

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering

www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βέλτιστη διαμόρφωση μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Βασιλική - Ελευθερία Σαραντοπούλου, AM0054
Επιβλέπων: Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering

www.eee.uniwa.gr
250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

MSc Thesis

Optimal design of small hydro power plant



Student: Vasiliki - Eleftheria Sarantopoulou, AM0054
MSc Thesis Supervisor: George Tsekouras, Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2023

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Τσεκούρας Γ.	Μανουσάκης Ν.	Γαλατά Σ.
Επικ. Καθηγητής	Επικ. Καθηγητής	Επικ. Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Βασιλική – Ελευθερία Σαραντοπούλου του Κωνσταντίνου με αριθμό μητρώου MSCRES-0054 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Βασιλική – Ελευθερία Σαραντοπούλου



Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Βασιλική – Ελευθερία
Σαραντοπούλου),

Φεβρουάριος, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με πάροδο των ετών η ζήτηση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχώς αυξάνει. Αυτό, σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση, έχει οδηγήσει στην κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Συγκεκριμένα, τα υδροηλεκτρικά έργα που απασχολούν την παρούσα εργασία, βασίζονται στην εκμετάλλευση του υδροδυναμικού. Χωρίζονται σε μικρά και μεγάλα, ανάλογα με την ισχύ της εγκατάστασής τους και είναι δυνατό να σταθούν αυτόνομα ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή ως τμήμα ενός υβριδικού σταθμού, είτε ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ως μέσο αποθήκευσης με τη χρήση ταμιευτήρα. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε, η συνεισφορά των υδροηλεκτρικών έργων στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Για την έναρξη λειτουργίας ενός τέτοιου σταθμού είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν πολλές διαφορετικές μελέτες για το κάθε επιμέρους τμήμα που τον απαρτίζει, ξεχωριστά. Σε αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη εφαρμογής τόσο σε θεωρητικό, όσο και πρακτικό επίπεδο για τη βελτιστοποίηση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού κατά το ρου του ποταμού σε μία περιοχή όμοια με το Γοργούρι Τρικάλων. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η υδρολογική ανάλυση του υδατορεύματος, το οποίο πρόκειται να τον τροφοδοτήσει. Στη συνέχεια, αναλύθηκε η αρχή της αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας και η περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού. Ιδιαίτερα μεγάλη σημασία δόθηκε στη μελέτη του πολιτικού μηχανικού που αφορά σε όλα τα έργα που απαιτούνται, προκειμένου να ολοκληρωθεί με επιτυχία το υδροηλεκτρικό έργο. Ακόμα, η σωστή επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι πολύ σημαντική για τη βιωσιμότητα του σταθμού. Έτσι, εφαρμόστηκε αναλυτική τεχνοοικονομική μελέτη, υπολογίζοντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους που αναλύθηκαν εκτενώς στα παρακάτω θεωρητικά κεφάλαια και λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης. Αυτό που επιχειρήθηκε σε αυτήν την εργασία αρχικά, ήταν η εξαντλητική αναζήτηση του κατάλληλου σημείου υδροληψίας – απόληξης του αγωγού φυγής κατά την κοίτη του ποταμού και η βέλτιστη χάραξη του κλειστού αγωγού προσαγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς χαρακτηρισμούς των περιοχών και του κόστους τοποθέτησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εξαντλητική αναζήτηση για κάθε ζεύγος υδροληψίας – απόληξης αγωγού φυγής για την εύρεση του κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δηλαδή τη διατομή του αγωγού, την επιλογή του στροβίλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή, λαμβάνοντας υπόψη την υπό εξέταση ονομαστική παροχή και το δεδομένο μεικτό ύψος υδροληψίας – απόληξης, βελτιστοποιώντας τον σχεδιασμό του μικρού υδροηλεκτρικού με έναν υδροστρόβιλο. Τέλος, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η βέλτιστη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βελτιστοποιημένη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού με δύο στροβίλους, βέλτιστη σχεδίαση μικρού υδροηλεκτρικού, βέλτιστη χάραξη κλειστού αγωγού μικρού υδροηλεκτρικού, ενεργειακή αξιοποίηση, σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υδροηλεκτρικό έργο

ABSTRACT

Over the years, the demand for electricity production is constantly increasing. This, combined with environmental awareness, has led to the construction of renewable power plants. Specifically, the hydropower plants that concern this thesis are based on the exploitation of hydropower. They are divided into small and large, depending on the power of their installation and it is possible to stand alone as an autonomous power plant or as a part of a hybrid powerplant, either as a mean of power plant or as a mean of storage system, using a reservoir. Through the literature review, which carried out, the contribution of hydropower plants to the global energy balance is of great interest. In order to operate, it is necessary to study all individual sections that consist a hydropower plant, separately. In this thesis, the development of an application was carried out at both a theoretical and a practical level for the optimization of a small hydroelectric plant along the river in an area similar to Gorgogyri Trikala. In particular, the hydrological analysis of water stream, which is going to feed it, was presented. Then, the principle of harnessing hydraulic energy and the description of the main components of a small hydroelectric were analyzed. Particular importance was given to the civil engineering study that concerns all the works required in order to successfully complete the hydropower plant. Also, the correct selection of the appropriate electromechanical equipment is very important for the viability of the power plant. Thus, an analytical techno-economic study was applied, calculating all the necessary parameters that were extensively analyzed in the following theoretical chapters and taking into account the degree of energy utilization. In more detail, what was attempted in this thesis initially, was the exhaustive search for the appropriate point of water intake - end of the tailrace pipe along the riverbed and the optimal drawing of the penstock, taking into account the different characteristics of the areas and the installation costs. An exhaustive search was then carried out for each intake – tailrace pair to find the appropriate electromechanical equipment, i.e. penstock cross-section, turbine, generator and transformer selection, taking into account the rated flow under consideration and the given gross head of water intake – end, optimizing the design of a small hydro power plant with one hydro turbine. Finally, in this work the optimal operation of a small hydroelectric plant with two hydro turbines was examined.

KEYWORDS: energy exploitation, hydropower plant, optimal operation of small hydropower plant with two turbines, optimal design of small hydropower plant, optimal penstock design of small hydro power plant with respect to land topography, power station, renewable energy

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

- τον κύριο Γ. Τσεκούρα, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α., για την επίβλεψή του κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της παρούσας εργασίας, τη βοήθειά του στη διαμόρφωση των αλγορίθμων και κατά συγγραφή του επιστημονικού άρθρου.
- την κ. Μ. Ραγκούση, Καθηγήτρια του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α., μέλος και πρώην Διευθύντρια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» για την παρουσία της σε όλες τις παρουσιάσεις των τεχνικών αναφορών και τον πάντα υποστηρικτικό και ενθαρρυντικό της λόγο.
- τον κ. Ι. Ράμπια, συνταξιούχο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α., για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή κατά τις παρουσιάσεις των τεχνικών αναφορών και για τις επιτυχημένες παρατηρήσεις του.
- την κ. Σ. Γαλατά, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α., για τη συμμετοχή της στην τριμελή επιτροπή κατά τις παρουσιάσεις των τεχνικών αναφορών και τον θετικό λόγο σε όλη την προσπάθειά μου.
- τον κ. Ν. Μανουσάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΠΑ.Δ.Α., για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή, κατά την τελική παρουσίαση της μεταπτυχιακής μου εργασίας.
- την οικογένεια μου και ειδικότερα τον σύζυγο μου, για την στήριξη και την υπομονή του σε όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

	Σελ.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας & στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στα Υδροηλεκτρικά Έργα	35
1.1 Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	35
1.2 Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	37
1.2.1 Ηλιακή Ενέργεια	37
1.2.2 Αιολική Ενέργεια	37
1.2.3 Βιομάζα	38
1.2.4 Γεωθερμία	39
1.2.5 Υδατοπτώσεις	40
1.3 Το νερό: ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους	41
1.4 Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος	42
1.5 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου	43
1.6 Ροή ενέργειας	47
1.7 Διάκριση μικρών - μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	50
1.8 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στα μικρά υδροηλεκτρικά	52
1.9 Υδραυλική ενέργεια στον κόσμο και στην Ελλάδα	53
1.10 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των μικρών υδροηλεκτρικών	55
1.11 Ενεργειακή συνεισφορά μικρών υδροηλεκτρικών έργων	57
1.12 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	59
1.13 Συμπεράσματα	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Υδρολογική ανάλυση	72
2.1 Εισαγωγή	72
2.2 Υδρολογικός Κύκλος	77
2.3 Υδρολογικοί υπολογισμοί	80
2.3.1 Φαινόμενα που συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο	80
2.3.1.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	80
2.3.1.2 Εξάτμιση και διαπνοή	86
2.3.1.3 Κατακράτηση και διήθηση	88
2.3.2 Επιφανειακή απορροή	90
2.3.2.1 Μηχανισμοί επιφανειακής απορροής	90

2.3.2.2	Υδατογράφημα	94
2.3.2.3	Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής	95
2.3.2.4	Ενεργός βροχόπτωση και συντελεστής απορροής	97
2.3.2.5	Καμπύλη διάρκειας παροχής	98
2.3.2.6	Υδρολογικά μοντέλα επιφανειακής απορροής	101
2.3.3	Πλημμυρική παροχή	103
2.4	Μέτρηση Παροχής	107
2.4.1	Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων	108
2.4.2	Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων	110
2.4.3	Μέτρηση με σταθμημετρία	111
2.4.4	Μέτρηση με μετρητικό υπερχειλιστή	112
2.5	Συμπεράσματα	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διαμόρφωση μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού		116
3.1	Αρχή αξιοποίησης υδραυλικής ενέργειας	116
3.2	Περιγραφή κύριων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου	119
3.3	Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου	121
3.4	Ενεργειακή ανάλυση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου	124
3.5	Διαδικασία επιλογής και επιλογή βέλτιστης θέσης κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού έργου	126
3.5.1	Χαρτογράφηση	126
3.5.2	Γεωλογικές μελέτες	127
3.5.3	Εφαρμοσμένες μεθοδολογίες	128
3.5.4	Επιλογή της βέλτιστης θέσης	129
3.6	Γενικές παρατηρήσεις περί διαμόρφωσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού	131
3.7	Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Pelton ή Cross Flow	133
3.8	Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Francis	137
3.9	Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο αξονικής ροής	142
3.10	Συμπεράσματα	150
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Έργα πολιτικού μηχανικού		151
4.1	Φράγματα	151
4.1.1	Τύποι φραγμάτων	151
4.1.2	Φράγματα βαρύτητας	153
4.1.3	Τοξωτά φράγματα	157
4.1.4	Λοιποί τύποι φραγμάτων	158
4.1.5	Εκτροπή υδατορεύματος για την κατασκευή φράγματος	162
4.2	Ταμιευτήρες	164
4.2.1	Ταμιευτήρας	164
4.2.2	Απόθεση φερτών υλών	165
4.3	Υπερχειλιστές	166
4.3.1	Γενικά	166

4.3.2	Υπερχειλιστές καμπύλης στέψης	167
4.3.3	Ρυθμιζόμενοι υπερχειλιστές – εκχειλιστές	170
4.3.4	Λοιποί τύποι υπερχειλιστών – εκχειλιστών	172
4.4	Λεκάνη ηρεμίας	173
4.5	Έργα υδροληψίας	174
4.5.1	Γενικά	174
4.5.2	Βυθισμένη υδροληψία	175
4.5.3	Διώρυγες υδροληψίας	175
4.5.4	Ορεινή υδροληψία	178
4.5.5	Εξαμμωτής	179
4.6	Διώρυγα	182
4.6.1	Στοιχεία μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα	182
4.6.2	Κατασκευαστικά και σχεδιαστικά στοιχεία διώρυγας	185
4.7	Δεξαμενή φόρτισης	188
4.8	Αγωγός πτώσης	190
4.8.1	Υλικό του αγωγού προσαγωγής	190
4.8.2	Επιλογή της διαμέτρου του αγωγού προσαγωγής	192
4.8.3	Υπολογισμός πάχους σωλήνα	193
4.8.4	Δυνάμεις και στηρίγματα	194
4.8.5	Υδραυλικές απώλειες	197
4.8.6	Εξαρτήματα αγωγού προσαγωγής	200
4.8.7	Διάταξη αγωγού πτώσης	201
4.9	Αγωγός εξόδου	203
4.10	Όργανα διακοπής	203
4.11	Λοιπά στοιχεία	204
4.11.1	Ιχθυόσκαλα/Γέφυρα ανόδου ψαριών	204
4.11.2	Ιχθυόσκαλα /Γέφυρα καθόδου ψαριών	205
4.12	Συμπεράσματα	208
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Έργα μηχανολόγου μηχανικού	209
5.1	Αρχή λειτουργίας υδροστροβίλων	209
5.1.1	Ενεργειακός υπολογισμός	209
5.1.2	Εφαρμογή θεωρήματος της ροπής της ορμής	212
5.1.3	Συνιστώσες της ταχύτητας και τρίγωνο ταχυτήτων	217
5.1.4	Εφαρμογή του θεωρήματος της ροπής της ορμής σε μερικό δρομέα	219
5.1.5	Περιπτώσεις άεργης ισχύος	221
5.1.6	Διερεύνηση θεμελιώδους εξίσωσης στροβιλομηχανών	223
5.1.7	Διαμόρφωση υδροστροβίλων	224
5.2	Καμπύλες λειτουργίας και βαθμοί απόδοσης υδροστροβίλων	225
5.2.1	Θεωρητική χαρακτηριστική	225
5.2.2	Απώλειες και βαθμοί απόδοσης	226
5.2.3	Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλων	227
5.2.4	Νόμοι ομοιότητας και αναγωγής του βαθμού απόδοσης	229

5.2.5	Αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας υδροστροβίλων	231
5.2.6	Ειδικός αριθμός στροφών	232
5.2.7	Επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, του ειδικού αριθμού στροφών και της ταχύτητας περιστροφής	233
5.2.8	Λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές	241
5.3	Εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής μικρών υδροηλεκτρικών	242
5.4	Το πρόβλημα της σπηλαίωσης και η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου	243
5.5	Τυποποίηση μικρών υδροηλεκτρικών	247
5.5.1	Γενικά	247
5.5.2	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Francis	248
5.5.3	Τυποποιημένοι αξονικής ροής	251
5.5.4	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton	255
5.5.5	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Cross – Flow	257
5.5.6	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Turgo	259
5.5.7	Αντίστροφη λειτουργία φυγόκεντρων αντλιών	260
5.6	Κιβώτιο ταχυτήτων	261
5.7	Συμπεράσματα	262
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Έργα ηλεκτρολόγου μηχανικού	263
6.1	Βασική δομή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού	263
6.2	Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά γεννητριών	264
6.2.1	Εισαγωγή	264
6.2.2	Σύγχρονες γεννήτριες	266
6.2.3	Ασύγχρονες γεννήτριες	268
6.2.4	Σύγκριση γεννητριών	270
6.2.5	Τυποποίηση και διαστάσεις γεννητριών	271
6.3	Μετασχηματιστές ισχύος	272
6.4	Εσωτερικές καταναλώσεις & λοιπά βοηθητικά συστήματα	273
6.5	Διακοπτικό υλικό πινάκων	273
6.6	Συστήματα αυτόματου ελέγχου	273
6.7	Διασύνδεση Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ηλεκτρικής Ενέργειας με Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	274
6.7.1	Διασύνδεση Υδροηλεκτρικού σε δίκτυο	274
6.7.2	Αυτόνομη λειτουργία Υδροηλεκτρικού Σταθμού	276
6.8	Συμπεράσματα	277
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:Επίδραση των υδροηλεκτρικών σταθμών στο περιβάλλον	278
7.1	Εισαγωγή/Natura 2000	278
7.2	Καταγραφή περιβαλλοντικών επιπτώσεων	282
7.3	Επιπτώσεις ως προς το περιβάλλον	283
7.3.1	Στο φυσικό περιβάλλον	283

7.3.2	Στο κοινωνικό και πολιτιστικό περιβάλλον	286
7.4	Επιπτώσεις ως προς τη χρονική περίοδο	287
7.4.1	Κατά τη φάση της κατασκευής	287
7.4.2	Κατά τη φάση της λειτουργίας	288
7.5	Συμπεράσματα	290
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Οικονομοτεχνική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων		291
8.1	Εισαγωγή	291
8.2	Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης	292
8.3	Τεχνικές και κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας	298
8.4	Υπολογισμός συνιστωσών κόστους κατασκευής μικρών μονάδων	303
8.4.1	Εισαγωγή	303
8.4.2	Προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους	305
8.4.3	Συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους κάθε συνιστώσας του έργου	306
8.5	Εκτίμηση λειτουργικού κόστους	314
8.6	Οικονομικά κίνητρα και τιμολόγηση	315
8.7	Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων	315
8.8	Οικονομική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών έργων	316
8.9	Συμπεράσματα	318
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Βελτιστοποίηση μικρού υδροηλεκτρικού σε παρόμοια περιοχή με το Γοργογύρι Τρικάλων		319
9.1	Εισαγωγή	319
9.2	Αρχές Σχεδίασης & Προσομοίωση Υδροηλεκτρικού	322
9.2.1	Τοπογραφική χάραξη διαδρομής	322
9.2.2	Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για υδροστροβίλους σε μικρό υδροηλεκτρικό	328
9.2.3	Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για γεννήτριες σε μικρό υδροηλεκτρικό	335
9.2.4	Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για μετασχηματιστές σε μικρό υδροηλεκτρικό	336
9.2.5	Κύρια Μελέτη Εφαρμογής για μικρό υδροηλεκτρικό	338
9.3	Αποτελέσματα	343
9.4	Συμπεράσματα	352
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Βελτιστοποιημένη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με χρήση δύο υδροστροβίλων		353
10.1	Εισαγωγή	353
10.2	Μέθοδοι λειτουργίας υδροηλεκτρικής μονάδας δύο υδροστροβίλων	355
10.2.1	Ιεραρχική Μέθοδος	356
10.2.2	Συνεργατική Μέθοδος	357
10.2.3	Προτεινόμενη – Βελτιστοποιημένη μέθοδος	359
10.3	Βέλτιστη κατανομή παροχή σε δύο υδροστροβίλους προς	360

	μεγιστοποίηση παραγόμενης ισχύος	
10.4	Εφαρμογή μεθοδολογίας	363
10.4.1	Γενικά	363
10.4.2	Σενάριο “Α”	366
10.4.3	Σενάριο “Β”	368
10.4.4	Σενάριο “C”	369
10.4.5	Σύγκριση Σεναρίων	371
10.5	Συμπεράσματα	372
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: Συμπεράσματα - Προτάσεις	373
11.1	Συμπεράσματα	373
11.2	Προτάσεις	378
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΩΔΙΚΩΝ	379
Π.1.	Επέκταση τοπογραφικού διαγράμματος	379
Π.2.	Χάραξη βέλτιστης διαδρομής κλειστού αγωγού προσαγωγής υπό πίεση μεταξύ διαφορετικών σημείων υδροληψίας και επιστροφής αγωγού φυγής σε κοίτη ποταμού	389
Π.3.	Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου στροβίλων σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα	394
Π.4.	Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου γεννητριών σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα	399
Π.5.	Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου μετασχηματιστών σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα	403
Π.6.	Κύριος κώδικας βέλτιστης επιλογής ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ενός στροβίλου	404
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ	424

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

		Σελ.
1.1	Στοιχεία σημαντικότερων μικρών υδροηλεκτρικών στην Ελλάδα [E16, Πίνακας 8]	58
1.2	Διάκριση μικρών υδροηλεκτρικών βάσει της εγκατεστημένης ισχύος σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. [E12, Table 1]	63
1.3	Ισχύουσες άδειες Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων <15MW έως το 2016. [E16, Πίνακας 6]	64
1.4	Ημερήσια κόστη λειτουργία για τις τρεις ξεχωριστές περιπτώσεις [E40, Table 5]	69
2.1	Υδραυλικά έργα και η σημασία της υδρολογίας στη μελέτη των έργων κάθε κατηγορίας. [E12, Πιν. 1.3]	74
2.2	Υδροδυναμικό Ελλάδας ανά υδατικό διαμέρισμα [E3, Πίνακας 1.2]	76
2.3	Πίνακας σφαλμάτων στην εκτίμηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης σε συνάρτηση με το πλήθος ετών των μετρήσεων [E3, Πίνακας 2.1]	84
2.4	Διακύμανση φυτικού συντελεστή k_C για διάφορες δενδρώδεις καλλιέργειες [E3, Πίνακας 2.2]	87
2.5	Ενδεικτικές τιμές f_0 , f_c , K για διάφορους τύπους εδάφους και φυτοκάλυψης [E3, Πίνακας 2.3]	90
2.6	Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή απορροής ψ [E3, Πίνακας 2.4]	97
2.7	Πιθανότητες πλημμύρας (διακινδύνευσης) ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς του φαινομένου [E1, Table 3 – 4]	103
2.8	Παράμετροι Y_I και S_I διανομής Gumbel σε συνάρτηση με το πλήθος m της σειράς των ετήσιων πλημμυρικών παροχών. [E3, Πίνακας 2.5]	105
2.9	Διαλυτότητα και ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση δεικτών [E3, Πίνακας 2.6]	111
3.1	Ενδεικτικές διαστάσεις (σε m) ΥΗΣ με υδροστροβίλο Francis οριζοντίου άξονα (CKD, Τσεχία) [E3, Σχήμα 7.7]	137
4.1	Τιμές του συντελεστού n της εξίσωσης της Manning [E3, Πίνακας 4.3]	184
4.2	Διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης [E3, Πίνακας 4.4]	189
4.3	Συντελεστής απωλειών σε διακλάδωση κυκλική διατομής [E3, Πίνακας 4.13]	198
4.4	Απότομη διεύρυνση (πάνω) και κωνική (κάτω) [E3, Πίνακας 4.15]	200
5.1	Συγκεντρωτικός πίνακας διάκρισης υδροστροβίλων [E23]	225
5.2	Ενδεικτικές τιμές ps και του ολικού βαθμού απόδοσης για τους διάφορους τύπους των υδροστροβίλων [E8, Πίνακας 7.1]	235
5.3	Συσχετίσεις ps και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H για τους διάφορους τύπους των υδροστροβίλων [E3, Πίνακας 5.1]	236
5.4	Εύρος λειτουργιών και περιοχή για διάφορους τύπους υδροστροβίλων [E3, Πίνακας 5.1]	239

5.5	Συσχετίσεις μικρών υδροστροβίλων για εύρεση της ταχύτητας περιστροφής και της διαμέτρου του δρομέα. [E3]	243
6.1	Σύγκριση σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών [E3, Πίνακας 6.7]	270
6.2	Συνιστώμενες τιμές τάσης σύγχρονης γεννήτριας σε συνάρτηση της φαινόμενης ισχύς. [E3, Πίνακας 6.8]	272
6.3	Προστασίες σύνδεσης στο δίκτυο [E3, Πίνακας 6.11]	274
7.1	Επιπτώσεις κατά τη φάση κατασκευής [Ξ1, Table 7.1]	282
7.2	Επιπτώσεις κατά τη φάση λειτουργίας [Ξ1, Table 7.2]	283
7.3	Επιπτώσεις στο φυσικό, πολιτιστικό και κοινωνικό περιβάλλον [E3]	283
8.1	Συσχέτιση κεφαλαίου και επιτοκίου	293
8.2	Ποσοστιαία συμμετοχή των συνιστωσών κόστους κατασκευής ΥΗΕ [E21, Πίνακας 9.3]	304
8.3	Ειδικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε € (τιμές 2012) [E21, Πίνακας 9.3]	305
8.4	Τιμές των συντελεστών και εκθετών a, n, m, b, k για τρεις τύπους υδροστροβίλων. [E3]	310
8.5	Τιμές συντελεστών a ₁ , b ₁ , a ₂ , b ₂ , c ₂ . [E3]	313
8.6	Συμμετοχή % κάθε συνιστώσας μελετών και επίβλεψης στο συνολικό κόστος του έργου [E3, Πίνακας 9.6]	314
8.7	Συγκριτικά οικονομοτεχνικά στοιχεία μικρών υδροηλεκτρικών έργων. [E3, Πίνακας 9.7]	316
8.8	Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών πώλησης ενέργειας από ΑΠΕ (2016) [E22]	317
9.1	Συντελεστής βάρους ανά εξεταζόμενη περιοχή	324
9.2	Δεδομένα (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3) για ανάλυση υδροστροβίλων.	328
9.3	Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης του υδροστροβίλου και του κόστους εγκατάστασης.	329
9.4	Δεδομένα προγραμματισμού (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4) για ανάλυση γεννητριών	335
9.5	Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης της γεννήτριας και του κόστους εγκατάστασης.	336
9.6	Δεδομένα προγραμματισμού (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5) για ανάλυση μετασχηματιστών	337
9.7	Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης του μετασχηματιστή και του κόστους εγκατάστασης.	338
9.8	Συνολικές μέσες μηνιαίες παροχές του Κεφαλοποτάμου 2000 – 2015 [E16, Πίνακας 12]	339
9.9	Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές του Κεφαλοποτάμου 2000 – 2015 [E16, Πίνακας 13]	340
9.10	Χαρακτηριστικά Βέλτιστου υδροστροβίλου	350
9.11	Χαρακτηριστικά Βέλτιστης γεννήτριας	351
9.12	Χαρακτηριστικά Βέλτιστου μετασχηματιστή	351

9.13	Χαρακτηριστικά Βέλτιστης λύσης	351
10.1	Βασικά σενάρια διαμόρφωσης υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους	365
10.2	Μέση διαφορά παραγόμενης ισχύος σεναρίων «Α», «Β», «C», κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης μεθόδου με ιεραρχική και προτεινόμενης μεθόδου με συνεργατική	371

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Α/Α	Τίτλος	Σελ.
1.1	Σχηματική διάταξη ηλεκτρικού δικτύου. [E1, Σχήμα 1.1]	36
1.2	Υδρολογικός κύκλος [I11]	40
1.3	Τυπική διάταξη υδροηλεκτρικού έργου [E8, Σχήμα 5.1]	45
1.4	Διάταξη ΥΗΕ κατά το ρου του ποταμού μικρής υδραυλικής πτώσης με κάτοψη της γενικής διάταξης στα αριστερά και τομή ΥΗΣ με υδροστροβίλο τύπου Kaplan στα δεξιά. [E8, Σχήμα 5.3]	45
1.5	Τομή ΥΗΣ με υδροστροβίλους τύπου Pelton, [E8, Σχήμα 5.6]	46
1.6	Διάταξη υδροστροβίλου Francis α) οριζόντιου, β) κατακόρυφου άξονα, [E3, Σχήμα 5.31]	46
1.7	Τομή ΥΗΕ και ΥΗΣ μέσης υδραυλικής πτώσης (H=62mΣΥ, N=185N) [E8, Σχήμα 5.5]	47
1.8	Διάταξη υδροηλεκτρικής εγκατάστασης υδροστροβίλου αντιδράσεως (α) και δράσεως (β) [E8, Σχήμα 5.7]	48
1.9	Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά (αριστερά) και Παγκόσμιο υδροδυναμικό (δεξιά) [I11]	54
1.10	Υδροδυναμικές θέσεις Ελλάδας [E2, Σχήμα, 3.2]	54
1.11	Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας για διάφορα μικρά υδροηλεκτρικά [Στοιχεία από E16, Πίνακας 8]	55
1.12	Κατανομή ηλεκτρικής ενέργεια στην Ελλάδα το 2017 [E17]	57
1.13	Σύγκριση ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα από συμβατικούς σταθμούς, και σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταξύ 10ετίας. (2010 [α] 2018 [β]) [Ξ27, pp. 10]	60
1.14	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στο διασυνδεδεμένο Σύστημα – Μείγμα Καυσίμου στην Ελλάδα την περίοδο 2004 – 2016 με στοιχεία από ΑΔΜΗΕ [E11, Εικόνα 2].	61
1.15	Παραγωγή Υδροηλεκτρικών, Ανανεώσιμων Πηγών και Αυτοπαραγωγής στο διασυνδεδεμένο Σύστημα – Μείγμα Καυσίμου κατά την περίοδο 2004 – 2016 με στοιχεία από ΑΔΜΗΕ – ΛΑΓΗΕ [E11, Εικόνα 3]	61
1.16	Εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά στην Ευρώπη [Ξ60, Figure 53]	63
1.17	Εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά & θεωρητικό υδροδυναμικό στην Ελλάδα [Ξ61, Figure 2]	64
1.18	Κατανομή Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων <15MW ανά εγκατεστημένη ισχύ [E16, Σχήμα 3]	65
1.19	Ευρωπαϊκός χάρτης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και πλήθος εγκατεστημένων μονάδων [Ξ12, Fig. 1]	66

1.20	Τα αποτελέσματα ανάλυσης για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις στροβίλων στα 3,5 μέτρα ύψος για 6 διαφορετικά κριτήρια. 1.Πυκνότητα ισχύος, 2. Ονομαστική απόδοση ροής (rated flow efficiency), 3.Μερική απόδοση ροής (part flow efficiency),4. Έργα πολιτικού μηχανικού (Civil Works), 5. Δυνατότητα συντήρησης, 6. Scope for modularity, 'DT' = Draft Tube. [E34, Fig.9]	67
1.21	Κατανομή των κοστών για διαφορετικά ύψη. [E35, Fig. 7]	68
1.22	Συνολική παραγόμενη ισχύς από θερμό – υδροηλεκτρικές μονάδες για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. [E40, Figure 7]	69
2.1	Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικής επιστήμης και τεχνικής υδρολογίας στο πλαίσιο των επιστημών μηχανικού και γεωεπιστημών και η σχέση τους με τη διαχείριση υδροσυστημάτων και της τεχνολογίας. [E12, Σχ. 1.1]	73
2.2	Λεκάνη Απορροής ή Υδρολογική λεκάνη [E12, Σχήμα 3.9]	75
2.3	Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας [E13, Σχήμα 2-1]	76
2.4	Ο υδρολογικός κύκλος με τις μέσες διακινήσεις του νερού που έχουν εκφραστεί ως ποσοστό επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γής. [E12, Σχ. 1.3]	78
2.5	Σκαρίφημα μεταγωγικού μηχανισμού κατακρημνισμάτων [E12, Σχ. 2.2]	81
2.6	Σκαρίφημα ορογραφικής επίδρασης στην ανύψωση του αέρα[E12, Σχ. 2.5]	82
2.7	α)Τυπικά βροχόμετρα β) Τυπικός βροχογράφος. [E3, Σχ. 2.3]	83
2.8	Διαχωρισμός λεκάνης απορροής με πολύγωνα Thiessen [E12, Σχ. 2.9]	84
2.9	Παράδειγμα μέσω ετήσιων ισοϋέτιων καμπυλών. [E12, Σχ. 2.10]	86
2.10	Χρονική μεταβολή της έντασης διήθησης [E3, Σχ. 2.6]	90
2.11	Σχηματικό διάγραμμα διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής απορροής [E12, Σχ. 5.1]	91
2.12	Σχηματικό διάγραμμα κίνησης νερού κατά Horton [E12, Σχ. 5.2]	92
2.13	Σχηματικό διάγραμμα κίνησης νερού κατά Hewlett (α) αρχικό στάδιο, (β)προχωρημένο στάδιο [E12, Σχ. 5.3]	93
2.14	Σχηματική παράσταση τυπικού υδατογραφήματος και του αντίστοιχου νετογραφήματος [E3, Σχήμα 2.7]	94
2.15	Παράδειγμα χάραξη υδατοκρίτη λεκάνης απορροής [E12, Σχ. 5.6]	96
2.16	Επίδραση της μορφής της λεκάνης απορροής στο υδατόρευμα. α) Συμπαγής λεκάνη, β) Επιμήκης λεκάνη [E3, Σχήμα 2.8]	97
2.17	Ενδεικτική ετήσια καμπύλη διάρκειας παροχής [E3, Σχήμα 2.9]	99
2.18	Τυποποιημένες αδιαστατοποιημένες καμπύλες διάρκειας παροχής με τη βοήθεια της παραμέτρου BFI της βασικής απορροής προς τη συνολική επιφανειακή απορροή. [E3, Σχήμα 2.10]	100

2.19	Σχηματική παράσταση υδρολογικού μοντέλου [E3, Σχήμα 2.11]	101
2.20	Υδρολογικό μοντέλο Thornthwaite [E3, Σχήμα 2.12]	102
2.21	Γραφική απεικόνιση της σχέσης των χαρακτηριστικών μεγεθών υδρολογίας εκφράζοντας την εξίσωση 2.22 [E15, Σχ. 4.3]	104
2.22	Τυπική μορφή όμβριων καμπύλων διάρκειας έντασης σε λογαριθμικές κλίμακες (αριστερά) και γραμμικές κλίμακες (δεξιά) [E3, Σχήμα 2.14]	107
2.23	Τυπικός μετρητικός μυλίσκος [I9]	108
2.24	Τυπική κατανομή ταχυτήτων σε μία κατακόρυφη διατομή υδατορεύματος. [E12, Σχ. 5.10]	109
2.25	Σκαρίφημα για την εκτέλεση της μέτρησης από τον υπολογισμό της παροχής. [E12, Σχ. 5.11]	110
2.26	Καμπύλη στάθμης – παροχής [E3, Σχ. 2.16]	112
2.27	Διάταξη μετρητικού υπερχειλιστή (α), Ορθογωνικός υπερχειλιστής (β), τριγωνικός υπερχειλιστής (γ) [E3, Σχ. 2.19]	114
3.1	Αρχή διαμόρφωσης μικρού ΥΗΕ με διώρυγα (ανοικτός αγωγός), δεξαμενή φόρτισης και αγωγό πτώσεως (κλειστός αγωγός προσαγωγής). [E3, Σχήμα 3.2]	118
3.2	Αρχή διαμόρφωσης μικρού ΥΗΕ με κλειστό αγωγό προσαγωγής. [E3, Σχήμα 3.3]	118
3.3	Τυπική διάταξη μικρού ΥΗΕ ροής με χαμηλή υδραυλική πτώση και ενσωματωμένο σταθμό στο φράγμα εκχειλιστή. [E3, Σχήμα 3.4]	119
3.4	Διαθέσιμη υδραυλική πτώση συναρτήσει της παροχής. [E3, Σχήμα 3.6α]	122
3.5	Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου. [E3, Σχήμα 3.6β]	123
3.6	Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου για συγκεκριμένη υδραυλική πτώση h. [E3, Σχήμα 3.6γ]	123
3.7	α) Καμπύλη διάρκειας της παροχής β) Καμπύλη διάρκειας της ισχύος για την εγκατάσταση της υδροστροβίλου. [E3, Σχήμα 3.7]	129
3.8	Μηκοτομή, επιφάνεια λεκάνης απορροής, ετήσια επιφανειακή απορροή και ετησία υδραυλική ενέργεια κατά μήκος υδατορεύματος. [E3, Σχήμα 3.9]	130
3.9	α) Διαμόρφωση ΥΗΣ και περιβάλλοντος χώρου, β) Τομή του ΥΗΣ [E3, Σχήμα 7.1]	132
3.10	Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton 2 ακροφυσίων, οριζοντίου άξονα και ονομαστικό σημείο λειτουργίας: P = 1380 kW, H = 330 mΣΥ, Q = 0,835 m ³ /sec, n = 1000 RPM. [E3, Σχήμα 7.2]	134
3.11	Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton 1 ακροφυσίου, οριζοντίου άξονα και ονομαστικό σημείο λειτουργίας: P = 456 kW, H = 300 mΣΥ, Q = 0,18 m ³ /sec, n = 1020 RPM. [E3, Σχήμα 7.3]	135

3.12	Υδροστρόβιλος Pelton οριζοντίου άξονα με 2 ακροφύσια [E1, Figure 6.5]	135
3.13	Pelton κατακόρυφου άξονα με 2 ακροφύσια, [E1, Figure 6.6]	136
3.14	Υδροστρόβιλος Cross Flow [E1, Figure 6.8]	136
3.15	Διάταξη με υδροστρόβιλο Francis, οριζοντίου άξονα (CKD, Τσεχία) [E3, Σχήμα 7.7]	137
3.16	ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα με ονομαστική λειτουργία $P = 740 \text{ kW}$, $H = 30 \text{ m}\Sigma\Upsilon$, $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 500 \text{ RPM}$. [E3, Σχήμα 7.8]	138
3.17	ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα [E3, Σχήμα 7.9]	139
3.18	ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα, ανοιχτού θαλάμου με ονομαστικό σημείο λειτουργίας $P = 14\text{kW}$, $H = 3,5 \text{ m}\Sigma\Upsilon$, $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ [E3, Σχήμα 7.10]	139
3.19	ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 2 υδροστρόβιλους Francis κατακόρυφου άξονα με ονομαστικό σημείο λειτουργίας $P = 1284\text{kW}$, $H = 97,9 \text{ m}\Sigma\Upsilon$, $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $n=1000\text{RPM}$, κατασκευής Koessler [E3, Σχήμα 7.11]	141
3.20	ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με υδροστρόβιλο Francis κατακόρυφου άξονα τύπου ανοιχτού θαλάμου [E3, Σχήμα 7.13]	141
3.21	Τομή ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis κατακόρυφου άξονα με ονομαστική ισχύ $P = 1250 \text{ kW}$. [E3, Σχήμα 7.12]	142
3.22	Σύγκριση ΥΗΣ εξοπλισμού με το ίδιο σημείο λειτουργίας για υδροστρόβιλο α)σωληνωτό, β)βολβοειδή, γ) δακτυλίου. [E3, Σχήμα 7.15]	143
3.23	Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Kaplan, κατακόρυφου άξονα. [E1, Figure 6.12]	144
3.24	Τομή και κάτοψη ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής τύπου έλικας, κατασκευής Sorumsand. [E3, Σχήμα 7.18]	144
3.25	Τομή ΥΗΣ μικρής υδραυλικής πτώσης με σωληνωτό υδροστρόβιλο αξονική ροής τύπου S – κατάντη. Ονομαστικό σημείο λειτουργίας υδροστροβίλου $P = 1068 \text{ kW}$, $H = 8,3 \text{ m}\Sigma\Upsilon$, $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ [E3, Σχήμα 7.19]	145
3.26	Τομή ΥΗΣ σχετικά μεγάλης υδραυλικής πτώσης με σωληνωτό υδροστρόβιλο αξονική ροής τύπου S – κατάντη, ονομαστικής ισχύς $P = 1173 \text{ kW}$, $H = 20,0 \text{ m}$, $H = 20 \text{ m}\Sigma\Upsilon$, $Q = 6,8 \text{ m}^3/\text{s}$, κατασκευής Koessler. [E3, Σχήμα 7.21]	146
3.27	Φάσεις κατασκευής ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστρόβιλο τύπου S – ανάντη. [E3, Σχήμα 7.25]	146
3.28	Τομή ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστρόβιλο S ανάντη εγκατεστημένο σε διάταξη σίφωνα [E3, Σχήμα 7.25]	147
3.29	Ισομετρικός ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής με γωνιακή μετάδοση κατασκευής Sulzer [E3, Σχήμα 7.29]	148

3.30	Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής με γωνιακή μετάδοση ονομαστική ισχύος 472 kW, H = 4,15 mΣΥ και Q = 13, 5 m ³ /s, κατασκευής Koessler. [E3, Σχήμα 7.29]	148
3.31	Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο δακτυλίου και μετάδοση με ιμάντα. [E3, Σχήμα 7.32]	149
3.32	(Πάνω) Κάτοψη ΥΕΗ ροής με τρεις βολβοειδείς υδροστροβίλους, (Κάτω) Τομή του ΥΗΣ με βολδοειδή υδροστρόβιλο. [E3, Σχήμα 7.34]	149
3.33	Τομή ΥΗΣ εξοπλισμένου με κλασσικό βολβοειδή υδροστρόβιλο. [E3, Σχήμα 7.35]	150
4.1	α)Χωμάτινο φράγμα βαρύτητας, β) Φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα, γ)Τοξωτό φράγμα, δ) Αντηριδωτό φράγμα. [E3, Σχήμα 4.1]	152
4.2	Φράγμα βαρύτητας και φράγμα στήριξης [E1, Σχήμα 5.1]	153
4.3	Τυπική διατομή χωμάτινου φράγματος [E3, Σχήμα 4.2]	154
4.4	α)Τυπική διατομή φράγματος λιθοριπτής, β)Λεπτομέρεια αγκύρωσης του πόδα του φράγματος, γ) Διαμόρφωση αδιαπέραστων αρμών μεταξύ των πλακών σκυροδέματος. [E3, Σχήμα 4.4]	155
4.5	α)Τυπική τομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα και αναπτυσσόμενες δυνάμεις. β) Μείωση της άνωσης με τη διαμόρφωση αδιαπέραστης ζώνης στη θεμελίωση του φράγματος. [E3, Σχήμα 4.5]	156
4.6	α)Τυπική διατομή αντηριδωτού φράγματος, β)Κυκλική διαμόρφωση της κεφαλής, γ)Διαδοχικά τοξωτά κελύφη. [E3, Σχήμα 4.7]	157
4.7	α)Τυπική κάτοψη τοξωτού φράγματος, β)Ανάλυση τοξωτού φράγματος σε στοιχειώδη τόξα. [E3, Σχήμα 4.8]	157
4.8	Τοξωτό φράγμα. [E1, Σχήμα 5.2]	158
4.9	Φράγμα από διαμορφωμένα χαλυβοελάσματα. [E3, Σχήμα 4.9]	159
4.10	Φράγμα από οριζόντιες δοκούς έμφραξης. β) Φράγμα από εγκιβωτισμένα χαλίκια [E3, Σχήμα 4.10]	159
4.11	Τοξωτό φράγμα - υδροηλεκτρικό Ταυρωπού [E7, Σχήμα 4.20]	160
4.12	Μηκοτομή αγωγού υδροληψίας - Υδροηλεκτρικό Κρεμαστών (Αχελώου) – Διαμήκης τομή σήραγγας προσαγωγής [E7, Σχήμα 4.22]	161
4.13	Χωμάτινο φράγμα - υδροηλεκτρικό έργο Καστρακίου (Αχελώου) [E7, Σχήμα 4.23]	162
4.14	Εκτροπή του υδατορεύματος με χρήση πρόχειρων φραγμάτων [E3, Σχήμα 4.11]	163
4.15	Εκτροπή του υδατορεύματος μέσω σήραγγας [E3, Σχήμα 4.12]	163
4.16	Αστοχία μικρού φράγματος και πλημμύρα κατάντη. [E1, Photo 5.3]	164
4.17	α)Ενδεικτική μορφή καμπύλης στάθμης – επιφάνειας ταμιευτήρα, β) Μέγιστη και ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα και ωφέλιμη	165

	χωρητικότητα [E3, Σχήμα 4.13]	
4.18	Κατακάθιση φερτών υλικών στον πυθμένα του ταμιευτήρα. [E3, Σχήμα 4.14]	166
4.19	Μετρητικός υπερχειλιστής λεπτού τοιχώματος. [E3, Σχήμα 4.15α]	168
4.20	Σχηματισμός δέσμης νερού κατάντη του υπερχειλιστή. [E3, Σχήμα 4.15β]	169
4.21	Συντελεστής παροχής CD υπερχειλιστή καμπύλης στέψης με κατακόρυφη ανάντη παρειά. [E3, Σχήμα 4.16]	169
4.22	Εκχειλιστής με επίπεδο συρόμενο θυρόφραγμα ή με δοκούς έμφραξης [E3, Σχήμα 4.18]	170
4.23	Λεπτομέρεια προσαγωγής εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης [E3, Σχήμα 4.22]	171
4.24	Πλευρικός υπερχειλιστής [E1, Photo 5.16]	172
4.25	Λεπτομέρεια προσαγωγής εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης [E1, Figure 5.12]	172
4.26	α) Ανεπιθύμητη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος, β) Ελεγχόμενη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος [E3, Σχήμα 4.26]	173
4.27	Σχηματισμό υδραυλικού άλματος [E3, Σχήμα 4.27]	174
4.28	Διάταξη βυθισμένης υδροληψίας [E3, Σχήμα 4.29]	175
4.29	Διαμόρφωση (α)καμπύλη, (β)ευθύγραμμο τμήμα [E3, Σχήμα 4.30]	176
4.30	Συντελεστής μορφής β της εσχάρας καθαρισμού [E3, Πίνακας 4.1]	177
4.31	Διώρυγα υδροληψίας με ανάβαθμο σε διαμόρφωση προβόλου [E3, Σχήμα 4.34]	178
4.32	Τομή ορεινής υδροληψίας [E3, Σχήμα 4.37]	179
4.33	Ορεινή υδροληψία με εσχάρα [E1, Photo 5.8]	179
4.34	Συγκέντρωση υλικών και αρχή λειτουργίας εξαμμωτή [E3, Σχήμα 4.43α]	180
4.35	Αρχή υπολογισμού μήκους δεξαμενής εξάμμωσης [E3, Σχήμα 4.43β]	181
4.36	Εξαμμωτής μικρού υδροηλεκτρικού Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας, Ισχύς 1,95 MW, 2003 [I12]	182
4.37	Ομοιόμορφη ροή σε διώρυγα [E3, Σχήμα 4.46]	182
4.38	Διάφορες συνήθειες διατομές διώρυγας [E3, Σχήμα 4.47]	184
4.39	Συζυγείς καταστάσεις ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα [E3, Σχήμα 4.48α]	185
4.40	Σχηματική διάταξη μικρού ΥΗΕ με διώρυγα προσαγωγής και δεξαμενή φόρτισης [E3, Σχήμα 4.49]	186
4.41	Τμήμα προσαρμογής κατά την αλλαγή διατομής διώρυγας [E3, Σχήμα 4.50α]	187
4.42	Διώρυγα και παγίδα φερτών υλικών μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας, Ισχύος 1,95 MW, 2003 [I12]	187

4.43	Υπερπήδηση χαράδρας με κλειστό αγωγό πάνω σε χαλύβδινο φάτνωμα και με αντίστροφο σίφωνα. [E3, Σχήμα 4.51]	188
4.44	Σχηματική διαμόρφωση δεξαμενής φόρτισης μικρού ΥΗΕ. [E3, Σχήμα 4.52]	189
4.45	Δεξαμενή φόρτισης μικρού ΥΗΕ Κρύας Βρύσης, Δήμος Υπάτη, Φθιώτιδας, Ισχύς 0,735 MW, 2006. [I12]	189
4.46	Επιλογή της οικονομοτεχνικά βέλτιστης διαμέτρου. [E3, Σχήμα 4.54]	192
4.47	Μηκοτομή αγωγού προσαγωγή ΥΗΕ, πιεζομετρική και στατική πίεση κατά μήκος του αγωγού προσαγωγής. [E3, Σχήμα 4.55α]	193
4.48	Αγωγός μη ομοιόμορφου πάχους (αριστερά) και μη ομοιόμορφης διαμέτρου και πάχους δεξιά. [E3, Σχήμα 4.55β & 4.55γ]	194
4.49	Συνισταμένη δύναμη F_p , λόγω εσωτερικής πίεσης. [E3, Σχήμα 4.56β]	195
4.50	Δυνάμεις σε αλλαγή διεύθυνσης λόγω της εσωτερικής πίεσης και της αλλαγής της ορμής του ρευστού. [E3, Σχήμα 4.56α]	196
4.51	Υπέργειος χαλύβδινος αγωγός – διάταξη αγκυρώσεων και στηριγμάτων. [E3, Σχήμα 4.56γ]	196
4.52	Συντελεστής αντίστασης για αλλαγή κλίσης χωρίς καμπυλότητα [E3, Σχήμα 4.57]	199
4.53	Διαμορφώσεις και απώλειες σε συστολές. [E3, Σχήμα 4.59]	199
4.54	Απότομη διεύρυνση της ροής. [E3, Σχήμα 4.60]	199
4.55	α) Σύνδεση σωλήνων χυτοσιδήρου (αρσενικό – θηλυκό), β) Σύνδεση με χιτώνιο για σωλήνες GRP, γ) Σύνδεση με ελεύθερη φλάντζα για σωλήνες GRP [E3, Σχήμα 4.62]	201
4.56	Υπόγειος αγωγός μικρού υδροηλεκτρικού Κρύας Βρύσης, Φθιώτιδα με ισχύ 0,735 MW, 2006. [I13]	202
4.57	Υπέργειος αγωγός μικρού υδροηλεκτρικού Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας με ισχύ 1,95 MW, 2003. [I13]	202
4.58	Θυρόφραγμα & Βάνα σε σχήμα πεταλούδας. [E1, Figure 5.25 & Photo 5.13]	204
4.59	Σχήμα από ορθογωνικά weirs [E1, Figure 7.6]	205
4.60	Πέρασμα ψαριών [E1, Figure 7.13]	206
4.61	Διάταξη Coanda [E1, Figure 7.12]	207
4.62	Εφαρμογή διάταξης Coanda [E1, Photo 7.17]	207
5.1	Ενεργειακός ισολογισμός στροβιλομηχανής [E8, Σχήμα 1.2]	209
5.2	Ροπή διανύσματος ως προς τον άξονα [E8, Σχήμα 1.4]	213
5.3	Διατύπωση θεωρήματος της ροπής της ορμής ως προς τον άξονα [E8, Σχήμα 1.5]	213
5.4	Συνιστώσες του διανύσματος και τρίγωνο τα ταχυτήτων [E8, Σχήμα 1.5]	218
5.5	Μεσημβρινή τομή πτερωτής (α) ακτινικής ροής, (β) μεικτής ροής, (γ) αξονικής ροής [E8, Σχήμα 1.5]	219
5.6	Μερική πτερωτή στροβίλου και συνιστώσες της ταχύτητας	219

