμα 12.1 – Διάγραμμα μεταβολής του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) συναρτήσει των διαφορετικών σεναρίων εγκατεστημένης ισχύος.

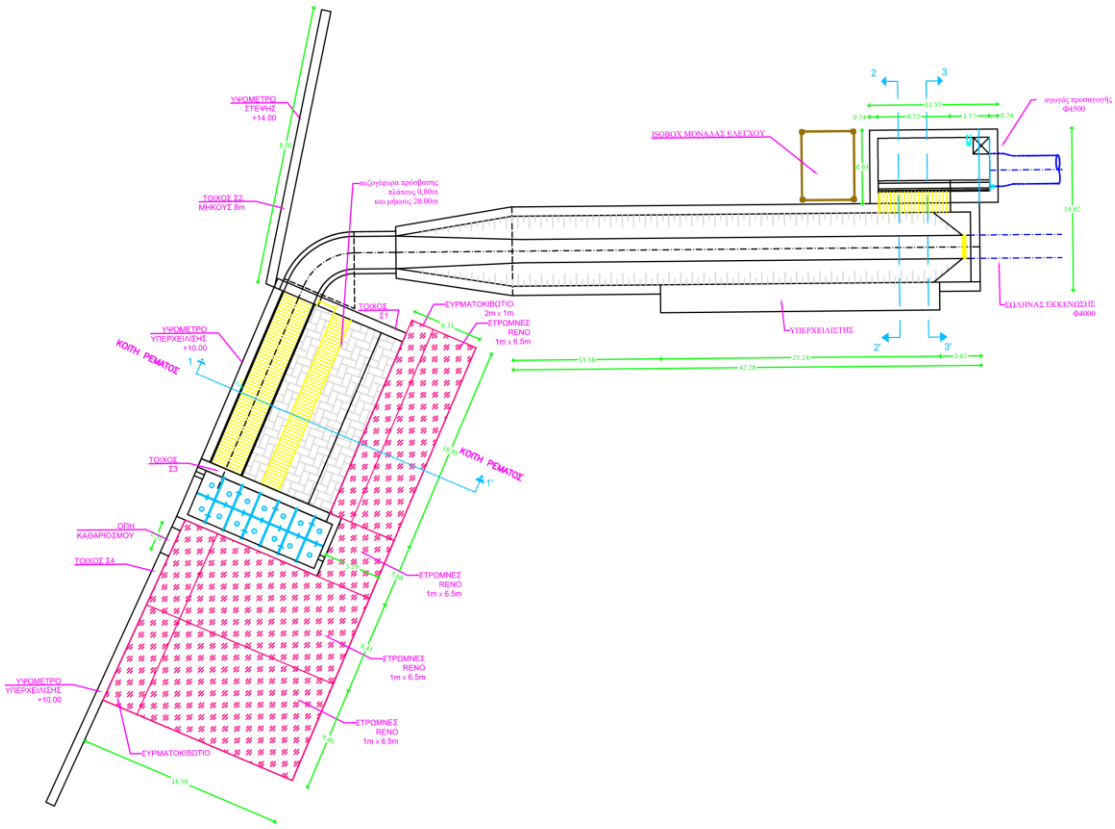


Σχήμα 12.2 – Διάγραμμα μεταβολής καθαρής παρούσας αξίας (NVP) συναρτήσει των διαφορετικών σεναρίων εγκατεστημένης ισχύος.