	[E8,Σχήμα 1.9]	
5.7	Αξονοσυμμετρική ροή – διατήρηση της συστροφής [E8,Σχήμα 1.12]	221
5.8	Διάταξη ακίνητης ακτινικής στεφάνης πτερυγίων [E8,Σχήμα 1.13]	222
5.9	Θεωρητικές χαρακτηριστικές του δρομέα του υδροστροβίλου. [E8, Σχ. 6.14]	225
5.10	Χαρακτηριστικές υδροστροβίλου Francis Ον. ισχύος 165 MW, δρομέας με διάμετρο $D=6,4$ m και σταθερή ταχύτητα περιστροφής $n = 88,3$ m [E8, Σχ. 6.21]	229
5.11	Μεταβολή ανηγμένης παροχής Q11 και ισχύος P11 σε συνάρτηση με το n_{11} [E8, Σχ. 6.21]	232
5.12	Μεσημβρινή τομή δρομέα και τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου για διάφορες τιμές του ειδικού αριθμού στροφών [E8, Σχ. 7.2]	234
5.13	Συσχέτιση ειδικού αριθμών στροφών – τύπου υδροστροβίλου σε συνάρτηση με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση [E8, Σχ. 7.1]	236
5.14	Μέγιστη τιμή ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων σε συνάρτηση με τον ειδικό αριθμό στροφών [E3, Σχ. 5.25α]	236
5.15	Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων σε συνάρτηση με τα φορτία του[E3, Σχ. 5.25β]	238
5.16	Χαρακτηριστικές υδροστροβίλου σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής για σταθερή υδραυλική πτώση και άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων [E8, Σχ. 7.9]	241
5.17	α) Στάθμη τοποθέτησης υδροστροβίλου β) Διανομή της στατικής πίεσης γύρω από το πτερύγιο [E8, Σχ. 8.1]	244
5.18	Διάγραμμα λειτουργίας Francis και επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας λόγω ανάπτυξης της σπηλαίωσης στην είσοδο [E8, Σχ. 8.3]	245
5.19α	Ανάπτυξη στήλης σπηλαίωσης για μεγαλύτερη παροχή [E8, Σχ. 8.4]	246
5.19β	Ανάπτυξη στήλης σπηλαίωσης για μικρότερη παροχή [E8, Σχ. 8.5]	246
5.20	Υδροστρόβιλος εταιρείας Cink (Hydro – Energy) [I25]	247
5.21	Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου [E3, Σχήμα 5.29]	248
5.22	Υδροστρόβιλοι Francis της εταιρείας Cink Hydro – Energy (κατακόρυφου άξονα πάνω – οριζόντιου άξονα κάτω) [I25]	248
5.23	Διαγράμματα εύρους λειτουργίας υδροστροβίλων Francis της εταιρείας Toshiba [E3, Σχήμα 5.33]	250
5.24	Τυπικό σχεδιάγραμμα και πτερύγιο υδροστροβίλου Kaplan [I22]	251
5.25	Τομή σωληνωτού υδροστροβίλου S-ανάντη κατακόρυφου άξονα [E3, Σχήμα 5.44]	252
5.26	Διαστάσεις του σωληνωτού υδροστροβίλου S – ανάντη της εταιρείας Dumont [E3, Σχήμα 5.43]	252
5.27	Τομή βολβοειδούς στροβίλου [E3, Σχήμα 5.51]	253
5.28	Κάτοψη, Όψη και κύριες διαστάσεις βολβοειδούς στροβίλου της εταιρείας Dumont [E3, Σχήμα 5.54]	253

5.29	Υδροστροβίλος δακτυλίου [E3, Σχήμα 5.57]	254
5.30	Τομή υδροστροβίλου με ιμάντα [E3, Σχήμα 5.58]	254
5.31	Στρόβιλος Pelton (πάνω) και διάταξη στροβίλου Pelton της εταιρείας Voith [I23, I24]	255
5.32	Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton της εταιρείας Voith με 1 ακροφύσιο (πάνω) και με 2 ακροφύσια (κάτω) οριζοντίου άξονα [E3, Σχήμα 5.64]	256
5.33	Τομή και αρχή λειτουργίας υδροστροβίλου Cross – Flow [E3, Σχήμα 5.65]	257
5.34	Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστροβίλων Cross – Flow της εταιρείας Hitachi[E3, Σχήμα 5.68]	258
5.35	(α)Πρόσπτωση δέσμης και (β)όψεις δρομέα Turgo[E3, Σχήμα 5.71]	259
5.36	Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστροβίλων Cross – Flow της εταιρείας Hitachi[E3, Σχήμα 5.68]	259
5.37	Χαρακτηριστικές φυγόκεντρης αντλίας και υδροστροβίλου για την ίδια ταχύτητα περιστροφής [E3, Σχήμα 5.73]	260
5.38	Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών [E3, Σχήμα 5.74]	260
5.39	Κατακόρυφη διαμόρφωση, συνδεδεμένη με έναν κατακόρυφο στρόβιλο Kaplan και αυξητής ταχύτητας δύο φάσεων (αριστερά), Κιβώτιο ταχυτήτων με κωνικά γρανάζια για αύξηση ταχύτητας περιστροφής (δεξιά). [E1, Figures 6.31, 6.32]	261
5.40	Κιβώτιο ταχυτήτων προς αύξηση της ταχύτητας με χρήση ιμάντα [E1, Figures 6.33]	262
6.1	Σχηματική διάταξη λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές [E3, Σχήμα 6.19]	263
6.2	Αρχή ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικής δύναμης [E3, Σχήμα 6.1]	264
6.3	Ηλεκτρική γεννήτρια (α), Μαγνητικό πεδίο σε διάκενο (β) [E3, Σχήμα 6.2]	265
6.4	Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σπείρα[E3, Σχήμα 6.5]	265
6.5	Στοιχειώδης σύγχρονη εναλλασσόμενη γεννήτρια με περιστρεφόμενους πόλους [E3, Σχήμα 6.6]	266
6.6	Τριφασική σύγχρονη γεννήτρια με τέσσερις πόλους [E3, Σχήμα 6.7]	267
6.7	Χαρακτηριστική σύγχρονης γεννήτριας[E3, Σχήμα 6.14]	268
6.8	Μεταβολή ροπής σε συνάρτηση με το συντελεστή ολίσθησης[E3, Σχήμα 6.15]	269
6.9	α) Διάταξη οριζόντια με εδράσεις του δρομέα του υδροστροβίλου στο κέλυφος της γεννήτριας, β) Οριζόντια διάταξη με 2 εξωτερικές εδράσεις δρομέα της γεννήτριας, γ) Κατακόρυφη διάταξη με ωστικό έδρανο στη θέση της γεννήτριας δ) Κατακόρυφη διάταξη με ωστικό έδρανο στο κέλυφος του υδροστροβίλου [E3, Σχήμα 6.18]	271

6.10	Τομή εγκατάστασης μετασχηματιστή ισχύος [E3, Σχήμα 6.20)	272
6.11	Διάγραμμα σύνδεσης ΥΗΣ με διασυνδεδεμένο δίκτυο [E3, Σχήμα 6.21α)	275
7.1	Δίκτυο υφιστάμενων και νέων περιοχών Natura 2000 [I14]	279
7.2	Ιχθυόσκαλα [E17]	285
7.3	Σταθμός Παραγωγής Neckar [I21]	288
8.1	Καθαρή παρούσα αξία συναρτήσει με την ελάχιστη απόδοση επένδυσης με ύπαρξη αρνητικών καθαρών ταμειακών ροών	302
8.2	Καθαρή παρούσα αξία συναρτήσει με την ελάχιστη απόδοση επένδυσης με ύπαρξη αρνητικών καθαρών ταμειακών ροών	303
8.3	Μεταβολή της κατανομής του κόστους των κύριων συνιστωσών. [E21, Σχήμα 9.3α]	304
8.4	Κόστος φράγματος σκυροδέματος ανά μέτρο ανοίγματος συναρτήσει του μέσου ύψους του φράγματος. [E3, Σχήμα 9.4]	307
8.5	Κόστος έργου υδροληψίας συναρτήσει της ονομαστικής παροχής. [E3, Σχήμα 9.5]	307
8.6	Κόστος διώρυγας προσαγωγής ανά μέτρο μήκους σε συνάρτηση με την ον. παροχή. [E3, Σχήμα 9.5]	308
8.7	Κόστος δεξαμενής φόρτισης συναρτήσει με την ον. παροχή. [E3, Σχήμα 9.7]	309
8.8	Κόστος αγωγού πτώσης συναρτήσει με την ον. παροχή και με παράμετρο την υδραυλική πτώση h . [E3, Σχήμα 9.8]	309
8.9	Κόστος υδροστρόβιλου Francis. [E3, Σχήμα 9.11]	311
8.10	Κόστος υδροστρόβιλου Pelton. [E3, Σχήμα 9.12]	311
8.11	Κόστος σύγχρονης και ασύγχρονης γεννήτριας. [E3, Σχήμα 9.14]	312
8.12	Κόστος μετασχηματιστή [E3, Σχήμα 9.15]	312
8.13	Κόστος ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων αυτοματισμού για 1, 2 και 3 μονάδες παραγωγής υδροηλεκτρικού έργου [E21, Σχήμα 9.16]	313
9.1	Γοργογύρι Τρικάλων_Επίπεδα[Google Maps]	319
9.2	Γοργογύρι Τρικάλων_ Δορυφόρος [Google Maps]	319
9.3	Pin Γοργογύρι Τρικάλων [Google Maps]	320
9.4	Απόσταση Γοργογύρι – Τρίκαλα [Google Maps]	320
9.5 α,β	Γοργογύρι – Τρικάλων [I26]	321
9.6 α	Ενδεικτικός τοπογραφικός κάρναβος	322
9.6 β	Παράδειγμα υδροληψίας – σημείου απόληξης	323
9.6 γ	Παράδειγμα υδροληψίας – σημείου απόληξης με μετατόπιση.	323
9.7	Πραγματική απεικόνιση Γοργογυριου – Κεφαλοποτάμου (α) Open Topo Map (β) Carto Light, (γ) CycIOSM [I27]	325
9.8	Πραγματική απεικόνιση Γοργογυριου – Κεφαλοποτάμου (α) Esri Imagery, (β) Esri Topo, (γ) Open Street Map [I27]	326
9.9	Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton, πολύ μικρής ισχύος της εταιρείας IREM (Ιταλία) [E21, Σχήμα 5.53]	331

9.10	Περιοχή τυποποιημένων υδροστροβίλων Kaplan της Escher-Wyss [E21, Σχήμα 5.37α]	331
9.11	Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Pelton της εταιρείας Voith με 4 ακροφύσια (κατακόρυφος άξονας), [E21, Σχήμα 5.57γ]	332
9.12	Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Pelton της εταιρείας Bouvier (Γαλλία), [E21, Σχήμα 5,55α]	333
9.13	Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Francis, κλειστού θαλάμου της εταιρείας Sorumsand (Νορβηγία), [E21, Σχήμα 5,34α]	333
9.14	Διάγραμμα επιλογής και διαστάσεις τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis ανοικτού θαλάμου της εταιρείας Voith [E21, Σχήμα 5.35α]	334
9.15	Υδρογράφημα μέσω μηνιαίων παροχών [E16, Σχήμα 5]	339
9.16	Υδρογράφημα αξιοποιήσιμων μηνιαίων παροχών [E16, Σχήμα 6]	340
9.17	Καμπύλη διάρκειας αξιοποιήσιμης παροχής [E16, Σχήμα 7]	341
9.18	Καθαρή παρούσα αξία (NPV) σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.	343
9.19	Καθαρή παρούσα αξία (NPV) σε σχέση με το μεικτό ύψος λαμβάνοντας υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.	344
9.20	Λόγος Οφέλους - Κόστους (BCR) σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.	345
9.21	Λόγος Οφέλους - Κόστους (BCR) σε σχέση με το μεικτό ύψος λαμβάνοντας υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.	345
9.22	Χρόνος αποπληρωμής σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης (συμπ. τα 2 έτη κατασκευής)	346
9.23	Χρόνος αποπληρωμής σε σχέση με το μεικτό, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης (συμπ. τα 2 έτη κατασκευής)	347
9.24	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με το μεικτό ύψος, χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.	348
9.25	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με το μεικτό ύψος, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης.	348
9.26	Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης για τις 1000 βέλτιστες λύσεις χωρίς περιορισμό αξιοποίησης πτώσης ύδατος.	349
9.27	Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης για τις 1000 βέλτιστες λύσεις με περιορισμό αξιοποίησης πτώσης ύδατος.	350
9.28	NPV με το κριτήριο βάσει λόγου ύψους προς μήκος σωλήνα	352
10.1	Απόδοση στροβίλων Francis και Pelton σε συνάρτηση με παροχή: πραγματική καμπύλη (Δεδομένα κατασκευαστή), εκτιμώμενη καμπύλη (δευτεροβάθμια εξίσωση με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων).	364

10.2	Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Α” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.	366
10.3	Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Α” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης με ιεραρχική, προτεινόμενης με συνεργατική: (α) πλήρης μορφή, (β) μεγέθυνση μη μηδενικών τιμών διαφοράς παραγόμενης ισχύος.	367
10.4	Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Β” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.	368
10.5	Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Β” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης με ιεραρχική, προτεινόμενης με συνεργατικής.	369
10.6	Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “C” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.	370
10.7	Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “C” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης με ιεραρχική, προτεινόμενης με συνεργατική: (α) πλήρης μορφή, (β) μεγέθυνση μη μηδενικών τιμών διαφοράς παραγόμενης ισχύος.	370

Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

Αρχικός σκοπός της προτεινόμενης έρευνας είναι η συστηματική σχεδίαση και βελτιστοποιημένη διαμόρφωση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με χρήση ενός ή περισσοτέρων υδροστροβίλων. Η σωστή μελέτη των υδροηλεκτρικών σταθμών με ακριβή στοιχεία και μετρήσεις είναι απαραίτητη για τη βιωσιμότητα του σταθμού. Υδρολογικές, γεωλογικές και τοπογραφικές αποτυπώσεις απαιτούνται για την κατάρτιση των μελετών. Όλα τα στοιχεία πρέπει να είναι αξιόπιστα και να εκτείνονται σε μεγάλο χρονικά διάστημα της τάξεως των 20 ετών για τα μικρά υδροηλεκτρικά και 40 ετών για τα μεγάλα. Η παροχή του υδατορεύματος αποτελεί την πιο σημαντική πληροφορία για τη μελέτη ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, αφού επηρεάζει άμεσα την επιλογή του μεγέθους (ισχύς του σταθμού), τον τύπο και το πλήθος των υδροστροβίλων, τη γενικότερη διαστασιολόγηση του σταθμού και κατ' επέκταση το κόστος όλων των έργων που θα πρέπει να διεκπεραιωθούν, προκειμένου να τεθεί σε λειτουργία ο σταθμός. Η υπερεκτίμηση παροχών θα οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση έργων προσαγωγής νερού με μεγάλο κόστος, με αποτέλεσμα η επένδυση να αποτύχει, αφού η παραγόμενη ενέργεια θα είναι αρκετά μικρότερη από την αναμενόμενη. Αντιθέτως, η υποεκτίμηση της παροχής έχει ως αποτέλεσμα τις μικρές μονάδες που δεν αξιοποιούν επαρκώς τη διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια, πράγμα που οδηγεί σε μεγάλη απώλεια εσόδων της επένδυσης. Το πλέον ιδανικό σενάριο είναι αυτό της μεγαλύτερης δυνατής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Η έρευνα πρόκειται να προσανατολιστεί, αρχικά, στην καταγραφή των βασικών αρχών σχεδίασης υδροηλεκτρικών μονάδων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα ζητήματα υδρολογίας και σχεδίασης υδραυλικών έργων, όσο και τα ηλεκτρομηχανολογικά. Για την εκπόνηση ενός υδροηλεκτρικού θα πρέπει να πραγματοποιηθούν τα έργα πολιτικού μηχανικού, όπως είναι για παράδειγμα η κατασκευή του φράγματος (κυρίως στα μεγάλα υδροηλεκτρικά), ή του ταμιευτήρα, τα οποία βασίζονται σε συγκεκριμένες μελέτες που θα πρέπει να έχουν διεξαχθεί. Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός αφορά στην ορθή επιλογή των υδροστροβίλων και το πλήθος αυτών, προκειμένου να επιτευχθεί ο μεγαλύτερος κατά το δυνατό βαθμός απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της βελτιστοποίησης της σχεδίασης των μικρών υδροηλεκτρικών με διάφορες μεθόδους, όπως είναι η ανάλυση ευαισθησίας, καθώς και ο έλεγχος για την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος. Το βασικότερο ερώτημα της συγκεκριμένης έρευνας είναι πως μπορεί μέσα από τη σωστή μελέτη και διαστασιολόγηση του σταθμού να υπάρξει άρτιος σχεδιασμός

και ομαλή λειτουργία με μικρές απώλειες και μέγιστη παραγωγή πάντα σύμφωνα με την ισχύ που δύναται να λειτουργήσει η μονάδα.

Στην παρούσα έρευνα θα πραγματοποιηθεί:

- εξαντλητική αναζήτηση του κατάλληλου σημείου υδροληψίας – απόληξης του αγωγού φυγής κατά την κοίτη του ποταμού και η βέλτιστη χάραξη του κλειστού αγωγού προσαγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς χαρακτηρισμούς των περιοχών και του κόστους τοποθέτησης,
- εξαντλητική αναζήτηση για κάθε ζεύγος υδροληψίας – απόληξης αγωγού φυγής για την εύρεση του κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δηλαδή τη διατομή του αγωγού, την επιλογή του στροβίλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή, λαμβάνοντας υπόψη την υπό εξέταση ονομαστική παροχή και το δεδομένο μεικτό ύψος υδροληψίας – απόληξης, βελτιστοποιώντας τον σχεδιασμό του μικρού υδροηλεκτρικού με έναν υδροστρόβιλο,
- ανάλυση βέλτιστης λειτουργίας μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους.

Πιο συγκεκριμένα στα πρώτα κεφάλαια θα παρουσιασθούν θεωρητικά όλες οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την πραγματοποίηση του σταθμού, καθώς και θα τονιστούν τα σημεία που χρήζουν ιδιαίτερη προσοχής προκειμένου να αποφευχθούν τυχόντα λάθη κατά την εκπόνηση του έργου. Η δομή της εργασίας θα έχει ως εξής:

- Στα κεφάλαια 1 έως 8 θα αναλυθούν σε σαφήνεια όλες οι παράμετροι που πρέπει να ερευνηθούν και θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν προκειμένου να βρεθεί το σωστό αποτέλεσμα.
Αναλυτικότερα:
 - Κεφάλαιο 2: Ανάλυση του υδρολογικού κύκλου και των φαινομένων που συμμετέχουν σε αυτόν,
 - Κεφάλαιο 3: Διαμόρφωση του μικρού υδροηλεκτρικού σε σχέση με την επιλογή του υδροστροβίλου,
 - Κεφάλαιο 4: Ανάλυση των έργων του πολιτικού μηχανικού, δηλαδή των φραγμάτων, των υπερχειλιστών, των ταμιευτήρων, κ.α.
 - Κεφάλαιο 5: Ανάλυση των έργων του μηχανολόγου μηχανικού και της επιλογής του κατάλληλου εξοπλισμού,
 - Κεφάλαιο 6: Ανάλυση των έργων του ηλεκτρολόγου μηχανικού, της διασύνδεσης του υδροηλεκτρικού σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, και ό,τι αφορά τους αυτοματισμούς του συστήματος,

- Κεφάλαιο 7: Ανάλυση της περιβαλλοντολογικής επίδρασης με καταγραφή των επιπτώσεων τόσο στο φυσικό, όσο και το κοινωνικό και πολιτιστικό περιβάλλον,
- Κεφάλαιο 8: Οικονομοτεχνική ανάλυση των μικρών υδροηλεκτρικών, εξετάζοντας τα βασικά οικονομικά στοιχεία, τις τεχνικές και τα κριτήρια της οικονομικής βιωσιμότητας του σταθμού.
- Στα κεφάλαια 9 έως 10 θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι αρχές σχεδίασης της μονάδας, η προσομοίωση του συστήματος μέσω υπολογιστικού προγράμματος MATLAB και οι εφαρμογές βελτιστοποίησης.

Αναλυτικότερα:

- Κεφάλαιο 9: Βελτιστοποίηση υδροηλεκτρικού σταθμού σε μία φανταστική περιοχή που μοιάζει με το Γοργούρι Τρικάλων, για την ακρίβεια, λαμβάνοντας την αντίστοιχη περιοχή, αλλά με πιο έντονο ανάγλυφο. Χρησιμοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες παράμετροι που αναλύθηκαν στα παραπάνω θεωρητικά κεφάλαια, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης
- Κεφάλαιο 10: Βελτιστοποίηση υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους,
- Κεφάλαιο 11: Τελικά συμπεράσματα και περιοχές για περαιτέρω έρευνα.

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας & στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στα Υδροηλεκτρικά Έργα

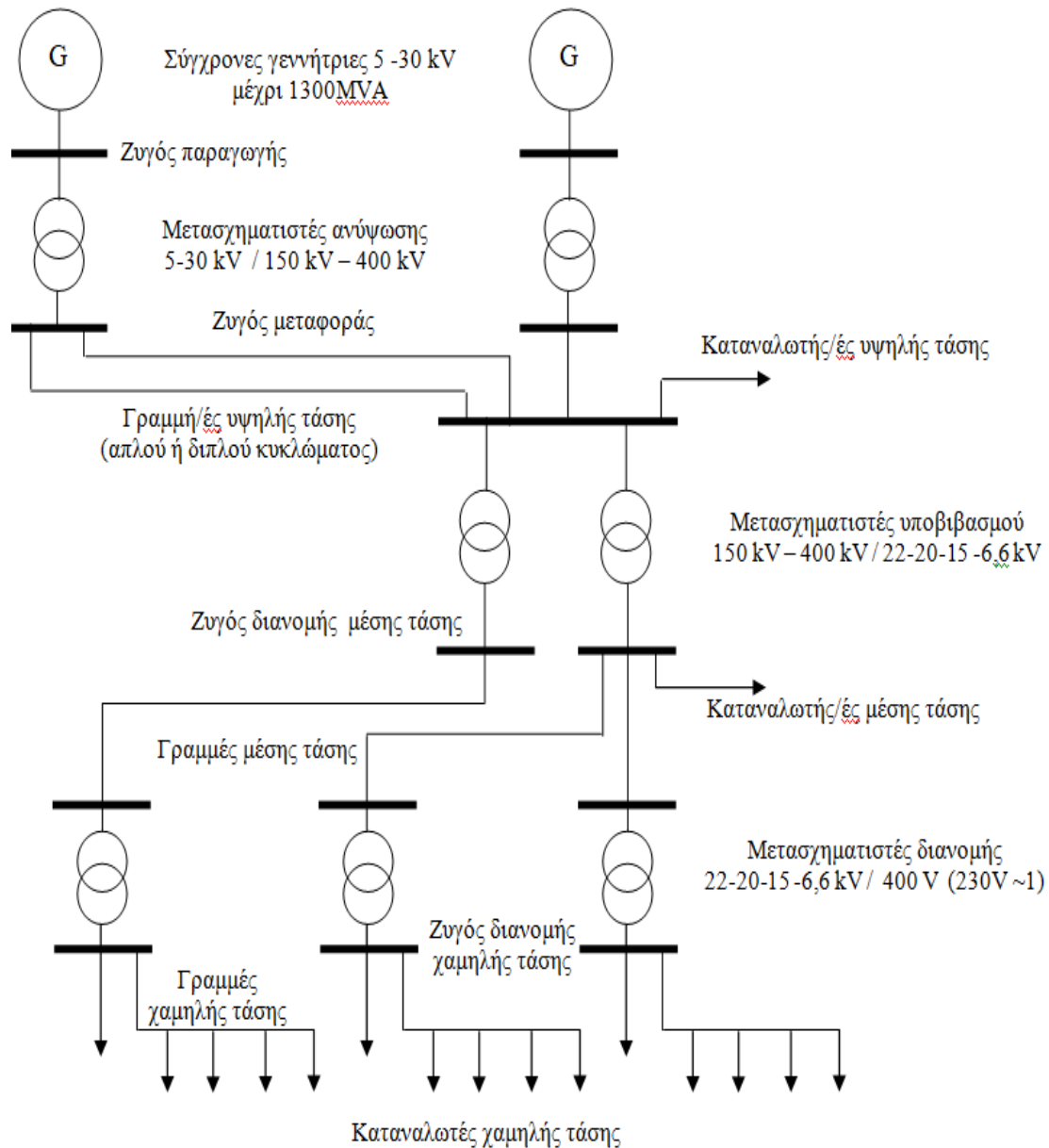
1.1 Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας;

Η ανάγκη για τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα, έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Οι συνέπειες χωρίς ηλεκτρισμό θα ήταν τρομακτικές τόσο στο οικονομικό, όσο και στο κοινωνικοπολιτικό τομέα της χώρας. Για παράδειγμα, βιομηχανίες ολόκληρες θα σταματούσαν την παραγωγή τους, με αποτέλεσμα την πτώχευσή τους και κατ' επέκταση την οικονομική δυσχέρεια εκατοντάδων οικογενειών. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αναγκαίος εξοπλισμός σχεδόν για όλων των ειδών των επιχειρήσεων, θα ήταν αδύνατη αφού δε θα υπήρχε τροφοδοσία αυτών, έτσι επιχειρήσεις με δραστηριότητα, κυρίως σε γραφεία, θα αντιμετώπιζαν προβλήματα χρόνου και κόστους, αφού δε θα μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στους στόχους μέσα στα απαραίτητα χρονικά πλαίσια. Συνεπώς, όταν υπάρχουν οικονομικές δυσκολίες με απόρροια τη μείωση του βιοτικού επιπέδου, δημιουργούνται προβλήματα και στον κοινωνικοπολιτικό τομέα, όπως για παράδειγμα στον κλάδο υγείας (νοσοκομεία/κλινικές), με την μη χρήση των ορθών μέσων για την αντιμετώπιση περιστατικών, καθώς και στην επικοινωνία μέσω σταθερού/κινητού τηλεφώνου, internet, ενημέρωση κ.λπ. Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η ύπαρξη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των μέσων και εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για τρεις ξεχωριστές βασικές λειτουργίες: *την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή* της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας γίνεται μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου, φυσικού αερίου, άνθρακα), της μηχανικής ενέργειας των υδατοπτώσεων και των υδάτινων ροών, καθώς και της κινητικής ενέργειας μέσω του ανέμου, σε ηλεκτρική. Γραμμές υπερυψηλής και υψηλής τάσεως αξιοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, οι οποίες κάνουν τη μεταφορά σε κεντρικά σημεία του δικτύου, (υποσταθμούς) από όπου ξεκινούν τα δίκτυα μέσης τάσης, τα οποία πραγματοποιούν τη μεταφορά προς τους τελικούς καταναλωτές μέσω των υποσταθμών και γραμμών χαμηλής τάσεως

(400/230 V). Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται η σχηματική διάταξη ενός ηλεκτρικού δικτύου.



Σχήμα 1.1: Σχηματική διάταξη ηλεκτρικού δικτύου. [E1, Σχήμα 1.1]

Για την ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να η παροχή να πραγματοποιείται με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προσφέροντας την εξασφάλιση της σταθερής συχνότητας και τάσης, καθώς και την υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

1.2 Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή μη αναλώσιμες ή εναλλακτικές, ονομάζονται όλες οι πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στη φύση, έχοντας συνεχή ανανέωση και επιτρέποντας τη σταθερή και συνεχή χρήση τους. Ήπιες μορφές ενέργειας ονομάζονται αυτές που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Μερικές ενδεικτικές μορφές ήπιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- Ο ήλιος – ηλιακή ενέργεια
- Ο άνεμος – αιολική ενέργεια
- Η βιομάζα – η ενέργεια της ζώσας ύλης
- Γεωθερμία – γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια που εμπεριέχει η γη
- Οι υδατοπτώσεις – υδραυλική ενέργεια
- Οι θάλασσες – παλιρροϊκή ενέργεια, ενέργεια κυμάτων

1.2.1 Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που προκαλείται από την ακτινοβολία του ηλίου, η οποία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική εφαρμογή αφορά στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας, συνήθως με ηλιακούς συλλέκτες, με σκοπό την παραγωγή θερμότητας. Τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση νερού χρήσης, θέρμανση χώρων, κ.λπ. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα επιτρέπουν τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών.

Τα ηλιακά συστήματα έχουν μεγάλη μείωση του ενεργειακού κόστους και μπορούν να επιτύχουν τη μέγιστη δυνατή ενεργειακή κλάση A+, σύμφωνα με τον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (KENAK). Μερικά ακόμα θετικά χαρακτηριστικά είναι η ένταξη τους στα επιδοτούμενα προγράμματα «Εξοικονομώ», καθώς και το αρκετά χαμηλό κόστος συντήρησή τους. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι η μη συνεχόμενη ακτινοβολία, αν και στην Ελλάδα υπάρχει το πλεονέκτημα ηλιοφάνειας συγκριτικά με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Επιπροσθέτως, το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής είναι ένα ακόμα αρνητικό χαρακτηριστικό των ηλιακών συστημάτων.

1.2.2 Αιολική ενέργεια

Η κινητική ενέργεια του ανέμου, ονομάζεται αιολική και θεωρείται μία από τις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αφού θεωρητικά είναι ανεξάντλητη και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η εκμετάλλευση της από τον άνθρωπο

χρονολογείται από τα πολύ παλιά χρόνια, όπως για παράδειγμα για την κίνηση των πλοίων, καθώς και για την άντληση νερού και το άλεσμα με τη χρήση ανεμόμυλων. Με τη συνεισφορά της τεχνολογίας, η άντληση της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται ακόμα και για μεγάλες απαιτήσεις ισχύος με τη χρήση των ανεμοκινητήρων. Η κλιμάκωση των ανεμοκινητήρων γίνεται βάσει της ισχύος και διακρίνονται σε μικρής (έως 20 kW), σε μέσης (20 έως 250 kW) και σε μεγάλης ισχύος (250 kW και άνω).

Οι ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος αφορούν στην οικονομικότερη λύση, αφού δεν αποτελούν μέρος του κύριου ηλεκτρικού δικτύου και λειτουργούν με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές στους αγροτικούς και κτηνοτροφικούς τομείς, για θέρμανση κατοικιών, άντληση και θέρμανση νερού, φωτισμός κ.α. Αντίθετα, οι ανεμοκινητήρες μέσης και υψηλής ισχύος είναι μέρος του ηλεκτρικού δικτύου . Η χρήση τους μπορεί να τοποθετηθεί για παράδειγμα σε νησιωτικά συμπλέγματα, αφού είναι αρκετά δύσκολη και δαπανηρή η μεταφορά καυσίμων μέσω της θάλασσας. Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και για την αφαλάτωση του νερού, καθώς αυτό περνά μέσα από μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης με αποτέλεσμα την παραγωγή πόσιμου νερού.

1.2.3 Βιομάζα

Η ενέργεια από τη βιομάζα είναι η ηλιακή ενέργεια που δεσμεύεται μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, έχοντας περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με την ηλιακή, αφού η δεύτερη είναι μία διακοπτόμενη, μέσα στην ημέρα, μορφή ενέργειας και επιπλέον έχει μεγαλύτερο κόστος συλλογής. Ο όρος βιομάζα αφορά σε οργανικές προελεύσεις στις οποίες περιλαμβάνονται τα στοιχεία οξυγόνο, υδρογόνο και άνθρακας και πιο συγκεκριμένα στην κατηγορία των υδρογονανθράκων. Ως παραδείγματα πηγών βιομάζας είναι:

- τα φυτικά έλαια,
- τα ζωικά λίπη,
- τα ζωικά , φυτικά δασικά και αλιευτικά υποπροϊόντα,
- αγροτικά απορρίμματα (άχυρο),
- τα ξύλα (καύση),
- το βιολογικό μέρος των αστικών απορριμμάτων και λυμάτων,
- τα προϊόντα ενεργειακών καλλιεργειών, δηλαδή προϊόντα που καλλιεργούνται με μοναδικό σκοπό τη χρήση τους για παραγωγή ενέργειας (ζαχαροκάλαμο, ελαιοκράμβη, ευκάλυπτος, κα).

Μερικές από τις κύριες εφαρμογές της βιομάζας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας τα τελευταία χρόνια είναι:

- Θέρμανση των θερμοκηπίων

- Κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε βιοτεχνίες και βιομηχανίες
- Θέρμανση κτιρίων με καύση της βιομάζας (π.χ. καυσόξυλα)
- Παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες ξύλου και γεωργικές βιομηχανίες
- Παραγωγή βιοκαυσίμων (στερεών, υγρών, αέριων)
- Παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο και αέριο σύνθεσης

Η βιομάζα στην οικιακή κατανάλωση αξιοποιείται κυρίως για θέρμανση με τη χρήση καυσόξυλων, σόμπες πέλετ κ.λπ.

Η χρήση της βιομάζας έχει αρκετά πλεονεκτήματα με κυριότερο όλων την αποτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου, αφού έχει μηδενικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Επιπλέον, βρίσκεται σε αφθονία, θεωρείται εγχώρια πηγή ενέργειας με αποτέλεσμα να μειώνεται η ανάγκη για εισαγόμενα καύσιμα, δημιουργώντας ενεργειακή απεξάρτηση. Αντίθετα, παρά τα θετικά που προσφέρει, δεν υπάρχει η αντίστοιχη αποδοχή από τον κόσμο, λόγω έλλειψης εμπειρίας, καθώς και υπάρχουν πιθανές αρνητικές συνέπειες λόγω κάποιων ιδιοτήτων καυσίμου ή ακόμα και κάποιου ατυχούς συνδυασμού αυτών.

1.2.4 Γεωθερμία

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που προκαλείται από τη θερμότητα που βρίσκεται στο εσωτερικό της γης, η οποία λόγω της υψηλής θερμοκρασίας φτάνει στην επιφάνεια της. Ακόμα ονομάζεται και η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της γης από την πυρηνική διάσπαση στοιχείων, όπως το θόριο και το ουράνιο. Το μεγαλύτερο ποσοστό γεωθερμίας αφορά στην ήδη αποθηκευμένη ενέργεια του εσωτερικού της γης, αφού οποιαδήποτε άλλη αντίδραση χρειάζεται πάρα πολύ χρόνο. Η μετάδοση της παραγόμενης ενέργειας πραγματοποιείται με δύο τρόπους, με αγωγή από το εσωτερικό τμήμα προς την επιφάνεια της γης, καθώς και με ρεύματα μεταφοράς, τα οποία εξαιτίας των υδροθερμικών και ηφαιστειακών φαινομένων περιορίζονται σε ζώνες γύρω από τις λιθοσφαιρικές πλάκες.

Η εφαρμογή της γεωθερμίας διακρίνεται ανάλογα με την ενθαλπία, δηλαδή το ολικό ποσό της θερμότητας που εμπεριέχεται στο εσωτερικό της. Ενδεικτικές εφαρμογές είναι:

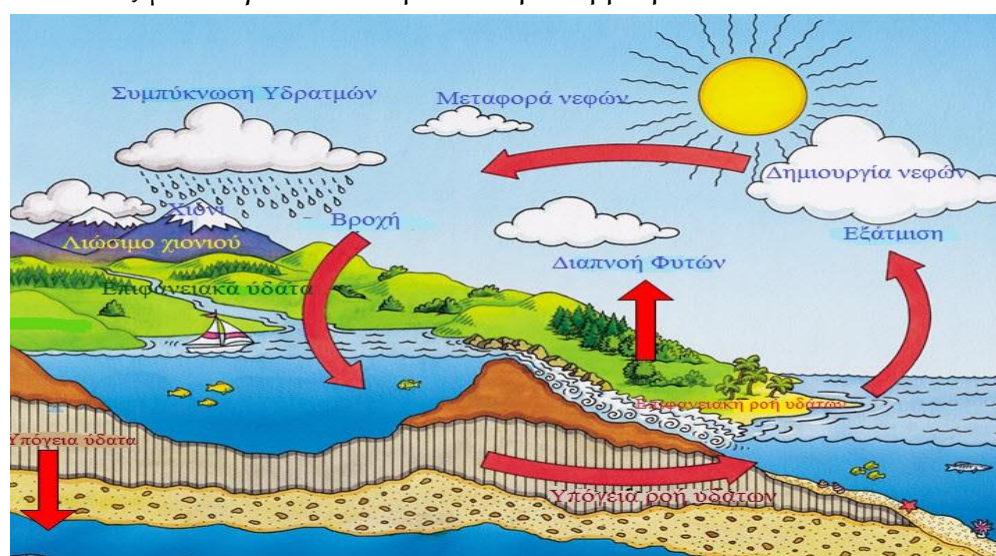
- Υψηλής ενθαλπίας ($>150^{\circ}\text{C}$): Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέσης ενθαλπίας (80 έως 150°C): Θέρμανση ή/και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων και παραγωγή ηλεκτρισμού σε συστήματα με χαμηλό σημείο ζέσεως, όπως αυτό του κλειστού κυκλώματος με φρέον, βιομηχανικές εφαρμογές για αφαλάτωση θαλασσινού νερού, κ.α.
- Χαμηλής ενθαλπίας (25 έως 80°C): Θέρμανση χώρων με καλοριφέρ ($>60^{\circ}\text{C}$), αερόθερμα ($>40^{\circ}\text{C}$) ή με ενδοδαπέδιο σύστημα ($>25^{\circ}\text{C}$), ψύξη και κλιματισμό με αντλίες θερμότητας απορρόφησης ($>60^{\circ}\text{C}$) ή με

υδροψυκτικές αντλίες θερμότητας (<30°C), θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών, παραγωγή γλυκού νερού στις ιχθυοκαλλιέργειες, κ.α.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της γεωθερμίας είναι η ασταμάτητη διαθεσιμότητά της, η οποία είναι εντελώς ανεξάρτητη από τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η διαρκής ανανέωσή της, το μηδενικό περιβαλλοντολογικό της αποτύπωμα, καθώς και η συνεισφορά της στην αισθητική των κτιρίων, αφού με τη χρήση της περιορίζονται εγκαταστάσεις π.χ. ψύκτες, A/C, κ.λπ. Το υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής και η εξειδικευμένη μελέτη σχεδιασμού της εγκατάστασης αποτελούν δύο από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας.

1.2.5 Υδατοπτώσεις

Η ενέργεια που προκύπτει από την υψομετρική διαφορά μέσω των υδατοπτώσεων και των φραγμάτων ονομάζεται υδροδυναμική ή υδραυλική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια δε, γίνεται μεγάλη προσπάθεια για εκμετάλλευση θαλασσών και ωκεανών μέσω των κυμάτων αλλά και των παλιρροιών. Η χρήση της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική είναι γνωστή από τα αρχαία χρόνια με τους νερόμυλους που αποτελούσαν κατασκευές μεγάλου μεγέθους και χαμηλής ισχύος. Η πρόκληση των υδατοπτώσεων δημιουργείται από τη βαρύτητα με τη μεταφορά του νερού από ένα υψηλότερο σε ένα χαμηλότερο σημείο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου, στον οποίον το νερό εξατμίζεται από τους ωκεανούς, τις θάλασσες, τα ποτάμια, τις λίμνες, εξαιτίας της ηλιακής ενέργειας, μεταφέρεται με τον αέρα πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές με τη μορφή ατμοσφαιρικής υγρασίας, μετατρέπεται σε υετό που πέφτει στο έδαφος και τελικά ξαναγυρίζει στο σημείο από όπου γίνεται η εξάτμιση, δηλαδή στους ωκεανούς, τα ποτάμια τις λίμνες και τις θάλασσες με υπόγεια και επιφανειακή απορροή.



Σχήμα 1.2: Υδρολογικός κύκλος [11]

1.3 Το νερό: ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους

Το νερό στη φύση υπάρχει ανεξάντλητο και η υδραυλική ενέργεια που δημιουργείται, παρέχεται δωρεάν. Για την εκμετάλλευσή της μέσω ενός υδροηλεκτρικού σταθμού όμως, απαιτούνται διάφορες δαπανηρές εργασίες στο κατασκευαστικό κομμάτι και πολλές φορές με αρκετές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Συγκριτικά με έναν θερμοηλεκτρικό σταθμό έχει μηδενικό κόστος καυσίμου, χωρίς να χρειάζεται μεγάλο αριθμό προσωπικού, με χαμηλό κόστος συντήρησης. Όμως, το σύνολο των ετήσιων δαπανών είναι αρκετά μεγαλύτερο, αφού απαιτούνται μεγάλα δομικά έργα για τη λειτουργικότητα της εγκατάστασης. Πέρα από την εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κανονισμοί και η πολιτική της κάθε χώρας στο ενεργειακό πλαίσιο και να εξετάζεται αν υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με άλλες κοινωφελείς εργασίες, όπως ύδρευση, άρδρευση, κ.λπ.

Η εγκατεστημένη ισχύς δεν είναι το μοναδικό μέγεθος που υπολογίζεται στο σύνολο των δαπανών μίας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Μεγάλης σημασίας είναι επίσης, οι αγορές εκτάσεων και οι απαλλοτριώσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την εκπόνηση του έργου, καθώς και όλα τα έργα διαμόρφωσης και στεγανοποίησης που απαιτούνται, όπως η κατασκευή φράγματος, η σήραγγα εκτροπής, οι δρόμοι προσπελάσεως για πιθανή συντήρηση κ.α. Το νερό δεν έχει σταθερή παροχή, όπως μία τεχνητή λίμνη, αλλά εξαρτάται από τα καιρικά φαινόμενα, δηλαδή τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, όπως είναι οι βροχές και οι χιονοπτώσεις, έτσι είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη ότι όταν σταματάει η παροχή του, το σύστημα αδυνατεί να λειτουργήσει. Επομένως, όταν η παροχή του ύδατος δεν είναι εφικτή, το νερό αποθηκεύεται στους ταμιευτήρες (τεχνητές λίμνες) για να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρξει ζήτηση. Αξίζει να σημειωθεί πως οι απαιτήσεις για την παροχή ενός τέτοιου σταθμού είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές ενός συμβατικού υδροηλεκτρικού, γιατί χρειάζεται μόνο συμπλήρωση των απωλειών ύδατος από την εξάτμιση ή τις διαρροές. Η θέση του σταθμού εξαρτάται από την ποσότητα του αποθηκευμένου ύδατος και από την τοποθέτηση του ταμιευτήρα, έτσι συνήθως εγκαθίσταται στη βάση του φράγματος ή σε ακόμα χαμηλότερη, ώστε να δημιουργείται η υψομετρική διαφορά. Με αυτόν τον τρόπο, ο υδροηλεκτρικός σταθμός με ταμιευτήρα διοχετεύει την αναγκαία ποσότητα νερού, μέσω του κατάλληλου χρονοπρογραμματισμού αξιοποίησής του, όμως κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί τόσο από οικονομικής, όσο και από περιβαλλοντικής πλευράς.

1.4 Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος

Οι υδροστρόβιλοι αποτελούν μηχανές στις οποίες η ενέργεια ενός υγρού μετατρέπεται σε μηχανική, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό το υγρό είναι το νερό και η ενέργεια του θεωρείται ανανεώσιμη, αφού προέρχεται από μέρος του υδρολογικού κύκλου, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Η κινητήρια δύναμη αυτού του κύκλου είναι η επίδραση του ήλιου γι' αυτό και λέγεται πως η υδραυλική ενέργεια προέρχεται από την ηλιακή.

Μέρος της ποσότητας του νερού που προκύπτει από τις βροχές και την τήξη των πάγων βρίσκεται στην επιφάνεια των ποταμών και των υδατορεμάτων γενικότερα. Το νερό αυτό, λόγω της βαρύτητας ρέει από τα ψηλά στα χαμηλά, με σκοπό να καταλήξει στη στάθμη της θάλασσας και εξαιτίας αυτής της φυσικής ροής, η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των υδραυλικών απωλειών τύρβης και μεταφοράς υλικών. Αν το νερό που συλλεχθεί σε μία στάθμη z_E κατευθυνθεί σε μία χαμηλότερη στάθμη z_A , αφού περάσει μέσα από έναν υδροστρόβιλο, γίνεται η μετατροπή ανά μονάδα μάζας ενέργειας $g(z_E - z_A)$ της διερχόμενης παροχής σε μηχανική ενέργεια, αφού όμως αφαιρεθούν πάσης φύσεως απώλειες.

Επειδή η παραγόμενη μηχανική ενέργεια δεν μπορεί να μεταφερθεί επαρκώς προς τον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται σε ηλεκτρική επί τόπου, μέσω γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη με την άτρακτο του υδροστρόβιλου. Γι' αυτόν το λόγο, το σύνολο του εξοπλισμού και των μέσων που η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και μετά σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο. Η εκμετάλλευση της ισχύος από το νερό για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από τη δημιουργία υδροηλεκτρικών μονάδων, όπου το νερό ενός ποταμού με τη βοήθεια ενός υδατοφράκτη, αποθηκεύεται σε μία λεκάνη ή έναν ταμιευτήρα και στη συνέχεια αφήνεται ελεύθερο, πέφτοντας από κάποιο ύψος για να προκαλέσει περιστροφή σε ένα στρόβιλο που είναι συνδεδεμένος με τη γεννήτρια. Η ύπαρξη των υδατοφρακτών έχει δύο σκοπούς. Πρώτον βοηθούν στην αύξηση της στάθμης του νερού με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η υψομετρική διαφορά και κατ' επέκταση η δυναμική ενέργεια του έργου και δεύτερον, βοηθούν στη δημιουργία ταμιευτήρα, έτσι ώστε να γίνεται ο έλεγχος της παροχής του νερού από τον ποταμό με στόχο την ορθολογική εκμετάλλευση της απαιτούμενης ισχύος σε συνάρτηση με την απαίτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Μία υδροηλεκτρική μονάδα αποτελείται από τον υδατοφράκτη (φράγμα), που ο στόχος του είναι να αυξήσει το ύψος του νερού και να δημιουργήσει ταμιευτήρα, όπου πραγματοποιείται η ρύθμιση της παροχής. Ο υδατοφράκτης μπορεί να είναι συνδεδεμένος με διόδους διάχυσης και με βαλβίδες ασφαλείας για τον έλεγχο κινδύνου από πλημμύρες. Στη συνέχεια, υπάρχει το σύστημα σωληνώσεων που οδηγούν το νερό στο σταθμό, ο σταθμός με τους στρόβιλους

και τις γεννήτριες, όπου πραγματοποιείται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται από γραμμές μεταφοράς στους υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιπλέον παροχή ρυθμίζεται και διαφεύγει μέσω αγωγών διαφυγής.

1.5 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου

Τα υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ) είναι σύνθετα και αποτελούνται από έργα πολιτικού μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Τα ΥΗΕ παράγουν μηχανική και ηλεκτρική ενέργεια από την υδραυλική ενέργεια του νερού που στέλνεται στους υδροστροβίλους με τη βοήθεια αγωγών. Τα δύο βασικότερα έργα του πολιτικού μηχανικού είναι η συλλογή και η παροχή του νερού, ενώ στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, ο οποίος στο μεγαλύτερο μέρος του στεγάζεται μέσα στον υδροηλεκτρικό σταθμό (ΥΗΣ), υπάγεται η διαδικασία της μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική και ηλεκτρική. Η τοποθεσία του ΥΗΣ προκύπτει μετά από μελέτη κόστους και τεχνικών χαρακτηριστικών και μπορεί να είναι υπέργειος ή υπόγειος. Στην επιλογή αυτή μεγάλη σημασία έχει ο υδροστροβίλος, αφού εξετάζονται προβλήματα σπηλαιώσης, αλλά και η μορφολογία του εδάφους. Για μεγάλα ΥΗΕ μία αναλογία κόστους εργασιών που αφορούν στα έργα του πολιτικού μηχανικού είναι 50 – 60%, του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού 30 – 40% , και περίπου ένα 10% αφιερώνεται στο κομμάτι της των μελετών.

Το **φράγμα**, η υδροληψία, η προσαγωγή και απαγωγή του νερού, καθώς και ο υδροηλεκτρικός σταθμός είναι τα έργα που αποτελούν βασικό πυλώνα των έργα του πολιτικού μηχανικού. Το φράγμα ουσιαστικά τροφοδοτεί τον αγωγό πτώσης ή προσαγωγής και ταυτόχρονα επιδιώκει τον σχηματισμό του ταμιευτήρα νερού, ο οποίος συμβάλλει, ως ένα βαθμό, στην ανεξαρτητοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από τη διακύμανση της παροχής του ποταμού. Ως συνήθως, κατασκευάζεται στην κοίτη του ποταμού και στην επιλογή της τοποθέτησής του συμβάλλει ο καθορισμός των κύριων χαρακτηριστικών του μέσα από οικονομοτεχνική μελέτη που εξετάζει διαφορετικές λύσεις. Μεγάλη σημασία στην επιλογή του έχουν η μεγάλη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, η μεγάλη υψομετρική διαφορά (υδραυλική πτώση), με το κατά το δυνατό μικρότερο κόστος, καθώς και το κόστος και η ευκολία της κατασκευής του. Η θέση του, επίσης, καθορίζει και τον τύπο του φράγματος, δηλαδή αν αυτό θα είναι βαρύτητας κατασκευασμένο από σκυρόδεμα ή χώμα και τοξωτό κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Μαζί με το φράγμα υπάρχουν και άλλα έργα που εξυπηρετούν τη λειτουργικότητα του συστήματος και συντελούν στην ασφάλειά του.

- **Υπερχειλιστής:** Σκοπό έχει τη διοχέτευση πλημμυρικής παροχής, προκειμένου να μην ξεπεραστεί η στέψη του φράγματος από την στάθμη του νερού.

- **Σήραγγα εκτροπής:** Από αυτήν γίνεται η διοχέτευση της φυσικής παροχής του ποταμού κατά την τελευταία φάση κατασκευής του φράγματος
- **Εκκενωτής πυθμένα:** Πραγματοποιείται το άδειασμα του ταμιευτήρα για λόγους συντήρησης ή ανάγκης, ενώ διοχετεύει και την απαιτούμενη παροχή για τη συντήρηση.
- **Υδροληψία:** Ονομάζεται το στόμιο εισόδου της σήραγγας ή του αγωγού προσαγωγής.

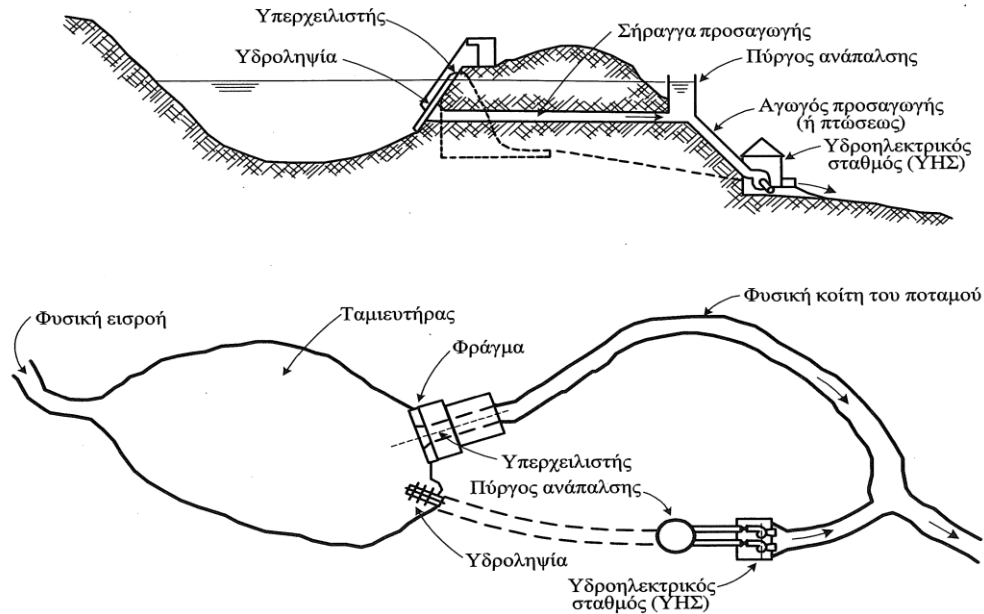
Η **σήραγγα**, ο **αγωγός προσαγωγής**, οι **βάνες** και τα **θυροφράγματα**, αποτελούν το υδραυλικό σύστημα απαγωγής και προσαγωγής της παροχής από το φράγμα στους υδροστροβίλους και μετά στην κοίτη του ποταμού. Στις περιπτώσεις που απαιτείται προστασία των αγωγών προσαγωγής λόγω υπερπιέσεων ή υποπιέσεων που δημιουργούνται εξαιτίας των μεταβατικών φαινομένων κατά την εκκίνηση ή την απόρριψη του φορτίου των υδροστροβίλων (υδραυλικό πλήγμα), στο παραπάνω σύστημα προστίθεται και ο **πύργος** ή οι **πύργοι ανάπαλσης**.