13. Τεχνικά Σχέδια Υδροηλεκτρικού Έργου

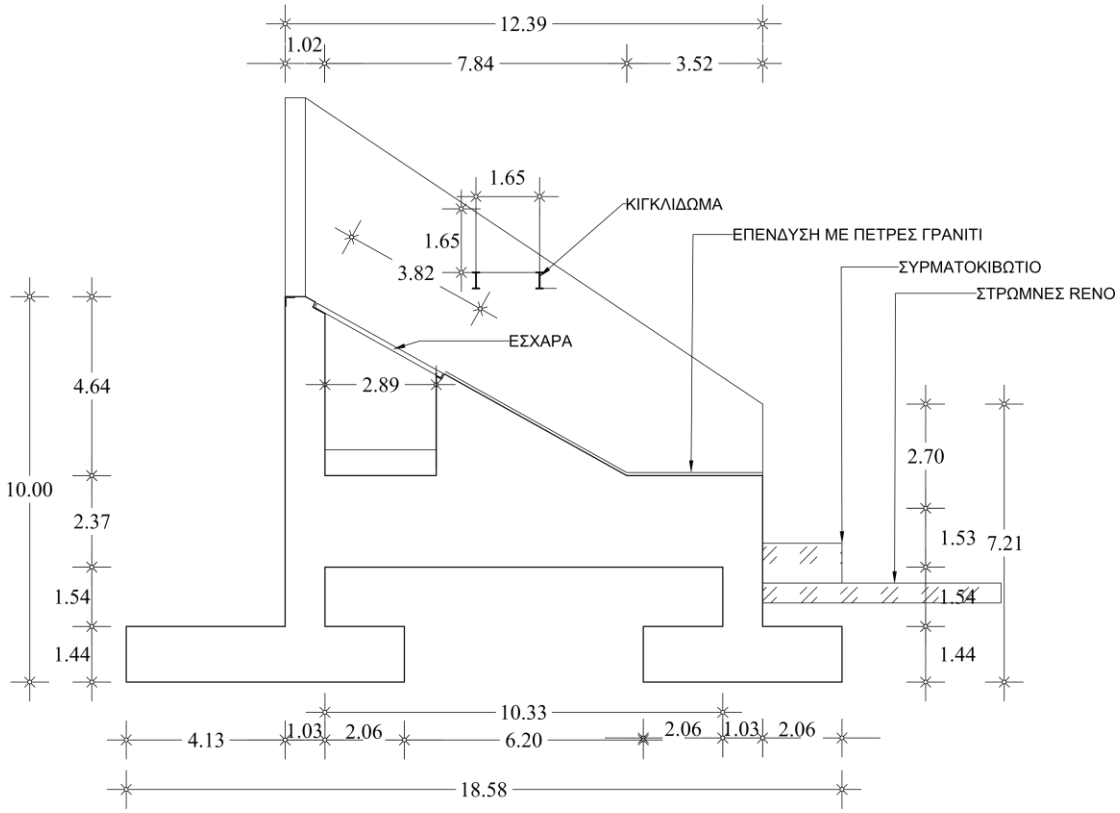
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα σχέδια τα οποία διαμορφώθηκαν για την πλήρης διαστασιολόγηση του φράγματος, του υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και τα σχέδια τα οποία χορηγήθηκαν για την διαστασιολόγηση του υδροστροβίλου Kaplan εγκατεστημένης ισχύος 4,5MW. Επίσης, για την άμεση απεικόνιση της συνολικής εγκατάστασης του φράγματος αλλά και των επιμέρους μελών δίνεται η κάτοψη της εγκατάστασης που ακολουθήθηκε και εφαρμόστηκε για την άντληση των παραπάνω πληροφορίων και αποτελεσμάτων.

13.1.1. Γενική Διάταξη Υδροηλεκτρικού Έργου



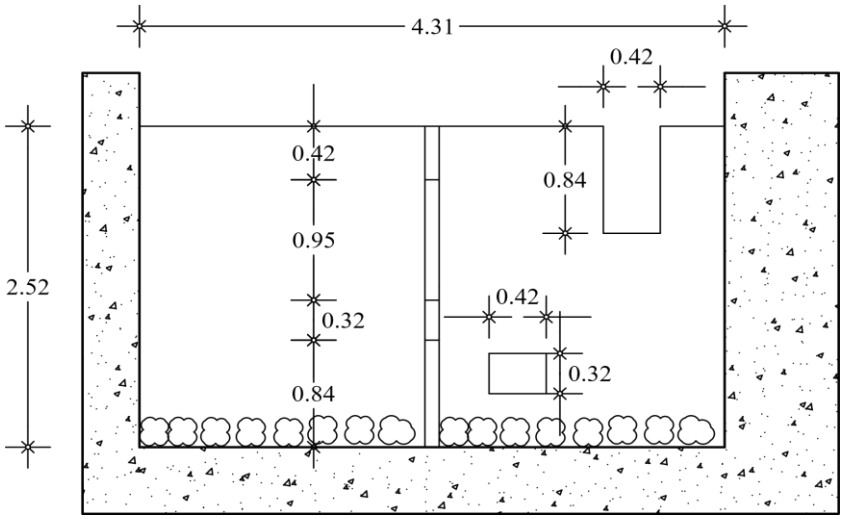
Σχέδιο 13.1 – Κάτοψη φράγματος, εξαμμωτή, αγωγού προσαγωγής και θέση μονάδας ελέγχου λειτουργίας φράγματος.