Ο αγωγός προσαγωγής είναι χαλύβδινος, η διάμετρός του προκύπτει μετά από οικονομοτεχνική μελέτη και μπορεί να μην είναι ίδιος σε όλο του την έκταση. Για παράδειγμα ένας αγωγός μεγάλου μήκους μπορεί να τροφοδοτήσει όλους τους υδροστροβίλους του υδροηλεκτρικού συστήματος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση κάθε υδροστροβίλος θα είχε τη δική του τροφοδοσία από ανεξάρτητο αγωγό. Επιπλέον, η σήραγγα και ο αγωγός προσαγωγής, μπορεί να μην περιλαμβάνονται στο σύστημα προσαγωγής του έργου, γιατί αυτό εξαρτάται από τη διαμόρφωσή του, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των υδροστροβίλων βολβοειδούς τύπου. Τα θυροφράγματα και οι βάνες διακοπής τοποθετούνται για λόγους κατασκευής και συντήρησης, πάνω και κάτω από τους υδροστροβίλους και κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του συστήματος παραμένουν ανοικτές.

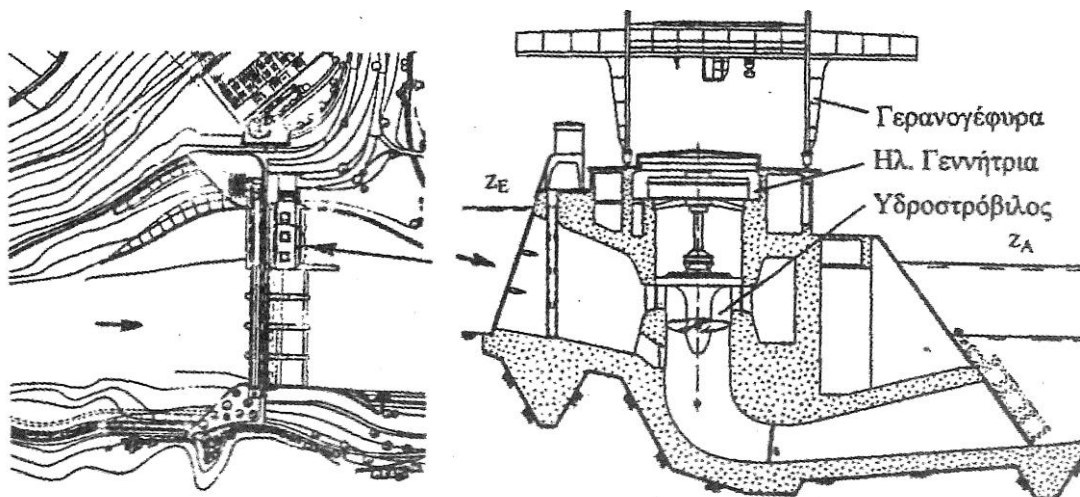
Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μία τυπική διάταξη ΥΗΕ με φράγμα που σχηματίζει ταμιευτήρα και στο σύστημα τροφοδοσίας του περιλαμβάνει τη σήραγγα προσαγωγής, τον πύργο ανάπλασης και τον αγωγό προσαγωγής.

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται διάταξη ΥΗΕ κατά το ρου του ποταμού με μικρή υδραυλική πτώση. Αυτό σημαίνει ότι κατά την κατασκευή του φράγματος υπερχειλίσης επιδιώκεται ανύψωση της ανάντι στάθμης έτσι ώστε να αξιοποιηθεί η μικρή υψομετρική διαφορά με τους υδροστροβίλους κατάλληλου τύπου.

Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός ενός ΥΗΕ μπορεί να αποτελείται από τους **υδροστροβίλους**, τις **ηλεκτρογεννήτριες**, τους **μετασχηματιστές**, καθώς και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό διακοπής και προστασίας (αποζεύκτες, διακόπτες, ασφάλειες, αυτόματοι διακόπτες ισχύος, γειωτές, κλπ). Στον βοηθητικό εξοπλισμό συγκαταλέγονται οι γερανογέφυρες, οι διάφοροι αυτοματισμοί, το σύστημα πεπιεσμένου ελέγχου και αέρα κ.α.



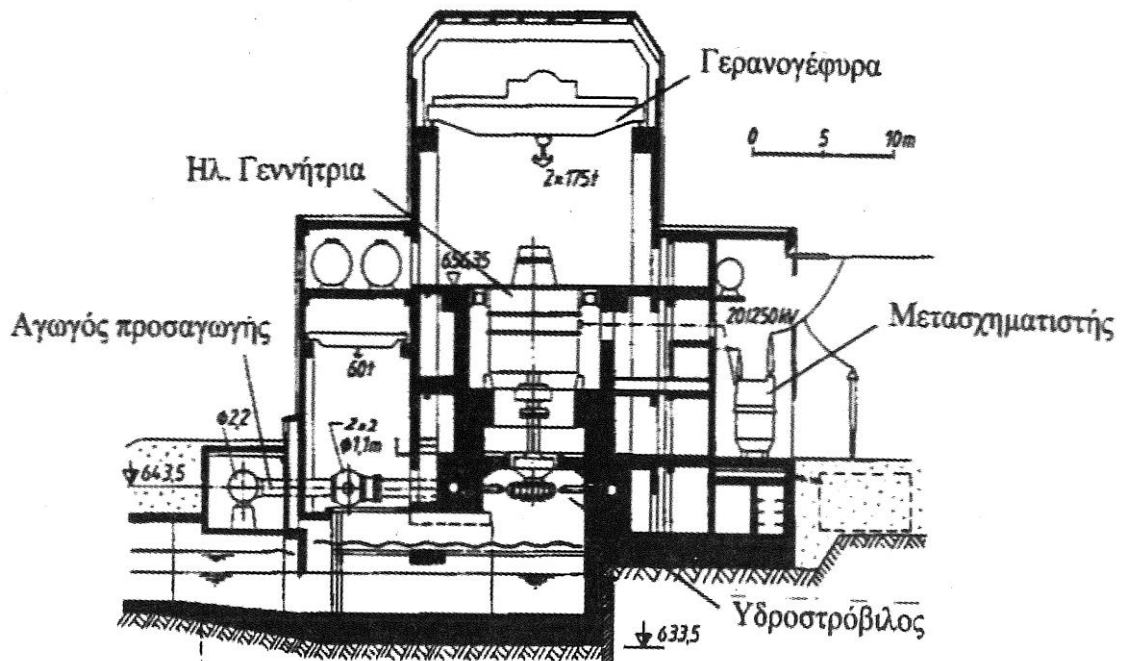
Σχήμα 1.3: Τυπική διάταξη υδροηλεκτρικού έργου [Ε8, Σχήμα 5.1]



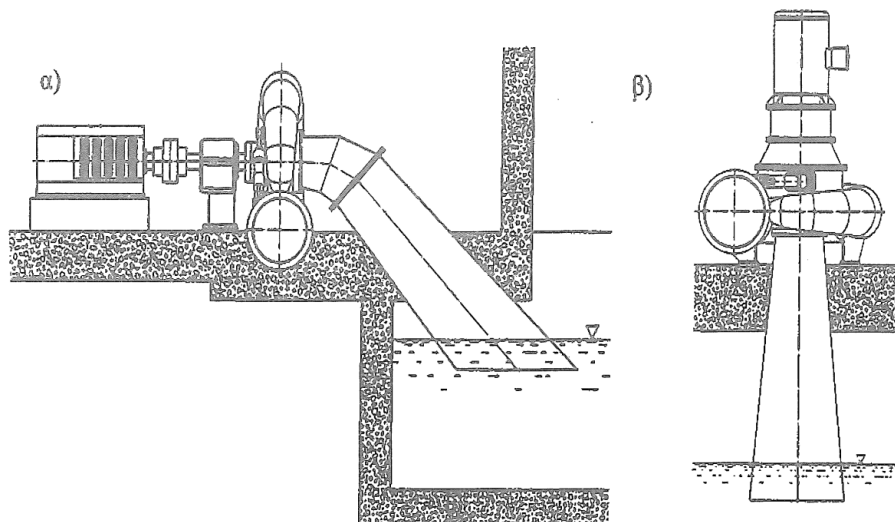
Σχήμα 1.4 Διάταξη ΥΗΕ κατά το ρου του ποταμού μικρής υδραυλικής πτώσης με κάτοψη της γενικής διάταξης στα αριστερά και τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο τύπου Kaplan στα δεξιά. [Ε8, Σχήμα 5.3]

Οι υδροστρόβιλοι αποτελούνται από δύο βασικές κατηγορίες: τους υδροστρόβιλους δράσης και τους υδροστρόβιλους αντίδρασης. Δράσης ονομάζονται αυτοί που λειτουργούν με πτώση νερού μεγάλης ταχύτητας στα πτερύγια του δρομέα κατά την οποία απαιτείται ειδικό ακροφύσιο. Λειτουργούν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε μηχανικό έργο επιτυγχάνεται μέσω του δρομέα του στροβίλου. Ο άξονας τους συνήθως είναι οριζόντιος και σε αυτήν την κατηγορία βρίσκεται ο υδροστρόβιλος PELTON. Στους στροβίλους αντίδρασης το νερό κατευθύνεται προς τα πτερύγια εφαπτομενικά, έτσι ώστε

να γλιστράει στα εσωτερικά του περυγίου και να δίνεται ώθηση με αντίδραση στα περυγία του στροβίλου. Με αυτόν τον τρόπο συνδυάζεται η εφαρμογή της ενέργειας που ασκείται από την πίεση, δηλαδή της δυναμικής, με εκείνη της ταχύτητας, δηλαδή της κινητικής. Η λειτουργία τους πραγματοποιείται με το θάλαμο γεμάτο από νερό και με πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Σε αυτήν την κατηγορία βρίσκονται οι στρόβιλοι τύπου KAPLAN και FRANCIS.



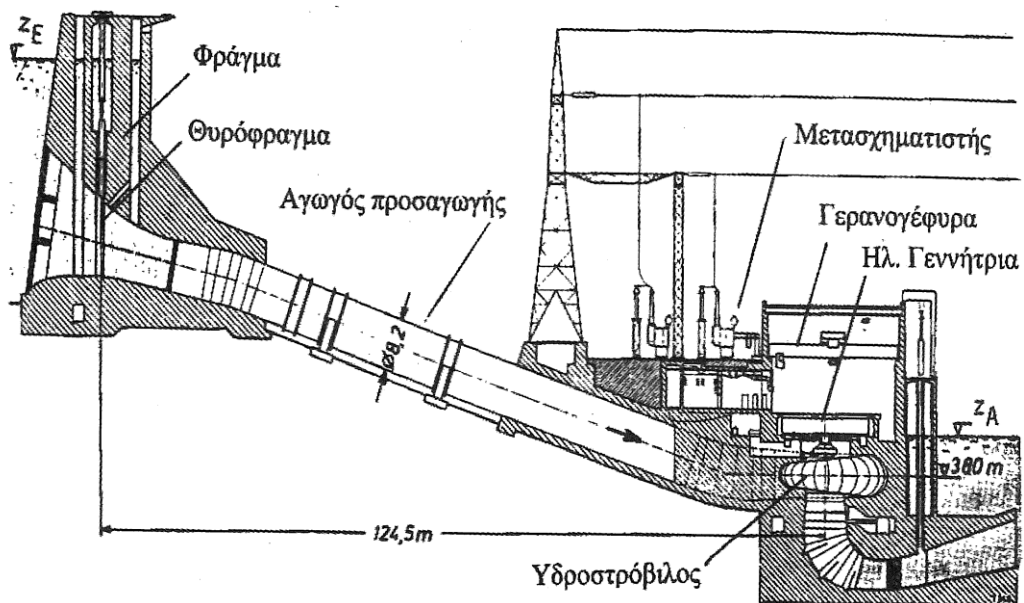
Σχήμα 1.5: Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλους τύπου Pelton, [E8, Σχήμα 5.6]



Σχήμα 1.6: Διάταξη υδροστροβίλου Francis α) οριζόντιου, β) κατακόρυφου άξονα, [E3, Σχήμα 5.31]

Ο υδροστρόβιλος είναι συζευγμένος στην ίδια άτρακτο με την ηλεκτρογεννήτρια, με εξαίρεση τις περιπτώσεις που περιλαμβάνουν γραναζωτή μετάδοση. Οι μετασχηματιστές λαμβάνουν την τάση που παράγουν οι γεννήτριες και την μετασχηματίζουν στην υψηλή του διασυνδεδεμένου δικτύου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μεταφορά της ενέργειας με τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Όλα τα παραπάνω αποτελούν μία μονάδα. Το πλήθος των μονάδων (υδροστρόβιλος – ηλεκτρογεννήτρια – μετασχηματιστής) που χρησιμοποιείται καθορίζεται μετά από εφαρμογή της οικονομοτεχνικής μελέτης και μπορεί να εξαρτάται για παράδειγμα από την προαπαιτούμενη παραγωγή, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση της παροχής, την κάλυψη των αιχμών του δικτύου κ.λπ. Ο αριθμός των μονάδων είναι από δύο και πάνω, ώστε να διασφαλίζεται η μεγαλύτερη ευελιξία του προγράμματος παραγωγής και η ευκολία στη συντήρηση, όταν αφορά μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα

Στο σχήμα 1.7 δίνεται τομή ΥΗΕ και ΥΗΣ μέσης υδραυλικής πτώσης της τάξεως 60 mΣΥ και αγωγό προσαγωγής μικρού μήκους.



Σχήμα 1.7: Τομή ΥΗΕ και ΥΗΣ μέσης υδραυλικής πτώσης (H=62mΣΥ, N=185N), [E8, Σχήμα 5.5]

1.6 Ροή ενέργειας

Ένας υδροστρόβιλος μετατρέπει την ενέργεια ενός υγρού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Σε ένα υδροηλεκτρικό έργο η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας του είναι η δυναμική του ενέργεια ίση προς την υδραυλική πτώση (υψομετρική διαφορά $h =$

$z_E - z_A$). Η παραγόμενη ενέργεια από έναν υδροηλεκτρικό σταθμό δίνεται από τη σχέση (1.1):

$$E = \gamma \cdot V \cdot (z_E - z_A) \cdot \eta \quad (1.1)$$

Όπου:

z_E : το επίπεδο στάθμης του νερού υδροληψίας (m)

z_A : το επίπεδο στάθμης νερού αγωγού φυγής (m)

$z_E - z_A$: η εκμεταλλεύσιμη υψομετρική διαφορά (m)

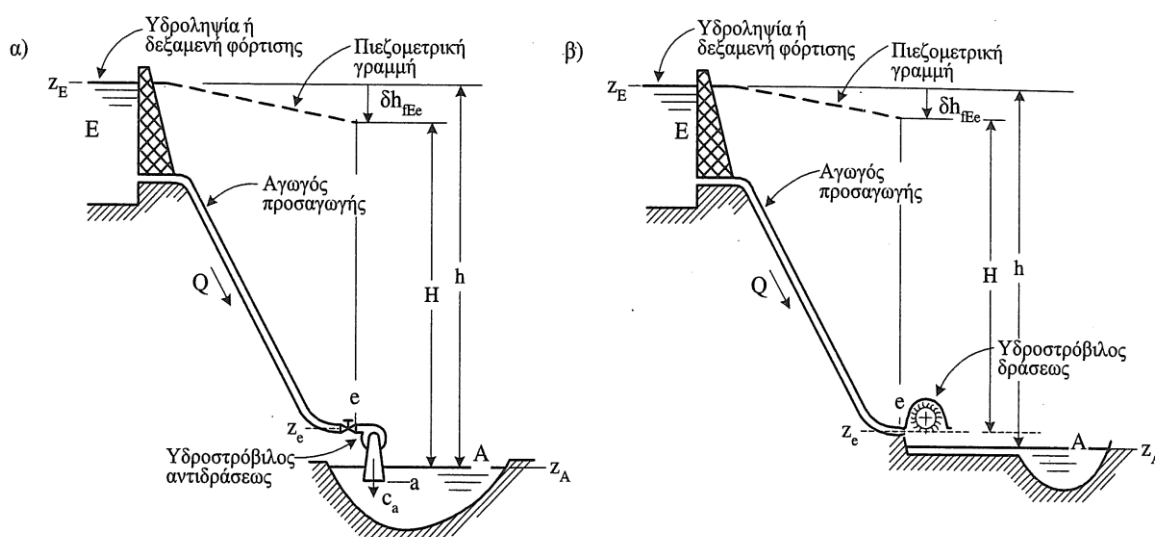
$V = qT$: ο διατιθέμενος όγκος ύδατος (m^3)

q : η παροχή ύδατος (m^3/s)

T : ο χρόνος λειτουργίας

γ : το ειδικό βάρος του νερού ($9,81 \times 10^3 \text{ Nt}/m^3$)

η : ο βαθμός απόδοσης της μονάδας



Σχήμα 1.8: Διάταξη υδροηλεκτρικής εγκατάστασης υδροστροβίλου αντιδράσεως (α) και δράσεως (β) [E8, Σχήμα 5.7]

Η σχέση (1.1) βασίζεται στον τύπο της θεωρητικής υδραυλικής ενέργειας που δίνει τη δυναμική ενέργεια μίας μάζας για υψομετρική διαφορά H ,

$$E = m \cdot g \cdot H = (\rho V) \cdot g \cdot H = (\rho g) \cdot V \cdot H = \gamma \cdot V \cdot H \quad (1.2)$$

όπου $g = 9,81 \text{ m}/s^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η σχέση (1.1) προϋποθέτει πως το ποσοστό ίσο με το βαθμό απόδοσης η της δυναμικής ενέργειας του ύδατος, έχει μετατραπεί όλο σε ηλεκτρική ενέργεια ($\eta_G=1$). Η εξίσωση (1.1) ισχύει για σταθερή παροχή q .

Η θεωρητική υδραυλική ισχύς προκύπτει ως εξής:

$$P_{th} = \frac{E}{T} = \gamma \frac{V}{T} h = \gamma Q h \quad (1.3)$$

όπου Q η παροχή όγκου νερού.

Οι υδραυλικές απώλειες επί του αγωγού προκύπτουν από την εξής σχέση:

$$\delta h_{feE} = k_e Q^2 \quad (1.4)$$

όπου k_e , ο συντελεστής υδραυλικών απωλειών που εξαρτάται από την τιμή της παροχής.

Το χρήσιμο υδραυλικό ύψος για υδροστρόβιλο αντιδράσεως είναι:

$$H = h - \delta h_{feE} - \delta h_f \quad (1.5)$$

όπου δh_f οι τοπικές υδραυλικές απώλειες, δh_{feE} οι υδραυλικές απώλειες του σωλήνα.

Το χρήσιμο υδραυλικό ύψος για υδροστρόβιλο δράσεως φαίνεται από τη σχέση:

$$H = h - \delta h_{feE} - \delta h_f - (z_e - z_A) \quad (1.6)$$

όπου z_e η στάθμη του ακροφυσίου τροφοδοσίας.

Η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς στροβίλου είναι:

$$P_i = \gamma Q H \quad (1.7)$$

Αν η_{mech} η απόδοση του στροβίλου, τότε η παραγόμενη υδραυλική ισχύς του στροβίλου είναι:

$$P = n_{mech} \gamma QH \quad (1.8)$$

Αν η_G η απόδοση της γεννήτριας, τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας είναι:

$$P_G = \eta_G \eta_{mech} \gamma QH \quad (1.9)$$

Αν η_{tr} η απόδοση του μετασχηματιστή, τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

$$P_G = \eta_{tr} \eta_G \eta_{mech} \gamma QH \quad (1.10)$$

Επιπλέον, στο σχήμα 1.8 φαίνεται η μεταβολή της γραμμής ενέργειας $(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g})$ και της πιεζομετρικής γραμμής $(z + \frac{p}{\rho g})$ του αγωγού προσαγωγής. Είναι φανερό πως η δυναμική ενέργεια του νερού στην είσοδο του αγωγού προσαγωγής, που εκφράζεται από την ενέργεια ανά μονάδα μάζας (gz_E), στη διατομή εισόδου e του υδροστροβίλου, έχει μετατραπεί κυρίως σε ενέργεια εντατικής κατάστασης ($\frac{p_e}{\rho g}$), λαμβάνοντας υπόψη πως η κινητική ενέργεια ($\frac{c_e^2}{2g}$) είναι σχετικά μικρή, αφαιρώντας τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής. Συγκεκριμένα στους υδροστροβίλους δράσεως, η ενέργεια εντατικής κατάστασης στην είσοδο του συστήματος τροφοδοσίας (είσοδος ακροφυσίου), μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, σχηματίζοντας δέσμη ταχύτητας.

1.7 Διάκριση μικρών – μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Γενικά δεν υπάρχει κάποια διάκριση ως προς το κομμάτι της λειτουργίας μεταξύ ενός μικρού και μεγάλου υδροηλεκτρικού. Η διαδικασία μετατροπής της υδραυλικής σε μηχανική και μετά σε ηλεκτρική ενέργεια είναι και στις δύο περιπτώσεις ίδια, καθώς και σχεδόν όλα τα επιμέρους τμήματα των ΥΗΕ. Ο χαρακτηρισμός «μικρό» δεν αφορά μόνο στο μέγεθος της ισχύος ή στις διαστάσεις των μονάδων ενός σταθμού, αλλά και σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών το οποίο δεν είναι πάντα μετρήσιμο.

Άτυπα λέγεται πως η ονομαστική ισχύς ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού είναι ίση η μικρότερη των 10 MW για την Ελλάδα, χωρίς αυτό να σημαίνει πως είναι το μοναδικό αποδεκτό όριο. Υπάρχουν χώρες στην Ευρώπη που γίνεται

υπέρβαση αυτού του «ορίου» , όπως π.χ. είναι η Γαλλία στα 12 MW ή η Αγγλία στα 20 MW. Υπάρχουν βέβαια και χώρες με πολύ μικρότερο όριο, όπως για παράδειγμα η Ιταλία με 3 MW και η Σουηδία με 1,5 MW. Επομένως, η διάκριση σε σχέση με το μέγεθος της ισχύος ποικίλουν από χώρα σε χώρα, σύμφωνα με την πολιτική και τις νομοθεσίες που πρέπει να τηρούνται.

Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των μικρών και μεγάλων υδροηλεκτρικών έγκεινται στη χρήση του τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και στο πρόγραμμα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας. Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός αποτελείται από τους υδροστροβίλους, τις γεννήτριες και τους ρυθμιστές στρωφών, τα οποία υπάρχουν τυποποιημένα στην αγορά από πολλούς κατασκευαστές. Αγοράζοντας τυποποιημένο εξοπλισμό, όπως συνηθίζεται στα μικρά υδροηλεκτρικά, μειώνεται σημαντικά το κόστος κατασκευής του έργου, αλλά και ο χρόνος παράδοσης τους, πράγμα αρκετά σημαντικό, δεδομένου του ότι η εκπόνηση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι αρκετά μεγάλος και ειδικά για τα μικρά δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2 έτη. Βέβαια, επειδή γίνεται χρήση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού η παραγόμενη ενέργεια ίσως να είναι κάπως μικρότερη από αυτήν που θα μπορούσε να παραχθεί με έναν ειδικά σχεδιασμένο εξοπλισμό, βασισμένο απόλυτα στις ανάγκες του συγκεκριμένου έργου.

Η διάκριση της εκμετάλλευσης αφορά κυρίως στη χρήση του ταμιευτήρα. Στα μεγάλα ΥΗΕ γίνεται χρήση ανάντι ταμιευτήρα με μεγάλη χωρητικότητα, όπου ρυθμίζεται η παραγωγή ενέργειας σύμφωνα με τις φυσικές εισροές, έτσι αξιοποιείται πλήρως η ποσότητα του εισερχόμενου νερού. Επιπλέον, επειδή τα μεγάλα ΥΗΕ χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αιχμών ζήτησης, πολλές φορές γίνεται υπερδιαστασιολογήση, άρα η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από την πραγματικά απαιτούμενη, μειώνοντας σημαντικά το συντελεστή φορτίου. Αντίθετα, αν στα μικρά ΥΗΕ χρησιμοποιηθεί ανάντι ταμιευτήρας, αυτό επιτυγχάνεται με μία δεξαμενή που εξυπηρετεί απλά τις ανάγκες υδροληψίας με μικρότερες παρεμβάσεις στο περιβάλλον και λιγότερες επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Επομένως για τη λειτουργία του υδροστροβίλου στα μικρά ΥΗΕ υπάρχουν τρεις διαφορετικές καταστάσεις:

- Όταν η φυσική ροή είναι μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου που έχει οριστεί, η μονάδα λειτουργεί κανονικά παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, αφού κάνει πλήρη αξιοποίηση της διαθέσιμης παροχής.
- Όταν η φυσική ροή είναι μικρότερη από την προκαθορισμένη, τότε η μονάδα σταματά τη λειτουργία της και η φυσική ροή υπερχειλίζει και διαφεύγει αναξιοποίητη.
- Όταν η φυσική ροή είναι μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη, τότε η μονάδα λειτουργεί με τη μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή και η περισσευούμενη υπερχειλίζει και διαφεύγει αναξιοποίητη.

Επιπλέον, τα μικρά μπορούν εύκολα να συνδυαστούν και με άλλες τοπικές δραστηριότητες, π.χ. άρδρευση, ύδρευση, και η επιβάρυνσή τους στο περιβάλλον είναι πολύ μικρότερη από αυτήν των μεγάλων, κυρίως λόγω της χρήσης

φράγματος και ταμιευτήρα στα δεύτερα. Μία ακόμη διαφορά διακρίνεται στην υδραυλική πτώση, δηλαδή την υψομετρική διαφορά από την οποία εξαρτάται άμεσα ο τύπος του υδροστροβίλου. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, μικρού ύψους όταν είναι λιγότερο από 20 m, μεσαίου όταν βρίσκεται μεταξύ των 20 m και 150 m και μεγάλου, για υδραυλικές πτώσεις άνω των 150 m.

Επιπλέον, κοστολογικά ένα μικρό έργο είναι πολύ οικονομικότερο από ένα μεγάλο, και αν υπάρχει μεγάλη υδραυλική πτώση θα υπάρχει και μεγαλύτερη επενδυτική απόδοση. Βέβαια, μεγάλες υδραυλικές πτώσεις συνήθως συναντώνται σε πιο απομακρυσμένες θέσεις, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη δαπάνη σε γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακριβώς το αντίθετο ισχύει για τα έργα μικρή υδραυλικής πτώσης, αφού έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος, αλλά μικρότερο κόστος μεταφοράς λόγω της θέσης της οποίας βρίσκονται (συνήθως πεδινές περιοχές).

1.8 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στα μικρά έργα

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς με την εκμετάλλευση υδατοπτώσεων έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας. Αρχικά, οι υδατοπτώσεις είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, χωρίς εμφανή κίνδυνο εξάντλησής τους, όπως ισχύει για τα συμβατικά καύσιμα. Κατά τη λειτουργία τους δεν αφήνουν κατάλοιπα και απόβλητα, με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον και να μην αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού των ποταμών. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται δεν έχει μεγάλες διακυμάνσεις, έτσι βοηθάει σημαντικά στην απόσβεση του έργου. Επιπλέον, το λειτουργικό κόστος ενός τέτοιου σταθμού, καθώς και το κόστος συντήρησής του είναι μικρό, δεδομένου ότι οι υδροστροβίλοι είναι αρκετά στιβαρές κατασκευές που χρειάζονται μικρή επίβλεψη και συντήρηση. Συνήθως πραγματοποιείται προληπτικός έλεγχος μετά τις 5.000 ώρες λειτουργίας, και για αυτόν το λόγο απαιτείται πολύ λίγο προσωπικό σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια του σταθμού, δηλαδή περίπου 25 άτομα στα 300MW ηλεκτρικής ενέργειας ή ένας υπάλληλος μερικής απασχόλησης για την επίβλεψη ενός μικρού ΥΗΕ. Η διάρκεια ζωής των σταθμών προβλέπεται στα 50 έτη για τους μεγάλους σταθμούς και στα 20 με 30 για τους μικρούς, η οποία μπορεί να επεκταθεί με την ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Πολλές φορές επίσης, η λειτουργία τους γίνεται συνδυαστικά και με άλλες κοινωφελείς δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα η ύδρευση, η άρδευση, η αλιεία, και επίσης κατασκευάζονται έργα υποδομής, όπως είναι οι δρόμοι και οι γέφυρες, που βοηθούν στην πρόσβαση απομακρυσμένων περιοχών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αφορά στα μεγάλα υδροηλεκτρικά με τη χρήση ταμιευτήρα για την αποθήκευση νερού. Ουσιαστικά αυτή η διάταξη δίνει τη

δυνατότητα για γρήγορη παραλαβή και απόρριψη του φορτίου, που συμβάλλει χαρακτηριστικά στην παρακολούθηση της μεταβολής της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και κατ' επέκταση στην κάλυψη των αιχμών. Αυτό το θετικό χαρακτηριστικό βασίζεται στην κατασκευή αναστρέψιμων μονάδων, οι οποίες κατά τη διάρκεια της νύχτας που υπάρχει χαμηλή ζήτηση, λειτουργούν αντλώντας νερό από τον κάτω ταμιευτήρα προς τον άνω, δηλαδή πραγματοποιείται αποταμίευση ενέργειας που καταναλώνεται στις ώρες αιχμής.

Τα μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών σταθμών αφορούν ως επί το πλείστον στα μεγάλα υδροηλεκτρικά, η χρήση φραγμάτων και ταμιευτήρων μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντολογική αλλοίωση, γι' αυτό απαιτείται σωστός χειρισμός και εκτεταμένες μελέτες πριν από οποιαδήποτε εφαρμογή. Ο χρόνος εκπόνησης ενός υδροηλεκτρικού σταθμού υπολογίζεται στα 5 με 10 έτη για τα μεγάλα και 1 με 2 έτη για τα μικρά, ενώ χρειάζεται αρκετός χρόνος και για την οικονομοτεχνική μελέτη, τη συλλογή και επεξεργασία των υδρολογικών στοιχείων που προηγείται της εφαρμογής. Επιπλέον, μπορεί να παρουσιάζονται διακυμάνσεις στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια, αφού εξαρτάται από το υδραυλικό δυναμικό που δίνεται από τα ετήσια κατακρημνίσματα (βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις). Το κόστος κατασκευής είναι μεγάλο, της τάξεως των 2.000 με 4.000 €/kW και για αυτόν το λόγο χρειάζεται μεγάλο επενδυτικό κεφάλαιο. Τέλος, επειδή αυτές οι κατασκευές απαιτούν υδατοπτώσεις με μεγάλες παροχές οι θέσεις τους είναι μακριά από την κατανάλωση, κάτι που επιβαρύνει το έργο παραπάνω κοστολογικά, λόγω των γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.9 Υδραυλική ενέργεια στον κόσμο και στην Ελλάδα

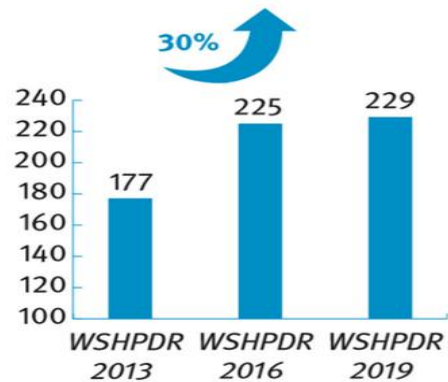
Σε παγκόσμια κλίμακα το συνολικό ποσό του νετού ισούται με το ποσό που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα από την εξατμισοδιαπνοή. Ο νετός στην ξηρά είναι μεγαλύτερος από την εξατμισοδιαπνοή, αλλά η διαφορά αυτή περιορίζεται από την εκβολή των ποταμών στους ωκεανούς. Αντίθετα στους ωκεανούς παρατηρείται ακριβώς το ανάποδο, η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη από το ποσό του νετού. Το μέσο ύψος νερού από βροχοπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ 740mm στην Ασία και την Αφρική, και 1600 mm στη Ν. Αμερική [E8].

Στην Ελλάδα λόγω της μορφολογίας της στα ορεινά και του εδάφους της υπάρχουν πολλές υδατοπτώσεις με υδραυλική ισχύ από μερικά kW και πάνω, και έχει εκτιμηθεί πως η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να φτάσει τα 3.000 GWh ετησίως. Υπάρχει γενικότερα μία μικρή προτίμηση προς τα μικρά υδροηλεκτρικά, διότι ο δείκτης ωφελιμότητας αυτών των έργων εξαρτάται από το ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση των υδατοπτώσεων, από τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, από την ευκολότερη αδειοδότηση, από την προστασία του περιβάλλοντος κ.α.

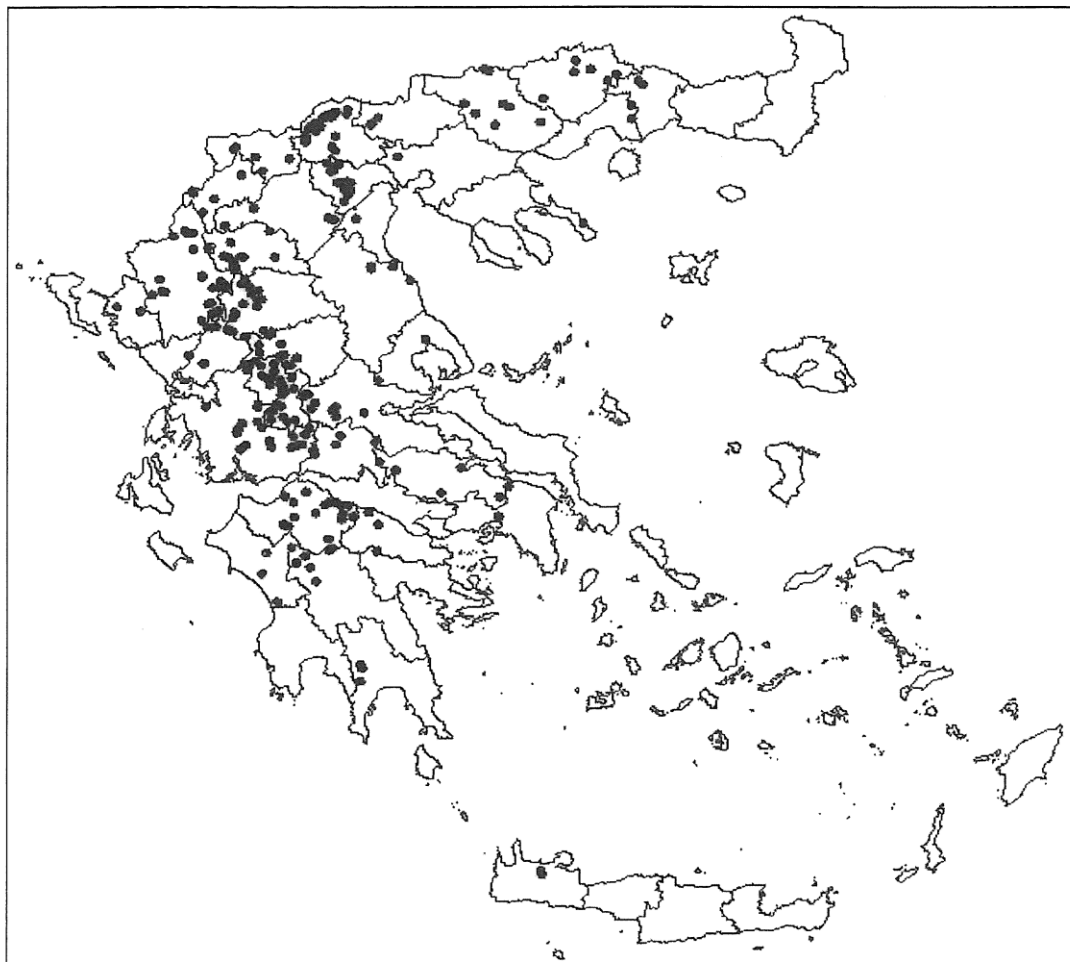
World SHP installed capacity (GW)



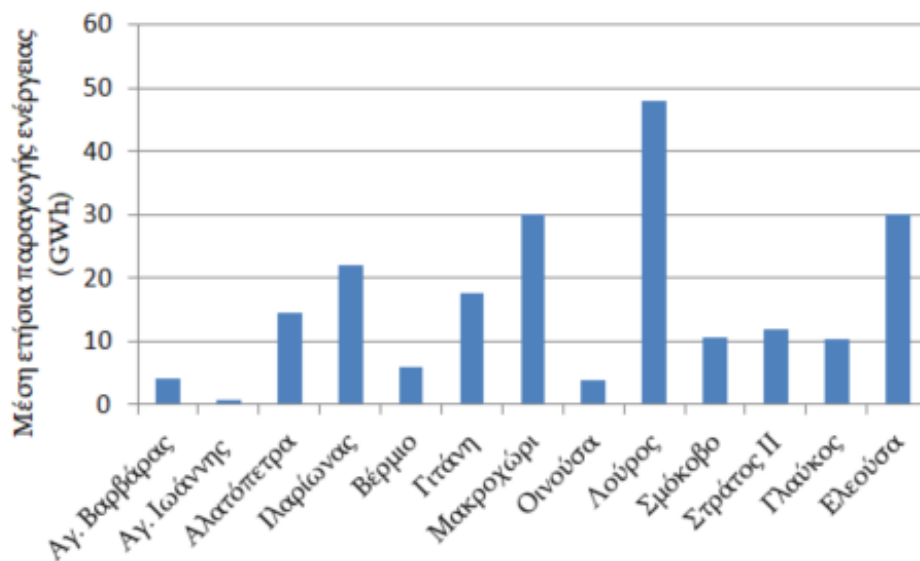
World SHP potential (GW)



Σχήμα 1.9 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά (αριστερά) και Παγκόσμιο υδροδυναμικό (δεξιά) [I11]



Σχήμα 1.10: Υδροδυναμικές θέσεις Ελλάδας [E2, Σχήμα, 3.2]



Σχήμα 1.11: Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας για διάφορα μικρά υδροηλεκτρικά [Στοιχεία από Ε16, Πίνακας 8]

1.10 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των μικρών υδροηλεκτρικών

Η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική είναι γνωστή από τα αρχαία χρόνια με τους νερόμυλους. Η τεχνολογία τους δεν είχε μεγάλη πρόοδο μέχρι την εμφάνιση των πρώτων μηχανών που χαρακτηρίστηκαν ως υδροστρόβιλοι στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Τα έργα στα οποία αξιοποιήθηκαν τότε οι υδροστρόβιλοι αφορούσαν σε έργα μικρής ισχύος, αφού η τότε υπάρχουσα τεχνολογία δεν επέτρεπε κάτι παραπάνω. Με την πάροδο των ετών σημειώθηκε αύξηση των ενεργειακών αναγκών που συμβάδισε με τα διαθέσιμα μέσα και τις τεχνολογικές προόδους με αποτέλεσμα την κατασκευή ακόμα μεγαλύτερων έργων μετατροπής υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Η ανάπτυξη στο κομμάτι της εφαρμογής του ηλεκτρισμού βοήθησε αρκετά στην αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας, αφού από τη θέση παραγωγής του ως τη θέση κατανάλωσής του ακολουθείται μία σχετικά εύκολη διαδικασία μεταφοράς. Έτσι τα έργα του νερού γίνονται «υδροηλεκτρικά», δηλαδή η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική στον υδροστρόβιλο και στην πορεία σε ηλεκτρική από την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη μαζί του. Με αυτόν τον τρόπο ο χώρος παραγωγής της μηχανικής ενέργειας αποδεσμεύτηκε από το χώρο κατανάλωσής της με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος των υδροηλεκτρικών έργων.

Με την εισαγωγή του ηλεκτρισμού στις οικίες στα τέλη τους 19^{ου} αιώνα, αρχές 20^{ου}, οι νερόμυλοι άρχισαν να αξιοποιούνται σταδιακά σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια που κάλυπτε τις ανάγκες μίας βιομηχανίας ή μίας μικρής περιοχής, μονάδες που υπήρχαν και στην Ελλάδα,

πριν την εξαγορά τους από τη ΔΕΗ μέσα στο 1954. Επειδή η ΔΕΗ είχε ήδη την αποκλειστικότητα στην παραγωγή και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη χώρα, βρέθηκε να έχει στην κατοχή πολλά μικρά υδροηλεκτρικά έργα, για τα οποία η ποιότητα και η αξιοπιστία ήταν αμφίβολη. Για αυτόν το λόγο τα περισσότερα τα έκλεισε και αποφασίστηκε να κρατηθούν όσα θεωρήθηκαν περισσότερο σημαντικά, όπως αυτό του Γλαύκου, δίνοντας μεγαλύτερη σημασία στην κατασκευή μεγάλων λιγνιτικών και μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών με μεγάλους ταμιευτήρες, όπως αυτά στο Πολύφυτο, στο Καστράκι και στα Κρεμαστά.

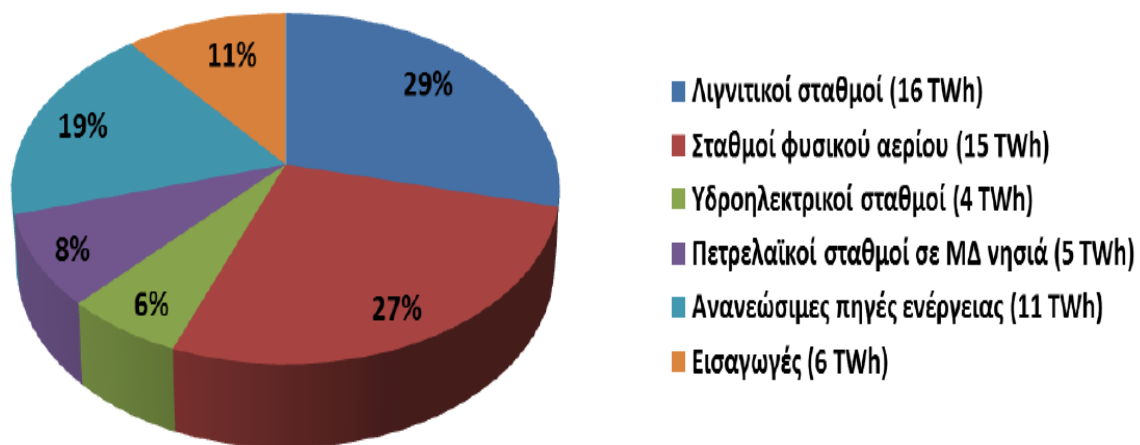
Γενικά στις άλλες ευρωπαϊκές χώρες τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα άνηκαν σε ιδιώτες και παρέμεναν στην κατοχή του μέχρι την ίδρυση εθνικών εταιρειών ηλεκτρισμού (όπως η EDF στη Γαλλία, η EDEL στην Ιταλία, κ.α.). Σε αυτές τις χώρες υπήρχε μεγάλη εξοικείωση και αποδοχή της αξιοποίησης των υδατοπτώσεων με αυτόν τον τρόπο, ενώ στην Ελλάδα λόγω της διακοπής που υπήρξε στη χρήση των νερόμυλων όσοι γεννήθηκαν μετά το 1945 δεν είχαν δει ποτέ κάποιο υδροηλεκτρικό έργο και έτσι συνέδεσαν τα υδροηλεκτρικά έργα με τη ΔΕΗ. Από το 1999 που ξεκίνησε η ουσιαστική κατασκευή ΥΗΕ από ιδιώτες, μεγάλες εργοληπτικές εταιρείες που δεν είχαν κάποια σχέση με την αξιοποιούμενη περιοχή, έως και σήμερα, οι κάτοικοι των περιοχών προς εκμετάλλευση, αντιδρούν αφού είναι έντονος ο φόβος για τον «άγνωστο» επενδυτή και για τις περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Σε αυτό το γεγονός αποδίδεται και η καθυστέρηση της Ελλάδας στην ανάπτυξη της αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας μέσω ΥΗΕ, συγκριτικά με άλλες χώρες της Ευρώπης, η δυσκολία στην ανάκτηση του χαμένου εδάφους, καθώς και οι έντονες αντιδράσεις.

Δύο με τρεις δεκαετίες μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο, ύστερα από την καταστροφή πολλών έργων υποδομής, σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτησή της ηλεκτρικής ενέργειας, υπήρξε έντονη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού, δημιουργώντας μονάδες με ισχύ κάποιων MW η κάθε μία. Γενικά από το 1980 μέχρι σήμερα υπάρχει έντονο ενδιαφέρον σε διεθνές επίπεδο για την ανάπτυξη των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών, είτε με την αξιοποίηση των νέων μικρών υδατοπτώσεων, είτε με την ανανέωση και την επανασχεδίαση των μικρών ΥΗΕ που έχουν απομείνει. Τέλος σημειώνεται μεγάλη ανάπτυξη τεχνικών εταιρειών που αναλαμβάνουν νέα υδροηλεκτρικά έργα, γεγονός που επιβεβαιώνει ακόμα πιο έντονα τη ραγδαία ανάπτυξη στη ζήτηση και αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας.

1.11 Ενεργειακή συνεισφορά μικρών υδροηλεκτρικών έργων

Η εκτιμώμενη ενεργειακή συνεισφορά από την αξιοποίηση των μικρών υδατοπτώσεων στην Ελλάδα, ο βαθμός ανάπτυξης τους και η συνεισφορά τους σε άλλες χώρες θα εξεταστούν σε αυτήν την παράγραφο. Γενικά δεν έχει πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα μία ολοκληρωμένη μελέτη για όλες τις πιθανές θέσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν, ώστε να λειτουργήσουν μικρά υδροηλεκτρικά και επίσης οι θέσεις που μπορεί να έχουν καταγραφεί δεν έχουν ακόμα αξιοποιηθεί όλες.

Το 2017 η κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα συνολικά ήταν 56,9 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, εκ των οποίων το 29% καλύπτεται από λιγνιτικούς σταθμούς και το 27% από σταθμούς φυσικού αερίου, το 6% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, το 8% από πετρελαϊκούς σταθμούς σε μη διασυνδεδεμένα νησιά, το 19% από ΑΠΕ και το 11% από εισαγωγές .



Σχήμα 1.12 Κατανομή ηλεκτρικής ενέργεια στην Ελλάδα το 2017 [E17]

Μορφολογικά στην Ελλάδα ευνοείται η δημιουργία ταμιευτήρων με μεγάλη ρυθμιστική ικανότητα, ενώ λόγω της έλλειψης μεγάλων ποταμών με συνεχείς και ομοιόμορφες παροχές δεν επιτρέπεται εύκολα η κατασκευή ΥΗΕ βάσεως. Για τους συγκεκριμένους λόγους στην Ελλάδα η αξιοποίηση των ΥΗΕ γίνεται κυρίως για την κάλυψη αιχμών του δικτύου. Αντιθέτως, η ορεινή επιφανειακή διαμόρφωση της, βοηθά στον σχηματισμό μικρών υδροηλεκτρικών με μεγάλη διαθέσιμη υδραυλική πτώση.

Όπως προαναφέρθηκε δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα καταγραφή και αξιολόγηση όλων των μικρών υδατοπτώσεων στην Ελλάδα παρά τις προσπάθειες που μπορεί να έλαβαν χώρα στο παρελθόν, εξαιτίας του μεγάλου πλήθος των θέσεων σε συνδυασμό με την έλλειψη συστηματικών υδρολογικών στοιχείων. Η μοναδική περιοχή στην Ελλάδα στην οποία έγινε συνολικός έλεγχος του υδροηλεκτρικού δυναμικού με οικονομοτεχνική μελέτη είναι η

Κρήτη. Αυτό πραγματοποιήθηκε χάριν στις συστηματικές μετρήσεις σε βάθος 25ετίας. Για τις υπόλοιπα γεωγραφικά διαμερίσματα της Ελλάδας, η εκτίμηση του υδροδυναμικού προκύπτει μέσα από θεωρητικούς υπολογισμούς που βασίζονται σε τοπογραφικούς χάρτες, σε χάρτες ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, σε στοιχεία που έχουν προκύψει από ήδη υπάρχοντες ΥΗΣ, καθώς και σε διορθωτικούς συντελεστές από την αξιολόγηση σταθμών που λειτουργούν στην υπόλοιπη Ευρώπη.

Σταθμός	Περιοχή	Έτος	Ισχύς	Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)	Στοιχεία έργου	Περιβαλλοντικά & Κοινωνικά Οφέλη
Αγ. Βαρβάρας	Βέροια	2008	0,92	4	1 μονάδα Kaplan S-type οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 4000 tn ετησίως - Δημιουργία υδροβιοτόπου στην περιοχή του φράγματος.
Αγ. Ιωάννης	Σέρρες	1931	0,7	0,71	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 710 tn ετησίως.
Αλατόπετρα	Γρεβενά	2013	2,43	14,5	2 μονάδες - 1 Francis οριζοντίου άξονα & 1 Pelton κάθετου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 14.500 tn ετησίως.
Παρίωνα	Κοζάνη	2014	4,2	22	1 μονάδα Francis οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 22.000 tn ετησίως.
Βέρμιο	Βέροια	1929	1,8	6	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 6.000 tn ετησίως.
Γιτάνη	Σαγιάδα Θεσπρωτίας	2006	2,06	17,5	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 2,1 MW)	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 17.500 tn ετησίως.
Μακροχώρι	Απόστολου Παύλου Ημαθίας	1992	10,8	30	3 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (3 x 3,6 MW)	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 30.000 tn ετησίως.
Οινούσα	Σερρών	2004	1,5	3,8	1 μονάδα Pelton οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 3.800 tn ετησίως.
Λούρος	Άρτα	1954	10,3	48	3 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 48.000 tn ετησίως.
Σμόκοβο	Καρδίτσα	2008	10,4	10,7	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 10.700 tn ετησίως.
Στράτος II	Νεάπολη Αιτωλοακαρνανίας	1989	6,2	12	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 3,15 MW)	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 12.000 tn ετησίως. Τροφοδότηση αναρρυθμιστικής λίμνης με την οποία γίνονται απολήψεις για άρδευση περιοχής.
Γλαύκος	Πάτρα	1992	3,7	10,3	2 μονάδες οριζοντίου άξονα (1 Francis 2,3 MW & 1 Pelton - 1,4 MW)	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 10.300 tn ετησίως. Από τον ποταμό Γλαύκο καλύπτονται οι ανάγκες ύδρευσης και άρδευσης της Πάτρας.
Ελεούσα	Χαλκηδόνα Θεσσαλονίκης	2008	3,23	30	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 3,3 MW)	Αποφυγή εκπομπής ρύπων CO ₂ κατά 30.000 tn ετησίως.