13.1.2. Μηκοτομή Φράγματος

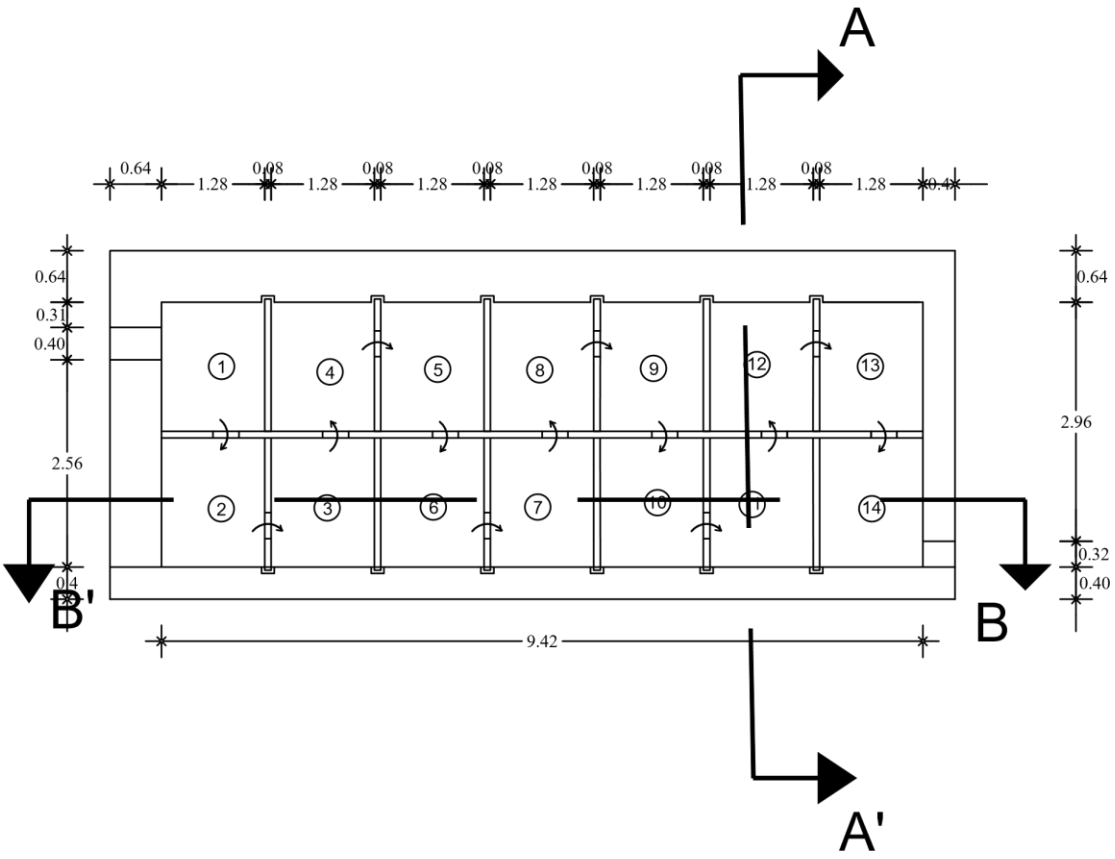


Σχέδιο 13.2 – Τομή φράγματος με απεικόνιση των διαστάσεων κάθε μέρους που το απαρτίζει καθώς και παρουσίαση του θυροφράγματος σε πλήρης ανοιχτή θέση.