Πίνακας 1.1 Στοιχεία σημαντικότερων μικρών υδροηλεκτρικών στην Ελλάδα [E16, Πίνακας 8]

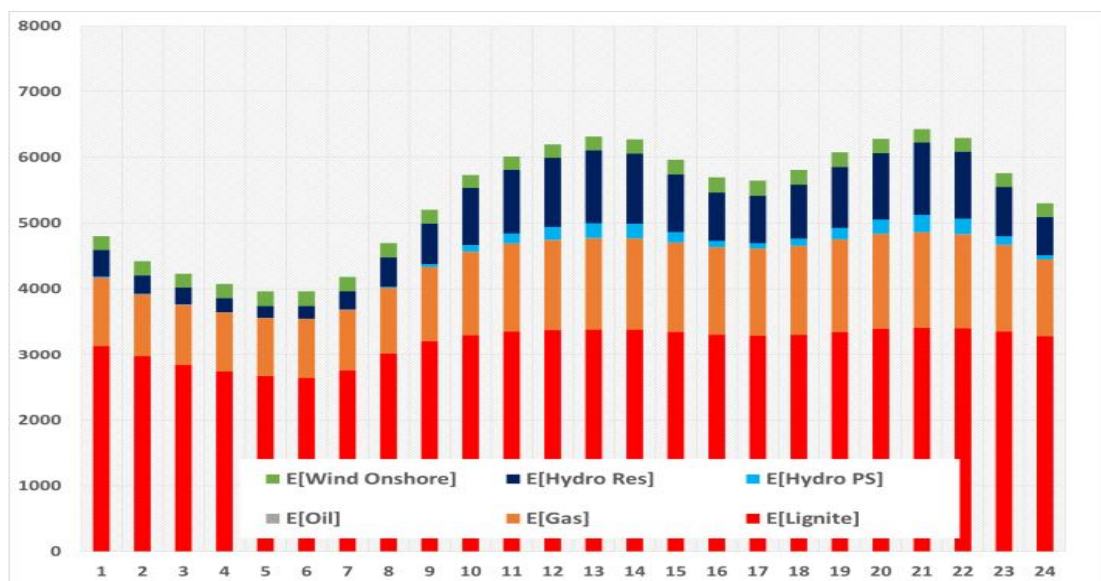
1.12 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βελτίωση της ανθρώπινης ευεξίας σε συνδυασμό με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας επιτάχυναν την αύξηση των ανθρώπινων αναγκών και κατ' επέκταση την αύξηση της ενεργειακής απαίτησης [E2]. Γενικότερα η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι συνδεδεμένη με την ενεργειακή κατανάλωση, σε καθημερινό επίπεδο και συγκεκριμένα στην πιο διαδεδομένη μορφή της που είναι η καύση ορυκτών καυσίμων. Η καύση ορυκτών καυσίμων όπως είναι το πετρέλαιο, το κάρβουνο και το φυσικό αέριο οδηγούν στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που αντιστοιχεί στο 10% των συνολικών εκπομπών αερίων στην Ευρώπη [18], αλλά και του μεθανίου (CH₄), το οποίο είναι ακόμα ισχυρότερο αέριο και ενισχύει το σχηματισμό όζοντος, ενός φαινομένου που προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας και συμβάλλει τόσο στην επιτάχυνση της κλιματικής αλλαγής, όσο και στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Η συνεχόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων είναι συνυφασμένη με την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται για την κοινωνική ευημερία και την οικονομική ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών [E3], δημιουργώντας όμως πολλά προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο με δραματικές κλιματικές αλλαγές. Οι χώρες που πλήττονται σημαντικά από μεγάλες ποσότητες εκπομπών του CO₂ είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ και ακολουθώντας η Ευρώπη και η Ινδία [E2]. Έχει διαπιστωθεί πως οι συνεχόμενες εκπομπές CO₂ θα μειωθούν σημαντικά με την αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σταθμούς παραγωγής [E4,E7,E9].

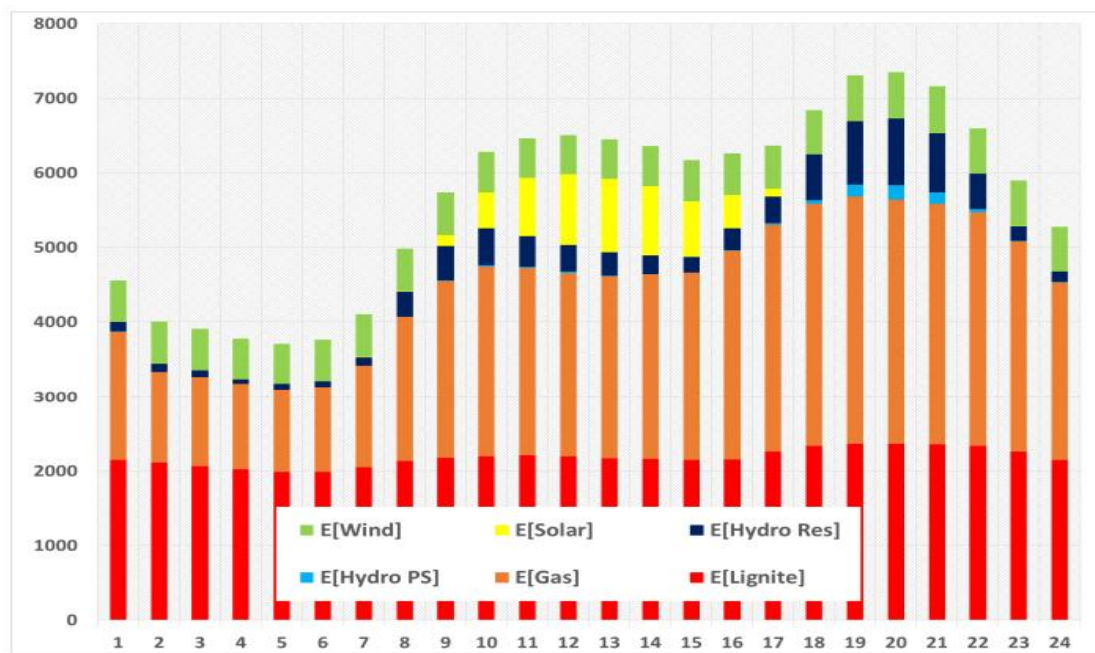
Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση έχει αυξηθεί από τα 9.208 δισεκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (toe) το 1980 σε 14.475 Mtoe το 2008, με αναμονή αύξησης έως 16.785 Mtoe μέσα στα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, ενώ η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας έχει αυξηθεί από 909 Mtoe το 1980 σε 1552 Mtoe το 2008 (71% αύξηση), σαν ποσοστό της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσής βρίσκεται μόλις στο 10 – 11%. Το 2010 η συνολική συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είχε το 16,6% της παγκόσμιας κατανάλωσης, ενώ αναμένεται να φτάσει το 47,7% έως το 2040 [E5]. Είναι εμφανές πως με τη συνεχή αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας δημιουργείται εξάντληση των συμβατικών πόρων, μειώνοντας σημαντικά την παραγωγή ενέργειας μέσω αυτών [E9,E7], κάτι που συμβάλλει επιπλέον στην αναζήτηση και μελέτη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές. Από την άλλη οι ανανεώσιμες πηγές όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό, η γεωθερμία είναι άφθονα, ανεξάντλητα, παρέχονται δωρεάν από το περιβάλλον και δεν το επιβαρύνουν [E6].

Η χωρική ανάλυση της μεταφοράς και κατανάλωσης της ενέργειας [E8], καθώς και της ζήτησης για ηλεκτρισμό μέσω οικονομικών παραμέτρων, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την αποτελεσματικότητα στη στρατηγική διαχείρισής της [E9]. Σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή ανάπτυξη έχει και η επιλογή της τοποθεσίας ενός σταθμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο σχεδιασμό του ηλεκτρικού δικτύου, όπου καλό είναι να αποφεύγονται τα στενά

όρια της ανάλυσης βασισμένα σε μονοσήμαντα κριτήρια, όπως είναι η επιθυμητή μελλοντική ζήτηση και να εξετάζονται επιπρόσθετα κριτήρια που αφορούν στο περιβάλλον, την κοινωνία, την λειτουργία του σταθμού, κ.α.



2010(α)

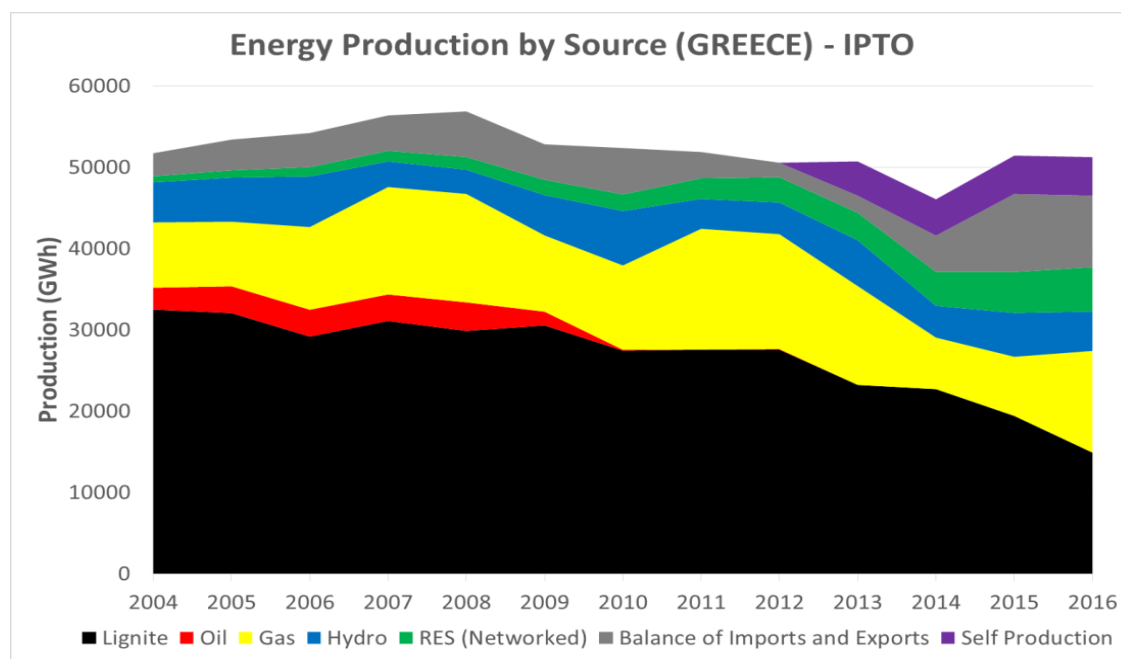


2018(β)

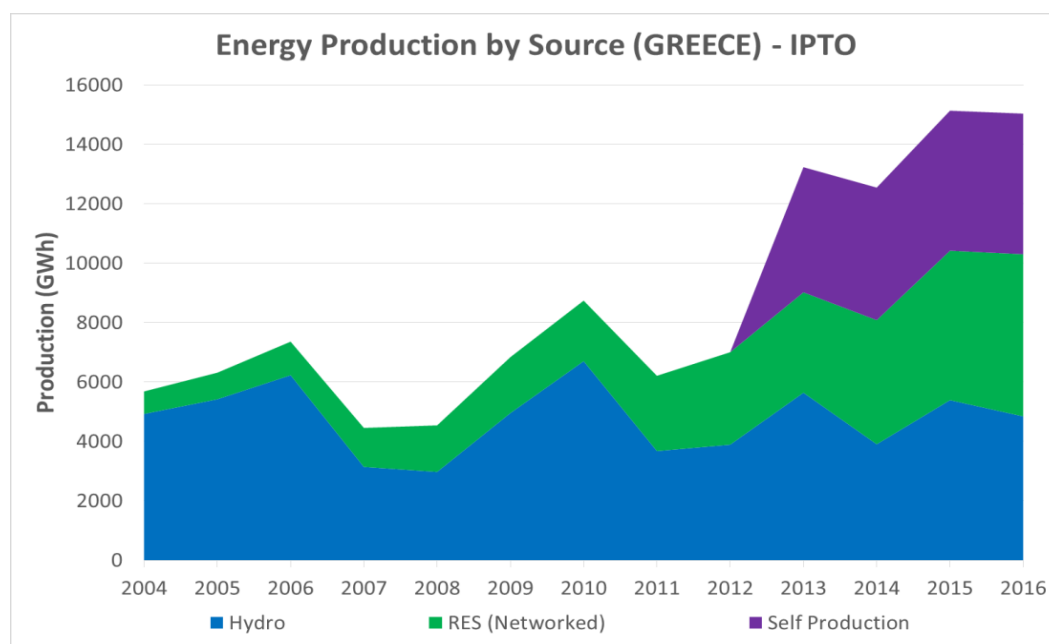
Σχήμα 1.13 Σύγκριση ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα από συμβατικούς σταθμούς, και σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταξύ 10ετίας. (2010 [α] 2018 [β]) [Ξ27, pp. 10]

Ο αριθμός, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του σταθμού εξαρτώνται από διάφορα θέματα και γνωρίσματα που επιδέχονται ανάλυση. Κάθε περιοχή

διαφέρει από μία άλλη, όχι μόνο στα γεωγραφικά της χαρακτηριστικά, αλλά και στα κοινωνικά και οικονομικά [E10].



Σχήμα 1.14 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στο διασυνδεδεμένο Σύστημα – Μείγμα Καυσίμου στην Ελλάδα την περίοδο 2004 – 2016 με στοιχεία από ΑΔΜΗΕ [E11, Εικόνα 2].



Σχήμα 1.15 Παραγωγή Υδροηλεκτρικών, Ανανεώσιμων Πηγών και Αυτοπαραγωγής στο διασυνδεδεμένο Σύστημα – Μείγμα Καυσίμου κατά την περίοδο 2004 – 2016 με στοιχεία από ΑΔΜΗΕ – ΛΑΓΗΕ [E11, Εικόνα 3]

Από όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το νερό είναι το πιο «επιθυμητό», αφού θεωρείται μία καθαρή πηγή, χωρίς να αφήνει υπολείμματα στο περιβάλλον, είναι αποδοτικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να απαιτείται κάποια ιδιαίτερη τεχνολογία. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι πιο αποτελεσματικοί σε σχέση με άλλους τύπους σταθμών παραγωγής, γιατί παρόλο το υψηλό κόστος κατασκευής τους, μόλις τεθούν σε λειτουργία, έχουν ελάχιστα λειτουργικά έξοδα και αρκετά χαμηλό κόστος συντήρησης [E3, E8, E13]. Γενικά οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διαχωρίζονται σε μικρούς και μεγάλους βάσει των ισχύων τους, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει κάποιον απόλυτο αριθμό σε παγκόσμια κλίμακα, διότι κάθε χώρα πορεύεται σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις νομοθεσίες της. Επιπλέον, υπάρχει διάκριση σε αυτούς με χρήση ταμιευτήρα, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγάλα υδροηλεκτρικά, και σε αυτούς που η λειτουργία τους βασίζεται στη ροή του ποταμού, όπου συνήθως είναι οι μικροί υδροηλεκτρικοί. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα έναντι των μεγάλων, αφού δεν οδηγούν σε αντιδράσεις από την πλευρά των κατοίκων της εκάστοτε περιοχής και έχουν αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, γιατί η λειτουργία τους βασίζεται στη στιγμιαία ροή του νερού που οδηγείται στους στροβίλους [E6, E3, E8]. Ωστόσο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι εντόνως στοχαστική.

Η υδραυλική ενέργεια είναι μία από τις σημαντικότερες αλλά και πιο «ώριμες» μορφές ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού σε παγκόσμια κλίμακα [E24] και καταλαμβάνει το 19% της ενεργειακής κατανάλωσης του πλανήτη [E10]. Τα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντολογικά της πλεονεκτήματα, την κάνουν σημαντικό παράγοντα του μελλοντικού ενεργειακού μείγματος, ιδιαίτερα στις πιο ανεπτυγμένες χώρες [E14]. Κατά το [E15] θεωρείται η πιο σημαντική, αφού αποτελεί το 97% του ηλεκτρισμού που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι γεγονός ότι κατά τον κόσμο πολλά χωριά τροφοδοτούνται μόνο από υδροηλεκτρικά συστήματα [E16]. Μικρά υδροηλεκτρικά ξεκίνησαν να εμφανίζονται σε παγκόσμιο επίπεδο από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, πολλά εκ των οποίων με την πάροδο των ετών εγκαταλείφθηκαν [E11]. Σύμφωνα με το [E14], το εφικτό υδροηλεκτρικό δυναμικό που υπολογίζεται παγκοσμίως είναι κοντά στις 15.000 TWh/year, ιδιαίτερα στις χώρες, όπου υπάρχει η ανάγκη για εφαρμογή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, προκειμένου να αναπτυχθούν σε οικονομικό, αλλά και κοινωνικό επίπεδο. Το υδροηλεκτρικό δυναμικό της Ευρώπης υπολογίζεται στις 1.021 TWh/year, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς από μετρήσεις που υλοποιήθηκαν το 2009 [E17] προσδιορίζεται στις 338 TWh/year. Οι ευρωπαϊκές χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή κατά τα έτη 1995 – 2011 σύμφωνα με το [E18] ήταν:

- Η Νορβηγία με μέσο όρο τις 120 TWh, που αποτελούν το 21,81% της Ευρώπης και το 3,54% παγκοσμίως.
- Η Σουηδία με μέσο όρο τις 66 TWh, που αποτελούν το 12,03% της Ευρώπης και το 1,95% παγκοσμίως

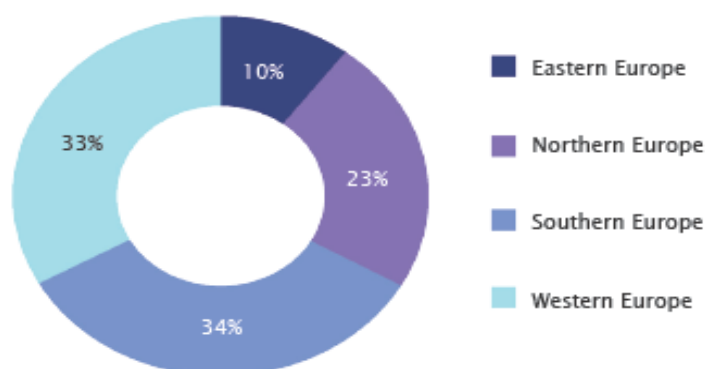
- Η Γαλλία με μέσο όρο τις 61TWh, που αποτελούν το 11,08% της Ευρώπης και το 1,89% παγκοσμίως.

Στην Ευρώπη έχει αξιοποιηθεί περίπου το 75% του υδροδυναμικού της, κάτι που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την Αφρική που υπολογίζεται πως βρίσκεται μόλις στο 7% [E19]. Αυτό επιβεβαιώνει ακόμα μία φορά πως για τις πιο ανεπτυγμένες χώρες η επιλογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η χρήση της τεχνολογίας είναι πολύ πιο εύκολη.

Συνήθως η κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών σε μικρά και μεγάλα, όπως έχει προαναφερθεί, διαφέρει από χώρα σε χώρα σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις νομοθεσίες που πρέπει να ακολουθηθούν. Για παράδειγμα στην Ελλάδα είναι κάτω από 10 MW, ενώ στην Ινδία ή στην Κίνα κάτω από 25MW [E20]. Στον πίνακα 1.2 φαίνεται η κατηγοριοποίηση των μικρών υδροηλεκτρικών σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Γενικότερα οι διεθνείς οργανισμοί επιλέγουν το όριο των 10MW ή και λιγότερο για τα μικρά υδροηλεκτρικά και των 5kW για τα πολύ μικρά. [E21,E22]

Installed Capacity (MW)	Countries	Organizations
≤10	Γαλλία, Νορβηγία, Ν. Αφρική, Τσεχία, Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα	International Energy Agency, World Commission on Dams, ESHA (European Small Hydropower Association), IEA Small Hydro
≤15	Σουηδία, Ηνωμένο Βασίλειο	
≤20	Ευρώπη	
≤25	Ινδία	
≤30	Βραζιλία	
≤50	Νέα Ζηλανδία, Φιλιππίνες	
≤100	ΗΠΑ	

Πίνακας 1.2: Διάκριση μικρών υδροηλεκτρικών βάσει της εγκατεστημένης ισχύος σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. [E12, Table 1]



Σχήμα 1.16 Εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά στην Ευρώπη [E60, Figure 53]

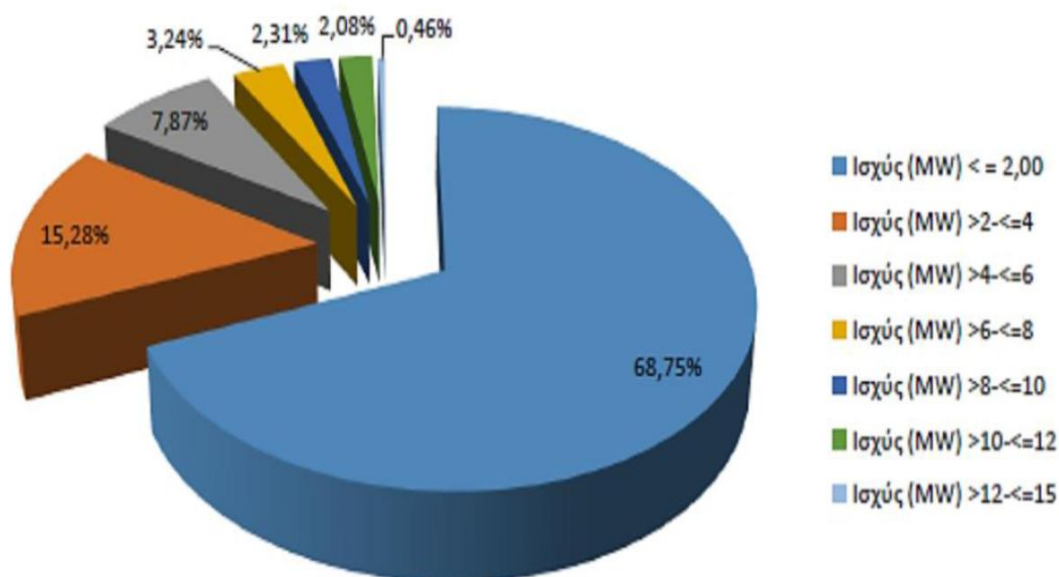
Στα τέλη του 2015 η Ελλάδα είχε συνολικά εγκατεστημένη ισχύς 3.395 MW, εκ των οποίων τα 2.474 MW αντιστοιχούν σε συμβατικά υδροηλεκτρικά, τα 699 MW σε αντλησιοταμιευτικά και τα 223 MW σε μικρά, με συνολικό ωφέλιμο όγκο ταμιευτήρων περίπου στα 5,7 δις m³. Η μέση ετήσια παραγωγή είναι στα 5.3 TWh και εκτιμάται πως ως το 2040 η εγκατεστημένη ισχύς θα φτάσει στα 5,6 GW στο ευμενές σενάριο ή 4,3 GW στο δυσμενές (από τα 3,4 GW που είναι περίπου τα τελευταία χρόνια), με μέση ετήσια παραγωγή στο ευμενές σενάριο τις 10 TWh και στο δυσμενές σενάριο τις 6,6 TWh (συνολικά από υδροηλεκτρικούς σταθμούς σε όλη τη χώρα), καθώς και ωφέλιμο όγκο ταμιευτήρων στα 7.9 δις m³. Συνδυαστικά με την εκτίμηση ζήτησης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς εκτιμάται πως θα μπορεί να καλύψει από 9,4% έως το 17,4% της συνολικής ζήτησης ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα έναντι του 9,2% κατά την περίοδο 1990 – 2015 [E11].



Σχήμα 1.17 Εγκατεστημένη ισχύς από μικρά υδροηλεκτρικά & θεωρητικό υδροδυναμικό στην Ελλάδα [E61, Figure 2]

Περιφέρεια	Ποσότητα	Ποσοστό	Ισχύς (MW)
Κεν. Μακεδονίας	90	20,83%	123,93
Δυτ. Μακεδονίας	34	7,87%	91,69
Ανατ. Μακεδονίας & Θράκης	23	5,32%	56,77
Ηπείρου	67	15,52%	215,49
Δυτικής Ελλάδος	64	14,82%	154,33
Θεσσαλίας	59	13,66%	119,65
Στερεάς Ελλάδος	77	17,82%	171,31
Αττικής	2	0,46%	2,13
Πελοποννήσου	14	3,24%	39,18
Κρήτης	2	0,46%	0,60
Σύνολο	432	100,00%	975,08

Πίνακας 1.3: Ισχύουσες άδειες Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων <15MW έως το 2016. [E16, Πίνακας 6]

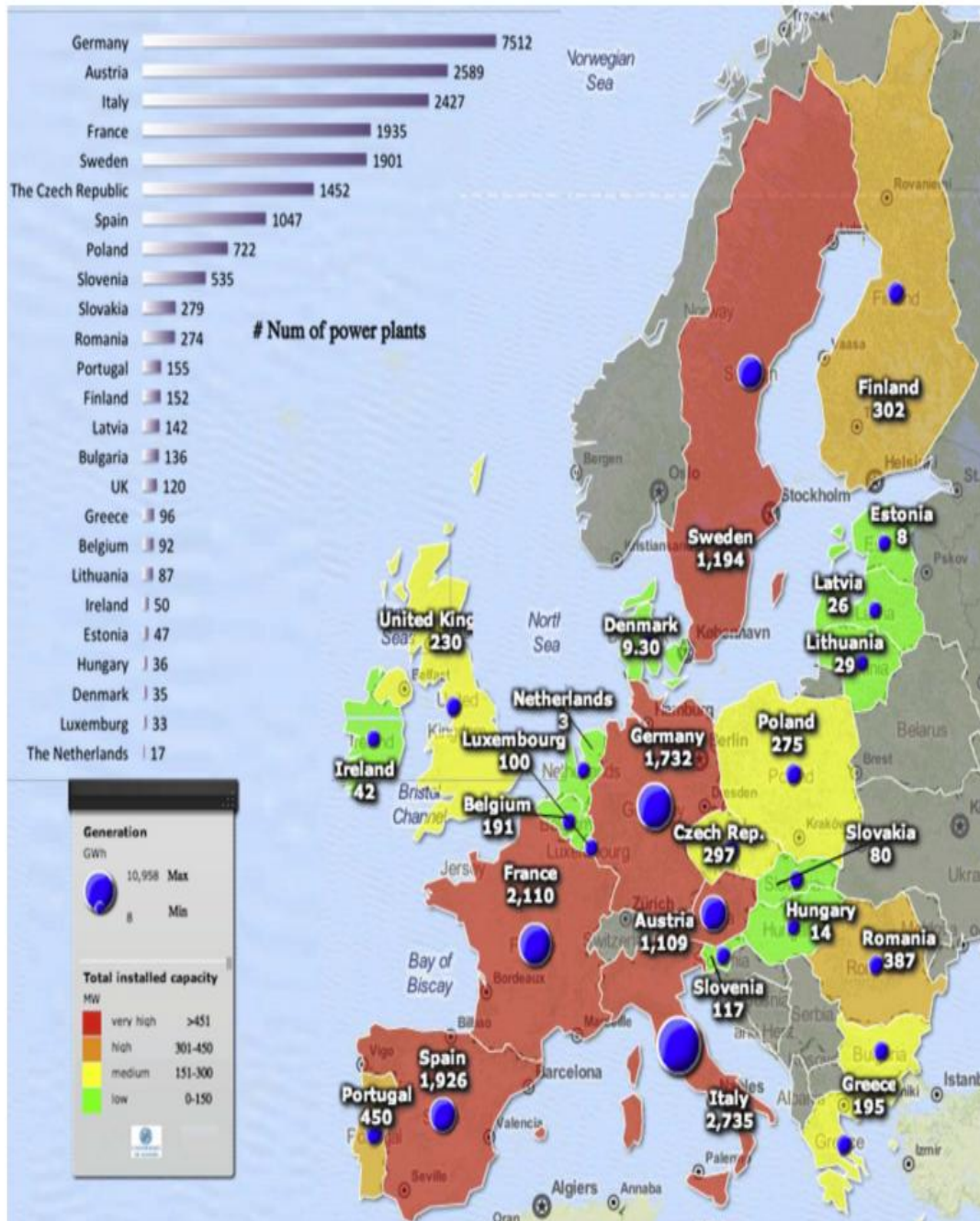


Σχήμα 1.18 Κατανομή Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων <15MW ανά εγκατεστημένη ισχύ [Ε16, Σχήμα 3]

Η συνεισφορά των μικρών υδροηλεκτρικών στην παγκόσμια ηλεκτρική ισχύ είναι πάνω κάτω ίδια με αυτήν των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών (1 – 2% της συνολικής ισχύος) υπολογιζόμενη στα 47 GW, εκ των οποίων το 53% εντοπίζεται κυρίως στις πιο ανεπτυγμένες χώρες[Ε23]. Έχουν εξαιρετικά μεγάλη σημασία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένου του μικρού χρόνου αποπεράτωσης της κατασκευής τους και της χαμηλής συντήρησης του συγκριτικά με τα μεγάλα υδροηλεκτρικά [Ε25].

Κατά το [Ε26] με δεδομένα του 2010 η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς που βρίσκεται στην Ευρώπη είναι συγκεντρωμένη κυρίως σε έξι χώρες. Σύμφωνα με το πλήθος των εγκαταστάσεων την πρωτιά έχει η Γερμανία με 7.512 μονάδες, ακολουθώντας η Αυστρία με 2.589 μονάδες και η Ιταλία με 2.427 μονάδες. Η χώρα με τη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μικρά υδροηλεκτρικά είναι η Ιταλία με 2.751 GWh, αξιοποιώντας μόλις το 21% της εγκατεστημένης ισχύος της, ακολουθώντας η Ισπανία (15,5%), η Γερμανία (14%), η Αυστρία (9,4%), η Σουηδία (7,7%) και η Γαλλία (7,5%).

Η βασική αρχή των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας του νερού, μετατρέποντας την σε μηχανική μέσω των στροβίλων και μετά σε ηλεκτρική με τη χρήση γεννητριών. Η λειτουργία τους πρέπει να είναι οικονομική, αξιόπιστη, να παράγει τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια με διάφορες βελτιστοποιήσεις της ενεργειακής απόδοσης, της παραγωγής και της οικονομικής αποδοτικότητας. Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας μπορούν να βοηθήσουν στο βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία ενός «κατά το ρου του ποταμού» υδροηλεκτρικό σταθμό [Ε6, Ε28, Ε29, Ε3, Ε8].



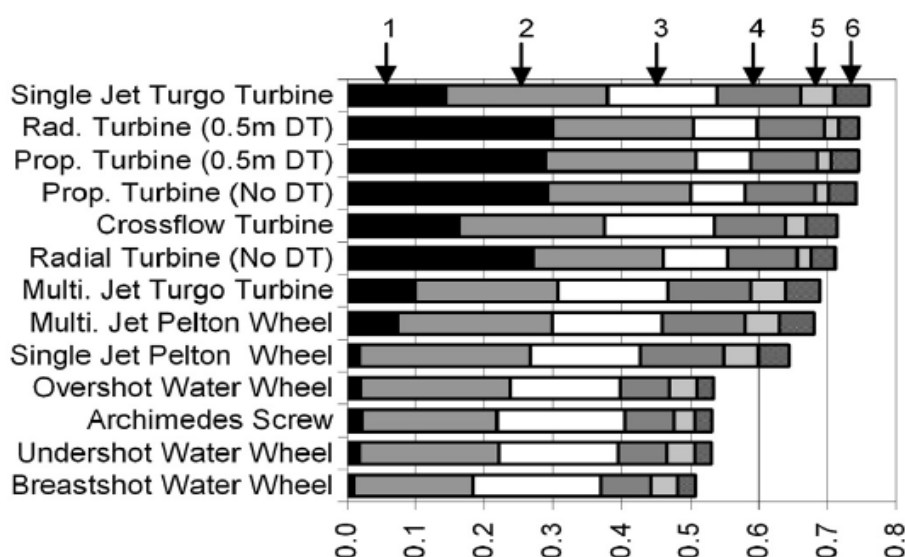
Σχήμα 1.19: Ευρωπαϊκός χάρτης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και πλήθος εγκατεστημένων μονάδων για μικρά υδροηλεκτρικά [Ξ12, Fig. 1].

Κατά και καιρούς έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες, σχετικά με τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών που βοηθούν στη βιωσιμότητα τους και στην ομαλή λειτουργία τους με τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση και το μικρότερο κατά το δυνατό κόστος.

- Τεχνική ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (multi-criterion decision – making technique MCDA) για τη μείωση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων της ανάπτυξης και λειτουργίας των μικρών

υδροηλεκτρικών. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης τεχνικής έδειξαν ότι μειώνοντας την απορροή θα προστατεύονταν το περιβάλλον και οι κλιματικές αλλαγές [Ε6,Ε52].

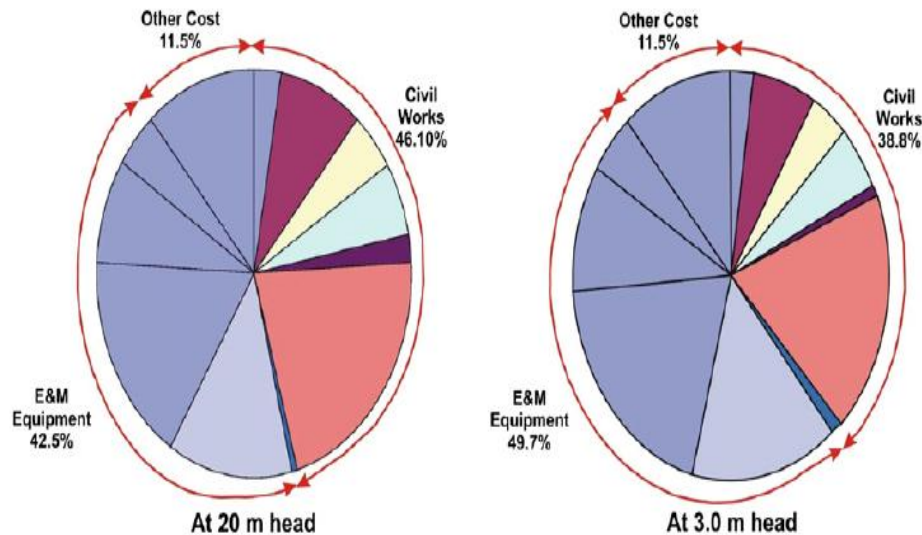
- Ανάπτυξη νέων εργαλείων προσομοίωσης για «κατά το ρου του ποταμού» μικρά υδροηλεκτρικά, αλλάζοντας τις ρυθμίσεις παραμέτρων και επιτυγχάνοντας την καλή συσχέτιση μεταξύ του εξεταζόμενου μοντέλου με τα δεδομένα του πραγματικού σταθμού [Ε30].
- Βέλτιστος σχεδιασμός μικρών υδροηλεκτρικών «κατά το ρου του ποταμού» με εξέταση διαφορετικών στροβίλων και σχεδιασμό της καλύτερης εγκατάστασης για οικονομική βιωσιμότητα του σταθμού [Ε31].
- Για καλύτερη παραμετροποίηση, εφαρμογή δυναμικής ανάλυσης και ανάλυσης ευαισθησίας σε σύστημα με τρεις εγκατεστημένους στροβίλους με αξιοποίηση του μεγαλύτερου ποσοστού απορροής [Ε32].
- Ποσοτική και ποιοτική ανάλυση δεκατριών περιπτώσεων για επιλογή του πλέον κατάλληλου στροβίλου για βέλτιστη λειτουργία σε εφαρμογή με χαμηλή πτώση ύδατος [Ε34].



Σχήμα 1.20 Τα αποτελέσματα ανάλυσης για τις 13 εξεταζόμενες περιπτώσεις στροβίλων στα 3,5 m ύψος για 6 διαφορετικά κριτήρια.

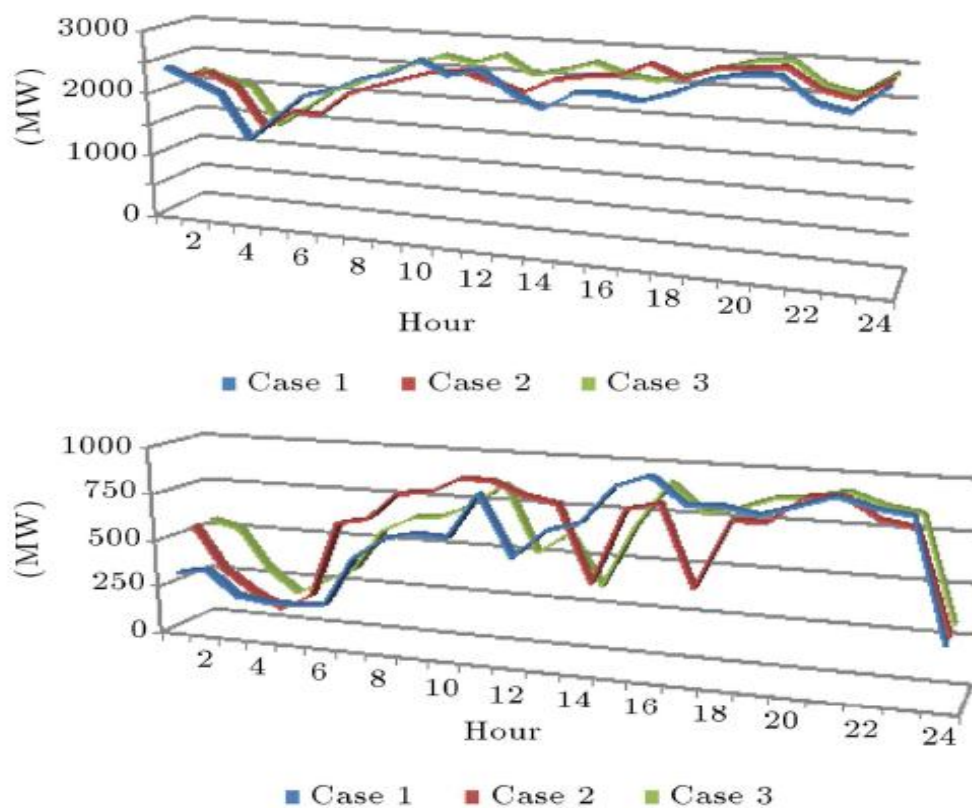
1.Πυκνότητα ισχύος, 2. Ονομαστική απόδοση ροής (rated flow efficiency), 3.Μερική απόδοση ροής (part flow efficiency),4. Έργα πολιτικού μηχανικού (Civil Works), 5. Δυνατότητα συντήρησης, 6. Scope for modularity, 'DT' = Draft Tube. [Ε34, Fig.9]

- Μέθοδος παλινδρόμησης σε υδροηλεκτρικό χαμηλού ύψους για εκτίμηση κόστους κατασκευής του σταθμού σε σύγκριση με το κόστος της επένδυσης, όπου τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι συσχετίσεις με το αρχικό κόστος επένδυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά το αρχικό στάδιο σχεδιασμού ενός σταθμού[Ε35].



Σχήμα 1.21 Κατανομή των κοστών για διαφορετικά ύψη. [Ε35, Fig. 7]

- Υπολογιστική βελτιστοποίηση σχεδιασμού Lagrange, βασισμένη σε κρίσιμες παραμέτρους κόστους – αποτελεσματικότητας, όπως είναι για παράδειγμα η σωστή επιλογή θυροφράγματος ή διαμέτρου του σωλήνα απορροής, το μέγεθος, ο τύπος ή και ο αριθμός των στροβίλων [Ε36].
- Ανάπτυξη αλγόριθμου για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας σε συνάρτηση με την καμπύλη διάρκειας – ροής με εξασφάλιση της ελάχιστης περιβαλλοντικής ροής κατάντη του σταθμού [Ε37].
- Εκτίμηση της διαθεσιμότητας παραγωγής μικρών υδροηλεκτρικών με εφαρμογή σε μελέτες σχεδιασμού και αξιοπιστίας συστημάτων παραγωγής. Κρίθηκε απαραίτητος ο συσχετισμός του εξεταζόμενου μοντέλου διαθεσιμότητας ενέργειας με τη μεταβολή της παροχής του ποταμού σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής [Ε58].
- Μεικτός ακέραιος προγραμματισμός (Mixed – Integer Programming) για υπολογισμό του ημερήσιου προγράμματος παραγωγής από θερμό – υδροηλεκτρικές μονάδες συγκρίνοντας 3 διαφορετικές περιπτώσεις [Ε40].
 1. Υπολογισμός ημερήσιου προγράμματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση των επιμέρους κοστών βαλβίδων ατμού, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις απαγορευμένες ζώνες λειτουργίας (prohibited operated zones).
 2. Υπολογισμός ημερήσιου προγράμματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις απαγορευμένες ζώνες λειτουργίας (prohibited operated zones) και χωρίς να συμπεριληφθούν τα επιμέρους κόστη βαλβίδων ατμού.
 3. Υπολογισμός ημερήσιου προγράμματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους κόστη βαλβίδων ατμού και τις απαγορευμένες ζώνες λειτουργίας (prohibited operated zones).



Σχήμα 1.22 Συνολική παραγόμενη ισχύς από θερμό – υδροηλεκτρικές μονάδες για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. [Ε40, Figure 7]

Περίπτωση	Με περιορισμούς ασφαλείας	Χωρίς περιορισμούς ασφαλείας
1	782.347,41	756.221,52
2	788.796,97	748.329,92
3	789.203,73	747.226,29

Πίνακας 1.4 Ημερήσια κόστη λειτουργίας για τις τρεις ξεχωριστές περιπτώσεις [Ε40, Table 5]

- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την οικονομική αξιολόγηση, εξετάζοντας οικονομικές παραμέτρους, όπως το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, η πώλησή μείγματος ισχύων, το κόστος εγκατάστασης, το συντελεστή εγκατάστασης σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [Ε7,Ε33,Ε53].
- Μεθοδολογία πιθανοτικής διάρκειας ροής για σχεδιασμό και αξιολόγηση λειτουργίας μικρού υδροηλεκτρικού [Ε26]. Η μέθοδος εστιάζει στην ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας που επιδρά στη σχεδίαση του σταθμού, καθώς και στις οικονομικές παραμέτρους, ξεπερνώντας τα όρια που υπάρχουν σε σπάνια μεθοδολογίες που συνήθως περιγράφονται

από τις καμπύλες παροχής – διάρκειας μέσω στοιχείων καταγραφής μερικών ετών.

Μερικές από τις τεχνικές βελτιστοποίησης μικρών υδροηλεκτρικών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μεικτός – ακέραιος και γραμμικός προγραμματισμός (Mixed – integer & interval linear programming) για τεχνικές βελτιστοποίησης σε ανανεώσιμες και βιώσιμες ενεργειακές αναπτύξεις. Lagrangian relaxation, τετραγωνικός προγραμματισμός και Nedler –Mead Simplex, ενώ παλαιότερα για τα ίδια ερωτήματα έχουν ερευνηθεί με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων και βελτιστοποίηση σωματιδίων [E43].
- Γραμμικός προγραμματισμός για μεγιστοποίηση υδροηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση και την ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον όγκο αποθήκευσης του ταμιευτήρα [E45], που αναφέρεται σε μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά με αντλησιοταμίευση.
- Βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων με άξονα τις περιβαλλοντολογικές και οικονομικές αντισταθμίσεις για ενίσχυση των αποφάσεων σε σχέση με τη αλλαγή του φράγματος, συνήθως στα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά [E46]
- Mixed – integer linear stochastic programming για βραχυπρόθεσμη λειτουργία του σταθμούς κάτω από διάφορες αβεβαιότητες [E47].
- Λεξικογραφική βελτιστοποίηση και μέθοδος διχοτόμου ομαλών άκρων (Lexicographic optimization & normal boundary intersection method). Με αυτή τη μέθοδο υπάρχει αποφυγή επιλογών αυθαίρετων παραμέτρων και τοποθετούνται στα σημεία μεθόδου διχοτόμου σε ίσες αποστάσεις. Από όλες τις μεθόδους η Pareto είναι αυτή που επιλέγεται περισσότερο [E51].

Ως προς τα κριτήρια βελτιστοποίησης έχουν αναφερθεί:

- Η μορφολογία του εδάφους και όλες οι γεωγραφικές παράμετροι [E9,E55]
- Οικονομικά σε σχέση με την καθαρή παρούσα αξία και τα κόστη συντήρησης ως προς το κόστος της παραγόμενης ενέργεια και της απόσβεσης του επενδυτικού κεφαλαίου [E7,E33,E53,E56].
- Τεχνικά ως προς τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του σταθμού[E57], τη βέλτιστη επιλογή διαμέτρου προσαγωγής με τις μικρότερες απώλειες και κόστος [E9].
- Ενεργειακά ως προς τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [E7], μειώνοντας σημαντικά την παραγωγή της από συμβατικές μονάδες [E9,E7,E55,E57].
- Εύρεση τοποθεσιών σε όλη τη χώρα προκειμένου να αξιοποιηθεί το συνεισφορά της Ελλάδας στο παγκόσμιο ισοζύγιο από την αξιοποίηση των μικρών υδροηλεκτρικών θα μπορούσε να φτάσει το 5%.

- Γενικά ως προς τη γραφειοκρατία σε σχέση με την άδεια της λειτουργίας των μικρών υδροηλεκτρικών που φτάνει τα 3 χρόνια αναμονής [Ξ59], αφήνοντας πίσω πολύτιμες εργασίες που θα βοηθούσαν στη γρηγορότερη απόσβεση του επενδυτικού κεφαλαίου.

1.13 Συμπεράσματα

Η συνεχόμενη αύξηση της ζήτησης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη μεγάλη ευαισθητοποίηση παγκοσμίως στον τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος, έχουν οδηγήσει στην κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Συγκεκριμένα, η εκμετάλλευση του υδροδυναμικού σε παγκόσμιο επίπεδο είναι ένα θέμα, το οποίο έχει απασχολήσει και εξακολουθεί να απασχολεί τον τομέα της ενέργειας, διότι πρόκειται για μία καθαρή πηγή με μηδενικό περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε μικρούς και μεγάλους κυρίως, βάσει της ισχύος εγκατάστασής τους. Μπορούν να σταθούν ως κύρια μονάδα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ακόμα και σα μέρος υβριδικού σταθμού είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ως μέσο αποθήκευσης με τη χρήση του ταμιευτήρα. Η συνεισφορά τους στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο έχει ήδη εξαιρετικό ενδιαφέρον και με την ορθή μελέτη των δυνητικά αξιοποιήσιμων σημείων με υψηλό υδροδυναμικό θα παρουσιαζόταν ακόμα μεγαλύτερη αύξηση. Είναι γεγονός πως για τη διαδικασία της υλοποίησης ενός νέου υδροηλεκτρικού, από τη σύλληψη της ιδέας έως την εφαρμογή της, υπάρχουν διάφορα στάδια και επιμέρους μελέτες που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν, προκειμένου να προκύψει ένα άρτιο αποτέλεσμα που θα επιφέρει το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος σε συνδυασμό με το χαμηλότερο δυνατό κόστος, χωρίς αυτό να σημαίνει πως θα υστερεί ποιοτικά. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές και συγκεκριμένα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την εύρυθμη λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια σε βάθος.

2.1 Εισαγωγή

Υδρολογία ονομάζεται η επιστήμη που μελετά την κίνηση, τη διανομή και τη διαχείριση του νερού στη Γη, αλλά και σε άλλους πλανήτες, συμπεριλαμβανομένου του κύκλου του νερού, των υδάτινων πόρων και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της λεκάνης απορροής. Η διάκριση των κλάδων που απασχολεί την επιστήμη της υδρολογίας βασίζεται στον τρόπο και στο στόχο και τον τρόπο της προσέγγισης του αντικειμένου. Ο κλάδος που έχει στόχο την κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών και όλων των φαινομένων που συνδέονται με αυτές ονομάζεται *υδρολογική επιστήμη* (hydrologic science) ή αλλιώς *φυσική υδρολογία* (physical hydrology). Αντίθετα, ο κλάδος της υδρολογίας που έχει στόχο την πρόγνωση και την ποσοτική εκτίμηση των διαφόρων υδρολογικών μεγεθών ονομάζεται *τεχνική υδρολογία* (engineering hydrology) ή αλλιώς *εφαρμοσμένη υδρολογία* (applied hydrology).

Γενικά τα τελευταία χρόνια ο όρος τεχνική υδρολογία ερευνά την τεχνολογία και τη διαχείριση των υδροσυστημάτων, συστήματα δηλαδή που αποτελούνται από φυσικούς υδάτινους πόρους, όπως είναι τα ποτάμια, οι λίμνες, οι θάλασσες, κλπ) και υδραυλικών έργων που αποσκοπούν τόσο στην αξιοποίηση αυτών των πόρων, αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος από κάποιες καταστροφικές δράσεις που μπορεί να προκαλέσει το νερό, όπως είναι για παράδειγμα η πλημμύρα. Η διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι ένα κομμάτι που έχει παγκόσμιο ενδιαφέρον και σπουδαιότητα, αφού εξετάζεται το βέλτιστο σενάριο μέσω οικονομοτεχνικών, πολιτικών και νομικών μηχανισμών. Ένας επιπλέον τρόπος διάκρισης κλάδων της υδρολογίας βασίζεται στο χώρο που εξετάζονται τα υδρολογικά φαινόμενα. Η *επιφανειακή υδρολογία* (surface hydrology) αφορά στα επιφανειακά νερά και η *υπόγεια υδρολογία* (subsurface or ground water hydrology) ασχολείται με τα υπόγεια νερά.

Επιπλέον, η *υδρομετεωρολογία* (hydrometeorology) ασχολείται με το νερό που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι) και στην εξατμοδιαπνοή, εξετάζονται τόσο το κομμάτι της υδρολογίας, αλλά και της μετεωρολογίας. Τέλος, υπάρχει η *στατιστική υδρολογία* (statistical hydrology) που αξιοποιεί την επιστήμη των πιθανοτήτων και της στατιστικής για πρόγνωση μεγεθών και ποσοτική εκτίμηση, αλλά και η *στοχαστική ή επιχειρησιακή υδρολογία* (stochastic or operational hydrology), όπου ασχολείται με τις μεθόδους στοχαστικής θεωρίας για προσομοίωση της χρονικής εξέλιξης των υδρολογικών μεταβλητών και τη συμπεριφορά των σύνθετων συστημάτων.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικής επιστήμης και τεχνικής υδρολογίας στο πλαίσιο των επιστημών μηχανικού και γεωεπιστημών και η σχέση τους με τη διαχείριση υδροσυστημάτων και της τεχνολογίας. [E12, Σχ. 1.1]

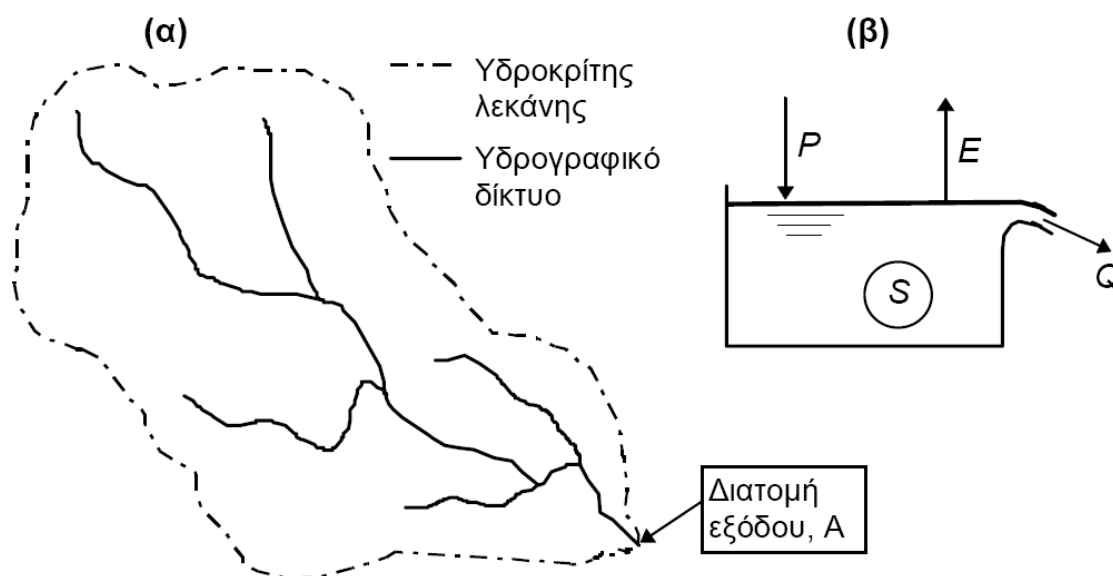
Τα υδραυλικά έργα χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες, τα έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης των υδάτινων πόρων και τα έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους.