13.1.3. Κάτοψη και τομή Ιχθυόδου

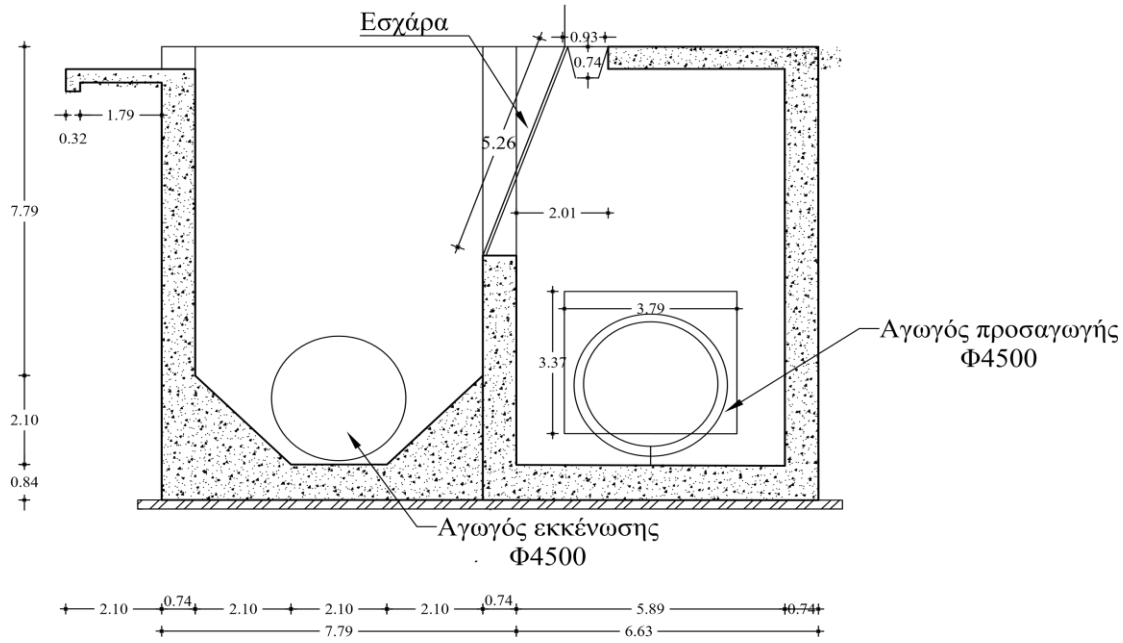


Σχέδιο 13.3 – Τομή ιχθυόδου με συνολική διαστασιολόγηση κάθε μέρους που την απαρτίζει.



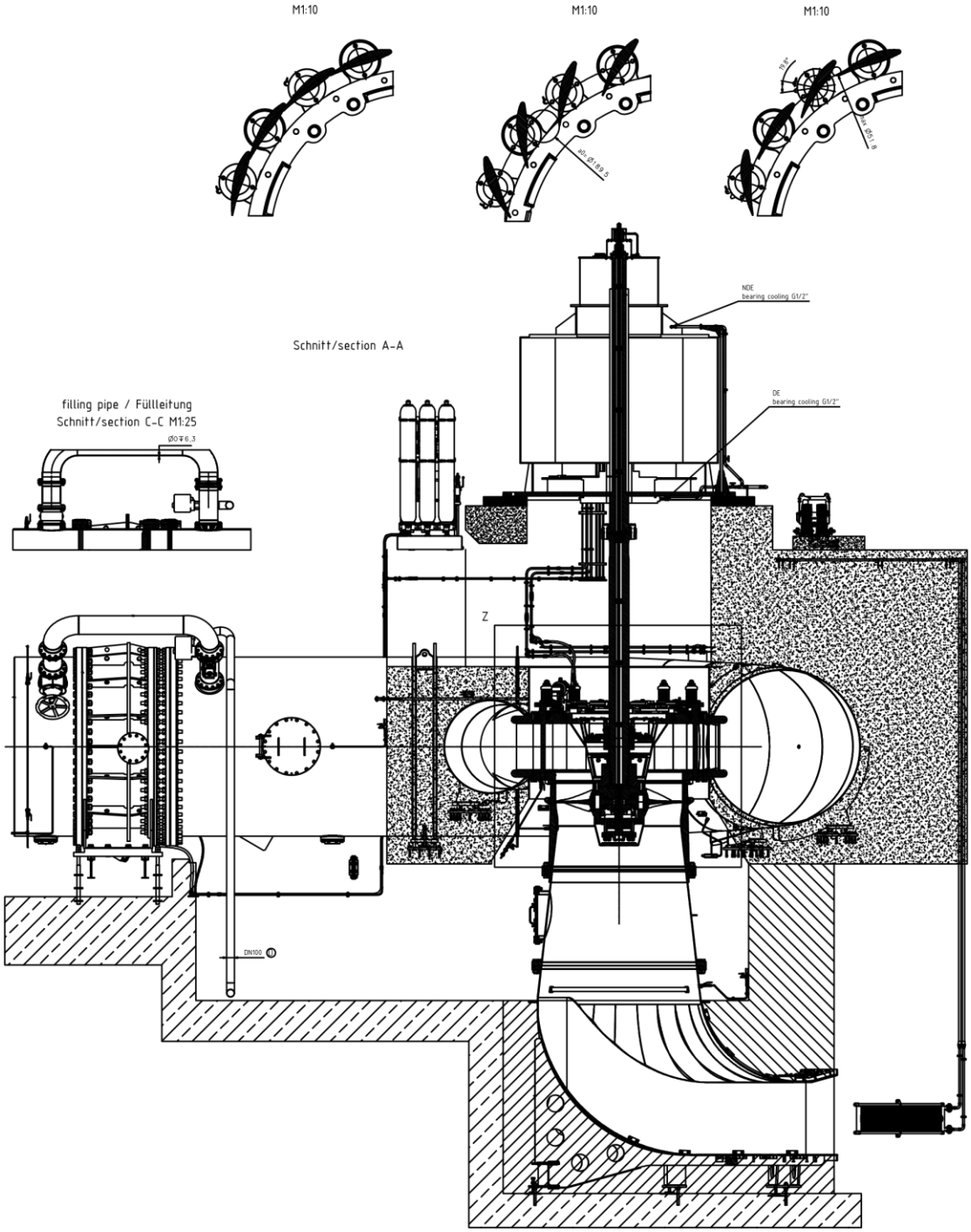
Σχέδιο 13.4 – Κάτοψη ιχθυόδου με απεικόνιση της ροής των υδάτων καθώς και την πορεία που καταγράφει από την είσοδο προς την έξοδο της ιχθυόσκαλας.