Γενική Κατηγορία Έργων	Ειδική κατηγορία έργων ή δράσεων	Τυπικά υδραυλικά έργα	Στόχος υδρολογικής μελέτης
Έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων	1. Αξιοποίηση των άμεσα διαθέσιμων υδατικών πόρων	Υδροληψία από: πηγές, υδατορεύματα, λίμνες, υδροφορείς	Εκτίμηση απολήψιμης παροχής
	2. Ανάπτυξη των ολικών διαθέσιμων υδατικών πόρων	Ταμιευτήρες, Έργα εκτροπής, Έργα εμπλουτισμού υδροφορέων	Εκτίμηση όγκων εισροών, απωλειών και απολήψεων, παροχών σχεδιασμού, χωρητικότητας ταμιευτήρων
	3. Μεταφορά και διανομή των υδατικών πόρων	Υδραγωγεία Δίκτυα διανομής	Εκτίμηση υδατικών αναγκών, εξαγωγή παροχών σχεδιασμού
Έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους	1. Αντιπλημμυρική προστασία αστικών και αγροτικών περιοχών	Αστικά δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων Έργα αποχέτευσης και αποστράγγισης αγροτικών περιοχών Έργα διευθέτησης υδατορευμάτων	Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών σχεδιασμού, χωροχρονικής εξέλιξης πλημμύρας, χρόνων κατάκλισης
	2. Αντιπλημμυρική προστασία συστημάτων τεχνικών έργων	Έργα προστασίας φραγμάτων, συγκοινωνιακών έργων, ειδικών έργων	Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών σχεδιασμού, χωροχρονικής εξέλιξης πλημμύρας, χρόνων κατάκλισης
	3. Προστασία από ξηρασίες	Ταμιευτήρες, Έργα εκτροπής, Έργα εμπλουτισμού υδροφορέων σε συνδυασμό με πήρηση εφεδρικών αποθεμάτων και εφεδρικά έργα	Εκτίμηση όγκων εισροών, απωλειών και απολήψεων, παροχών σχεδιασμού, χωρητικότητας ταμιευτήρων, εκτίμηση ελάχιστων φυσικών παροχών περιβαλλοντικής διατήρησης
	4. Προστασία από διαβρώσεις και προσχώσεις των φυσικών ή καλλιεργημένων εδαφών	Φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών, έργα διευθέτησης υδατορευμάτων, έργα ορεινής υδρονομίας	Εκτίμηση ρυθμών διάβρωσης εδαφών και υδατορευμάτων στερεομεταφοράς και πρόσχωσης εδαφών, υδατορευμάτων και τεχνικών έργων

Πίνακας 2.1 Υδραυλικά έργα και η σημασία της υδρολογίας στη μελέτη των έργων κάθε κατηγορίας. [E12, Πιν. 1.3]

Η μελέτη των μετρήσεων της παροχής και η διάθεση των μεγάλων χρονικών διαστημάτων που αφορούν σε αυτές τις παροχές είναι αρκετά δύσκολη και πολύ δαπανηρή. Για αυτόν το λόγο συνήθως, αυτή η πληροφορία είναι ελλιπής έως και ανύπαρκτη, ιδιαίτερα για τα μικρά υδροηλεκτρικά. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της απορροής του υδατορεύματος, βασισμένες στην επιστήμη της υδρολογίας, πάρα τον περιορισμό των μετρήσεων. Αυτές οι μέθοδοι αποσκοπούν στην ανάλυση μία δευτερεύουσας πληροφορίας που αφορά στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, δηλαδή τις χιονοπτώσεις, τις βροχές κλπ, για τα οποία η καταγραφή των μετρήσεων είναι πολύ πιο εύκολη και σαφώς φθηνότερη.

Λεκάνη απορροής ή υδρολογική λεκάνη ονομάζεται η συγκέντρωση των επιφανειακών νερών στη διατομή του υδατορεύματος, όπου θα πραγματοποιηθεί η συλλογή της επιφανειακής απορροής με σκοπό την ενεργειακή της αξιοποίηση.



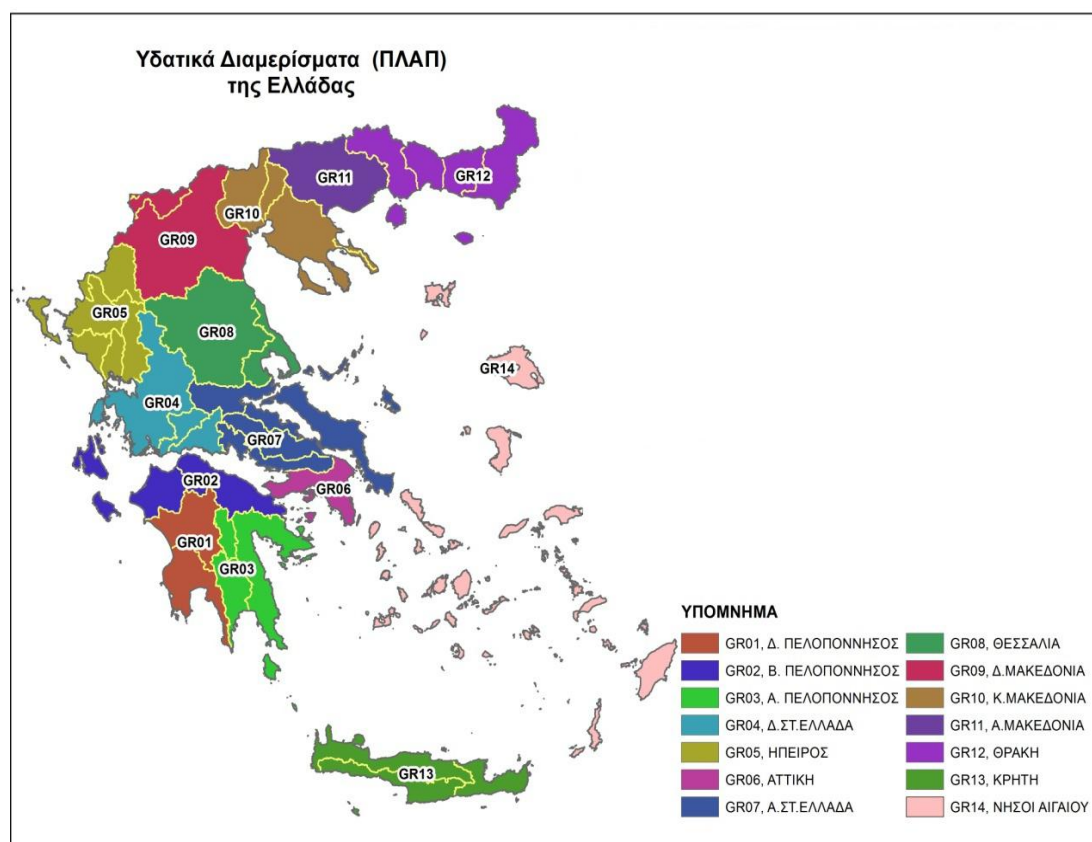
Σχήμα 2.2 Λεκάνη Απορροής ή Υδρολογική λεκάνη [E12, Σχήμα 3.9]

Επομένως, ως λεκάνη απορροής στη συγκεκριμένη διατομή A ενός υδατορεύματος, ορίζεται η γεωγραφική επιφάνεια S_A , τα νερά της οποίας συνεισφέρουν στην απορροή που διέρχεται από τη διατομή A . Το όριο της λεκάνης απορροής εξαρτάται από τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής και ονομάζεται υδατοκρίτης. Όλα τα υδρολογικά μεγέθη είναι χρονικά μεταβλητά και η κλίμακα του χρόνου στην οποία εξετάζεται αυτή η χρονική εξέλιξη τους εξαρτάται από τη φύση του εξεταζόμενου μεγέθους. Για παράδειγμα όταν εξετάζεται ένα πλημμυρικό φαινόμενο, πρέπει να μελετηθεί ωριαία ή ακόμα και σε κλίμακα δεκαλέπτου σε μικρά υδατορεύματα, λόγω της γρήγορης εξέλιξης του.

Στην Ελλάδα υπάρχει μεγάλο πλήθος λεκανών απορροής, μικρού ή μεσαίου μεγέθους, εξαιτίας του πολύπλοκου ανάγλυφου της. Οι λεκάνες αυτές έχουν ομαδοποιηθεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα με διάφορα κριτήρια κλιματικής και υδρολογικής ομογένειας. Είναι αναμενόμενο πως στις δυτικές περιοχές της χώρας υπάρχει μεγαλύτερο υδροδυναμικό εξαιτίας των περισσότερων υδατοπτώσεων και του πλέον έντονου ανάγλυφου.

α/α	Υδατικό Διαμέρισμα	Επιφάνεια	Θεωρητικό υδροδυναμικό (GWh/y)	Οικονομικά αξιοποιήσιμο υδροδυναμικό (GWh/y)
1	Δυτ. Πελοπόννησος	7.771	7.210	1.260
2	Β. Πελοπόννησος	6.596	4.290	557
3	Αν. Πελοπόννησος	8.702	4.300	417
4	Δυτ. Στερεά Ελλάδα	10.420	14.880	4.200
5	Ήπειρος	10.275	15.642	4.830
6	Αττική	3.326	282	5
7	Αν. Στερεά Ελλάδα	11.923	5.090	390
8	Θεσσαλία	13.148	6.010	468
9	Δυτ. Μακεδονία	13.404	10.444	1.670
10	Κεν. Μακεδονία	10.388	2.800	123
11	Αν. Μακεδονία	7.342	2.270	118
12	Θράκη	10.894	6.783	1.110
13	Κρήτη	8.330	4.600	446
14	Νήσοι Αιγαίου	9.060	400	6
Σύνολο		131.579	85.001	15.600

Πίνακας 2.2: Υδροδυναμικό Ελλάδας ανά υδατικό διαμέρισμα [Ε3, Πίνακας 1.2]



Σχήμα 2.3 Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας [Ε13, Σχήμα 2-1]

2.2 Υδρολογικός Κύκλος

Το νερό έχει πολλά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και για αυτόν το λόγο θεωρείται μία από τις σπουδαιότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μερικές από αυτές τις ιδιότητες φαίνονται παρακάτω:

- Υπάρχει σε αφθονία.
- Μπορεί να έχει ταυτόχρονη παρουσία σε τρεις διαφορετικές φάσεις (στερεή, υγρή, αέρια).
- Υπάρχει ιδιαιτερότητα στις αλλαγές φάσεως, δημιουργώντας δεσμούς υδρογόνου.
- Έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα, δηλαδή μεγάλη θερμική αδράνεια πράγμα που το καθιστά έναν κλιματικό θερμοστάτη.
- Έχει μεγάλη ειδική λανθάνουσα θερμότητα, δηλαδή είναι ένας αποτελεσματικός εναλλάκτης θερμότητας.
- Είναι ένας αποτελεσματικός διαλύτης, αφού διαλύει μεγάλη ποικιλία ουσιών.
- Έχει μικρή συνεκτικότητα σε σχέση με άλλα υγρά.

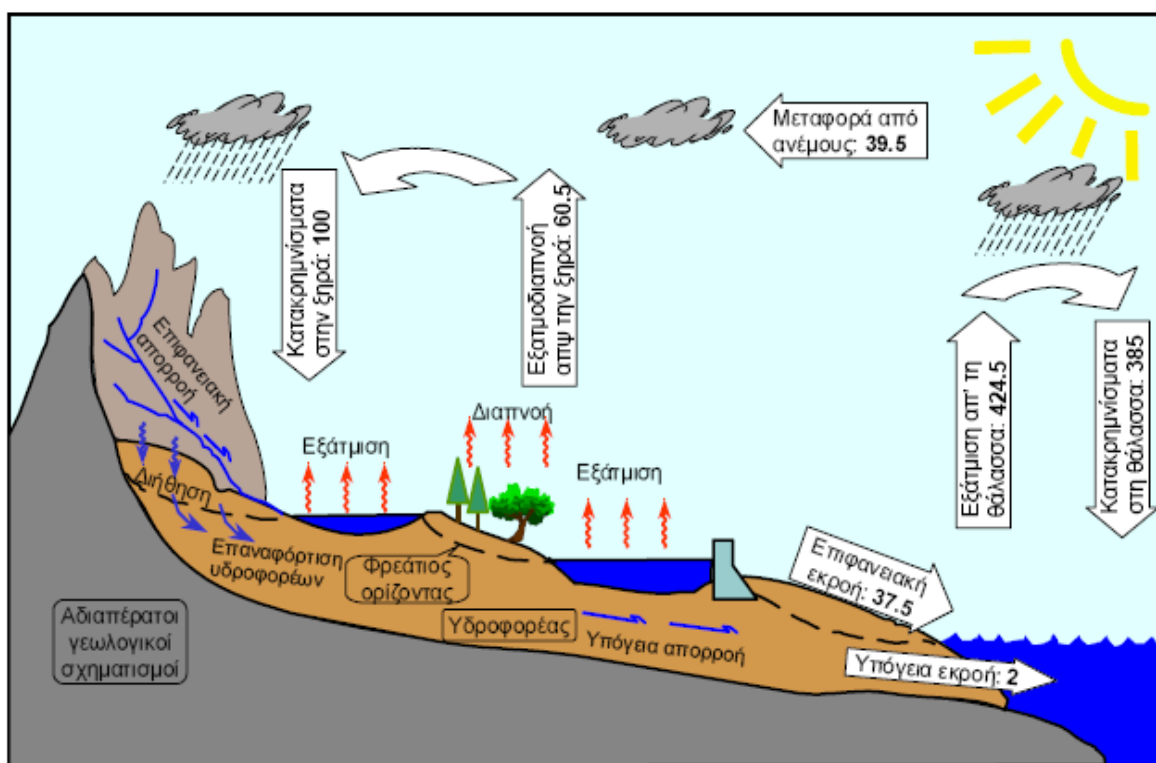
Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο η πορεία του νερού αποτυπώνεται μέσω του υδρολογικού κύκλου, όπου περιγράφεται η κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ξηρά και την ατμόσφαιρα που συνοδεύεται από τις αλλαγές των φάσεων του, την υγρή, τη στερεή και την αέρια. Η κινητήρια δύναμη αυτής της διαδικασίας είναι η ηλιακή ενέργεια και για αυτόν το λόγο πολλοί υποστηρίζουν πως η υδραυλική ενέργεια υπάρχει εξαιτίας της ηλιακής. Οι κυριότερες φάσεις του υδρολογικού κύκλου είναι:

- Η κατακρήμνιση των ατμών, που έχουν συμπυκνωθεί στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας σύννεφα από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης κυρίως σε μορφή βροχής και χιονόπτωσης.
- Η εξάτμιση του νερού από την ξηρά και τις υδάτινες επιφάνειες (λίμνες, ποταμοί, θάλασσα).
- Το νερό από την υγρή του φάση μετατρέπεται σε υδρατμούς οι οποίοι ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα και μετακινούνται σύμφωνα με τους ανέμους.
- Η διαπνοή από τη βλάστηση και τα φυτά μετατρέπεται σε υδρατμούς που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα.
- Η κατακράτηση του νερού από τη βλάστηση στο έδαφος.
- Η διήθηση του επιφανειακού νερού στο έδαφος. Εδώ μέρος αυτής της ποσότητας του νερού αξιοποιείται σε υπόγειους ταμιευτήρες και απορρέει υπόγεια μέσω ρωγμών των γεωλογικών σχηματισμών και καταλήγει στην επιφάνεια της γης, σχηματίζοντας πηγές ή απλά στη θάλασσα.
- Η επιφανειακή απορροή, δηλαδή ο σχηματισμός των ποταμών και των ρευμάτων, τα οποία καταλήγουν στη θάλασσα ή σε λίμνες.

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ενδεικτικές τιμές του υδατικού ισοζυγίου για μία λεκάνη απορροής, θεωρώντας ως μέγεθος αναφοράς το σύνολο των κατακρημνισμάτων της λεκάνης, όπου:

- Η εξατμισοδιαπνοή αντιστοιχεί στο 60,5%
- Η επιφανειακή απορροή στο 37,5%
- Η υπόγεια απορροή στο 2%

Επομένως, το σύνολο των παραπάνω αντιστοιχεί στο 100%. Από αυτά η υπόγεια και η επιφανειακή απορροή καταλήγουν στην απορροή του υδατορεύματος, δηλαδή αντιστοιχούν στο 39,5% των κατακρημνισμάτων, ποσότητα που αναπληρώνεται από την είσοδο στη λεκάνη, μέσω της διακίνησης των νεφών στην ατμόσφαιρα. Απ' όλες τις φάσεις αυτή που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την υδροηλεκτρική αξιοποίηση είναι η επιφανειακή απορροή που αποτελεί το πρωτεύον μέγεθος στην υδρολογική ανάλυση.



Σχήμα 2.4 Ο υδρολογικός κύκλος με τις μέσες διακινήσεις του νερού που έχουν εκφραστεί ως ποσοστό επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. [E12, Σχ. 1.3]

Οι κύριες μεταβλητές της υδρολογίας στη μελέτη των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου διακρίνονται σε:

- αποθέματα ή αποθηκεύσεις νερού στα υδάτινα σώματα, δηλαδή στις χερσαίες επιφάνειες (π.χ. λίμνες, ποτάμια, τεχνητοί ταμιευτήρες, κλπ), στους υπεδάφιους ταμιευτήρες νερού και στις θάλασσες,
- διακινήσεις νερού από ένα υδάτινο σώμα σε ένα άλλο (π.χ. ατμόσφαιρα – έδαφος).

Στις μεταβλητές που εκφράζουν διακινήσεις, η ποσοτική έκφραση πραγματοποιείται με βάση τα ακόλουθα μεγέθη:

- τον όγκο που διακινήθηκε στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο,
- την παροχή, δηλαδή το ρυθμό διακίνησης στη μονάδα χρόνου.
- το ισοδύναμο ύψος, που προκύπτει από τη διαίρεση του όγκου που διακινήθηκε στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο με την οριζόντια επιφάνεια της έκτασης στην οποία αναφέρεται η διακίνηση,
- την ένταση, δηλαδή το ρυθμό μεταβολής του ύψους στη μονάδα χρόνου.

Η εφαρμογή της μελέτης σε συγκεκριμένο όγκο αναφοράς που προβάλλεται στη λεκάνη απορροής, επιτρέπει τη διατύπωση της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου, όπου σε ένα χρονικό διάστημα το αλγεβρικό άθροισμα των διαφόρων μορφών αποθήκευσης και διακίνησης του νερού είναι ίσο με το μηδέν. Το υδατικό ισοζύγιο εκφράζεται ως εξής:

$$\Delta S = I - O \quad (2.1)$$

Όπου:

ΔS : η μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού στον εξεταζόμενο όγκο μεταφοράς και στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

I : οι συνολικές εισροές

O : οι συνολικές εκροές προς τον όγκο αναφοράς σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η εξατμισοδιαπνοή (το σύνολο της διαπνοής και της εξάτμισης) E , συμπεριλαμβάνεται στον όρο O , διότι πρόκειται για υδραυλική απώλεια.

Σε μία λεκάνη απορροής μικρού μεγέθους, χωρίς μεγάλα τεχνητά υδραυλικά έργα, με ομοιόμορφες συνθήκες και χωρίς μεγάλους υπόγειους υδροφορείς, η μοναδική εισροή στον οριζόμενο από αυτήν όγκο αναφορά είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα P , τα οποία αποτελούνται κυρίως από τη βροχόπτωση και τη χιονόπτωση. Η αποθήκευση του νερού S στον όγκο αναφοράς αφορά στην αποθήκευση στο έδαφος υπό τη μορφή εδαφικής υγρασίας. Επομένως η εξίσωση (2.1) του υδατικού ισοζυγίου μετατρέπεται στην παρακάτω μορφή:

$$\Delta S = P - E - Q \quad (2.2)$$

Όπου:

Q : η επιφανειακή απορροή στη διατομή εξόδου, στην οποία αντιστοιχεί η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής.

P : το σύνολο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

E : το σύνολο της εξατμισοδιαπνοής.

Στην περίπτωση κατά την οποία το χρονικό διάστημα εφαρμογής της αρχής του υδατικού ισοζυγίου είναι ένα ή παραπάνω από ένα έτη, θεωρείται πως $\Delta S = 0$, δηλαδή στο χρονικό διάστημα ενός μέσου έτους, δε συσσωρεύεται νερό και η λεκάνη απορροής είναι στην ίδια κατάσταση. Έτσι οι διακυμάνσεις της αποθηκευμένης υγρασίας στο έδαφος S , θεωρείται πως έχουν εποχιακό χαρακτήρα. Σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση (2.2) μετατρέπεται σε:

$$Q = P - E \quad (2.3)$$

Επομένως, συνεπάγεται πως η επιφανειακή απορροή είναι το άθροισμα της ποσότητας του νερού που ρέει στην επιφάνεια του εδάφους υπό τις συνθήκες κορεσμού και της ποσότητας του νερού από τον υπόγειο ορίζοντα, το κεκορεσμένο έδαφος.

2.3. Υδρολογικοί υπολογισμοί

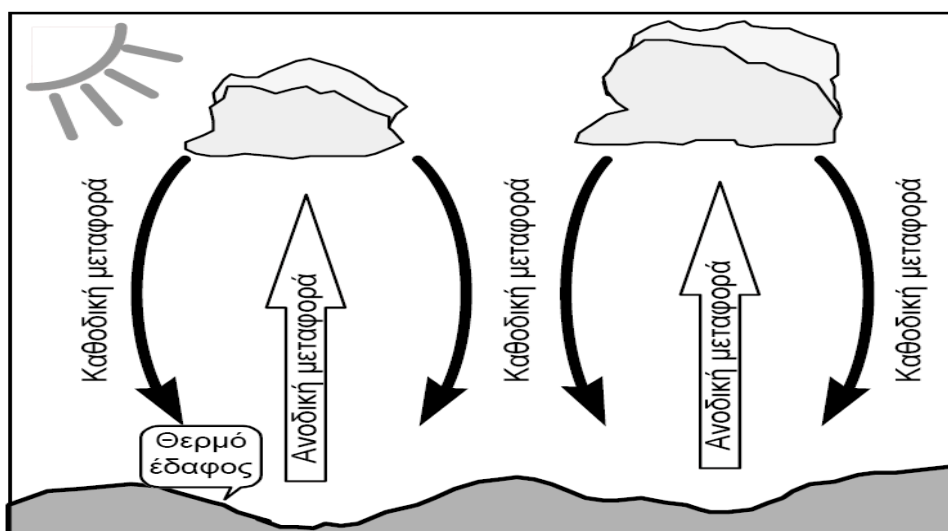
2.3.1 Φαινόμενα που συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο

2.3.1.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Ο όρος ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα περιλαμβάνει όλες τις μετρήσιμες ποσότητες νερού που φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους της γης ως συνέπεια υγροποίησης των ατμοσφαιρικών υδρατμών. Τα πιο συνήθη κατακρημνίσματα είναι οι βροχοπτώσεις και οι χιονοπτώσεις. Οι βροχοπτώσεις απασχολούν κυρίως τα τροπικά και εύκρατα κλίματα, λόγω της συχνότητάς τους σε σχέση με άλλες μορφές κατακρημνισμάτων, με αποτέλεσμα να δημιουργούν πολύ σημαντικά φαινόμενα απορροής. Οι χιονοπτώσεις έχουν ιδιαίτερη σημασία στις εύκρατες περιοχές κατά κύριο λόγο κατά τους ανοιξιάτικους, μερικές φορές και θερινούς, μήνες, όπου συναντούνται μεγάλα υδατορεύματα λόγω της τήξης των πάγων. Επιπλέον, το χαλάζι αποτελεί άλλη μία μορφή κατακρημνίσματος, του οποίου η μελέτη έχει αρκετά μεγάλη σημασία ειδικά σε γεωργικές καλλιέργειες εξαιτίας των καταστροφικών ιδιοτήτων που έχει, απλά λόγω της μικρής συχνότητάς του, δεν απασχολεί ιδιαίτερα τη μελέτη των υδροηλεκτρικών. Γενικότερα αυτά τα φαινόμενα έγκεινται στην ανάλυση της ατμοσφαιρικής επιστήμης και της μετεωρολογίας, όμως η αντίληψη των διεργασιών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι χρήσιμη από τη

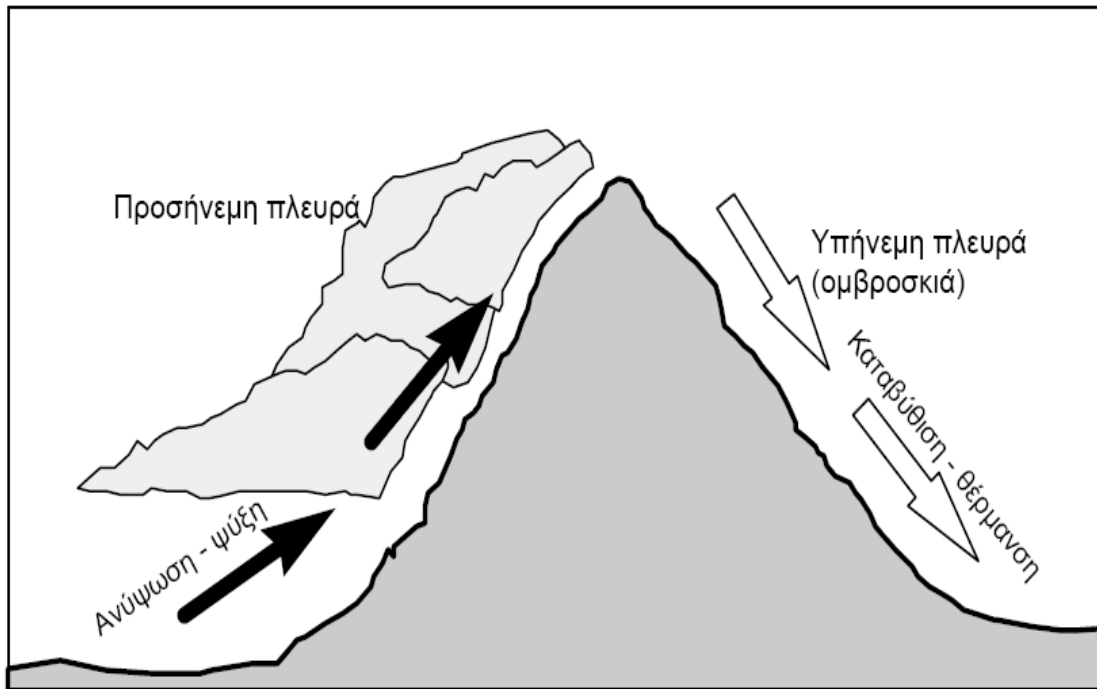
σκοπία της υδρολογίας, ιδίως για θέματα που αφορούν σε πλημμυρικά φαινόμενα.

Η δημιουργία των κατακρημνισμάτων πραγματοποιείται από τη θερμοδυναμική κατάσταση του κορεσμού των υδρατμών, τη συμπύκνωσή τους που οδηγεί στη δημιουργία των σταγονιδίων, μέσης διαμέτρου 10 – 30 μm , και στη συνέχεια την αύξηση της μάζας των σταγονιδίων, ώσπου να φτάσει σε μέγεθος κατακρημνίσματος. Σε αυτήν τη φάση, εξαιτίας της βαρύτητας, η αιώρηση τους είναι αδύνατη, με αποτέλεσμα να δημιουργείται τυρβώδης διάχυση. Υπάρχουν δύο βασικοί μετεωρολογικοί μηχανισμοί κατακρήμνισης: ο *μεταγωγικός ή κατακόρυφης μεταφοράς* και ο *διαστρωματικός*. Στο μεταγωγικό μηχανισμό υπάρχει κατακόρυφη κίνηση του αέρα με ταχεία ανάπτυξη κατακρημνισμάτων, συνήθως εντός 45 min, ξεκινώντας από τη βάση του σύννεφου. Στο διαστρωματικό μηχανισμό υπάρχει ασθενής κατακόρυφη κίνηση του αέρα, η ανάπτυξη των κατακρημνισμάτων ξεκινάει από το πάνω μέρος του σύννεφου και η δημιουργία τους μπορεί να κρατήσει κάποιες ώρες.



Σχήμα. 2.5 Σκαρίφημα μεταγωγικού μηχανισμού κατακρημνισμάτων [E12, Σχ. 2.2]

Τέλος, ένας επιπλέον μηχανισμός κατακρημνισμάτων είναι ο *ορογραφικός*, που αποτελείται από μεταγωγικές και διαστρωματικές συνιστώσες κατά τη μεταφορά αέριων μαζών πάνω από όρη.



Σχήμα. 2.6 Σκαρίφημα ορογραφικής επίδρασης στην ανύψωση του αέρα [E12, Σχ. 2.5]

Για τη μέτρηση της ποσότητας του νερού από τις βροχοπτώσεις σε ένα σημείο της λεκάνης απορροής λαμβάνεται υπόψη το ύψος h σε χιλιοστά στήλης ύδατος, σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα t . Η ένταση της βροχόπτωσης i , χαρακτηρίζεται από τη μεταβολή του ύψους Δh μέσα στο χρονικό διάστημα Δt .

Επομένως, ισχύει:

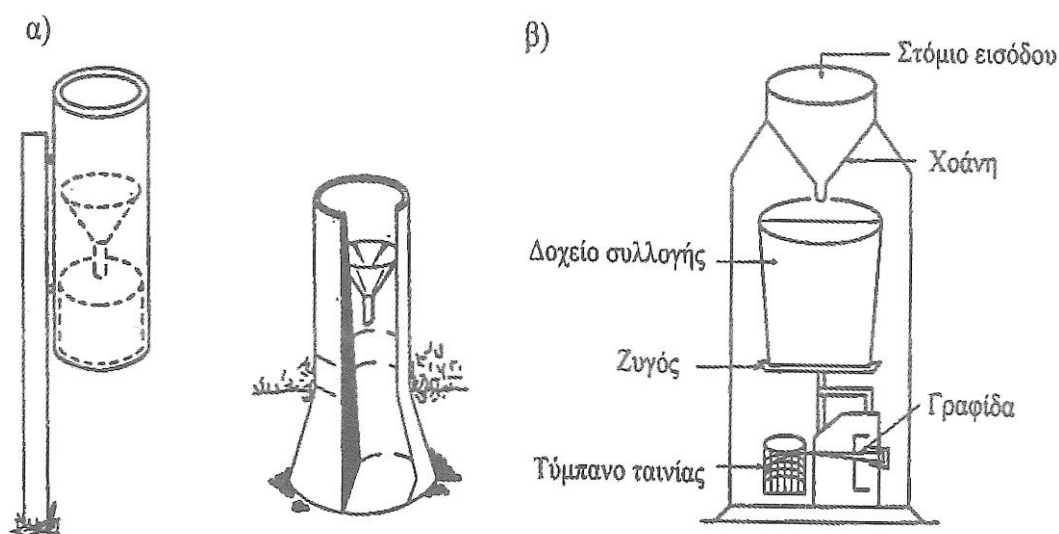
$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Όσο πιο μικρό είναι το Δt , η ένταση i , τείνει να είναι πιο κοντά στη στιγμιαία ένταση της βροχόπτωσης, ενώ, όταν το Δt είναι αφορά σε πιο μεγάλο χρονικό διάστημα, η ένταση της βροχόπτωσης προσεγγίζει τη μέση τιμή της. Επειδή κατά το φαινόμενο της κατακρήμνισης παρουσιάζεται έντονη επιφανειακή ανομοιομορφία, απαιτείται η πλήρης γνώση του πεδίου $h(x,y,t)$ για κάθε σημείο (x,y) της εξεταζόμενης επιφάνειας. Τα βροχομετρικά όργανα που χρησιμοποιούνται, όμως, έχουν τη δυνατότητα να μετρούν το ύψος και την ένταση της βροχής στο σημείο που είναι τοποθετημένα. Έτσι, όσο πυκνότερα είναι εγκατεστημένα τα βροχόμετρα, η καταμέτρηση της χρονικής εξέλιξης των βροχοπτώσεων σε μία λεκάνη απορροής, βοηθά στην εκτίμηση της πραγματικής κατανομής του φαινομένου.

Τα βροχόμετρα συλλέγουν τη βροχή που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο και έχουν τη μορφή κυλινδρικών δοχείων. Υπάρχουν τα τυπικά βροχόμετρα, όπου η ανάγνωση της στάθμης του νερού πραγματοποιείται από τον

παρατηρητή δύο, ή μία φορά τη μέρα, καθώς και οι βροχογράφοι στους οποίους γίνεται η καταγραφή της μεταβολής του ύψους του νερού σε συγκεκριμένο χρόνο, με τη βοήθεια καταγραφικού μηχανισμού. Στο πάνω μέρος του υπάρχει στόμιο υποδοχής για το νερό σε μορφή χωνιού, με εμβαδόν 200 με 500 cm². Το εμβαδόν του κυλινδρικού δοχείου συλλογής είναι σχεδόν 10 φορές μικρότερο από αυτό του στομίου υποδοχής με σκοπό να αυξάνει την ευαισθησία ανάγνωσης της στάθμης. Επειδή η εγκατάσταση των βροχόμετρων επηρεάζει τοπικά τη ροή του ανέμου και κατ' επέκταση την ποσότητα του νερού που συλλέγεται από τη βροχόπτωση, συνήθως τοποθετούνται σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στροβιλισμού.

Όταν η διάρκεια της βροχής είναι μεγάλη, η ένταση συνήθως είναι μικρή, αντίστροφα όταν η διάρκεια της βροχής είναι μικρή, η ένταση στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλη. Επιπλέον, ρόλο παίζει και η επιφάνεια πάνω στην οποία εκδηλώνεται η βροχόπτωση. Για παράδειγμα όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια, τόσο χαμηλότερη είναι η ένταση της βροχής και αντίστροφα. Επομένως, για να μπορούν να υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις, πρέπει οι βροχομετρικοί σταθμοί να είναι εγκατεστημένοι ομοιόμορφα και σε μεγάλη πυκνότητα, ειδικά σε περιοχές με κεκλιμένο έδαφος, όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανομοιομορφία στην ένταση των βροχών.



Σχήμα. 2.7 α) Τυπικά βροχόμετρα β) Τυπικός βροχογράφος. [Ε3, Σχ. 2.3]

Επειδή οι βροχοπτώσεις είναι ένα στατιστικό μέγεθος για τον καλύτερο υπολογισμό της εκτίμησης της μέσης βροχόπτωσης θα πρέπει να υπάρχουν συστηματικές μετρήσεις για 30 με 40 έτη, διαφορετικά θα υπάρχει μεγάλο σφάλμα στην εκτίμηση, ανάλογα με τα έτη για τα οποία υπάρχουν δεδομένα, όπου θα βασίζεται η πρόβλεψη.

Πλήθος ετών	Σφάλμα εκτίμησης %
1	+51 έως -40
2	+35 έως - 31
3	+27 έως - 25
5	+15 έως - 15
10	+8 έως - 8
20	+3 έως - 3
30	+2 έως - 2

Πίνακας 2.3 Πίνακας σφαλμάτων στην εκτίμηση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης σε συνάρτηση με το πλήθος ετών των μετρήσεων [Ε3, Πίνακας 2.1]



Σχήμα 2.8 Διαχωρισμός λεκάνης απορροής με πολύγωνα Thiessen [Ε12, Σχ. 2.9]

Οι μετρήσεις από τα βροχόμετρα αξιοποιούνται για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού από τις βροχές σε μία λεκάνη απορροής για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης απορροής στην υδρολογική λεκάνη γίνεται με διάφορες μεθόδους, εκ των οποίων η πιο κλασσική θεωρείται αυτή του Thiessen, σύμφωνα με την οποία η εξεταζόμενη λεκάνη χωρίζεται σε πολύγωνα που ορίζονται από μεσοκαθέτους των ευθύγραμμων τμημάτων που ενώνουν δύο βροχομετρικούς σταθμούς.

Για κάθε πολύγωνο S_i , το ύψος της βροχόπτωσης είναι ίσο προς h_i , του βροχομετρικού σταθμού που περικλείει. Άρα το ύψος h της βροχόπτωσης μιας λεκάνης απορροής, με συνολικό εμβαδό S , που είναι διαχωρισμένο σε n πολύγωνα, υπολογίζεται από:

$$h = h_1 \frac{S_1}{S} + h_2 \frac{S_2}{S} + \dots + h_n \frac{S_n}{S} \quad (2.5)$$

Εκτός από την παραπάνω μέθοδο για τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσής για μία συγκεκριμένη περιοχή, γνωστή είναι επίσης και αυτή που βασίζεται στη χρήση ισοϋέτιων καμπυλών. Ως ισοϋέτια καμπύλη ορίζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων με δεδομένη τιμή βροχόπτωσης (π.χ. 1000mm για ετήσιο ύψος βροχής). Αυτές οι καμπύλες χαράσσονται στο χάρτη με συγκεκριμένο βήμα (π.χ. ανά 100mm ύψους βροχής), σε αντιστοιχία με τις ισοϋψείς καμπύλες. Δυστυχώς όμως οι ισοϋέτιες καμπύλες είναι λιγότερο ακριβείς σε σχέση με τις ισοϋψείς, διότι είναι αποτέλεσμα λίγων σημειακών μετρήσεων.

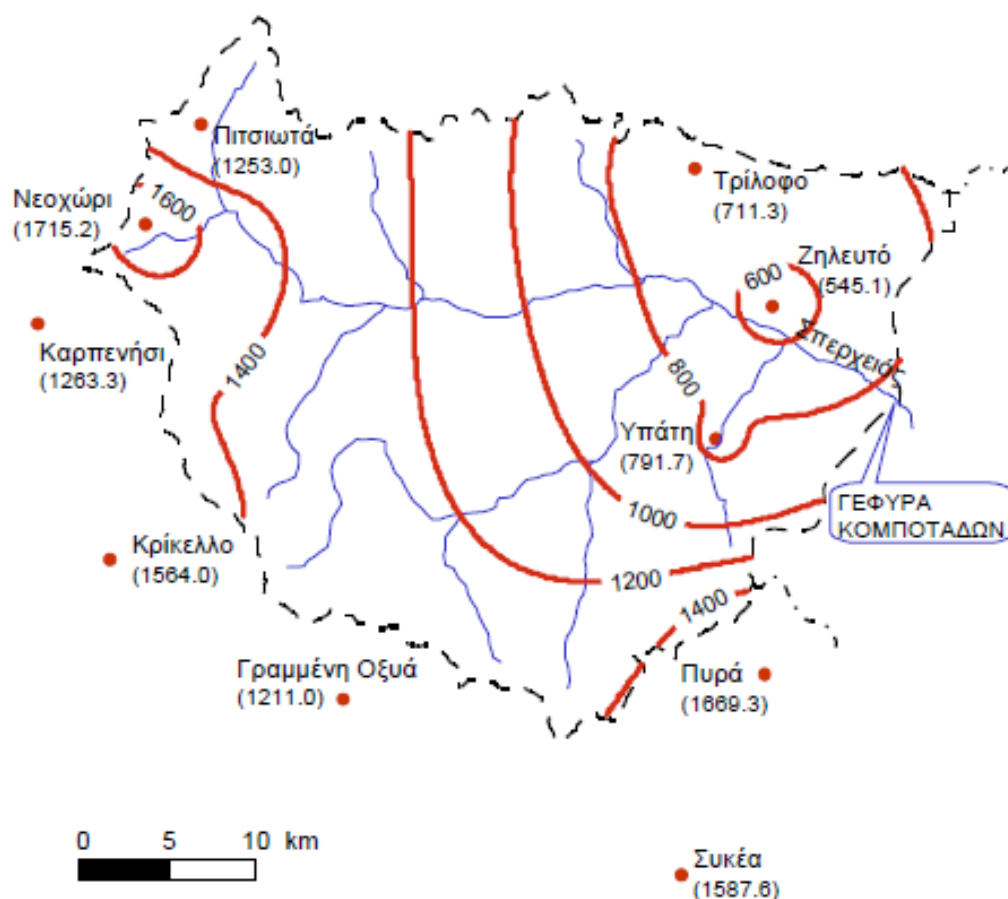
Για τη χάραξη τους λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του υψομέτρου z στο ύψος h της βροχόπτωσης, το οποίο θεωρείται πως μεταβάλλεται γραμμικά με τη στάθμη z :

$$\delta h = \beta \cdot \delta z \quad (2.6)$$

όπου β ο συντελεστής βροχομετρικής βαθμίδας και είναι της τάξεως του 0,9 mm ύψους βροχής ανά m στάθμης. Στην Ελλάδα αυτός ο συντελεστής κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 2 mm/m, ενώ στα τροπικά κλίματα παρατηρείται αύξηση των βροχοπτώσεων με τη μείωση του υψομέτρου.

Προκύπτει πως η μέση βροχόπτωση h_m της εξεταζόμενης περιοχής, με συνολικό εμβαδόν S , πραγματοποιώντας εμβαδομέτρηση των επιφανειών S_i που περιλαμβάνονται μέσα στις ισοϋέτιες καμπύλες σε ύψος βροχόπτωσης h_i και h_{i-1} θα είναι:

$$h_m = \frac{h_1+h_2}{2} \cdot \frac{S_1}{S} + \frac{h_2+h_3}{2} \cdot \frac{S_2}{S} + \dots + \frac{h_n+h_{n-1}}{2} \cdot \frac{S_{n-1}}{S} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.9 Παράδειγμα μέσω ετήσιων ισοϋέτιων καμπυλών. [Ε12, Σχ. 2.10]

2.3.1.2. Εξάτμιση και διαπνοή

Στην υδρολογία ο όρος *εξάτμιση* χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη μετατροπή του νερού από υγρή σε αέρια φάση. Όταν η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται στους πόρους της χλωρίδας και ιδίως στα φυλλώματα των φυτών, χαρακτηρίζεται ως *διαπνοή*. Οι ρίζες των φυτών απορροφούν το νερό και μέσω ενός αγγειακού συστήματος, αυτό καταλήγει στους πόρους των φυλλωμάτων, μεταφέροντας σημαντικά συστατικά, τα οποία αποτελούν μέρος της φωτοσύνθεσης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαπνοής είναι πως πραγματοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αφού τη νύχτα οι πόροι των φυτών κλείνουν, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι απώλειες. Φυσικά, για να λάβει χώρα το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής, είναι απαραίτητη η διαθεσιμότητα του νερού στις εδαφικές επιφάνειες. Δυνητική εξατμισοδιαπνοή ονομάζεται η πραγματοποίησή της υπό απεριόριστες ποσότητες διαθεσιμότητας νερού, ενώ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή για την ίδια επιφάνεια είναι πάντα ίση ή μικρότερη της δυνητικής.

Είναι δεδομένο πως πάνω από το 60% των κατακρημνισμάτων που πέφτουν στη χερσαία επιφάνεια της γης, τελικά την εγκαταλείπουν μέσω του φαινομένου

της εξατμίσης και της διαπνοής. Αν υπήρχε η δυνατότητα της ακριβούς καταγραφής της εξατμισοδιαπνοής, θεωρητικά θα επιτυγχανόταν η εκτίμηση του συνολικού υδροδυναμικού της χώρας. Παρόλο που αυτές οι υδρολογικές απώλειες είναι πολύ σημαντικές για το υδρολογικό ισοζύγιο, είναι πάρα πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια, αφού οι υδρατμοί διαχέονται στην ατμόσφαιρα, έτσι οι ποσοτικές μετρήσεις είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν μόνο μέσω πειραματικών διατάξεων. Για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής μέσω προσεγγιστικών μεθόδων, εφαρμόζονται μέθοδοι όπως Penman, Penman – Monteith κ.λπ., ενώ για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως Hargreaves, Blanney – Criddle, Thornthwaite κ.α.

Για την εκτίμηση της υδατικής κατανάλωσης των αρδευόμενων φυτικών καλλιεργειών που ταυτίζεται με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή δίνεται από:

$$E_C = k_C \cdot E_{rC} \quad (2.8)$$

όπου:

E_C : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της συγκεκριμένης καλλιέργειας.

E_{rC} : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς

k_C : ο εμπειρικός φυτικός συντελεστής, η τιμή του οποίου αφορά στη συγκεκριμένη καλλιέργεια και εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών, από το μήνα μέσα στο έτος, κ.α. Οι τιμές για τον συγκεκριμένο συντελεστή υπολογίζονται και δημοσιεύονται από το Υπουργείο Γεωργίας για τις συνηθέστερες καλλιέργειες.

Καλλιέργεια	Απρ.	Μάιος	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπτ.	Οκτ.
Πυρηνόκαρπα (Ροδακινιά, Βερικοκιά, Αχλαδιά, Δαμασκηνιά) και Φιστικιά	-	0,45	0,50	0,80	0,65	0,60	-
Κερασιά, Μηλιά, Καρυδιά	-	0,45	0,65	0,80	0,65	0,60	-
Εσπεριδοειδή	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,80
Αμπέλι	-	0,30	0,35	0,50	0,45	0,35	-
Ελιά	-	0,25	0,35	0,45	0,45	0,30	-

Πίνακας 2.4 Διακύμανση φυτικού συντελεστή k_C για διάφορες δενδρώδεις καλλιέργειες [Ε3, Πίνακας 2.2]

Λόγω πολυπλοκότητας, συνήθως επιλέγεται η εμπειρική μέθοδος Thornthwaite εξαιτίας των λίγων δεδομένων που απαιτεί. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο η δυνητική εξατμισοδιαπνοή E_p , σε mm/μήνα εκφράζεται ως εξής:

$$E_p = 16 \cdot \left(\frac{10T_a}{I} \right)^a \frac{\mu \cdot N}{360} \quad (2.9\alpha)$$

όπου:

T_a : η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C

μ : το πλήθος των ημερών του μήνα

N : η μέση αστρονομική διάρκεια της μέρας

I : εμπειρικός συντελεστής που χαρακτηρίζεται ως ετήσιος θερμικός συντελεστής

a : εμπειρικός συντελεστής που εξαρτάται από τον ετήσιο θερμικό συντελεστή.

Η τιμή του I υπολογίζεται βασισμένο στις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες των 12 μηνών του έτους (δείκτης j) και προκύπτει από τις σχέσεις:

$$I = \sum_j^{12} i_j, \quad i_j = 0,09 \cdot T_{aj}^{3/2}, \quad a = 0,016 \cdot I + 0,05 \quad (2.9\beta)$$

Δυστυχώς, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής για μία μεγάλη λεκάνη απορροής έχει πολλές δυσκολίες, ακόμα και μία απλοποιημένη εμπειρική μέθοδο εξαιτίας της ανομοιομορφίας στη χλωρίδα, της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας και των κλιματικών αλλαγών.

2.3.1.3 Κατακράτηση και διήθηση

Με τον όρο *κατακράτηση* νοείται η παρεμπόδιση ενός τμήματος της βροχής να φτάσει στο έδαφος λόγω παρεμπόδισης της χλωρίδας, αλλά και τις ανωμαλίες του εδάφους. Η ποσότητα του μέρους που κατακρατείται εξατμίζεται ή καταλήγει κάποια στιγμή στο έδαφος, με αποτέλεσμα να διηθείται. Στο πρώτο διάστημα μίας βροχόπτωσης η κατακράτηση υπάρχει σε μεγάλο βαθμό, όμως μόλις κορεσθεί η χωρητικότητα παρεμπόδισης της χλωρίδας και όλων των άλλων εμποδίων, ο ρυθμός απώλειας αρχίζει να μειώνεται. Με τον όρο *διήθηση* χαρακτηρίζεται η φυσική διαδικασία κατά την οποία το νερό που προέρχεται από βροχόπτωση, τήξη χιονιού ή άρδευση, εισχωρεί στο έδαφος. Εξαρτάται κυρίως από την ένταση και τη διάρκεια της βροχόπτωσης, από την κλίση, τις φυσικές ιδιότητες και τη σύσταση του εδάφους, από την επιφανειακή κατάσταση του, δηλαδή αν έχει ή όχι φυτά, την εδαφική υγρασία, τη θερμοκρασία, κλπ. Όλα τα παραπάνω είναι μεγέθη είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθούν, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εκτίμηση της διήθησης.

Κάθε έδαφος χαρακτηρίζεται από διαφορετική διηθητική ικανότητα με διαφορετική ένταση διήθησης f (σε mm νερού/ώρα). Παραδείγματος χάρη, στα χαλίκια ή την άμμο η βροχή έχει γρήγορα ρυθμό διήθησης και στην περίπτωση που το οριζόντιο υπόγειο φρεάτιο είναι πολύ πιο χαμηλά από την επιφάνεια του εδάφους, πολύ δύσκολα θα συμβεί επιφανειακή απορροή, ακόμα και στην περίπτωση βροχοπτώσης με μεγάλη διάρκεια και ένταση. Σε ένα αργιλώδες έδαφος, αντίθετα, η διηθητική ικανότητα είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να καλύπτεται με νερό, ακόμα και στις περιπτώσεις βροχοπτώσεων με μικρή διάρκεια και ένταση.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των παραμέτρων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δύο παραπάνω συνιστωσών, εξακολουθούν να εφαρμόζονται πειραματικές μέθοδοι. Επίσης, ένα ακόμη πρόβλημα για την αξιόπιστη ποσοτική εκτίμηση της διήθησης είναι η έντονη ανισοτροπία και ανομοιογένεια των εδαφών, ακόμα και στις μικρές εξεταζόμενες περιοχές μίας λεκάνης απορροής, με αποτέλεσμα οι διάφορες σημειακές πειραματικές μετρήσεις και τα μαθηματικά μοντέλα να μην μπορούν να εξυπηρετήσουν το σκοπό αυτό. Η ποσοτική περιγραφή του φαινομένου πραγματοποιείται συχνά από το εμπειρικό μοντέλο Horton, όπου η ένταση f της διήθησης εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-K_d t} \quad (2.10)$$

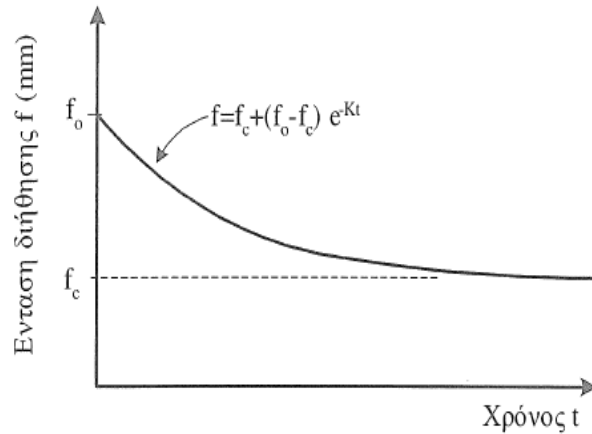
όπου:

f : η ασυμπτωτική τιμή της έντασης της διήθησης (για μεγάλες τιμές του χρόνου t), η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια και το είδος του εδάφους,

f_o : η αρχική τιμή της έντασης της διήθησης, η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια και το είδος του εδάφους, όπου $t=0$,

K_d : σταθερά που χαρακτηρίζει την επιφάνεια του εδάφους, η οποία είναι μικρή σε επιφάνειες με βλάστηση και μεγάλη σε γυμνό περιβάλλον.