13.1.4. Τομή Εξαμμωτή-Αγωγού Προσαγωγής



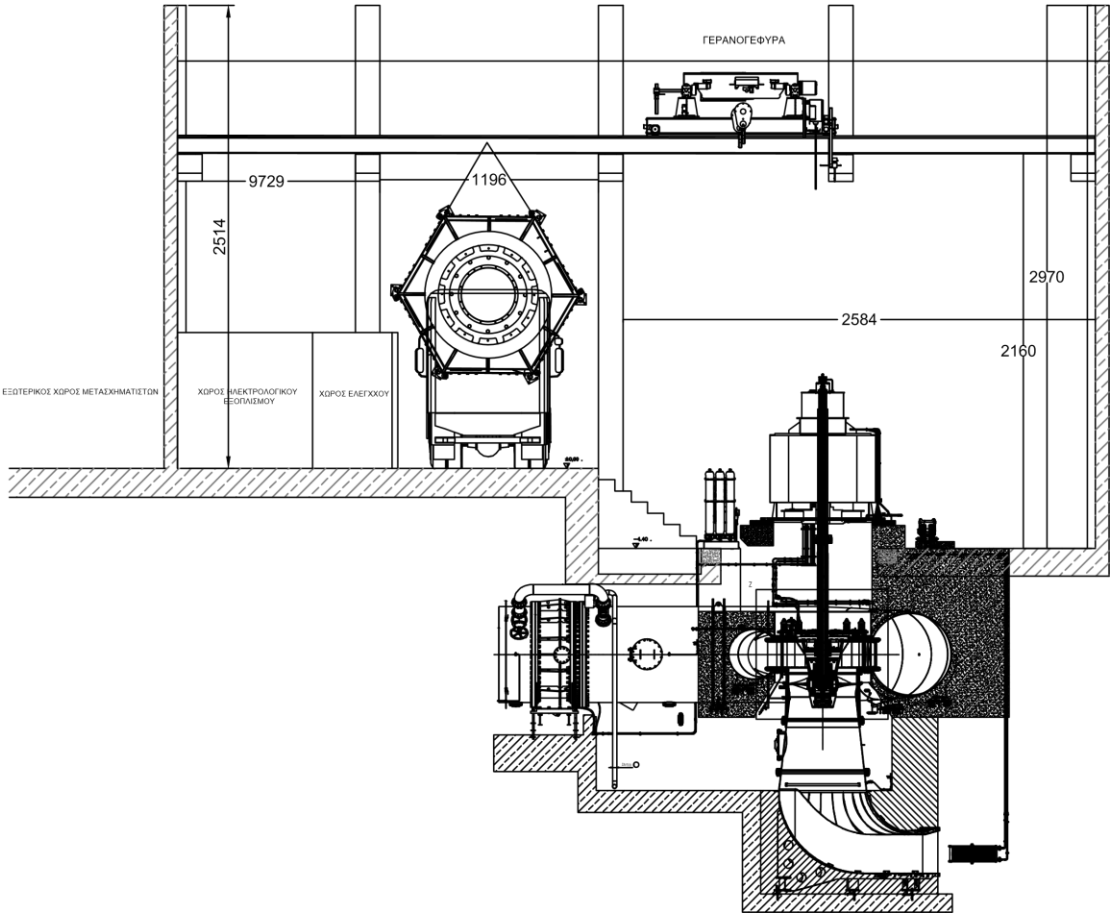
Σχέδιο 13.5 – Τομή εξαμμωτή (αριστερή πτέρυγα), τομή αγωγού προσαγωγής (δεξιά πτέρυγα) και διαστάσεις εσχαρών και αγωγών προσαγωγής και εκκένωσης.

13.1.5. Τομή Υδροστροβίλου Kaplan 4,5MW



Σχέδιο 13.6 – Τομή υδροστροβίλου Kaplan 4,5MW με πλήρης παρουσίαση της συνολικής εγκατάστασης με εμφανής λεπτομέρειες στους κινούμενους οδηγούς πτερύγια και στο bypass του αγωγού προσαγωγής καθώς και ανάδειξη της διώρυγας φυγής από την εταιρία Geppert Hydro.

13.1.6. Τομή Υδροηλεκτρικού Σταθμού



Σχέδιο 13.7 – Τομή υδροστροβίλου Kaplan 4,5MW από την εταιρία Geppert Hydro με εγκατάσταση στον χώρο του υδροηλεκτρικού σταθμού καθώς και παρουσίαση των χώρων ελέγχου, ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και των μετασχηματιστών.

14. Συμπεράσματα Εργασίας

14.1. Συνοπτική Παρουσίαση της Μελέτης

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η μεθοδολογία εγκατάστασης και μελέτης ενός υδροηλεκτρικού έργου, το οποίο εγκαταστάθηκε στον ποταμό Άραχθο με γνώμονα την πλήρης αξιοποίηση του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού καθώς και την δημιουργία ενός έργο σε περιοχή όπου δεν καταγράφεται υφιστάμενη υδροηλεκτρική εγκατάσταση (σύμφωνα με τα δεδομένα του ΡΑΑΕΥ).

Παράλληλα, μέσω της διαδικασίας που ακολουθήθηκε προέκυψαν αποτελέσματα τα οποία θεωρήθηκαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά για την πορεία της μελέτης, καθώς το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό είχε την ικανότητα να υποστηρίξει ένα έργο υψηλής ενεργειακής απόδοσης αλλά και η γεωγραφική θέση του έργου πρόσδιδε ένα χαμηλό κόστος εγκατάστασης λόγω της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των πλευρών της κοίτης του ποταμού.