Σε γυμνό, χαλικώδες ή αμμώδες έδαφος, οι τιμές των f και f_o είναι μεγάλες, ενώ στην περίπτωση του αργιλώδους εδάφους είναι μικρές. Όταν το έδαφος καλύπτεται με χλόη, οι τιμές των f_c και f_o αυξάνονται, ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους. Η τιμή f_c εξαρτάται επίσης, από την εδαφική υγρασία, την κλίση του εδάφους για κλίσεις μικρότερων των 16 – 24%, καθώς και την ένταση της βροχοπτώσης (όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχοπτώσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η εδαφική υγρασία).



Σχήμα 2.10 Χρονική μεταβολή της έντασης διήθησης [Ε3, Σχ. 2.6]

Τύπος εδάφους και φυτοκάλυψης	f_0 (mm/h)	f_c (mm/h)	K (h ⁻¹)
Τυπικό αγροτικό, γυμνό	280	2 - 200	96
Τυπικό αγροτικό με κάλυψη χλόης	900	20 - 290	48
Λεπτή αμμώδης άργιλος, γυμνή	210	2 - 25	120
Λεπτή αμμώδης άργιλος, με κάλυψη χλόης	670	10 - 30	84

Πίνακας 2.5 Ενδεικτικές τιμές f_0 , f_c , K για διάφορους τύπους εδάφους και φυτοκάλυψης [Ε3, Πίνακας 2.3]

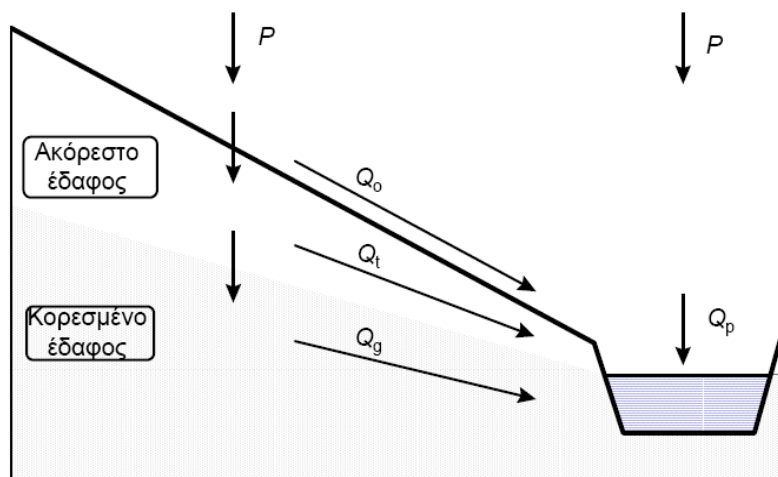
Είναι δεδομένο πως όλα τα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα διήθησης, ισχύουν στην περίπτωση που το έδαφος έχει κατακλυσθεί και κατ' επέκταση το ανώτερο στρώμα του είναι κορεσμένο και η διηθητική ικανότητα είναι μικρότερη από την ένταση της βροχόπτωσης. Συνήθως το έδαφος είναι ακόρεστο κατά την έναρξη μία βροχόπτωσης, όταν έχει περάσει μεγάλο χρονικό διάστημα από την προηγούμενη βροχή, όμως, αν η ένταση της βροχής είναι μεγάλη, τότε ο κορεσμός θα επανέλθει σε χρονικό διάστημα t_p (χρόνος κατάκλυσης). Στην περίπτωση που η ένταση της καινούριας βροχόπτωσης είναι μικρή, υπάρχει πιθανότητα να μην επέλθει ποτέ η κατάκλυση.

2.3.2 Επιφανειακή απορροφή

2.3.2.1 Μηχανισμοί επιφανειακής απορροής

Επιφανειακή απορροφή ορίζεται η ροή του νερού των υδατορευμάτων εξαιτίας της βαρύτητας, χωρίς όμως να έχει σημασία το μέγεθος του υδατορευμάτος (από ένα μικρό ρυάκι έως ένα μεγάλο ποταμό, π.χ. Αμαζόνιος). Συνήθως

εκφράζεται από τα μεγέθη της παροχής, του ισοδύναμου ύψους ή του όγκου. Η ανάλυση της κίνησης του νερού στο υδρογραφικό δίκτυο είναι κατανοητή, αφού περιγράφεται από εξισώσεις υδραυλικής. Το δύσκολο κομμάτι αφορά στην γέννηση της επιφανειακής απορροής, δηλαδή πριν φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο.



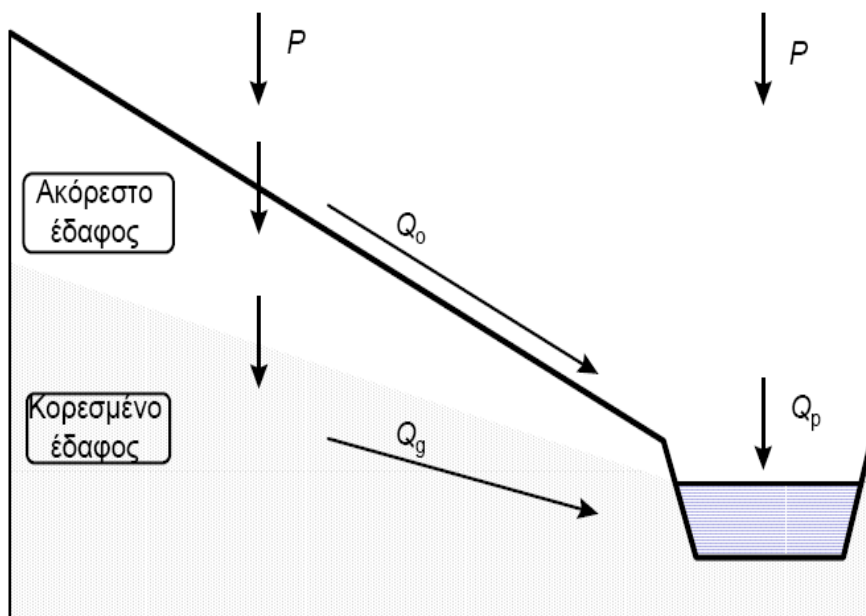
Σχήμα 2.11 Σχηματικό διάγραμμα διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής απορροής [E12, Σχ. 5.1]

Στο παραπάνω σχήμα (2.11) υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές προελεύσεις πριν φτάσει το νερό στο υδατόρευμα.

- (α) Άμεσα κατακρημνίσματα στο υδατόρευμα (Channel precipitation Q_p). Εδώ υπάρχει άμεση επιφανειακή απορροή από τα κατακρημνίσματα, αλλά συνήθως η συμμετοχή της στη συνολική επιφανειακή απορροή είναι μικρή, γιατί η επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου είναι αμελητέα μπροστά στην έκταση της λεκάνης απορροής.
- (β) Επίγεια ροή (Overland flow Q_o). Η επίγεια ροή αναφέρεται στη δισδιάστατη ροή που πραγματοποιείται στην επιφάνεια του εδάφους. Διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις:
 1. *Επίγεια ροή Horton (Hortonian overland flow)*: Σύμφωνα με τον Horton αν η ένταση της βροχής ξεπεράσει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους f με κλίση, δημιουργούνται συνθήκες κατάκλυσης του εδάφους και ξεκινάει η επίγεια ροή. Η επίγεια ροή Horton είναι γνωστή επίσης, ως «επίγεια ροή λόγω κορεσμού από πάνω» (overland flow saturated from above), εξαιτίας των συνθηκών κατάκλυσης, που λαμβάνουν χώρα επιφανειακά. Επομένως, ένα τμήμα των κατακρημνισμάτων P , διηθείται στο έδαφος, τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφορείς, ενώ το υπόλοιπο τμήμα ρέει ως επίγεια ροή Q_o . Επιπλέον, γίνεται τροφοδοσία της επιφανειακής απορροής με αρκετά μικρότερο ρυθμό από τους υπόγειους υδροφορείς μέσω της υπόγεια ροής Q_g .

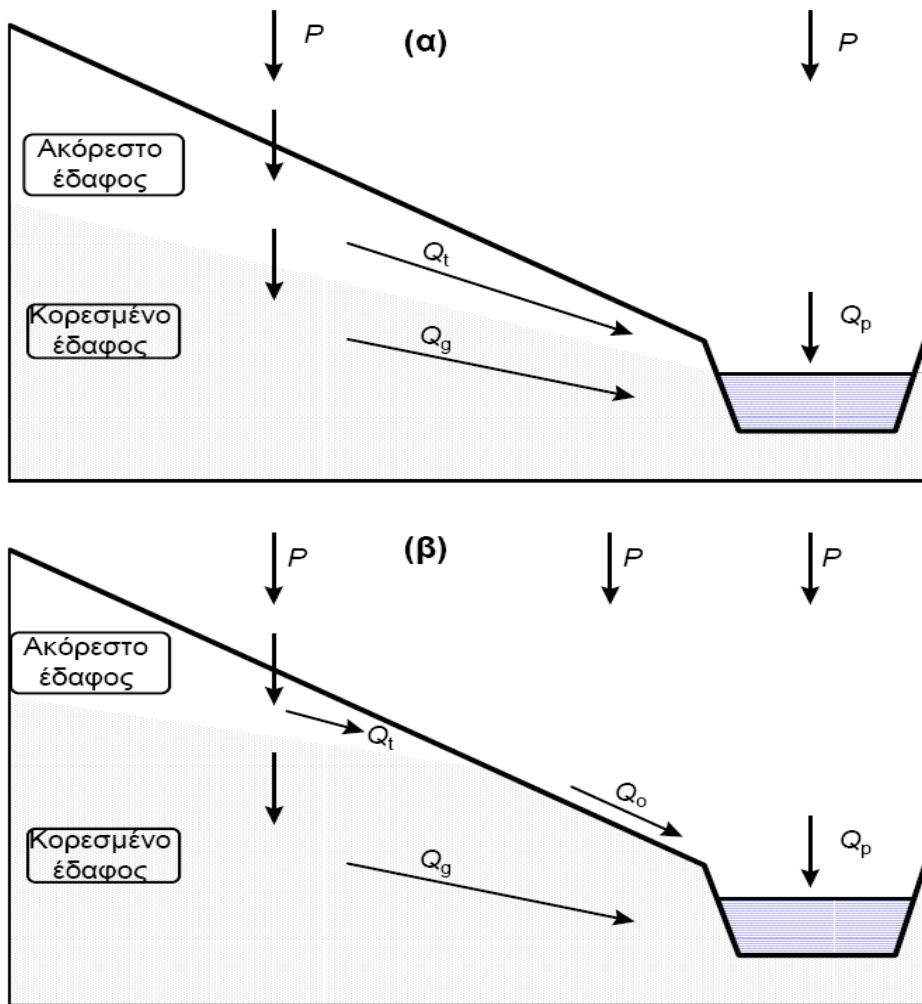
2. *Επίγεια ροή λόγω κορεσμού - Υπόθεση Hewllet (Overland flow saturated from above)*: Εξαιτίας διαφόρων αμφιβολιών σχετικά με την περίπτωση του Horton περί κατάκλυσης εδάφους, διατυπώθηκε μία εναλλακτική υπόθεση με παρατηρήσεις και μετρήσεις πεδίου, η οποία είναι γνωστή ως υπόθεση Hewllet. Σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση, η διαπερατότητα του εδάφους κατά το ανώτερο στρώμα του, στο μεγαλύτερο μέρος μίας λεκάνης απορροής είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε να μην επιτρέπει τον κορεσμό του από πάνω, άρα και την κατάκλυση, ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχουν παρατεταμένες καταιγίδες. Επομένως, στα πρώτα λεπτά της βροχόπτωσης, πραγματοποιείται διήθηση, χωρίς επίγεια ροή. Όμως κάτω από το έδαφος πραγματοποιείται πλευρική ροή τόσο στην ακόρεστη περιοχή (Q_t), όσο και στην κορεσμένη περιοχή του εδάφους (Q_g). Η σύγκλιση των δύο παραπάνω ροών στην κάτω περιοχή του εδάφους, έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωση του φρεατίου ορίζοντα, δηλαδή της διαχωριστικής επιφάνειας ακόρεστου και κορεσμένου εδάφους, ώσπου σε ένα τμήμα αυτή η διαχωριστική επιφάνεια φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτό το τμήμα η διήθηση είναι αδύνατη, ενώ είναι πιο πιθανή η ανάβλυση του υπόγειου νερού – return flow, επομένως η βροχή μετατρέπεται σε επίγεια ροή, γνωστή ως *επίγεια ροή λόγω κορεσμού από κάτω*.

Horton



Σχήμα 2.12 Σχηματικό διάγραμμα κίνησης νερού κατά Horton [E12, Σχ. 5.2]

Hewlett



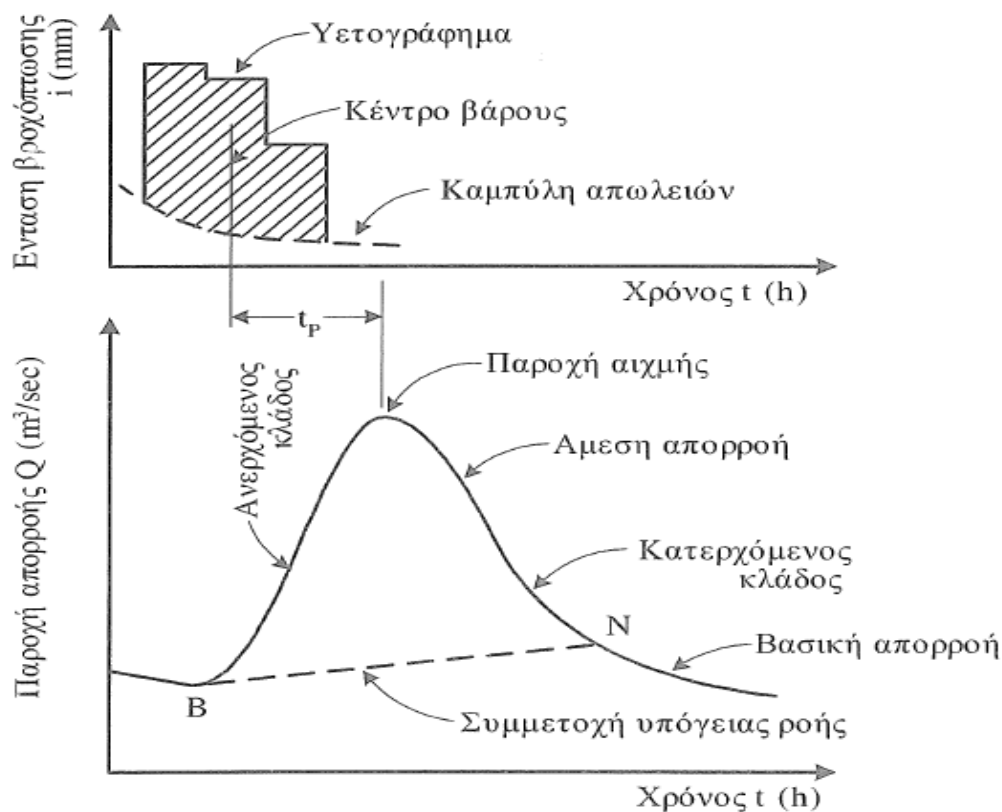
Σχήμα 2.13 Σχηματικό διάγραμμα κίνησης νερού κατά Hewlett (α) αρχικό στάδιο, (β) προχωρημένο στάδιο [E12, Σχ. 5.3]

- (γ) Υποδερμική ροή (Interflow, throughflow, subsurface stormflow Q_t). Η υποδερμική ροή αφορά στο σύνολο των διάφορων τύπων υπεδάφιαων ροών που λαμβάνουν χώρα με γρήγορους ρυθμούς κατά τη διάρκεια υψηλών βροχοπτώσεων, ενισχύοντας την επιφανειακή απορροή. Όπως φαίνεται στα σχήματα 2.11 και 2.12 η υποδερμική ροή πραγματοποιείται κοντά στην επιφάνεια του ακόρεστου εδάφους, χωρίς όμως να αποκλείεται η ροή σε συνθήκες κορεσμού. Η ύπαρξη της συνήθως οφείλεται στην ανομοιογένεια και ανισοτροπία των εδαφών,
- (δ) Υπόγεια ροή (Groundwater flow Q_g). Πρόκειται για το νερό που φτάνει στο κορεσμένο έδαφος και ενισχύει το σχηματισμό των υπόγειων υδροφορέων, προκαλώντας την υπόγεια ροή, η οποία ξαναβγαίνει στο έδαφος είτε με τη μορφή σημειακών πηγών, είτε κατά μήκος των φυσικών

υδατορευμάτων που έρχονται σε επαφή με τους υδροφορείς (Σχήμα 2.11). Η εξέλιξη της υπόγειας ροής σε αντίθεση με τα παραπάνω, πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα η τροφοδοσία της επιφανειακής απορροής από αυτήν να είναι διαρκής.

2.3.2.2 Υδατογράφημα

Κατά τη διάρκεια μίας έντονης βροχόπτωσης η άμεση απόκριση της ροής στο υδατόρευμα είναι εμφανής και οφείλεται στο γεγονός πως ένα τμήμα από τα κατακρημνίσματα έχει μία πολύ γρήγορη πορεία, επίγεια ή υπόγεια προς το υδατόρευμα. Παρατηρείται συνεχόμενη ροή ακόμα και σε περιόδους ανομβρίας, το οποίο επιβεβαιώνει το γεγονός πως ένα μέρος των κατακρημνισμάτων ακολουθούν υπόγεια πορεία προς το υδατόρευμα με πολύ αργό ρυθμό. Έτσι διακρίνονται δύο συνιστώσες επιφανειακής απορροής: η βασική απορροή, η οποία οφείλεται στους μηχανισμούς της υπόγεια ροής και δεν επηρεάζεται σημαντικά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών και την άμεση ή ταχεία απορροή που αποτελεί το μετασχηματισμό της ενεργού βροχής με μία χρονική υστέρηση, εξαιτίας των διαδρομών που διατρέχει το νερό στην επιφάνεια της λεκάνης, ώσπου να φτάσει στην εξεταζόμενη διατομή εξόδου. Η ποσοτική απεικόνιση της μεταβολής της απορροής (m^3/s) για μία συγκεκριμένη διατομή υδατορεύματος A (λεκάνη απορροής ή υδρολογική λεκάνη) ονομάζεται *υδατογράφημα*.



Σχήμα 2.14 Σχηματική παράσταση τυπικού υδατογραφήματος και του αντίστοιχου υετογραφήματος [Ε3, Σχήμα 2.7]

Στο σχήμα 2.14 παρουσιάζεται σχηματικά η παράσταση ενός τυπικού υδατογραφήματος με το αντίστοιχο νετογράφημα, δηλαδή η χρονική εξέλιξη της έντασης της βροχόπτωσης, στην οποία οφείλεται το εξεταζόμενο φαινόμενο. Όσο η βροχόπτωση βρίσκεται στην αρχή, η κατακράτηση και διήθηση είναι πιο έντονες και σημειώνεται σταδιακή μείωση, όσο περνάει η βροχόπτωση συνεχίζεται. Έτσι, η επίγεια ροή γίνεται όλο και μεγαλύτερη, ώσπου αρχίζει να τροφοδοτείται η απορροή του υδατορεύματος, η παροχής της οποίας θα φτάσει στο μέγιστο σε χρόνο t_p (χρόνος κατάκλισης), μετρούμενο από τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του νετογραφήματος. Μετά από αυτό το σημείο η παροχή της απορροής αρχίζει να μειώνεται σταδιακά. Εξαιτίας της ανύψωσης του φρεατίου που αναφέρθηκε παραπάνω, δημιουργείται επιπλέον συνεισφορά στο υδατόρευμα μέσω της υπόγειας ροής, η οποία φθίνει κατά τη διάρκεια της αποφόρτισής της, ενώ παράλληλα χαμηλώνει ξανά η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Η εκθετική καμπύλη που περιγράφει τη βασική ροή του υδατορεύματος είναι:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-at} \quad (2.11)$$

Όπου:

Q_0 : η αρχική τιμή της βασικής απορροής στο χρόνο t ,

a : συντελεστής στείρευσης, ο οποίος χαρακτηρίζει το υδροφόρο στρώμα

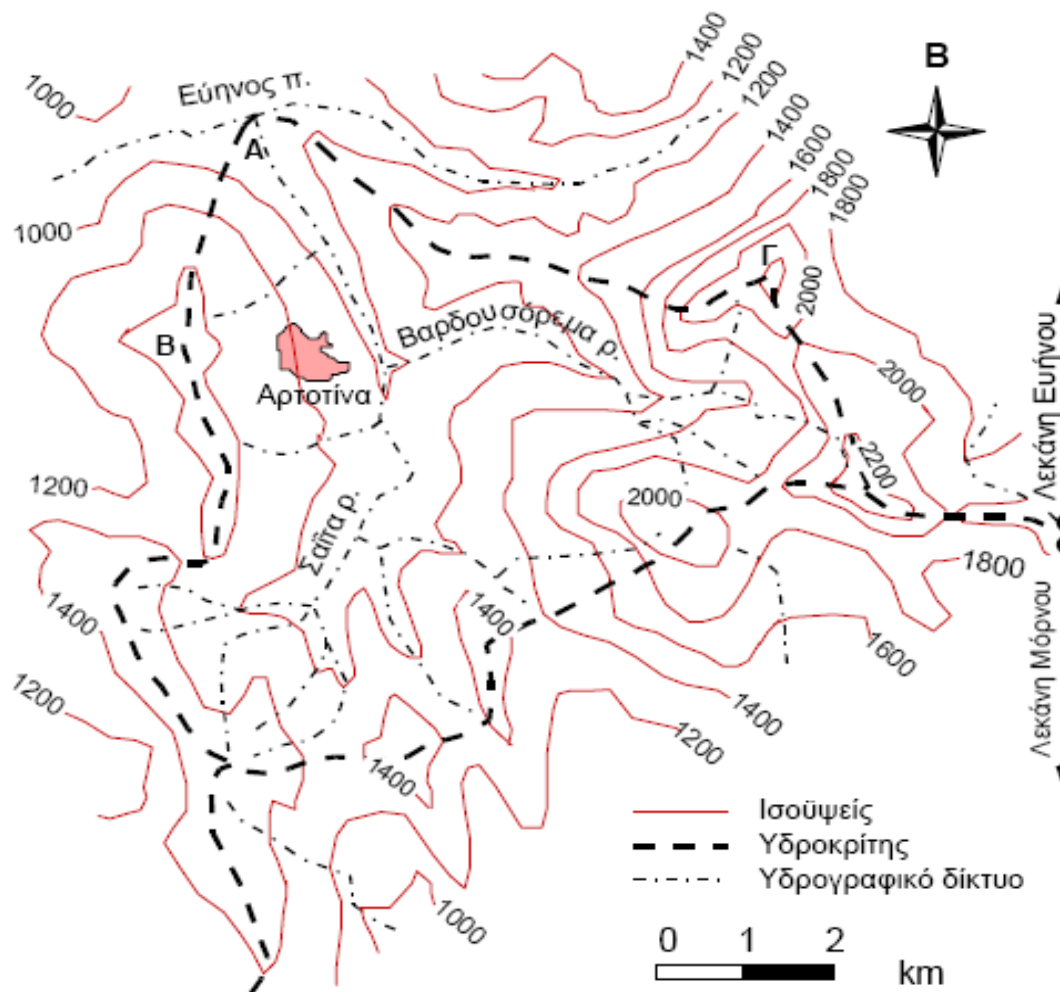
Ο προσδιορισμός του σημείου B στο σχήμα (2.14) είναι σχετικά εύκολος γιατί είναι ίδιο με το σημείο μεταβολής της ήπιας φθίνουσας καμπύλης σε έντονη αύξουσα καμπύλη. Αντίθετα, ο προσδιορισμός στο σημείο N που χαρακτηρίζει τη λήξη της απορροής είναι αρκετά δύσκολος και έχουν εξετασθεί διάφορες μέθοδοι. Ως πιο αξιόπιστη μέθοδος έχει χαρακτηριστεί αυτή που βασίζεται στη λογαρίθμηση της εξίσωσης (2.11), όπου η βασική απορροή βρίσκεται στην περιοχή της άμεσης απορροής από την αλλαγή της κλίσης. Η ευθεία γραμμή μεταξύ των σημείων έναρξης B και λήξης N της άμεσης ροής θεωρείται η διαχωριστική γραμμή μεταξύ της άμεσης και βασικής απορροής.

2.3.2.3 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Η απορροή σε μία συγκεκριμένη διατομή υδατορεύματος επηρεάζεται σημαντικά κάποια γνωρίσματα της λεκάνης απορροής, τα οποία ονομάζονται φυσιογραφικά χαρακτηριστικά και μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

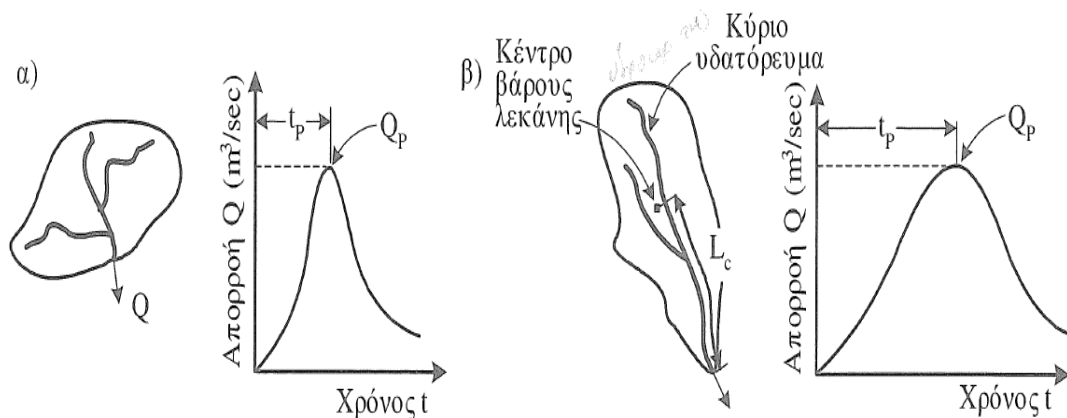
- Μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως είναι το ανάγλυφο, η μορφή και το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Η χάραξη του υδατοκρίτη σε ένα χάρτη, για μία δεδομένη θέση της διατομής A του υδατορεύματος ξεκινάει η χάραξη του αρχικά προς τη μία κατεύθυνση, προχωρώντας κάθετα προς τις ισοϋψείς καμπύλες και ανεβαίνοντας υψόμετρο μέχρι την

κορυφογραμμή, πχ στο σημείο Β του σχήματος (2.15). Το ίδιο ακριβώς πραγματοποιείται και από την άλλη πλευρά του υδατορεύματος ως την κορυφή Γ του σχήματος (2.15). Στη συνέχεια γίνεται χάραξη μεταξύ των σημείων Β και Γ με προσοχή, ώστε να μην υπάρξει μείωση των υψομέτρων και προς τις δύο πλευρές αυτής της κορυφογραμμής. Η διαφοροποίηση της μορφής της λεκάνης επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης απορροής, όπως φαίνεται στο σχήμα (2.16)



Σχήμα 2.15 Παράδειγμα χάραξη υδατοκρίτη λεκάνης απορροής [Ε12, Σχήμα 5.6]

- Η σύσταση των εδαφών της λεκάνης απορροής επηρεάζει αρκετά τα υδρολογικά ελλείμματα, καθώς και την επιφανειακή απορροή. Οι μηχανικές ιδιότητες των εδαφών επηρεάζουν άμεσα την απορροή και σε συνδυασμό με τη χημική σύστασή τους, καθορίζουν τη φυτοκάλυψη και τους τύπους της χλωρίδας.
- Η φυτοκάλυψη του εδάφους της λεκάνης απορροής, δηλαδή η χωρική της διάταξη και τα είδη της χλωρίδας από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 2.16 Επίδραση της μορφής της λεκάνης απορροής στο υδατόρευμα.

α) Συμπαγής λεκάνη, β) Επιμήκης λεκάνη [Ε3, Σχήμα 2.8]

2.3.2.4 Ενεργός βροχόπτωση και συντελεστής απορροής

Ενεργός βροχόπτωση χαρακτηρίζεται το τμήμα της βροχόπτωσης με ένταση i που μετατρέπεται σε απορροή και η έντασή της συμβολίζεται με i_e . Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$i_e = i - i_a \quad (2.12)$$

όπου:

i_a : η ένταση όλων των ελλειμμάτων λόγω κατακράτησης ή διήθησης.

Η σχέση προσδιορισμού της ενεργού βροχόπτωσης από την ολική βασίζεται στην παρακάτω αναλογία:

$$i_e = \psi \cdot i \quad (2.13)$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής ψ εκφράζει το συντελεστή απορροής της εξεταζόμενης επιφάνειας και εξαρτάται από τον τύπο και τις χρήσεις της γης.

Τύπος και χρήσεις γης	ψ	Τύπος και χρήσεις γης	ψ
Μονοκατοικίες	0,30 - 0,50	Οδόστρωμα	0,75 - 0,95
Μονοκατοικίες σε προάστιο	0,25 - 0,40	Πάρκα, κήποι	0,19 - 0,30
Αστικές κατοικίες	0,60 - 0,80	Χλοοκάλυψη με κλίση <2%	0,05 - 0,16
Ελαφρά βιομηχανία	0,50 - 0,80	Χλοοκάλυψη με κλίση <8%	0,10 - 0,25
Βαριά βιομηχανία	0,60 - 0,90	Χλοοκάλυψη με κλίση >8%	0,20 - 0,36

Πίνακας 2.6 Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή απορροής ψ [Ε3, Πίνακας 2.4]

Επιπλέον, η εκτίμηση των ελλειμμάτων μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μέσω της μεθόδου του δείκτη φ (σε μονάδες έντασης βροχής). Το φ αντιπροσωπεύει το σταθερό ρυθμό πραγματοποίησης ελλειμμάτων. Αν η ένταση της βροχής i είναι μικρότερη του φ , τότε τα ελλείμματα πραγματοποιούνται με ρυθμό i , δηλαδή:

$$i_a = \min(\varphi, i) \quad \& \quad i_e = \max(i - \varphi, 0) \quad (2.14)$$

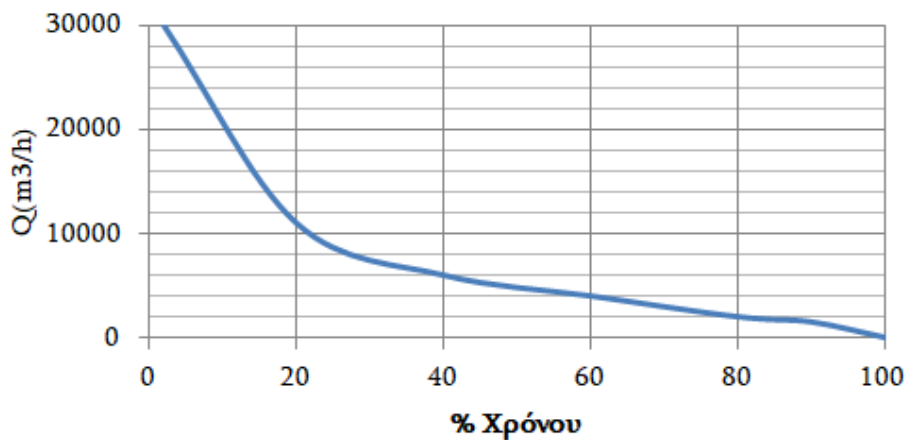
Αν είναι γνωστό το πραγματικό νετογράφημα $i(t)$ και η τιμή του δείκτη φ , τότε προσδιορίζεται εύκολο το νετογράφημα της ενεργού βροχόπτωσης $ie(t)$. Όταν υπάρχει σταθερή ένταση βροχόπτωσης και οι δύο μέθοδοι, αυτή του δείκτη φ και αυτή του συντελεστή απορροής ψ , είναι ισοδύναμες, απλά η πρώτη εκφράζει καλύτερα τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν. Στη μέθοδο του δείκτη φ δε λαμβάνεται υπόψη πως ο ρυθμός των ελλειμμάτων μεταβάλλεται, αλλά παρουσιάζει φθίνουσα πορεία.

2.3.2.5 Καμπύλη διάρκειας παροχής

Η καμπύλη διάρκειας είναι ένα αρκετά χρήσιμο εργαλείο, αφού παρουσιάζει τη μεταβλητότητα του ενός εξεταζόμενου μεγέθους στο χρόνο, όπως π.χ. την παροχή για τα υδροηλεκτρικά. Χρησιμοποιείται κυρίως στις μελέτες για αρδευτικούς σκοπούς, αλλά και για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και ισχύος, κυρίως στα μικρά υδροηλεκτρικά. Στα μεγάλα υδροηλεκτρικά αυτή η πληροφορία δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού χρησιμοποιούν ταμιευτήρα για αποθήκευση νερού. Η καμπύλη διάρκειας παροχής προκύπτει από τις τιμές τις παροχής, ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά, σε συνάρτηση με το χρόνο (%). Ουσιαστικά πρόκειται για μετρημένες τιμές τις παροχής στην εξεταζόμενη διατομή του υδατορεύματος, σε ημερήσια, εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση. Αν η καμπύλη βασιστεί σε μέσες παροχές το αποτέλεσμα δε θα συμπεριλαμβάνει τις έντονες διακυμάνσεις, όταν αυτές υπάρχουν.

Το εμβαδόν που σχηματίζεται κάτω από την καμπύλη είναι ίσο προς τον όγκο του νερού που διέρχεται από την επιφάνεια εξόδου κατά τη χρονική κλίμακα που αντιπροσωπεύει το διάγραμμα (π.χ. ένας μήνας, ένα έτος, κλπ). Επειδή όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι πολύ δύσκολο να υπάρχουν καταγεγραμμένα τόσο πολλά δεδομένα, έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι προκειμένου να βοηθήσουν στον υπολογισμό της καμπύλης παροχής.

Καμπύλη Διάρκειας Παροχής



Σχήμα 2.17 Ενδεικτική ετήσια καμπύλη διάρκειας παροχής [Ε3, Σχήμα 2.9]

Μία προσέγγιση εξετάζει για παράδειγμα το μέσο ετήσιο όγκο του νερού R , το οποίο διέρχεται από την εξεταζόμενη διατομή. Ο όγκος αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$R = A \cdot h_m \cdot \psi \quad (2.15)$$

όπου:

A : η επιφάνεια της λεκάνης απορροής,

h_m : το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης, το οποίο προκύπτει είτε από ισούψείς καμπύλες, λαμβάνοντας υπόψη το εμβαδόν μεταξύ διαδοχικών καμπυλών, είτε μέσω των τεχνικών που αναλύθηκαν για τον υπολογισμό των κατακρημνισμάτων στο κεφάλαιο 2.3.1.1,

ψ : η εκτιμώμενη τιμή του συντελεστού απορροής.

Η εφαρμογή της σχέσης (2.15) απαιτεί κάποιες μετατροπές μονάδων. Η ετήσια μέση παροχή Q_m είναι ίση με τον ετήσιο όγκο του διερχόμενου νερού προς τη διάρκεια της αντίστοιχης περιόδου, π.χ. 1 έτος = $365 \times 24 \times 60 \times 60$ sec. Η καμπύλη διάρκειας παροχής μετά, προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό κάθε τιμής της καμπύλης διάρκειας του μέσου μηνιαίου ύψους βροχόπτωσης ως προς το μέσο ετήσιο h_m , για κάθε τιμή του χρόνου επί τη μέση ετήσια παροχή Q_m .

Τέλος, ο πιο ασφαλής τρόπος μεταφοράς μίας καμπύλης παροχής από μία θέση που υπάρχουν μετρήσεις της παροχής, στη θέση προς εξέταση είναι αυτός της εντοπικής ή γεωγραφικής μεταβολής των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις συσχετίσεις που περιγράφουν την καμπύλη διάρκειας παροχής. Για την Ελλάδα η συσχέτισή που περιγράφει τη μηνιαία καμπύλη διάρκειας παροχής είναι:

$$Q = a_0 - a_1 \cdot D + a_2 \cdot D^2 - a_3 \cdot D^3 \quad (2.16)$$

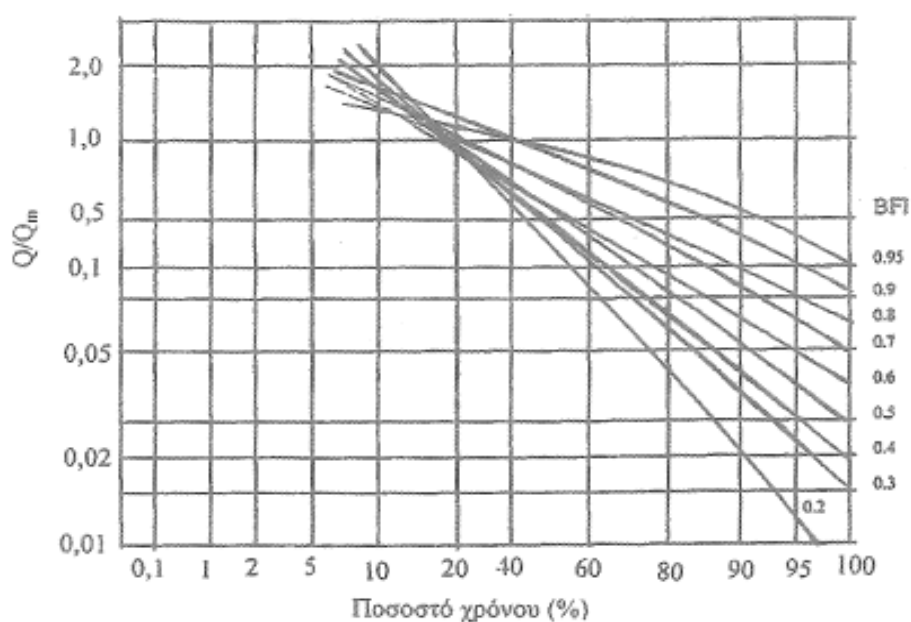
όπου:

Q: η παροχή σε m³/sec,

D: το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου,

a_0, a_1, a_2, a_3 : παράμετροι που σχετίζονται με κάποια βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, το πιο ψηλό σημείο της λεκάνης μέχρι την εξεταζόμενη διατομή, την έκτασή της, την υψομετρική διαφορά και το μήκος του κύριου κλάδου υδατορεύματος από τον υδατοκρίτη ως την εξεταζόμενη διατομή. Επιπλέον βασίζονται και στη μέση ετήσια κατακρήμνιση στη λεκάνη απορροής.

Επιπλέον, μία ακόμα μέθοδος είναι η χρήση των τυποποιημένων καμπυλών διάρκειας της παροχής με παράμετρο το λόγο BFI (Baseflow Index) της βασικής απορροής προς τη συνολική επιφανειακή απορροή σε μία εξεταζόμενη λεκάνη. Η τιμή του BFI προκύπτει από το υδατογράφημα και εκφράζει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του BFI, τόσο μεγαλύτερη είναι η διηθητική ικανότητα του εδάφους και η συνεισφορά της βασικής ροής άρα τόσο πιο επίπεδη θα προκύψει η καμπύλη της διάρκειας παροχής.

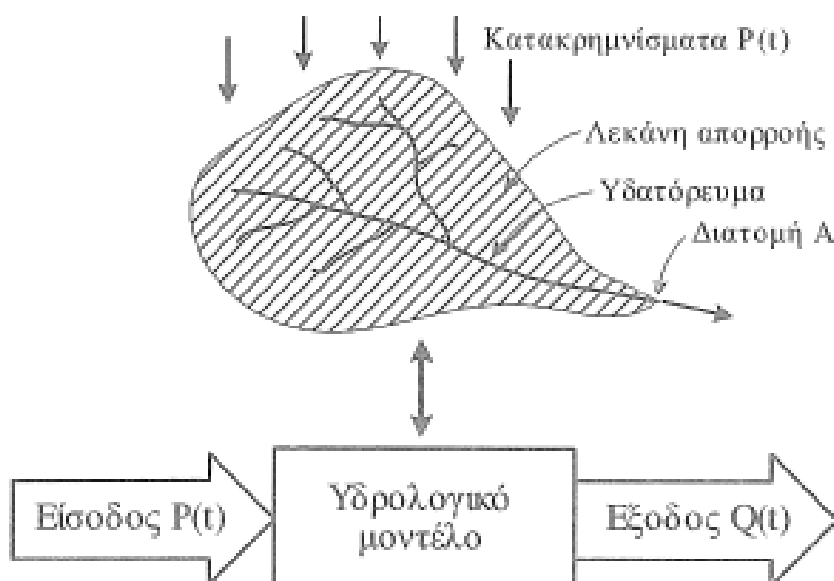


Σχήμα 2.18 Τυποποιημένες αδιαστατοποιημένες καμπύλες διάρκειας παροχής με τη βοήθεια της παραμέτρου BFI της βασικής απορροής προς τη συνολική επιφανειακή απορροή [Ε3, Σχήμα 2.10]

2.3.2.6 Υδρολογικά μοντέλα επιφανειακής απορροής

Κατά τη μελέτη των υδροηλεκτρικών σταθμών, μεγάλη σημασία έχει η ποσοτική εκτίμηση των διαφορών όρων που υπάρχουν στο υδατικό ισοζύγιο μίας εξεταζόμενης λεκάνης απορροής που οδηγεί στο μέγεθος που είναι το πιο σημαντικό για τον υπολογισμό των μικρών υδροηλεκτρικών, την παροχή. Δυστυχώς όμως, κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο, γιατί τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον υδρολογικό κύκλο και επικρατούν στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, παρουσιάζουν μεγάλες ανομοιομορφίες στις συνθήκες του εδάφους, της βλάστησης, κλπ. Μόνο οι ποσότητες των εισροών από τα κατακρημνίσματα και συγκεκριμένα των βροχοπτώσεων είναι δυνατό να εκτιμηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω βροχομετρικού δικτύου, όπου συνήθως έχουν διαθέσιμο μεγάλο πλήθος μετρήσεων.

Υδρολογικό μοντέλο ονομάζεται το σύνολο των μαθηματικών μετασχηματισμών που αξιοποιούν υδρολογικά δεδομένα και λογικές υποθέσεις σχετικά με το μηχανισμό του υδρολογικού κύκλου με σκοπό την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών στον κατάλληλο χρόνο και χώρο.



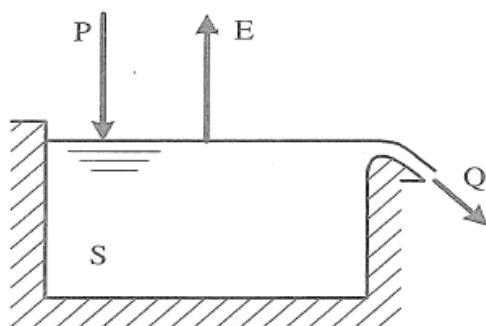
Σχήμα 2.19 Σχηματική παράσταση υδρολογικού μοντέλου [E3, Σχήμα 2.11]

Σαν είσοδος του συστήματος λαμβάνονται οι μετεωρολογικές μεταβλητές, κατά κύριο λόγο τα κατακρημνίσματα, και ως έξοδος θεωρείται η απορροή. Για να δράσει αξιόπιστα, θα πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις πολλών ετών της φυσικής απορροών και των βροχοπτώσεων κατά την ίδια χρονική περίοδο. Με αυτόν τον τρόπο εισάγοντας τις χρονοσειρές μετρήσεων για τις βροχοπτώσεις θα προκύψει ως έξοδος διακύμανση της φυσικής απορροής. Γενικά στις εκτιμήσεις των

βροχοπτώσεων υπάρχει μικρό σφάλμα, διότι υπάρχει διαθεσιμότητα στοιχείων πολλών ετών.

Ένα από τα πιο απλά μοντέλα συσχέτισης της φυσικής απορροής με τις βροχοπτώσεις είναι το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite, κατά το οποίο γίνεται προσομοίωση της λεκάνης απορροής με μία δεξαμενή χωρητικότητας K (mm). Η ποσότητα του νερού που είναι αποθηκευμένη μέσα στη δεξαμενή είναι η εδαφική υγρασία και αποθηκευμένη ποσότητα ύδατος σε mm S , για την οποία η μέγιστη τιμή θα είναι ίση με K , όση δηλαδή η χωρητικότητα της δεξαμενής. Η βροχόπτωση P είναι η είσοδος στη δεξαμενή, η εξατμισοδιαπνοή E είναι η έξοδος και η ποσότητα που υπερχειλίζει είναι η επιφανειακή απορροή Q . Σύμφωνα με τα παραπάνω η επιφανειακή απορροή Q θα επιτευχθεί μόνο γεμίσει η λεκάνη και κεραστεί το έδαφος. Το υδατικό ισοζύγιο εκφράζεται από τη σχέση $\Delta S = P - E - Q$ (2.2), στην οποία αν γίνει εφαρμογή για τα μεγέθη που αφορούν το μήνα I παίρνει τη μορφή:

$$S(I) = S(I-1) + P(I) - E(I) - Q(I) \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.20 Υδρολογικό μοντέλο Thornthwaite [E3, Σχήμα 2.12]

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (2.9α) και (2.9β) βάσει της μεθόδου Thornthwaite, προκύπτουν δύο περιπτώσεις ανάλογα με το ύψος της βροχόπτωσης $P(I)$ σε σχέση με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή $E_P(I)$ για τον εξεταζόμενο μήνα:

- i. Αν η βροχόπτωση $P(I)$ είναι μεγαλύτερη ή ίση από τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή $E_P(I)$, τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή $E(I)$ είναι ίση με τη δυνητική, δηλαδή $E(I) = E_P(I)$ άρα:

$$\text{Για } Q(I)_{\min} = 0, \text{ ισχύει } S(I) = S(I-1) + P(I) - E(I) \quad (2.18)$$

$$\text{Για } S(I)_{\max} = K, \text{ ισχύει } Q(I) = S(I-1) + P(I) - E(I) - K \quad (2.19)$$

- ii. Αν η βροχόπτωση $P(I)$ είναι μικρότερη από τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τότε η εδαφική αποθήκευση μειώνεται εκθετικά με μηδενική επιφανειακή απορροή:

$$S(I) = S(I - 1)e^{\frac{P(I) - E_P(I)}{K}} \quad (2.20)$$

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή δίνεται από:

$$E(I) = [S(I-1) - S(I)] + P(I) \quad (2.21)$$

Η εφαρμογή του μοντέλου λαμβάνει υπόψη πως κατά την έναρξη του υδρολογικού έτους η ποσότητα του αποθηκευμένου νερού στη δεξαμενή είναι μηδενική και η τιμή της χωρητικότητας της λεκάνης K , προσαρμόζεται έτσι, ώστε το σύνολο της απορροής $\Sigma Q(I)$ ανά έτος να ναι ίδιο με τη μέτρηση της λεκάνης απορροής.

2.3.3 Πλημμυρική παροχή

Ο υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής, είναι πολύ σημαντικός για τη διαστασιολόγηση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, γιατί οποιαδήποτε αστοχία θα μπορούσε να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα, τόσο στη λειτουργία του σταθμού, όσο και στο περιβάλλον. Σε περίπτωση πλημμύρας η λειτουργία του σταθμού διακόπτεται λόγω των φερτών υλικών, τα οποία μπορεί να εξαιτίας των μεγάλων ταχυτήτων να μην κάθονται, αλλά είναι μεγαλύτερο το ποσοστό τους συνολικά. Επειδή η πλημμύρα πρόκειται καθαρά για ένα στατιστικό μέγεθος, αφού προκύπτει από τις εντάσεις των βροχοπτώσεων, ουσιαστικά εξετάζεται η περίοδος επαναφοράς της και για τα μικρά υδροηλεκτρικά υπολογίζεται στα 50 με 100 έτη. Παρακάτω φαίνεται το ποσοστό της πιθανότητας διακινδύνευσης για την επανεμφάνιση ενός πλημμυρικού φαινομένου, ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς.

Συχνότητα Επανεμφάνισης (Περίοδος Επαναφοράς)	10 χρόνια	50 χρόνια	100 χρόνια	200 χρόνια
0,01 (100)	9,60%	39%	63%	87%
0,001 (1000)	1%	5%	9,50%	18%
0,0001 (10000)	0,10%	0,50%	1%	2%

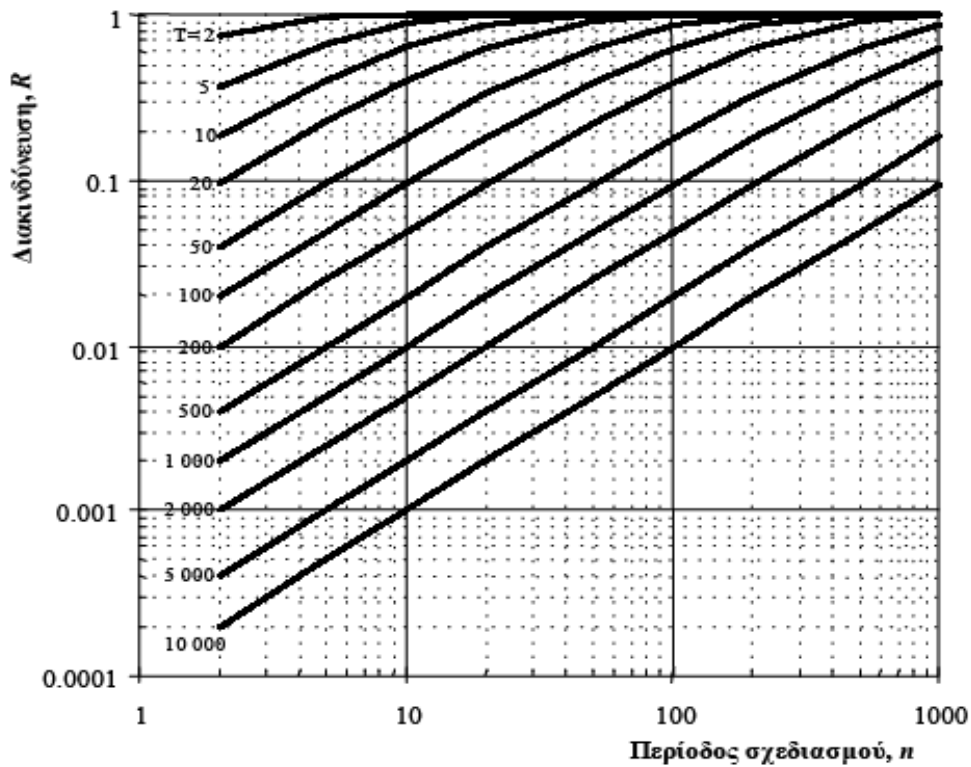
Πίνακας 2.7 Πιθανότητες πλημμύρας (διακινδύνευσης) ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς του φαινομένου [Ξ1, Table 3 – 4]

Ο παραπάνω πίνακας (2.7) προέκυψε μετά από εφαρμογή του παρακάτω τύπου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πιθανότητας ενός πλημμυρικού φαινομένου:

$$P(X \leq x)_n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (2.22)$$

όπου:

- x: η τιμή της πλημμυρικής παροχής ,
- X: η τιμή της παροχής,
- T: η περίοδος επαναφοράς σε έτη,
- n: το εξεταζόμενο διάστημα σε έτη.