Μέσω των προαναφερόμενων, παρουσιάστηκε το αποτέλεσμα της υδρολογικής, υδραυλικής και τεχνοοικονομικής ανάλυσης καθώς και τεχνικά σχέδια που απεικονίζουν την συνολική εγκατάσταση του υδροηλεκτρικού έργου, με αποτέλεσμα να αναδεικνύεται ο σκοπός της εργασίας όπου αναφέρεται στην βελτιστοποίηση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου.

14.2. Αποτελέσματα Σχεδιασμού υπό Μελέτη ΥΗΕ

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν κατά την αξιολόγηση των δεδομένων των ημερήσιων παροχών χρονικής διάρκειας δέκα ετών, είναι ότι η μέση ημερήσια παροχή ανέρχεται στα 51,72 m^3/s, καθώς και η οικολογική παροχή η οποία οφείλεται να προσφέρεται είναι ίση με 3,76 m^3/s. Η παροχή σχεδιασμού της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης είναι ίση με 46 m^3/s, παρέχοντας εγκατάσταση ενεργειακής απόδοσης περίπου 4,2MW με υδροστρόβιλο τύπου Kaplan εγκατεστημένης ισχύος 4,5MW.

Μέσω της υδραυλικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, προέκυψαν τα αποτελέσματα των γραμμικών και τοπικών απωλειών τα οποία είναι $h_f = 0{,}037$m και $h_D = 1{,}61m$ αντίστοιχα, ενώ το καθαρό ύψος πτώσης το οποίο προκύπτει είναι $\mathrm{h_n} = 9{,}35m$. Παράλληλα, για την μεταφορά των υδάτων προς τον στρόβιλο επιλέχθηκε, σύμφωνα με τα παραπάνω, ένας χαλύβδινος αγωγός προσαγωγής διαμέτρου D = 4,5m και πάχους e = 18mm, με σκοπό την βέλτιστη αντοχή και την αξιόπιστη χρήση που οφείλει να παρέχει για μια υδροηλεκτρική εγκατάσταση.

14.3. Αποτελέσματα Οικονομικών και Ενεργειακών Αναλύσεων

Μέσω της αναλυτικής κοστολόγησης του υπό μελέτη έργου και των διαφορετικών παραδοχών που εφαρμόστηκαν, το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 14.342.000€, με ετήσια παραγωγή ενέργειας 18,3GWh/ετησίως και περίοδο αποπληρωμής περίπου 11,8 χρόνια, με αποτέλεσμα το έργο να κρίνεται τόσο ενεργειακά αλλά και οικονομικά ικανοποιητικό. Τα διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος τα οποία επιλέχθηκαν, παρουσίασαν άλλοτε σφάλματα ή αδυναμίες ενώ μέσω της υδρολογικής ανάλυσης αποδείχθηκε πως το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό του ποταμού προσδίδει βέλτιστη ενεργειακή απόδοση σε χαμηλές τιμές. Η βέλτιστη επιλογή η οποία και επιλέχθηκε, είναι η εγκατεστημένη ισχύς 4,2MW καθώς η περίοδος αποπληρωμής των 11,8 χρόνων, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) 8% αλλά και η καθαρή παρούσα αξία που προκύπτει από την οικονομική ανάλυση υπερίσχυσε από κάθε άλλο σενάριο.

15. Βιβλιογραφία

1. Παπαντώνης, Δ.Ε., 2021. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. 3η έκδ. Αθήνα: Εκδόσεις Τσότρας.
2. Geppert – Empowering Everyone. Everywhere
3. ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ
4. Φράγματα - Riverview Project
5. Λούρος | energypress.gr
6. Υδροτρόβιλοι Pelton | CINK Hydro - Energy k.s.
7. CROSS FLOW TURBINES
8. Home - DLLP Power-Hydroelectric Equipment Solutions
9. Blogs | Power-MI