Σχήμα 2.21 Γραφική απεικόνιση της σχέσης των χαρακτηριστικών μεγεθών υδρολογίας εκφράζοντας την εξίσωση 2.22 [Ε15, Σχ. 4.3]

Για την εκτίμηση της χρησιμοποιούνται τεχνικές που βασίζονται κυρίως σε δύο μεθόδους:

1. Στοχαστική αξιολόγηση με αξιοποίηση επί σειρά ετών μετρήσεων των μέγιστων τιμών της επιφανειακής απορροής. Ως επί το πλείστον, χρησιμοποιείται η μέθοδος της κατανομή Cumbel, όπου η τιμή της πλημμυρικής παροχής με συγκεκριμένο χρόνο επαναφοράς T δίνεται από τη σχέση:

$$X_n = X + K \cdot S_x \quad (2.23\alpha)$$

όπου:

X και S_x : η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της σειράς των ετήσιων πλημμυρικών παροχών,

K : η παράμετρος που εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$K = \frac{Y_n - Y_L}{S_L} \quad \& \quad Y_n = -\ln \ln \frac{T}{T-1} \quad (2.23\beta)$$

Οι τιμές παρακάτω παραμέτρων προκύπτουν από τους παρακάτω πίνακες:

m	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Y_L	0,495	0,503	0,510	0,516	0,520	0,524	0,527	0,529	0,532	0,534
S_L	0,949	0,983	1,009	1,032	1,049	1,063	1,075	1,086	1,096	1,104
m	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
Y_L	0,536	0,538	0,539	0,541	0,542	0,544	0,545	0,546	0,547	0,548
S_L	1,112	1,119	1,125	1,131	1,136	1,141	1,146	1,150	1,154	1,157

Πίνακας 2.8 Παράμετροι Y_L και S_L διανομής Gumbel σε συνάρτηση με το πλήθος m της σειράς των ετήσιων πλημμυρικών παροχών. [Ε3, Πίνακας 2.5]

Μία ακόμη σχέση με απλή εφαρμογή για την εύρεση της πιθανότητας της πλημμυρικής απορροής είναι:

$$Q_{fT} = Q_{fm} \cdot (1 + 0,8 \cdot \log T) \quad (2.24)$$

όπου:

Q_{fm} : η μέση τιμή των ετήσιων πλημμυρικών απορροών,

Q_{fT} : η πλέον πιθανή τιμή της πλημμυρικής απορροής σε χρόνο επαναφοράς T .

2. Αξιολόγηση των μέγιστων βροχοπτώσεων, που θεωρείται η πρώτη αιτία των πλημμυρικών επεισοδίων, και συνήθως αξιοποιούνται όταν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία επιφανειακής απορροής. Η μέγιστη επιφανειακή απορροή Q_{fm} εκφράζεται από την ένταση της βροχόπτωσης i και του συντελεστή απορροής ψ (Πίνακας 2.5).

$$Q_f = \psi \cdot i \cdot A \quad (2.25)$$

όπου:

A: το εμβαδόν της λεκάνης απορροής για την εξεταζόμενη διατομή του υδατορεύματος.

Για να εκφραστεί η παραπάνω σχέση ως η ζητούμενη πλημμυρική παροχή η ένταση i πρέπει να είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της i_m με χρόνο συγκέντρωσης στη λεκάνη απορροής t_c . Ο χρόνος συγκέντρωσης εξαρτάται από το μήκος L του κυρίως υδατορεύματος μέχρι τον υδατοκρίτη, τη μορφή, τη σύνθεση και την κλίση της λεκάνης απορροής, κλπ. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό του με τις πιο γνωστές αυτές του Kirpich και του Giandotti.

$$\text{Κατά Kirpich: } t_c = (36,06 \cdot 10^{-6} \frac{L^3}{h})^{0,385} \quad (2.26\alpha),$$

όπου:

h η υψομετρική διαφορά σε m.

$$\text{Κατά Giandotti: } t_c = \frac{4\sqrt{A}+1,5L}{0,80\sqrt{z_m-z_o}} \quad (2.26\beta),$$

όπου:

A: το εμβαδόν της λεκάνης σε km^2 ,

L: το μήκος του υδατορεύματος ως τον υδατοκρίτη σε km^2

z_m : η μέση στάθμη της λεκάνης απορροής σε m,

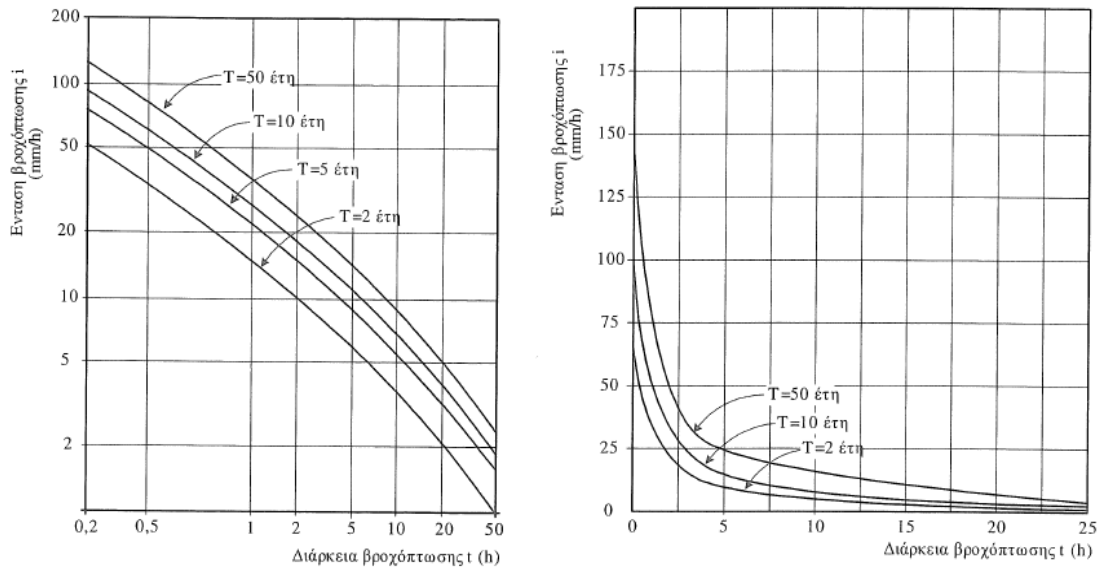
z_o : η στάθμη στη διατομή εξόδου της λεκάνης απορροής σε m.

Η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης μπορούν να απεικονιστούν σχηματικά μέσω των όμβριων καμπυλών (έντασης – διάρκειας) με παράμετρο την περίοδο επαναφοράς T . Προκύπτουν μετά από αρκετή επεξεργασία πολλών μετρήσεων βροχόπτωσης στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής για μεγάλο πλήθος ετών. Είναι εμφανές πως όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια μία βροχής, τόσο μικρότερη θα είναι η έντασή της, ενώ για την ίδια διάρκεια η ίδια ένταση είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο και η θεωρούμενη περίοδος επαναφοράς. Εκφράζονται από τη σχέση (2.27) και σχηματικά παρουσιάζονται στο σχήμα (2.22):

$$i = \frac{c \cdot T^m}{t^{e+f}} \quad (2.27)$$

Όπου:

c, e, f : σταθερές με χαρακτηριστικές τιμές της εξεταζόμενης λεκάνης.



Σχήμα 2.22 Τυπική μορφή όμβριων καμπύλων διάρκειας έντασης σε λογαριθμικές κλίμακες (αριστερά) και γραμμικές κλίμακες (δεξιά) [Ε3, Σχήμα 2.14]

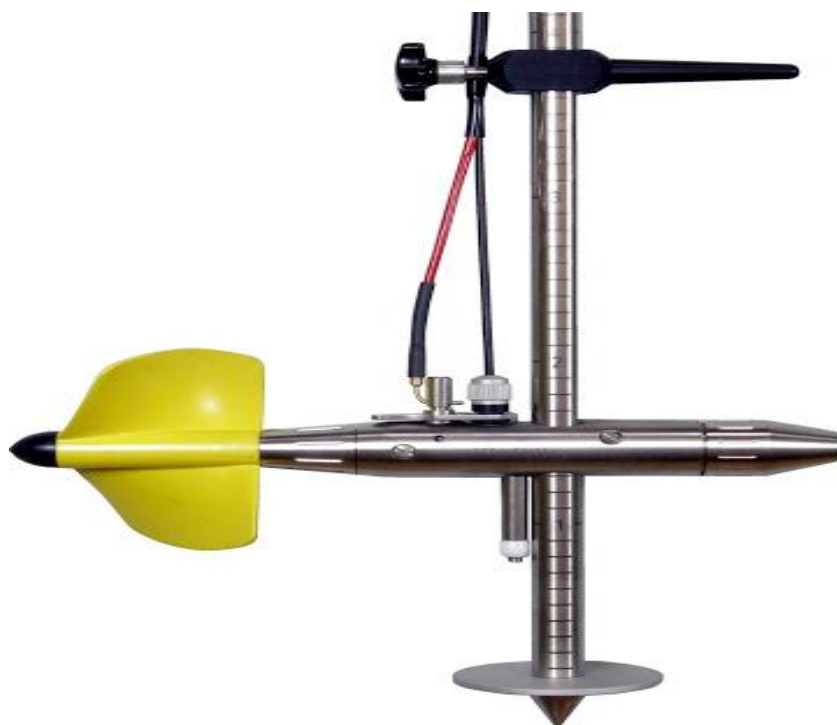
2.4 Μέτρηση Παροχής

Υδρομετρία ονομάζεται ο κλάδος της υδρολογίας που ασχολείται με τη μέτρηση της πρωτεύουσας πληροφορίας, δηλαδή της παροχής. Η διαδικασία της μέτρησής της είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσκολη, αφού η διαθέσιμη χρονική συχνότητα των μετρήσεων δεν είναι η επιθυμητή, ώστε να περιγράφεται με ακρίβεια η μεταβλητότητά της. Έτσι, για αυτόν το λόγο εξετάζονται άλλα χαρακτηριστικά της ροής που έχουν πολύ πιο εύκολη μέτρηση, όπως είναι η στάθμη. Εξ ορισμού η παροχή Q είναι η χρονική μεταβολή του διερχόμενου όγκου νερού V στο χρονικό διάστημα dt ($Q = dV/dt$). Η πραγματική εφαρμογή του παραπάνω ορισμού είναι πολύ σπάνια και συνήθως αξιοποιείται εργαστηριακά μέσω της ογκομετρικής δεξαμενής και για αρκετά μικρές τιμές. Με τη βοήθεια της γεωμετρίας (χρήση στενώσεων διατομής, υπερχειλιστές, κλπ), η υδραυλική χρησιμοποιεί σχέσεις με εφαρμογή τόσο σε ελεύθερη ροή, όσο και σε ροή υπό πίεση, οι οποίες συνδέουν την παροχή μονοσήμαντα με άλλα μεγέθη της ροής, όπως είναι η στάθμη ή η πίεση. Όμως τα παραπάνω συνήθως εφαρμόζονται για μικρά υδατορεύματα.

Για τη μέτρηση της παροχής υδατορεύματος εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι όπως είναι η μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, η σταθμημετρία, η μέθοδος του διαλύματος, κ.α.

2.4.1 Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων

Το τυπικό όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας είναι ο μυλίσκος (current meter), ένα όργανο σε μορφή έλικα που προσανατολίζεται προς τη διεύθυνση της ροής. Εμβαπτίζεται στη διατομή του υδατορεύματος σε συγκεκριμένο σημείο (x,y) και περιστρέφεται με τη βοήθεια της ροής. Συνήθως τα όργανα του εμπορείου έχουν όριο ανοχής σφάλματος $\pm 3\%$.



Σχήμα 2.23 Τυπικός μετρητικός μυλίσκος [19]

Από το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει πως η ταχύτητα ροής σε βάθος 0,6 προς το συνολικό βάθος ($y/h = 0,6$), αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της ταχύτητας ($u_{0,6}/\bar{u} = 1$).

Ως προς το σχήμα (2.24):

Κάθετος άξονας: y/h : ο λόγος της απόστασης βάθους y από την επιφάνεια προς το συνολικό βάθος h .

Οριζόντιος άξονας: u/\bar{u} : ο λόγος της σημειακής ταχύτητας u στη θέση y προς τη μέση ταχύτητα \bar{u} στο συνολικό βάθος h .



Σχήμα 2.24 Τυπική κατανομή ταχυτήτων σε μία κατακόρυφη διατομή υδατορεύματος. [E12, Σχ. 5.10]

Ομοίως, για $y/d = 0,2$ προκύπτει $u_{0,2}/\bar{u} = 1,10$ και για $y/d = 0,8$ προκύπτει $u_{0,8}/\bar{u} = 0,9$, έτσι ώστε να ισχύει:

$$\bar{u} = \frac{u_{0,2} + u_{0,8}}{2} \quad (2.28\alpha)$$

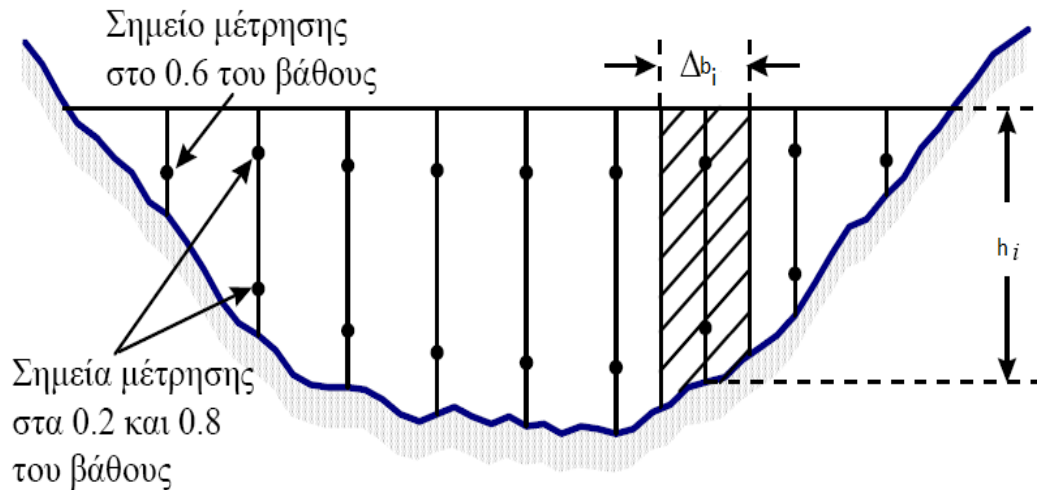
Είναι δεδομένο πως δύο μετρήσεις παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, απλά για μικρά βάρη γίνεται αποδεκτή και η μία μέτρηση στο 0,6 του συνολικού βάθους (για $h < 0,75\text{m}$). Για μεγαλύτερα βάρη όμως, χρησιμοποιείται μέτρηση τριών σημείων:

$$\bar{u} = \frac{u_{0,6}}{2} + \frac{u_{0,2} + u_{0,8}}{4} \quad (2.28\beta)$$

Οι αποστάσεις των κατακόρυφων όπου πραγματοποιείται η μέτρηση της ταχύτητας θα πρέπει τόση, ώστε να η παροχή που αντιπροσωπεύεται από τη μία κατακόρυφο να μην υπερβαίνει το 10% της ολικής παροχής.

$$Q = \sum_i q_i = \sum u_{mi} \cdot h_i \cdot \Delta b_i \quad (2.29)$$

Είναι γεγονός πως για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση της παροχής θα πρέπει ο μυλίσκος να βυθιστεί σε διάφορα βάρη και θέσεις και για την επίτευξη αυτού είναι απαραίτητο η συνολική διατομή του υδατορεύματος να είναι προσπελάσιμη.



Σχήμα 2.25 Σκαρίφημα για την εκτέλεση της μέτρησης από τον υπολογισμό της παροχής. [E12, Σχ. 5.11]

2.4.2 Μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων

Η μέθοδος διαλυμάτων εφαρμόζεται σε τυρβώδη και ανομοιόμορφη ροή, όπου η μέτρηση των ταχυτήτων είναι πρακτικά αδύνατη. Τέτοιες εφαρμογές συνήθως γίνονται σε μικρά υδατορεύματα με ακανόνιστη κοίτη, που εμφανίζονται κυρίως στις ορεινές λεκάνες απορροής. Η μέθοδος στηρίζεται στη διάχυση ενός εύκολα ανιχνεύσιμου δείκτη, στην κατερχόμενη υδάτινη μάζα του υδατορεύματος και στη λήψη και ανάλυση του δείγματος σε μία πιο κατάντη διατομή του. Η απόσταση του σημείου λήψης από το σημείο έγχυσης του δείκτη, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να έχει προλάβει να ομογενοποιηθεί το νερό με το διάλυμα. Ο δείκτης θα πρέπει να πληροί κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ανώτερο σκοπό, όπως είναι τα παρακάτω:

- Μεγάλη διαλυτότητα στο νερό,
- Μικρή έως αμελητέα φυσική συγκέντρωση στο υδατόρευμα,
- Χημική αδράνεια,
- Ευκολία στην ανίχνευση,
- Χαμηλό Κόστος,
- Μη τοξικό για τον άνθρωπο και τους ζωντανούς οργανισμούς.

Συνήθως χρησιμοποιείται το αλάτι (NaCl), που η συγκέντρωση μετράται εύκολα με τη μέθοδο της αγωγιμότητας. Η ικανοποιητική ομογενοποίηση του διαλύματος εξαρτάται κυρίως από το πλάτος του υδατορεύματος. Η έγχυση του διαλύματος του δείκτη πραγματοποιείται από δοχείο με σταθερή παροχή q και

αρχική συγκέντρωση C_0 για ένα χρονικό διάστημα, ώστε η συγκέντρωση να φτάσει στο σημείο ισορροπίας C_e (δηλαδή να μη μπορεί να αυξηθεί παραπάνω).

$$Q = q \frac{C_0 - C_e}{C_e - C_b} \quad (2.30)$$

Όπου C_b , η φυσική συγκέντρωση του δείκτη στο νερό του υδατορεύματος πριν την έγχυση του.

Δείκτης	NaCr ₂ O ₂	C ₁₀ H ₂₁ C ₁ O ₃ N ₂	NaNO ₂	MnSO ₄	NaCl	LiCl
Διαλυτότητα (g/l)	600	10	750	500	200	500
Ελάχιστη συγκέντρωση (mg/l)	0,2	0,1	1	2	5 έως 30	0,2

Πίνακας 2.9 Διαλυτότητα και ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση δεικτών [Ε3, Πίνακας 2.6]

2.4.3 Μέτρηση με σταθμημετρία

Η μέθοδος της σταθμημετρίας έχει ικανοποιητική ακρίβεια και χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση της καμπύλης στάθμης παροχής του υδατορεύματος στην εξεταζόμενη περιοχή. Η μέτρησης της πραγματοποιείται μέσω σταθμημέτρων με συχνότητα μία φορά την ημέρα. Στις περιπτώσεις πλημμυρικών επεισοδίων η καταγραφή πραγματοποιείται ανά δύο ώρες για να επιτευχθεί η έγκυρη αποτύπωσή του. Ουσιαστικά μετράται η παροχή Q ανά τακτά χρονικά διαστήματα και καταγράφεται η αντίστοιχη στάθμη του νερού z , ενώ η καμπύλη που προκύπτει είναι της μορφής (σχέση Manning – Chezy):

$$Q = C \cdot (z - z_0)^N \quad (2.31)$$

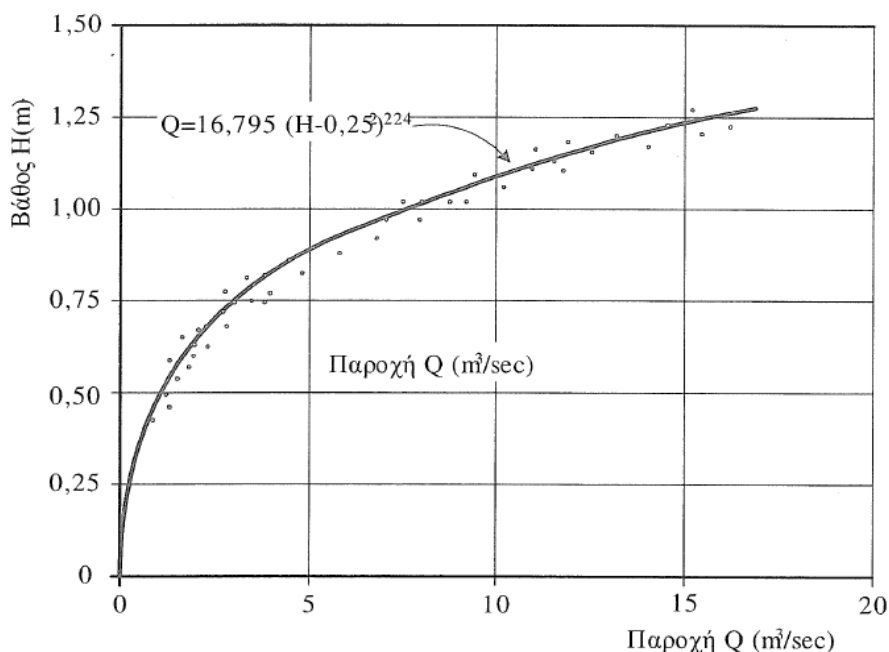
όπου,

C: σταθερά,

N: εκθέτης της τάξης 1,5 για ομοιόμορφη ορθογωνική διατομή και 2,5 για τριγωνική.

Η επιλογή της διατομής του υδατορεύματος όπου θα χαραχθεί η καμπύλη στάθμης – παροχής πρέπει να πληροί τα παρακάτω κριτήρια: να είναι εύκολα προσβάσιμη, να μην εμφανίζει καμπύλες πάνω και κάτω από το σημείο μέτρησης, να μην υπάρχει έντονη δραστηριότητα απόθεσης φερτών υλικών, να είναι ομοιόμορφη η σε μεγάλο μήκος πάνω και κάτω από το σημείο μέτρησης και τέλος να υπάρχει δυνατότητα γεφύρωσης του υδατορεύματος, προκειμένου

να είναι εφικτή η μέτρηση σε όλα τα σημεία της διατομής του. Η χάραξη της καμπύλης γίνεται τυπικά με ταυτόχρονη μέτρηση παροχής με μιλίσκο ή άλλη μέθοδο. Μετά από έντονη πλημμύρα πρέπει να αναβαθμονομηθεί η καμπύλη μέτρησης της παροχής διότι αλλάζει η διατομή.



Σχήμα 2.26 Καμπύλη στάθμης – παροχής [Ε3, Σχ. 2.16]

2.4.4 Μέτρηση με μετρητικό υπερχειλιστή

Η μέθοδος αυτή επιλέγεται κυρίως για τα μικρά υδατορεύματα, όπου η μέτρηση της παροχής ανάγεται στη στάθμη του νερού πάνω από τον υπερχειλιστή μέσω σταθμήμετρου. Ο υπερχειλιστής μπορεί να είναι είτε ορθογωνικός, είτε τριγωνικός και για τον υπολογισμό της παροχής χρησιμοποιούνται σχέσεις με ακρίβεια της τάξης του 2%.

α) Ορθογωνικός υπερχειλιστής:

$$Q = C \cdot L \cdot H \sqrt{2gH} \quad (2.32)$$

όπου:

H: η πάνω στάθμη του νερού ως προς τη στάθμη στέψης του οργάνου,

L: το μήκος της στέψης του υπερχειλιστή,

C: συντελεστής μορφής. Για $l_c = 0$ (υπερχειλιστής πλήρους εύρους), ο συντελεστής δίνεται από τη σχέση:

$$C = \left(0,405 + \frac{0,003}{H}\right) \cdot \left[1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+P}\right)^2\right] \quad (2.33\alpha)$$

Επίσης μία πιο απλή σχέση για το συντελεστή C είναι η:

$$C = 0,4 + 0,05 \frac{H}{P} \quad (2.33\beta)$$

όπου, P: το βάθος του πυθμένα μέχρι την πάνω στάθμη του νερού στο υδατόρευμα και ισχύει ότι $0,1\text{m} < L < 2\text{m}$ & $0,1\text{m} < H < 0,6\text{m}$ & $0,2\text{m} < P < 2\text{m}$.

Για $l_c \neq 0$ τραπεζοειδούς υπερχειλιστή ισχύει:

$0,4\text{m} < L < 1,8\text{m}$ & $0,1\text{m} < H < 0,6\text{m}$ & $0,4\text{m} < P < 0,8\text{m}$ & $0 < l_c / (L + l_c) < 0,90$ και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \left(0,405 - 0,03 \frac{l_c}{L+l_c} + \frac{0,0027}{H}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{LH}{(l_c+L) \cdot (H+P)}\right)^2\right] \quad (2.33\gamma)$$

β) Τριγωνικός υπερχειλιστής:

Η παροχή δίνεται από τη σχέση:

$$Q = 1,32 \cdot H^{2,47} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2.34)$$

όπου:

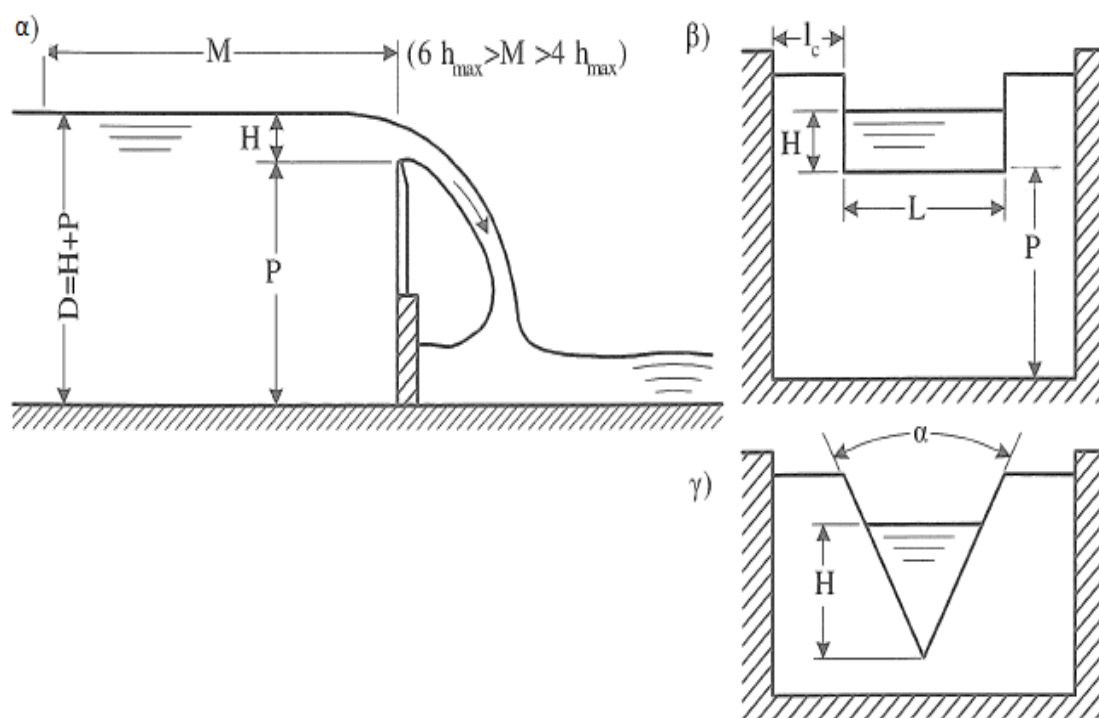
α: η γωνία της τριγωνικής εγκοπής, συνήθως ίση με 90° .

Άλλες μέθοδοι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της παροχής είναι:

- Εκτίμηση παροχής με πλωτήρα, όπου δεν απαιτείται ιδιαίτερος εξοπλισμός και εφαρμόζεται με τη μέτρηση της ταχύτητας ενός αντικειμένου (πλωτήρας) που επιπλέει στην ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω της μέτρησης του χρόνου που χρειάζεται ο πλωτήρας για να φτάσει σε μία συγκεκριμένη απόσταση.
- Μέθοδος υπερήχων, η οποία βασίζεται στην εκπομπή δέσμης παλμών υπερήχων που ανακατευθύνεται διαγώνια προς την επιφάνεια του υδατορεύματος, όπου και ανακλάται. Η συχνότητα της δέσμης που κάνει

την ανάκλαση μετράται με ειδικό αισθητήρα, επομένως από τη μεταβολή της συχνότητας προκύπτει και η ροή της ταχύτητας.

- Εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου, η οποία βασίζεται στη δημιουργία κατακόρυφου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με χρήση πηνίου που τοποθετείται στο πυθμένα του εξεταζόμενου υδατορεύματος. Εξαιτίας της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ιόντων νερού που κινούνται με τη μέση ταχύτητα της ροής, υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, αναπτύσσεται κάθετη δύναμη προς το πεδίο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δυναμικού σε δύο ηλεκτρόδια που εγκαθίστανται στις δύο όχθες. Με αυτήν την εφαρμογή υπάρχει συνεχόμενη καταγραφή, όμως το κόστος της είναι αρκετά υψηλό και είναι αδύνατο να εφαρμοστεί σε υδατόρευμα μεγάλου πλάτους.



Σχήμα 2.27 Διάταξη μετρητικού υπερχειλιστή (α), Ορθογωνικός υπερχειλιστής (β), τριγωνικός υπερχειλιστής (γ) [Ε3, Σχ. 2.19]

2.5 Συμπεράσματα

Η υδρολογική ανάλυση του υδατορεύματος που τροφοδοτεί έναν υδροηλεκτρικό σταθμό είναι πολύ σημαντική για τη βιωσιμότητα του στο μέλλον. Η ουσιαστική ανάλυση του υδρολογικού κύκλου και όλων των φαινομένων που την απαρτίζουν, όπως είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα με υπολογισμό της ενεργού βροχόπτωσης και του συντελεστή απορροής, η εξατμισοδιαπνοή, καθώς και η κατακράτηση και διήθηση συντελούν στη σωστή προδιαγραφή και μελέτη του σταθμού. Επιπλέον, η επιφανειακή απορροή, η μελέτη των μηχανισμών της, η σχεδίαση υδατογραφημάτων, η εξέταση των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής αποτελούν διεργασίες απαραίτητες για την εύρυθμη λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού. Η μέτρηση της παροχής, του πιο σημαντικού μεγέθους για έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, ειδικά των μικρών που λειτουργούν κατά το ρου του ποταμού, εμφανίζεται συνήθως μέσα από τα διαγράμματα παροχής – στάθμης και μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως είναι για παράδειγμα η μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, μέτρηση με τη μέθοδο διαλυμάτων, με σταθμημετρία ή ακόμα και με μετρητικό υπερχειλιστή. Επιπλέον, εξαιρετικά υψηλής σημασίας είναι ο υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής, αφού ένας λάθος υπολογισμός στη μελέτη, μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε περιβαλλοντική καταστροφή και στη δυσλειτουργία του σταθμού. Επομένως, η σωστή διαστασιολόγηση όλων των παραπάνω μεγεθών είναι απαραίτητη για τη λειτουργία ενός σταθμού και κατ' επέκταση για τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο κατά το δυνατό κόστος.

3.1 Αρχή αξιοποίησης υδραυλικής ενέργειας

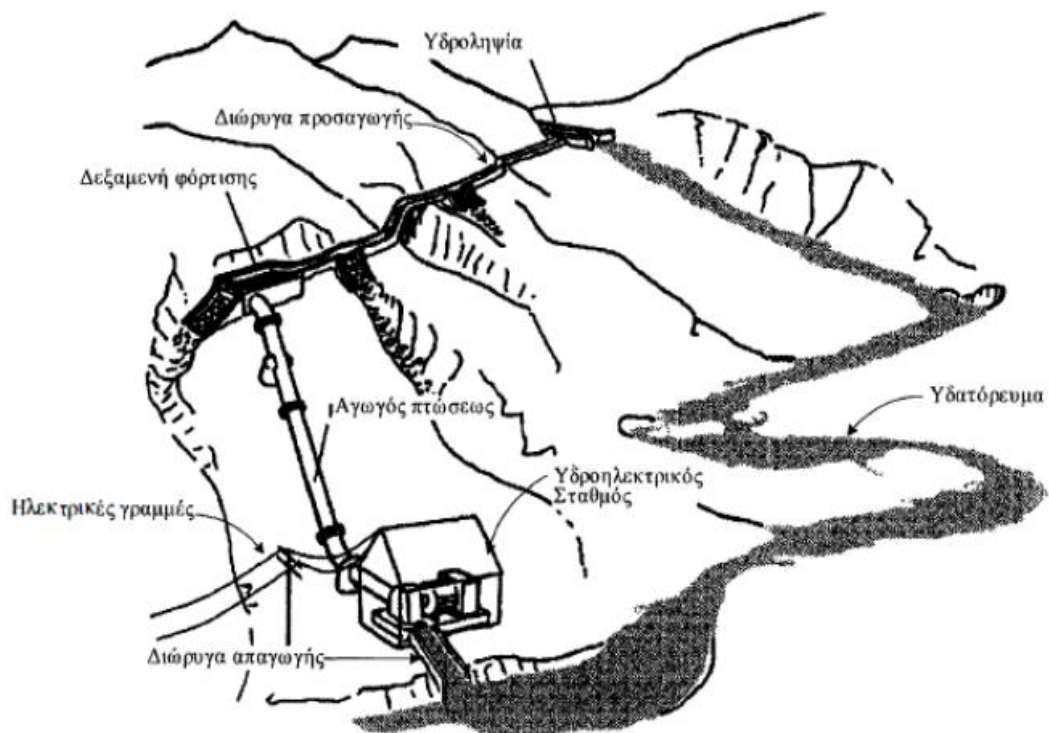
Τα υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ) χαρακτηρίζονται σύνθετα καθώς αποτελούνται από έργα πολιτικού, μηχανολόγου και ηλεκτρολόγου μηχανικού. Κατά τα έργα του πολιτικού μηχανικού, πρωτεύουσα σημασία έχει η συγκέντρωση της επιφανειακής ροής, η κατεύθυνσή της προς τον υδροστρόβιλο, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μετατροπή της ενέργειας του νερού σε μηχανική και στη συνέχεια η απομάκρυνση και οδήγηση της παροχής στην κοίτη του ποταμού. Αποτελούνται κυρίως από τα έργα που αφορούν στην ασφάλεια των υπολοίπων έργων κατά την κατασκευαστική περίοδο του σταθμού, αλλά και στην εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας, ώσπου να φτάσει στον ηλεκτρομηχανολογικό του εξοπλισμό, για την ασφάλεια του οποίου επίσης, είναι υπεύθυνος ο πολιτικός μηχανικός. Με τον όρο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός νοείται ως επί το πλείστον ο υδροστρόβιλος, η γεννήτρια, ο μετασχηματιστής, αλλά και όλοι οι αυτοματισμοί, οι ηλεκτρικοί πίνακες και όλος ο βοηθητικός εξοπλισμός, όπως είναι για παράδειγμα η γερανογέφυρα κλπ. Πολλές είναι αυτές οι περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται παραπάνω από ένας υδροστρόβιλος, προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της λειτουργικής ευελιξίας και βελτίωση της αξιοποίησης της διαθέσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά κύριο λόγο το σύνολο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στεγάζεται στον υδροηλεκτρικό σταθμό που μπορεί να ναι υπόγειος ή υπέργειος κάτι που προσδιορίζεται από την οικονομοτεχνική μελέτη στην οποία το σημαντικό ρόλο έχει ο υδροστρόβιλος (πρόβλημα σπηλαίωσης), καθώς και η μορφολογία του εδάφους. Συνήθως στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, ο υδροηλεκτρικός σταθμός σπάνια είναι υπόγειος, λόγω αυξημένου κόστους.

Οι υδροστρόβιλοι είναι οι μηχανές μέσα από τις οποίες μετατρέπεται, όπως ήδη αναφέρθηκε, η υδραυλική ενέργεια σε μηχανική, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην άτρακτο του δρομέα. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, το διακινούμενο μέσο είναι το νερό της επιφανειακής απορροής που προκύπτει από ένα υδατόρευμα και η ενέργεια που διαθέτει είναι αυτή που εκφράζεται από την υψομετρική διαφορά της στάθμης z ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Επιπλέον, αυτή η ενέργεια του νερού είναι ανανεώσιμη, αφού η επιφανειακή απορροή είναι κομμάτι του υδρολογικού κύκλου που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2. Η επιφανειακή απορροή εξαιτίας της βαρύτητας ρέει συνεχώς προς χαμηλότερες στάθμες μέχρι να φτάσει τελικά στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου η δυναμική ενέργεια του νερού, ανάλογα με τη μείωση της στάθμης, μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και θερμότητα μέσω των υδραυλικών απωλειών, τύρβης και μεταφοράς φερτών υλικών.

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1.4, όταν το νερό μίας φυσικής ροής από το ύψος στάθμης z_E , οδηγηθεί μέσω του αγωγού προσαγωγής σε μία χαμηλότερη στάθμη z_A , πραγματοποιείται η μετατροπή από τον υδροστρόβιλο ανά μονάδα ενέργειας μάζας $g(z_E - z_A)$ της παροχής σε μηχανικής ενέργεια, αφού αφαιρεθούν οι απώλειες. Στη συνέχεια, επειδή η παραγόμενη μηχανική ενέργεια είναι αδύνατο να μεταφερθεί επαρκώς στην περιοχή κατανάλωσης, μετατρέπεται επιτόπου σε ηλεκτρική μέσω της συζευγμένης, με την άτρακτο του δρομέα, γεννήτρια. Έτσι, εξηγείται και η ονομασία των υδροηλεκτρικών έργων, αφού πραγματοποιείται μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική μέσω των υδροστροβίλων και μετά σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών.

Τα υδροηλεκτρικά διακρίνονται σε δύο διαφορετικές βασικές διαμορφώσεις σύμφωνα με την υδραυλική πτώση $h = (z_E - z_A)$. Σημαντική υδραυλική πτώση συνήθως θεωρείται αυτή που είναι τουλάχιστον από 20 m και πάνω, όπου ο σταθμός διαμορφώνεται σε διακριτή θέση από αυτή των έργων προσαγωγής και συλλογής του νερού, ενώ στις περιπτώσεις που η υδραυλική πτώση είναι κάτω από τα 20 m υπάρχει η δυνατότητα ο σταθμός να ενσωματωθεί στο φράγμα ή στο έργο υδροληψίας και να θεωρηθεί ενιαίο συγκρότημα. Όταν υπάρχει μεσαία ή μεγάλη πτώση ύδατος ο υδροηλεκτρικός σταθμός είναι αρκετά χαμηλότερα από την υδροληψία και το φράγμα, ώστε η εκμετάλλευση της υψομετρικής διαφοράς να πραγματοποιείται με την εκτροπή ολόκληρης της παροχής ή μέρος αυτής μέσω του αγωγού προσαγωγής ή αλλιώς, πτώσεως. Η παροχή αυτή οδηγείται στον υδροστρόβιλο, όπου επιτυγχάνεται η μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια το νερό επιστρέφει στον ποταμό συνεχίζοντας τη φυσική ροή του. Στα μικρά υδροηλεκτρικά είναι αρκετά πιθανό ο κλειστός αγωγός προσαγωγής να μην ξεκινά από την υδροληψία, αλλά το νερό να οδηγείται από αυτήν σε μία δεξαμενή φόρτισης με τη χρήση ανοιχτού αγωγού (διώρυγα ή κανάλι). Η θέση της δεξαμενής είναι τέτοια, ώστε να μην υπάρχει μεγάλη απόσταση από το σταθμό. Στη συνέχεια το νερό μεταφέρεται από τη δεξαμενή φόρτισης προς τον υδροστρόβιλο με τη χρήση του κλειστού αγωγού προσαγωγής. Η παραπάνω διάταξη επιλέγεται καθαρά για οικονομικούς λόγους, διότι το κόστος κατασκευής μίας διώρυγας είναι πολύ πιο μικρό από αυτό του αγωγού προσαγωγής, της τάξεως του 1/2 - 1/3 της τιμής του αγωγού προσαγωγής. Παρόλα αυτά, πρέπει να αναφερθεί πως η κατασκευή της διώρυγας δεν είναι πάντα εφικτή για λόγους κατασκευής ή διαμόρφωσης του εδάφους. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη ενός μικρού υδροηλεκτρικού, όπου στο σύστημα προσαγωγής περιλαμβάνεται ανοικτός αγωγός (διώρυγα), δεξαμενή φόρτισης και αγωγό πτώσης. Συνήθως, η διαμόρφωση σήραγγας στα μικρά έργα δεν είναι συμφέρουσα από οικονομικής σκοπιάς, αφού η ελάχιστη διάμετρος της σήραγγας δεν μπορεί να είναι κάτω από το 1,5 m, κάτι που σημαίνει πως θα είναι αρκετά μεγαλύτερη από τον αγωγό προσαγωγής που θα περάσει από αυτήν. Στις περιπτώσεις που το μήκος του αγωγού προσαγωγής δεν είναι μεγάλο ή αν η διαμόρφωση της διώρυγας δεν είναι δυνατή, τότε η προσαγωγή του νερού από την υδροληψία μέχρι τον

υδροστρόβιλο πραγματοποιείται μέσω κλειστού αγωγού (σωλήνα), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.

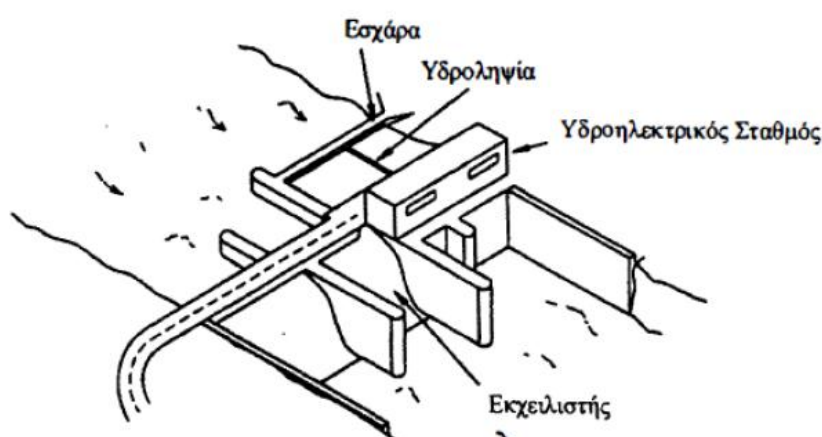


Σχήμα 3.1 Αρχή διαμόρφωσης μικρού ΥΗΕ με διώρυγα (ανοικτός αγωγός), δεξαμενή φόρτισης και αγωγό πτώσεως (κλειστός αγωγός προσαγωγής). [Ε3, Σχήμα 3.2]



Σχήμα 3.2 Αρχή διαμόρφωσης μικρού ΥΗΕ με κλειστό αγωγό προσαγωγής. [Ε3, Σχήμα 3.3]

Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μικρή κλίση του εδάφους, κατασκευάζονται έργα με χαμηλό ύψος, όπου ο ΥΗΣ ενσωματώνεται με το φράγμα (Σχήμα 3.3), όπως είναι στο μικρό υδροηλεκτρικό του Στράτου ΙΙ. Στις περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιείται ταμιευτήρας, ο σταθμός λειτουργεί κατά το ρου του ποταμού, όπως είναι το υδροηλεκτρικό του Μακροχωρίου που κατασκευάστηκε σε αρδευτικό κανάλι του Αλιάκμονα. Τα δύο παραπάνω έργα αξιοποιούν την αρδευτική ενέργεια, η οποία διαφορετικά θα καταστρεφόταν με βάνες καταστροφής ενέργειας, όπως γινόταν σε όλα τα έργα καταστροφής ενέργειας στα άκρα των σηράγγων του υδραγωγείου Μόρνου.



Σχήμα 3.3 Τυπική διάταξη μικρού ΥΗΕ ροής με χαμηλή υδραυλική πτώση και ενσωματωμένο σταθμό στο φράγμα εκχειλιστή. [Ε3, Σχήμα 3.4]

3.2 Περιγραφή κύριων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Η κατασκευή του φράγματος είναι ένα από τα κυριότερα έργα του πολιτικού μηχανικό κατά την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου. Σκοπός του είναι η δημιουργία μια δεξαμενής, του ταμιευτήρα, στην οποία συγκεντρώνεται μία ποσότητα νερού από τη φυσική απορροή του υδατορεύματος, από την οποία μέσω του αγωγού προσαγωγής το νερό οδηγείται στον υδροστρόβιλο. Όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα του ταμιευτήρα, τόσο πιο εύκολα θα επιτευχθεί η ευελιξία της λειτουργία του σταθμού, αφού η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται, ως ένα βαθμό, ανεξάρτητα από τη φυσική παροχή. Κάτι τέτοιο αποτελεί χαρακτηριστικό, κυρίως, των μεγάλων υδροηλεκτρικών μέσω των οποίων επιδιώκεται η κάλυψη των αιχμών του δικτύου. Γενικά, το κόστος μίας τέτοιας κατασκευής είναι αρκετά υψηλό και τα μικρά υδροηλεκτρικά ως επί το πλείστον, αδυνατούν να καλύψουν τις αιχμές ενός δικτύου. Έτσι, ο σκοπός ύπαρξης ταμιευτήρα και φράγματος στα μικρά έργα δεν είναι η κάλυψη των αιχμών, αλλά η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του σταθμού στην

υδροληψία με στόχο να μην εισέρχονται στο σύστημα προσαγωγής και στον υδροστρόβιλο φερτά υλικά και αέρας που θα παρεμποδίσουν τη λειτουργία του και θα προκαλέσουν υλικές ζημιές.

Η θέση του φράγματος βρίσκεται, συνήθως, στην κοίτη του υδατορεύματος και επιλέγεται μετά από μεγάλο πλήθος κριτηρίων, όπως είναι ο σχεδιασμός του ταμιευτήρα, η ευκολία κατασκευής του και η δημιουργία μεγάλης υψομετρικής διαφοράς με το κατά το δυνατό μικρότερο μήκος αγωγού προσαγωγής. Έτσι, η σωστή επιλογή της θέσης προκύπτει ύστερα από οικονομοτεχνική μελέτη των βασικών χαρακτηριστικών του φράγματος και εξετάζονται διάφορες εναλλακτικές λύσεις. Ο τύπος του καθορίζεται κυρίως από τη φυσική διαμόρφωση της θέσης και τη διαθεσιμότητα των υλικών. Η κατασκευή του συνοδεύεται και από κάποια επιπλέον έργα που συμβάλλουν στην εξυπηρέτηση του συνολικού έργου, αλλά και στην ασφάλειά του. Τέτοια έργα είναι ο εκχειλιστής με σκοπό τη διοχέτευση της πλημμυρικής παροχής, έτσι ώστε η στάθμη του νερού να μην ξεπεράσει το όριο που φράγματος, τα έργα εκτροπής που χρησιμοποιούνται κατά τη τελευταία φάση της κατασκευής του φράγματος για τη διοχέτευση της παροχής, τον εκκενωτή πυθμένα, με τη βοήθεια του οποίου εκκενώνεται ο ταμιευτήρας σε περίπτωση που χρειαστεί, αλλά και πραγματοποιεί τη διοχέτευση της απαραίτητης οικολογικής παροχής και τέλος η υδροληψία, δηλαδή το στόμιο εισόδου του αγωγού ή της σήραγγας προσαγωγής.

Το υδραυλικό σύστημα απαγωγής και προσαγωγής της παροχής του νερού από το σημείο της υδροληψίας μέχρι και την επιστροφή του στη φυσική ροή του υδατορεύματος μπορεί να περιλαμβάνει τα παρακάτω έργα:

- το φράγμα με την υδροληψία,
- τον ανοιχτό αγωγό (κανάλι ή διώρυγα)
- τη σήραγγα (κυρίως στα μεγάλα έργα)
- τη δεξαμενή φόρτισης στο άκρο της διώρυγας προσαγωγής
- τον αγωγό προσαγωγής (ή πτώσεως)
- τα θυροφράγματα και της βάνες
- τον αγωγό και τη διώρυγα απαγωγής
- τον πύργο ή τους πύργους ανάπαλσης, που συναντούνται κυρίως στα μεγάλα έργα και συμβάλλουν στην προστασία του αγωγού προσαγωγής από το υδραυλικό πλήγμα, δηλαδή από τις υποπιέσεις και τις υπερπιέσεις που πραγματοποιούνται κατά τα μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης ή απόρριψης του φορτίου των υδροστροβίλων.

Η διαστασιολόγηση των παραπάνω έργων προκύπτει ύστερα από οικονομοτεχνική μελέτη και πολλές φορές ένα υδροηλεκτρικό έργο είναι πιθανό να μην τα περιλαμβάνει όλα. Στις περιπτώσεις που ο σταθμός έχει πάνω από έναν υδροστρόβιλο ο αγωγός πτώσης έχει μεγάλο μήκος, τότε προτιμότερη είναι η κατασκευή ενός αγωγού προσαγωγής για την τροφοδοσία όλων των υδροστροβίλων. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου ο αγωγός πτώσης είναι μικρός ο υδροστρόβιλος θα τροφοδοτείται από ανεξάρτητο αγωγό. Για την κατασκευή

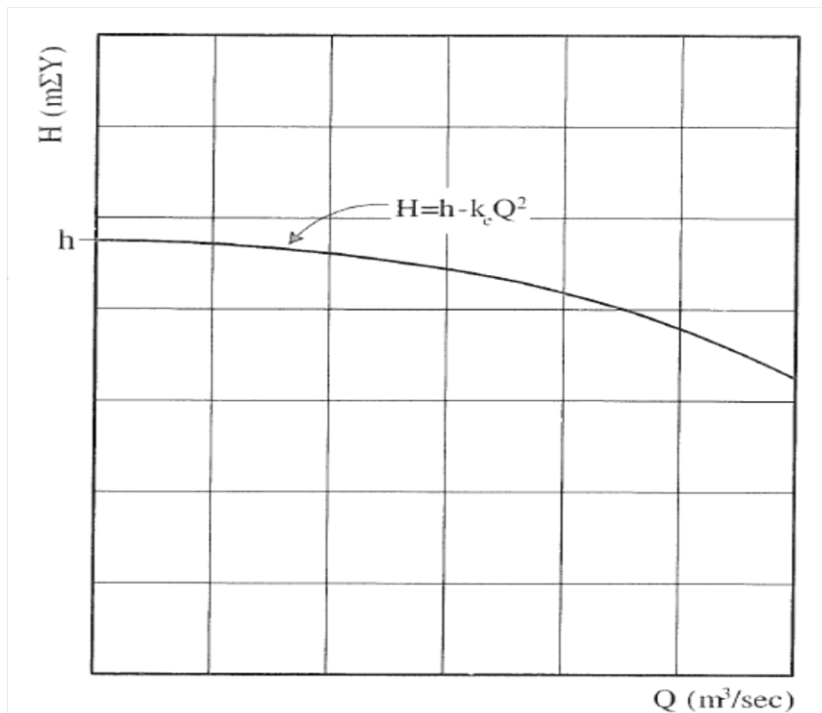
και τη συντήρηση του σταθμού χρησιμοποιούνται τα θυροφράγματα και οι βάνες διακοπής, οι οποίες κατά την κανονική λειτουργία είναι πλήρως ανοιχτές. Στην περίπτωση που η θέση του υδροστροβίλου είναι πιο ψηλά από τη στάθμη απαγωγής, δε χρειάζεται η χρήση της βάνας ή του θυροφράγματος. Ο αγωγός απαγωγής είναι μέρος του υδροστροβίλου και ο σκοπός του είναι η ανάκτηση της κινητικής ενέργειας σε στατική πίεση. Στα μικρά έργα το νερό από την έξοδο του αγωγού απαγωγής τροφοδοτεί τη διώρυγα απαγωγής, της οποίας η στάθμη είναι υψηλότερη από τη μέγιστη πλημμυρική παροχή του υδατορεύματος και καθορίζεται από υπερχειλιστή διαμορφωμένο στο άκρο της. Όταν το νερό εξέρχεται από φυσική λίμνη σχεδόν σταθερής στάθμης, το νερό από τον αγωγό απαγωγής οδηγείται σε αυτή χωρίς διώρυγα απαγωγής.

Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός κυρίως περιλαμβάνει τους υδροστροβίλους, τους ρυθμιστές στροφών, τις γεννήτριες, τους ηλεκτρολογικούς πίνακες, τους μετασχηματιστές και όλους τους αυτοματισμούς. Οι γεννήτριες είναι κατευθείαν συνδεδεμένες με τον υδροστρόβιλο στην ίδια άτρακτο, εκτός από τις πολύ μικρές μονάδες, όπου μεσολαβεί γραναζωτή μετάδοση. Οι μετασχηματιστές στοχεύουν στην ανύψωση της τάσης που παράγεται από τις γεννήτριες στη μέση ή στην υψηλή τάση του διασυνδεδεμένου δικτύου, έτσι ώστε Τα μεγέθη των παραπάνω συνδυαστικών μονάδων (στρόβιλος – γεννήτρια – μετασχηματιστής) εξαρτώνται από το προβλεπόμενο πρόγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση της παροχής, την ανάγκη της κάλυψης των αιχμών, στοιχεία που καθορίζονται ύστερα από την οικονομοτεχνική μελέτη. Για λόγους ασφάλειας και συντήρησης, συνήθως, επιλέγονται από δύο μονάδες και πάνω. Στα μικρά έργα ο ακριβής αριθμός των μονάδων εξετάζεται ύστερα από μελέτη, αφού η εγκατάσταση δύο υδροστροβίλων αντί για έναν μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος επένδυσης.

3.3 Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου

Η λειτουργία του υδροστροβίλου αφορά στη μετατροπή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H σε μηχανική ενέργεια. Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση σε μία συγκεκριμένη εγκατάσταση εκφράζεται συναρτήσει της παροχής Q από την εξίσωση 3.1 και περιγράφεται από το διάγραμμα (H,Q) με τη μορφή παραβολής που απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.

$$H = h - \delta h_{fEe} = h - k_e \cdot Q^2 \quad (3.1)$$



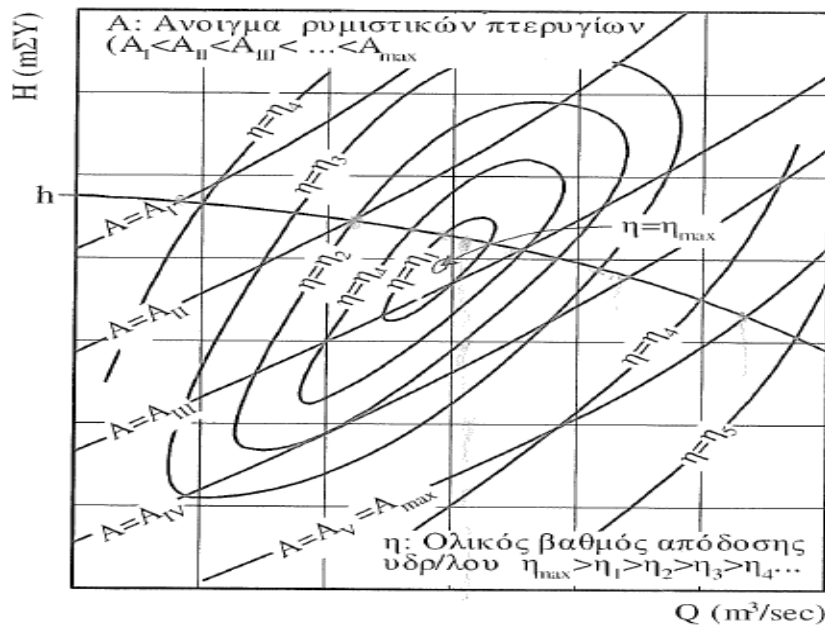
Σχήμα 3.4 Διαθέσιμη υδραυλική πτώση συναρτήσει της παροχής. [Ε3, Σχήμα 3.6α]

Η λειτουργία του υδροστροβίλου με σταθερή ταχύτητα περιστροφής περιγράφεται στο σχήμα 3.5 από ένα πλέγμα καμπυλών με θετική κλίσης, όπου κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε μία τιμή A του ανοίγματος του ρυθμιστικού οργάνου, δηλαδή των ρυθμιστικών πτερυγίων. Κάθε σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε μία τιμή του βαθμού απόδοσης η του υδροστροβίλου. Αν ενωθούν όλα τα σημεία λειτουργίας που έχουν τον ίδιο βαθμό απόδοσης, προκύπτει η καμπύλη του ίσου βαθμού απόδοσης και έχει τη μορφή των ισοϋψών καμπυλών. Επιπλέον, για κάθε ένα σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου υπάρχει μία συγκεκριμένη τιμή παροχής του ύψους H και του βαθμού απόδοσης και της παραγόμενης μηχανικής ισχύος. Η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς δίνεται από τη σχέση 3.2.

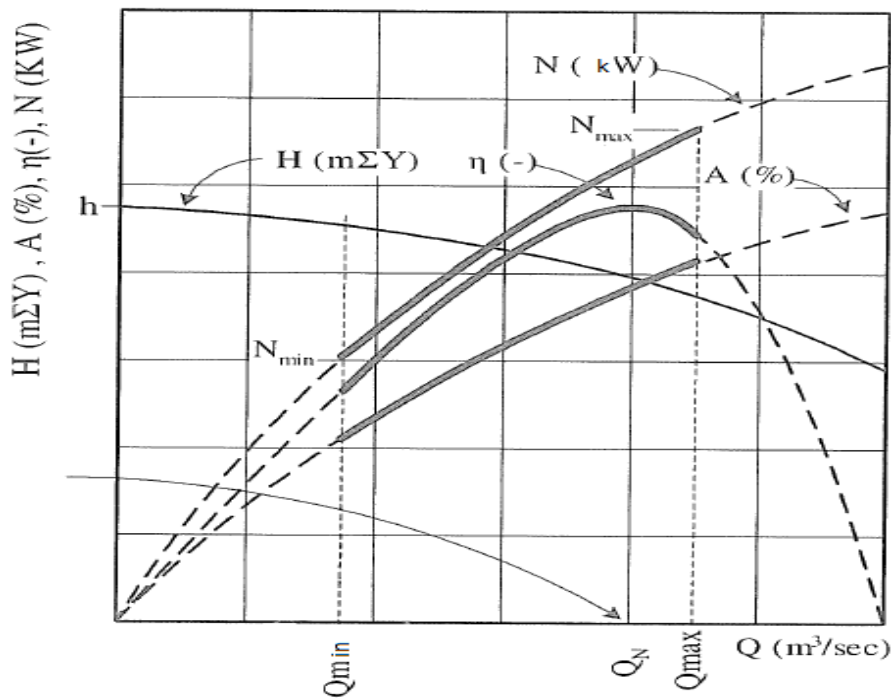
$$N_i = (\rho \cdot g) \cdot H \cdot Q \quad (3.2)$$

Εάν ένας υδροστροβίλος για τον οποίο οι χαρακτηριστικές του καμπύλες περιγράφονται από το σχήμα 3.5, τοποθετηθεί σε υδραυλική εγκατάσταση της οποίας η καμπύλη της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης περιγράφεται από το διάγραμμα στο σχήμα 3.4, το μοναδικά δυνατά σημεία λειτουργίας του είναι τα σημεία τομής της καμπύλης της υδραυλικής πτώσης H της εγκατάστασης με χαρακτηριστικές καμπύλες ανοίγματος. Αν χαραχθεί καμπύλη των σημείων της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες των υδροστροβίλων, τότε προκύπτουν όλα τα δυνατά σημεία λειτουργίας. Για τη

συγκεκριμένη τιμής της υδραυλικής πτώσης h , μπορεί να χαραχθεί το διάγραμμα του σχήματος 3.6 από τις τιμές του διαγράμματος από το σχήμα 3.5, όπου παρουσιάζεται η αντιστοιχία διαφόρων μεγεθών, όπως είναι της παροχής Q του ολικού βαθμού απόδοσης η , της παραγόμενης μηχανικής ισχύος N , της υδραυλικής πτώσης H και του ανοίγματος των πτερυγίων A .



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου. [Ε3, Σχήμα 3.6β]



Σχήμα 3.6 Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου για συγκεκριμένη υδραυλική πτώση h . [Ε3, Σχήμα 3.6γ]

Από το σχήμα 3.6 προκύπτει πως η λειτουργία του συγκεκριμένου υδροστροβίλου σε συγκεκριμένη υδραυλική πτώση έχει συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας από το ελάχιστο Q_{\min} ως το μέγιστο Q_{\max} που αντιστοιχεί στο μέγιστο άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων, αρά και σε μία μέγιστη παραγόμενη μηχανική ισχύ. Στην πραγματικότητα, το εύρος της λειτουργίας των υδροστροβίλων για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω είναι αρκετά μικρότερο. Γενικά, το επιτρεπόμενο εύρος λειτουργίας ενός υδροστροβίλου αδιαστοποιείται ως προς την κανονική παροχή Q_N , δηλαδή αυτή που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης και εκφράζεται ως $(Q_{\min}/Q_N - Q_{\max}/Q_N)$ και εξαρτάται από τον κατασκευαστή, καθώς και τον τύπου του υδροστροβίλου. Όλα τα ενδιάμεσα σημεία μπορούν να επιτευχθούν με το κατάλληλο άνοιγμα A των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου. Η επιθυμητή λειτουργία του υδροστροβίλου βρίσκεται κοντά στις περιοχές όπου ο ολικός βαθμός απόδοσης η είναι υψηλός, έτσι ώστε η γίνεται μετατροπή της υδραυλικής πτώσης σε μηχανική ενέργεια να πραγματοποιείται σε μεγάλο βαθμό.

3.4 Ενεργειακή ανάλυση ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Λαμβάνοντας ως δεδομένη την καμπύλη διάρκειας παροχής ενός υδατορεύματος σε μία εξεταζόμενη διατομή, είναι εφικτός ο υπολογισμός της ενέργειας που πρόκειται να παραχθεί ετησίως, καθώς και η επιλογή του μεγέθους του υδροστροβίλου που θα επιτύχει την καλύτερη ενεργειακή αξιοποίηση του υδατορεύματος. Το πιο σύνηθες πρόβλημα για τη βελτιστοποίηση του έργου τίθεται στο περιορισμένο εύρος της παροχής της λειτουργίας του υδροστροβίλου σε σχέση με το πολύ μεγάλο εύρος παροχών της επιφανειακής απορροής του υδατορεύματος. Σε περίπτωση που ο ανάντη ταμιευτήρας είναι μεγάλης χωρητικότητας, ο παραπάνω προβληματισμός δεν είναι τόσο κρίσιμος, αφού υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της επιφανειακής απορροής ή έστω κάποιου μέρους αυτής. Στα μικρά υδροηλεκτρικά όμως, η ύπαρξη του ταμιευτήρα είναι αρκετά σπάνια λόγω οικονομικών παραμέτρων, με αποτέλεσμα το πρόβλημα αυτό να είναι εξαιρετικής σημασίας.

Αρχικά, η επιλογή του υδροστροβίλου επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς πηγαίνει σε ισχυρό διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο ή εάν τροφοδοτεί κάποιο μικρό αυτόνομο δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση η επιλογή του υδροστροβίλου επηρεάζεται, επίσης, και από το εάν υπάρχει ενιαίο ή διαφορικό τιμολόγιο της ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα σε κάποιες χώρες η τιμή πώλησης της kWh εξαρτάται από την εποχή του έτους και είναι πιο υψηλή κατά τη χειμερινή περίοδο, όπου υπάρχει αυξημένη ζήτηση. Στη δεύτερη περίπτωση, της τροφοδοσίας αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου, σημαντικότερο κριτήριο για την επιλογή του υδροστροβίλου αποτελεί η κατά το

δυνατό καλύτερη κάλυψη της ζήτησης, κάτι που πρακτικά είναι αδύνατο λόγω των διακυμάνσεων της διαθέσιμης παροχής.

Ο ετήσιος συντελεστής φορτίου ($\Sigma\Phi$) είναι μία έννοια που σχετίζεται με το πρόβλημα της επιλογής της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ενέργειας E (kWh) που παράγεται από έναν ΥΗΣ για ένα έτος, προς την ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί αν δούλευε πάντα στην ονομαστική του ισχύ.

$$\Sigma\Phi = E/(N \cdot 8760) \quad (3.3)$$

Για τα μικρά υδροηλεκτρικά ο $\Sigma\Phi$ είναι αρκετά υψηλός της τάξεως του 0,70 – 0,80, σε αντίθεση με τα μεγάλα ΥΗΕ, όπου ο συντελεστής φορτίου είναι της τάξεως του 0,35 (συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,25 – 0,50), δηλαδή η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη μέση ισχύ για να μπορούν να εξυπηρετούνται οι ώρες αιχμής φορτίου του δικτύου. Αν υπάρξει υπερδιαστασιολόγηση του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού, είναι φυσικό επόμενο να ανέβει πολύ το κόστος του έργου. Για τα μεγάλα υδροηλεκτρικά όμως, συμφέρει, αφού η αξία της παραγόμενης ενέργειας για την κάλυψη αιχμών είναι αρκετά υψηλή, κάτι που τα μικρά έργα, όπως έχει ήδη επισημανθεί, δεν δύνανται να καλύψουν, γι' αυτό και λειτουργούν συνήθως ως μονάδες βάσης. Η τιμή του συντελεστή φορτίου εξαρτάται από την καμπύλη διάρκειας παροχής, την ονομαστική παροχή του σταθμού, τον τύπο, αλλά και το πλήθος των υδροστροβίλων του.

Η οικολογική παροχή ή παροχή συντήρησης είναι ακόμα ένα σημαντικό μέγεθος για την εκμετάλλευση ενός μικρού υδροηλεκτρικού. Πρόκειται για ένα την ελάχιστη παροχή που επιβάλλεται να υπάρχει στην κοίτη του ποταμού κατάντη του έργου, έτσι ώστε να υπάρχει εξασφάλιση πως οι υπόλοιπες χρήσεις του νερού (π.χ. ύδρευση, άρδευση) θα μπορούν να πραγματοποιηθούν κανονικά, αλλά και να βεβαιώσει την επιβίωση της χλωρίδας και της πανίδας στο μήκος του υδατορεύματος στο τμήμα μεταξύ του φράγματος – υδροληψίας και του υδροηλεκτρικού σταθμού. Η παροχή αυτή είναι αδύνατο να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλών παροχών του υδατορεύματος και έτσι επιβαρύνεται η οικονομική απόδοση, ιδιαίτερα των μικρών έργων. Στην καμπύλη διάρκειας παροχής που θα αξιοποιείται για τη μελέτη του έργου θα πρέπει να έχει αφαιρεθεί η οικολογική παροχή για να προχωρήσει σε σωστά αποτελέσματα. Οικολογική παροχή θεωρείται το:

- 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου, ή το
- 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου, ή το
- 30 lt/sec σε κάθε περίπτωση (σύμφωνα με υπουργική απόφαση).

Τέλος στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής, η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διακρίνεται σε πρωτεύουσα ή δευτερεύουσα. Πρωτεύουσα είναι η ενέργεια που θα παραχθεί ετησίως, ανεξάρτητα τις συνθήκες υδραυλικότητας του υδρολογικού έτους, δηλαδή είναι η ελάχιστη ενέργεια που θα δώσει εγγυημένα ο σταθμός στο δίκτυο. Ως δευτερεύουσα νοείται η ενέργεια που παράγεται επιπλέον της πρωτεύουσας στη διάρκεια του ενός έτους και το μέγεθός της εξαρτάται από τα υδρολογικά στοιχεία του εκάστοτε χρόνου.

3.5 Διαδικασία επιλογής και επιλογή βέλτιστης θέσης κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού έργου.

Η επαρκής υψομετρική διαφορά και η διαθέσιμη παροχή είναι απαραίτητες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής. Κατά συνέπεια, αυτές οι παράμετροι είναι σημαντικοί παράγοντες στην επιλογή της βέλτιστης θέσης. Κατά καιρούς έχουν εφαρμοστεί διάφορες μεθοδολογίες για την αξιολόγηση της ροής που είναι διαθέσιμη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.5.1 Χαρτογράφηση

Στις βιομηχανικές χώρες, συνήθως αξιοποιούνται χάρτες με διάφορες κλίμακες. Στην Ευρώπη είναι διαθέσιμοι ψηφιοποιημένοι χάρτες σε κλίμακα έως 1:5.000, ενώ στην Ελλάδα οι χάρτες που χαράσσονται, συνήθως, είναι της κλίμακας 1:50.000. Οι αεροφωτογραφίες της θέσης μπορούν να αντικαταστήσουν τους χάρτες, εάν δεν μπορούν να βρεθούν στην απαιτούμενη κλίμακα. Ωστόσο, οι εναέριες φωτογραφίες είναι σε αντίθεση με τους χάρτες από μία σημαντική διαφορά. Ένας χάρτης έχει μια ομοιόμορφη ή ελεγχόμενη μεταβλητή κλίμακα, η οποία εξαρτάται από την επιλογή της προβολής του χάρτη. Η εναέρια φωτογραφία, από την άλλη πλευρά, δεν έχει σταθερή ή ομοιόμορφα μεταβαλλόμενη κλίμακα. Εκτός από τις ατέλειες του φακού, οι οποίες για όλους τους πρακτικούς σκοπούς μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, δύο βασικοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για διακυμάνσεις στην κλίμακα μιας φωτογραφίας:

1. Το τοπογραφικό ανάγλυφο - η γη, ανεξάρτητα από το πόσο επίπεδη, δεν είναι ποτέ οριζόντια.
2. Η κλίση του οπτικού άξονα της κάμερας.

Οι σύγχρονες κάμερες είναι σε θέση να απομακρύνουν την παραμόρφωση, λόγω της αξονικής τους κλίσης. Επιπλέον, οι αεροφωτογραφίες μπορούν να προβληθούν στερεοσκοπικά ή σε τρεις διαστάσεις. Το στερεοσκοπικό αποτέλεσμα επιτρέπει στο γεωλόγο να εντοπίσει τύπους πετρωμάτων, να προσδιορίσει γεωλογικές δομές και να ανιχνεύσει τη σταθερότητα της κλίσης, ενώ ο μηχανικός είναι σε θέση να συλλέξει δεδομένα απαραίτητα για την κατασκευή του φράγματος, την επιλογή των ανοιχτών καναλιών, αλλά και

κατασκευή θυροφραγμάτων Η παραμόρφωση από το φακό της κάμερας αφαιρείται χρησιμοποιώντας σημεία ελέγχου γείωσης από χάρτες, δεδομένα έρευνας ή διανύσματα GPS. Αυτός είναι ένας πολύ αποδοτικός τρόπος για την διόρθωση αεροφωτογραφιών. Με αυτούς τους χάρτες είναι δυνατό να εντοπιστεί η υδροληψία, το ανοιχτό κανάλι, θυρόφραγμα, αλλά και η θέση του σταθμού, με αρκετή ακρίβεια για τις οικονομοτεχνικές μελέτες, ακόμη και για τους εργολάβους να συμμετέχουν στη φάση υποβολής προσφορών για κατασκευή.

3.5.2 Γεωλογικές μελέτες

Πολύ συχνά, η ανάγκη διεξαγωγής λεπτομερών γεωλογικών μελετών μιας τοποθεσίας, υποτιμάται και σε πολλές περιπτώσεις με δυσάρεστες συνέπειες, όπως για παράδειγμα διαρροή κάτω από τον υδατοφράκτη. Ευτυχώς, στην Ευρώπη και σε πολλές άλλες χώρες σε όλο τον κόσμο, οι καλοί γεωλογικοί χάρτες επιτρέπουν αρχικές εκτιμήσεις, για την ασφάλεια των θεμελίων του φράγματος, τη σταθερότητα των πλαγιών και τη διαπερατότητα του εδάφους. Ωστόσο, μερικές φορές αυτές οι πληροφορίες, θα πρέπει να συμπληρώνονται, με επιτόπια εργασία ιδίως, διάτρηση και δειγματοληψία.

Οι υδραυλικές κατασκευές πρέπει να στηρίζονται σε επίπεδα θεμέλια, με επαρκείς πλευρικές κλίσεις και πλάτη, που δεν υπόκεινται σε προβλήματα σταθερότητας. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός προγραμμάτων υπολογιστικής σταθερότητας κλίσης, που κυμαίνονται από μια απλή δισδιάστατη προσέγγιση έως την εξελιγμένη τρισδιάστατη πλήρη έγχρωμη ανάλυση γραφικών. Ο κατάλογος των αστοχιών, ειδικά στο σχεδιασμό καναλιών είναι τόσο μεγάλος που θα πρέπει να προτείνεται μια ελάχιστη γεωμορφολογική μελέτη του εδάφους στην πρώτη φάση του έργου. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στ ορεινά, όπου η κατασκευή μπορεί να είναι επηρεασμένη από διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, όπως ερπυσμός εδάφους, διάβρωση, περιστροφικές και επίπεδες ολισθήσεις εδάφους και πτώσεις βράχων.

Το φράγμα και ο αντίστοιχος ταμιευτήρας του μπορεί να επηρεαστούν από την αστάθεια των επιφανειακών σχηματισμών που μπορεί να υπάρχουν στη ζώνη επιρροής του, αλλά ταυτόχρονα η ίδια η λίμνη ή το ποτάμι μπορεί να επηρεάσει αυτούς τους σχηματισμούς. Εάν το φράγμα πρέπει να τοποθετηθεί σε μη ομογενές έδαφος, η διακύμανση της στάθμης του νερού μπορεί να δημιουργήσει αστάθεια στις βρεγμένες πλαγιές του ταμιευτήρα. Επιπλέον, κατά μήκος του ανοιχτού καναλιού, πολλά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την επιλεγμένη πορεία του, η οποία, μαζί με μια απότομη κλίση του εδάφους, μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή αστάθεια.

3.5.3 Εφαρμοσμένες μεθοδολογίες

Η επιστήμη της γεωλογίας διαθέτει ένα ευρύ φάσμα γεωμορφολογικών τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις μελέτες, όπως:

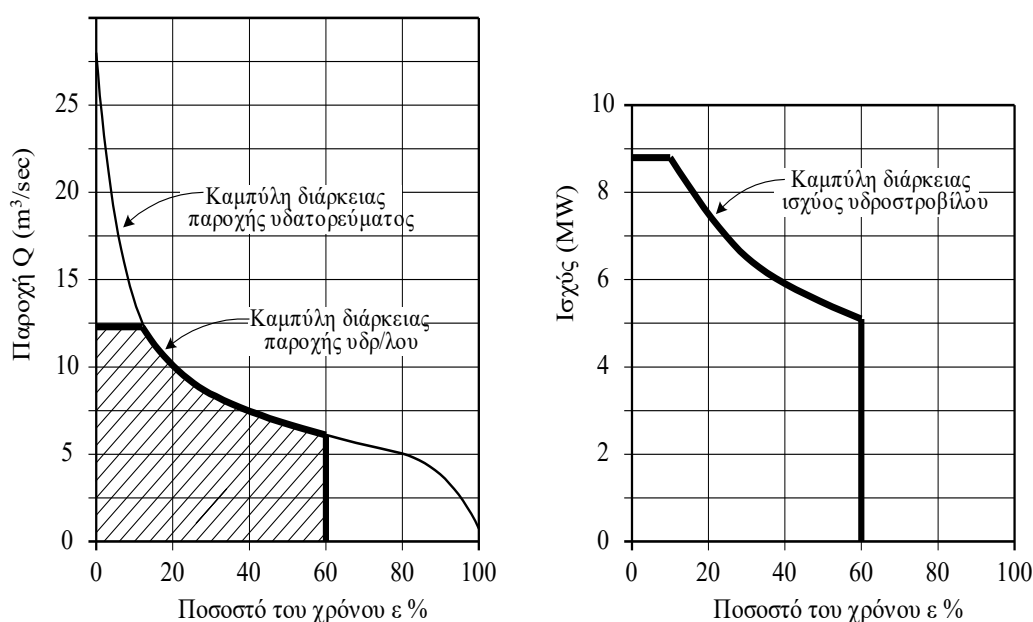
- Φωτογεωλογία (Photogeology): Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η φωτογραμμετρία - σε κλίμακες από 1:10000 έως 1:5000 - επιτρέπει στον γεωλόγο να εντοπίσει τύπους βράχων, να προσδιορίσει γεωλογικές δομές και να εντοπίσει τη σταθερότητα της κλίσης.
- Γεωμορφολογικοί χάρτες. Το αποτέλεσμα της φωτογραμμετρικής ανάλυσης που συμπληρώνεται με τα αποτελέσματα της έρευνας πεδίου πρέπει να συνδυαστεί σε ένα γεωμορφολογικό χάρτη: Αυτός ο χάρτης βασίζεται σε τοπογραφικό και σχεδιάζεται σε κλίμακα μεταξύ 1:10000 και 1:5000, χρησιμοποιώντας απλά σύμβολα, θα πρέπει να δείχνει όλους τους επιφανειακούς σχηματισμούς που επηρεάζουν τις προτεινόμενες υδραυλικές κατασκευές.
- Εργαστηριακή ανάλυση: Οι παραδοσιακές εργαστηριακές δοκιμές, όπως ταξινόμηση του εδάφους και η τριαξονική ενοποίηση διευκολύνουν την ταξινόμηση του σχηματισμού επιφανείας. Τα αποτελέσματα πρέπει να συμπεριληφθούν στο γεωμορφολογικό χάρτη.
- Γεωφυσικές μελέτες: Μια γεωφυσική έρευνα είτε ηλεκτρική είτε σεισμική (με διάθλαση) θα συμβάλει στην καλύτερη γνώση του επιφανειακού πάχους σχηματισμού, της θέσης των κατολισθήσεων, της εσωτερικής κυκλοφορίας του νερού και της ογκομετρικής σημασίας δυνητικά ασταθών σχηματισμών.
- Δομική γεωλογική ανάλυση. Μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων στη λεκάνη απορροής και στις περιπτώσεις όπου οι υδραυλικοί αγωγοί πρέπει να είναι σήραγγες σε ορεινούς όγκους. Η σταθερότητα του βράχου και της διαρροής στη βάση των υδραυλικών κατασκευών είναι προβλήματα που μπορούν να λυθούν με αυτή τη μεθοδολογία, αποφεύγοντας δραματικά περιστατικά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.
- Άμεσες έρευνες - Διάτρηση γεωτρήσεων. Αυτό είναι ασυνήθιστο για την ανάπτυξη μικρού υδροηλεκτρικού συστήματος. Ωστόσο, όταν το φράγμα πρέπει να θεμελιωθεί σε μη ομογενή στρώματα, είναι απαραίτητο ένα πρόγραμμα γεώτρησης, ακολουθούμενο από εργαστηριακές δοκιμές στα δείγματα που εξάγονται. Μερικές από αυτές τις συνιστώμενες δοκιμές είναι:
 1. Δοκιμές διαπερατότητας σε γεωτρήσεις, όπως η δοκιμή Lugeon ή χαμηλής πίεσης, για τον καθορισμό της κυκλοφορίας του νερού στο θεμέλιο.
 2. Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη των δειγμάτων για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών τους.

3.5.4 Επιλογή της βέλτιστης θέσης

Σκοπός όλων των παραπάνω είναι η επιλογή της βέλτιστης θέσης η οποία θα συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα η μεγάλη επιφανειακή απορροή και η μεγάλη υδραυλική πτώση, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

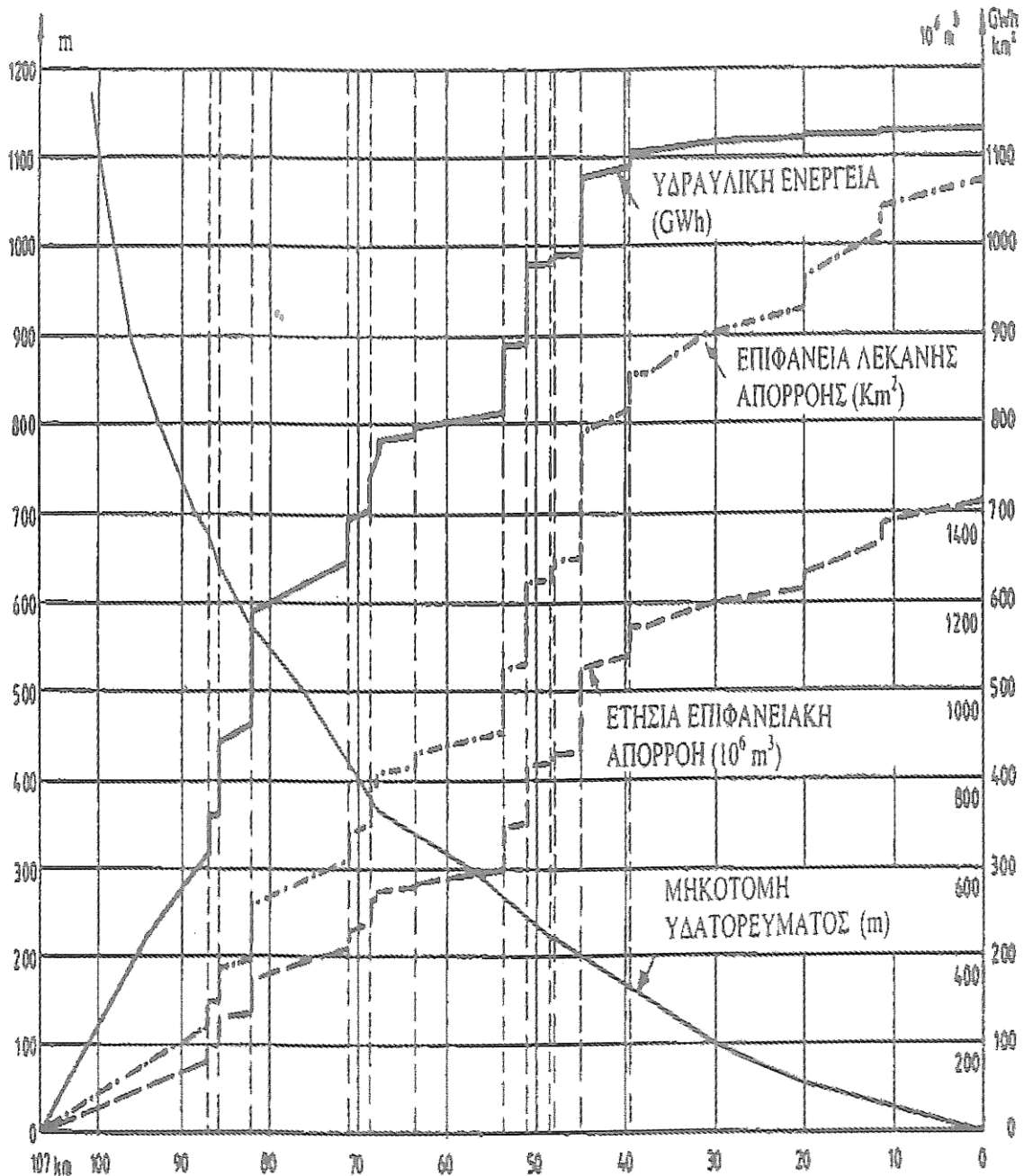
Όπως έχει αναφερθεί ήδη, σε κάθε σημείο του υδατορεύματος το οποίο θεωρητικά είναι υποψήφιο σημείο για την κατασκευή του φράγματος και της υδροληψίας, αντιστοιχεί σε μία λεκάνη απορροής που συνέχεια θα αυξάνεται, όσο το εξεταζόμενο σημείο θα μετατοπίζεται προς τα κάτω. Θα πρέπει στη συνέχεια να γίνει χάραξη της μηκοτομής του κύριου υδατορεύματος, δηλαδή της στάθμης z (m) συναρτήσει του ανάπτυσματος x (m). Η μηκοτομή του υδατορεύματος καταλήγει στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου $z = 0$ m, από την οποία μετράται το ανάπτυσμα του υδατορεύματος. Αν η ετήσια επιφανειακή απορροή V (m^3) του υδατορεύματος είναι αρχικά ανάλογη της αντίστοιχης λεκάνης απορροής, είναι δυνατή η χάραξη σε διάγραμμα με οριζόντιο άξονα το ανάπτυσμα x του υδατορεύματος των ακόλουθων καμπυλών:

- Της στάθμης z του υδατορεύματος.
- Της επιφάνειας A της λεκάνης απορροής.
- Της ετήσιας επιφανειακής απορροής V .
- Της υδραυλικής ενέργειας E που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη επιφανειακή απορροή V , από τη θέση της στάθμης z έως την επιφάνεια της θάλασσας, όπου $z=0$ m, εφόσον δε ληφθούν υπόψη βαθμοί απόδοσης και θεωρηθεί πως υπάρχει πλήρης ενεργειακή αξιοποίηση του νερού.



Σχήμα 3.7 α) Καμπύλη διάρκειας της παροχής β) Καμπύλη διάρκειας της ισχύος για την εγκατάσταση της υδροστροβίλου. [Ε3, Σχήμα 3.7]

Το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας σε όλα τα ποσοστά της χρονικής διάρκειας δίνει την παραγόμενη ενέργεια στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, δηλαδή ετησίως και είναι ίση προς το εμβαδό που περικλείεται από την καμπύλη διάρκειας ισχύος που φαίνεται στο σχήμα 3.7β. Επιπλέον, από το σχήμα προκύπτει πως δεν υπάρχει εκμετάλλευση του νερού πάνω από το Q_{max} και κάτω από το Q_{min} .



Σχήμα 3.8 Μηκοτομή, επιφάνεια λεκάνης απορροής, ετήσια επιφανειακή απορροή και ετησία υδραυλική ενέργεια κατά μήκος υδατορεύματος. [Ε3, Σχήμα 3.9]

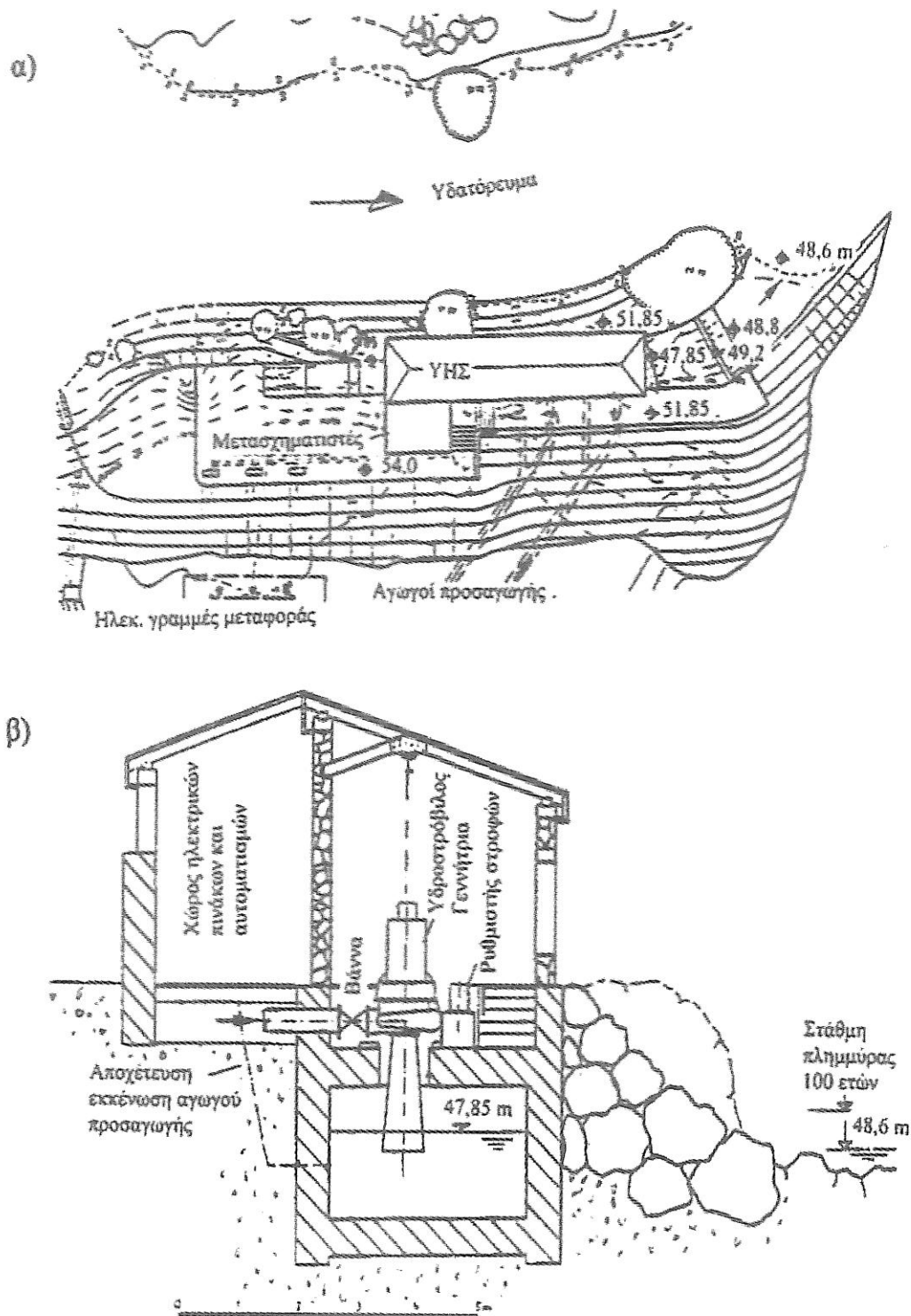
3.6 Γενικές παρατηρήσεις περί διαμόρφωσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) ενός υδροηλεκτρικού έργου (ΥΗΕ) περιλαμβάνει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του έργου και εξασφαλίζει την είσοδο και την απαγωγή της παροχής στους υδροστροβίλους. Η διαμόρφωσή του εξαρτάται από τον τύπο του και το πλήθος των υδροστροβίλων, καθώς και από την ονομαστική τους ισχύ. Η επιλογή που αφορά στη θέση του σταθμού πρέπει να εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση, την ασφάλεια στις περιπτώσεις πλημμυρικών φαινομένων, την εύκολη πρόσβαση, τη συντήρηση και την επίβλεψη του εξοπλισμού σε συνδυασμό με το κατά το δυνατό μικρότερο προϋπολογισμό. Επιπλέον, περιλαμβάνει όλον το εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την εγκατάσταση και τη συντήρηση του κύριου εξοπλισμού, όπως είναι οι αντλίες αποστράγγισης, τα εργαλεία επισκευών (ηλεκτροσυγκόλληση, δρέπανο, κλπ.) και τη γερανογέφυρα. Στην κατασκευή του θα πρέπει να προβλεφθεί χώρος πρόσβασης και συναρμολόγησης του εξοπλισμού και ανοίγματα κατάλληλων διαστάσεων, ώστε να καθίσταται δυνατή η εισαγωγή του εξοπλισμού. Επιπλέον, χρειάζεται ένας χώρος, απαραίτητος για τη φύλαξη όλων των εγχειριδίων του εξοπλισμού, χώρος αποθήκευσης όλων των ανταλλακτικών και των απαραίτητων λιπαντικών ελαίων για τον εξοπλισμό, αλλά και χώρος για το προσωπικό. Τέλος, πολύ βασικό είναι να υπάρχει κατάλληλα διαμορφωμένος χώρος για την εγκατάσταση του μετασχηματιστή, που θα πληροί όλες τις προαπαιτούμενες προδιαγραφές για την εξασφάλιση του εξοπλισμού και του προσωπικού.

Τα υδροηλεκτρικά έργα διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες, στα ΥΗΕ εκτροπής, όπου η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω εκτροπής του υδατορεύματος και στα ΥΗΕ κατά το ρου του ποταμού ή ΥΗΕ ροής, όπου η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω του έργου υδροληψίας. Τα υδροηλεκτρικά ροής, συνήθως, έχουν χαμηλή υδραυλική πτώση, 5 με 15 m, και επιτυγχάνεται μέσω εκχειλιστή μικρού ύψους, χωρίς να παρεμβαίνει αγωγός προσαγωγής ή διώρυγα. Στα έργα εκτροπής η υδραυλική πτώση είναι μεγαλύτερη των 15 m, συνήθως 15 με 500 m, και ο σταθμός τροφοδοτείται μέσω της διώρυγας και αγωγού προσαγωγής ή μόνο μέσω αγωγού προσαγωγής. Έτσι, τα μικρά εκτροπής εξοπλίζονται με υδροστροβίλους Francis ή δράσεως, όπως είναι οι Pelton, Turgo και Cross – Flow, ενώ τα μικρά ροής με υδροστροβίλους αξονικής ροής ή Francis ανοιχτού θαλάμου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κάτοψη ενός μικρού έργου εκτροπής. Ο σταθμός είναι κατασκευασμένος κοντά στο φυσικό υδατόρευμα, όπου οδηγείται η παροχή από τους αγωγούς απαγωγής των υδροστροβίλων στην ανοιχτή διώρυγα απαγωγής. Η στάθμη της διώρυγας παραμένει σταθερή με τη βοήθεια του υπερχειλιστή. Είναι σύνηθες κάθε υδροστροβίλος να έχει δική του διώρυγα απαγωγής, κάτι που βελτιώνει αρκετά την ευελιξία της λειτουργίας του σταθμού.

Η διώρυγα απαγωγής συμβάλλει στο υδατόρευμα, σχηματίζοντας οξεία γωνία με αυτό, ώστε να μη δημιουργείται αλληλεπίδραση και φθορά στις κατασκευές. Ο σταθμός είναι εξοπλισμένος με υδροστρόβιλους Francis.



Σχήμα 3.9 α) Διαμόρφωση ΥΗΣ και περιβάλλοντος χώρου, β) Τομή του ΥΗΣ [Ε3, Σχήμα 7.1]

Η στάθμη της διώρυγας απαγωγής είναι υψηλότερη από τη μέγιστη προβλεπόμενη στάθμη του υδατορεύματος, για να συμβάλλει στη λειτουργία των μονάδων ακόμα και στις πιο δυσμενείς περιπτώσεις. Στον τοίχο του υδροηλεκτρικού από την πλευρά του υδατορεύματος τοποθετούνται μεγάλες πέτρες για προστασία από τη διάβρωση. Επίσης, στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο αγωγός προσαγωγής, ο οποίος από το πάνω μέρος του σταθμού διακλαδίζεται, ώστε να τροφοδοτεί τους δύο υδροστροβίλους.

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ ενός άξονα οριζόντιου ή κατακόρυφου υδροστροβίλου. Όταν όμως αυτό είναι δυνατό, η επιλογή του οριζόντιου τύπου Pelton & Francis έχει κάποια βασικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ευκολία στην επίβλεψη και συντήρηση, στο μικρότερο απαιτούμενο ύψος του ΥΗΣ, στην ευκολία της εγκατάστασης του σφονδύλου.

Κατά τη διαμόρφωση του σταθμού είναι σίγουρο πως πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι ισχύοντες κανονισμοί σχετικά με τη στέγαση του εξοπλισμού μέσης τάσεως (χώρος μετασχηματιστών και διακοπών) και την πυρασφάλειά του. Αυτά του είδους τα έργα θεωρούνται χαμηλού κινδύνου, έτσι δεν απαιτείται η εγκατάσταση συστήματος αυτόματης πυρανίχνευσης και πυρασφάλειας, αλλά θα πρέπει σίγουρα να υπάρχει η εγκατάσταση ορισμένου αριθμού φορητών πυροσβεστήρων ξηρής χημικής ουσίας (κόνεως) CO₂, σύμφωνα πάντα με τα τετραγωνικά του χώρου. Η παροχή του νερού για τις απαιτήσεις του σταθμού σαν εγκατάσταση (WC, νιπτήρας) γίνεται μέσω του αγωγού προσαγωγής και η λήψη του πραγματοποιείται από σημεία πάνω από τις βάνες του υδροστροβίλου.

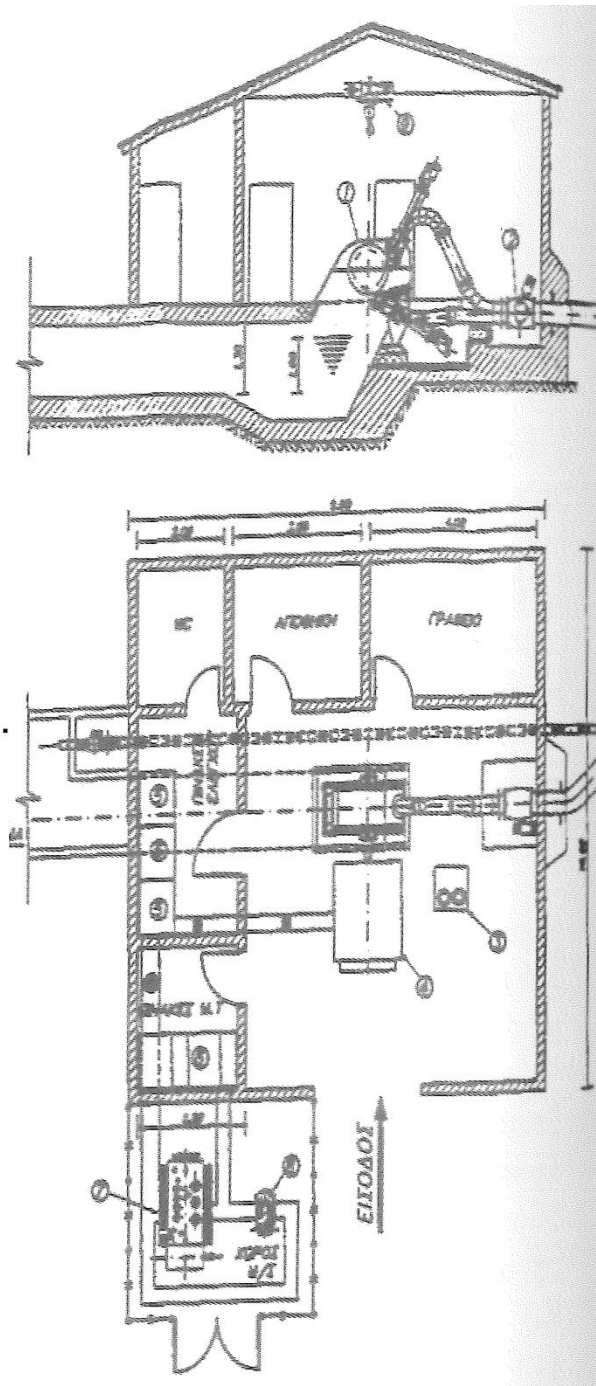
Πολύ σημαντική, επίσης, κατά τη φάση της κατασκευής του σταθμού είναι η πρόβλεψη για την εκκένωση και αποστράγγιση των υδροστροβίλων σε περίπτωση συντήρησης ή επίβλεψης. Αν ο υδροστρόβιλος είναι τοποθετημένος στη στάθμη του νερού στο φρεάτιο απαγωγής, αρκεί να κλείσει η βάννα εισόδου και να πραγματοποιηθεί η είσοδος του αέρα. Αν όμως, ο υδροστρόβιλος είναι χαμηλότερα από τη στάθμη απαγωγής, κυρίως για λόγους σπηλαιώσεως, θα πρέπει να υπάρχει θυρόφραγμα στην άκρη του αγωγού απαγωγής, έτσι ώστε η εκκένωση του υδροστροβίλου από το νερό να πραγματοποιείται μέσω αντλίας τοποθετημένης σε φρεάτιο στο χαμηλότερο σημείο. Σε κάθε περίπτωση απαραίτητο είναι το σύστημα αποστράγγισης, είτε μέσω φυσικής ροής, είτε μέσω αντλιών.

3.7 Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Pelton ή Cross Flow

Οι υδροστρόβιλοι Pelton είναι συνήθως μικρής ισχύος με 1 ή 2 ακροφύσια το πολύ και είναι είτε οριζόντιου είτε κατακόρυφου άξονα (από 5 έως 500 kW περίπου). Στο σχήμα 3.10 δίνεται η τομή και οι διαστάσεις υδροηλεκτρικού σταθμού με υδροστρόβιλο Pelton οριζοντίου άξονα, 2 ακροφυσίων, ενώ στο σχήμα 3.11 δίνεται η τομή και οι διαστάσεις υδροηλεκτρικού σταθμού με

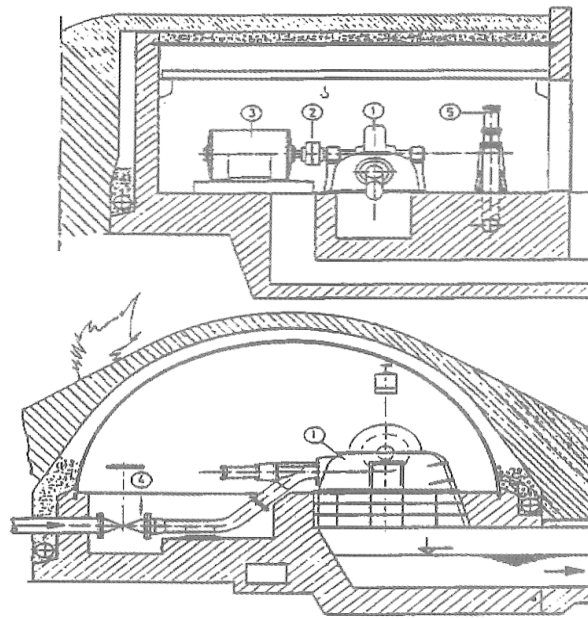
υδροστρόβιλο Pelton οριζοντίου άξονα, 1 ακροφυσίου. Χαρακτηριστικό του σταθμού στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η ημικυκλική του διατομή που επιχωματώνεται στην εξωτερική πλευρά, έτσι ώστε να προκαλεί πολύ μικρή παρέμβαση στον περιβάλλοντα χώρο.

1. Υδροστρόβιλος
2. Βάννα εισόδου (σφαιρική)
3. Μονάδα ισχύος ρθμ. Στροφών
4. Γεννήτρια
5. Πίνακες ελέγχου-αυτοματισμών
6. Πίνακες μετασχηματιστού
7. Μετασχηματιστής
8. Μετασχηματιστής εσ. καταν.
9. Βαρούλκο



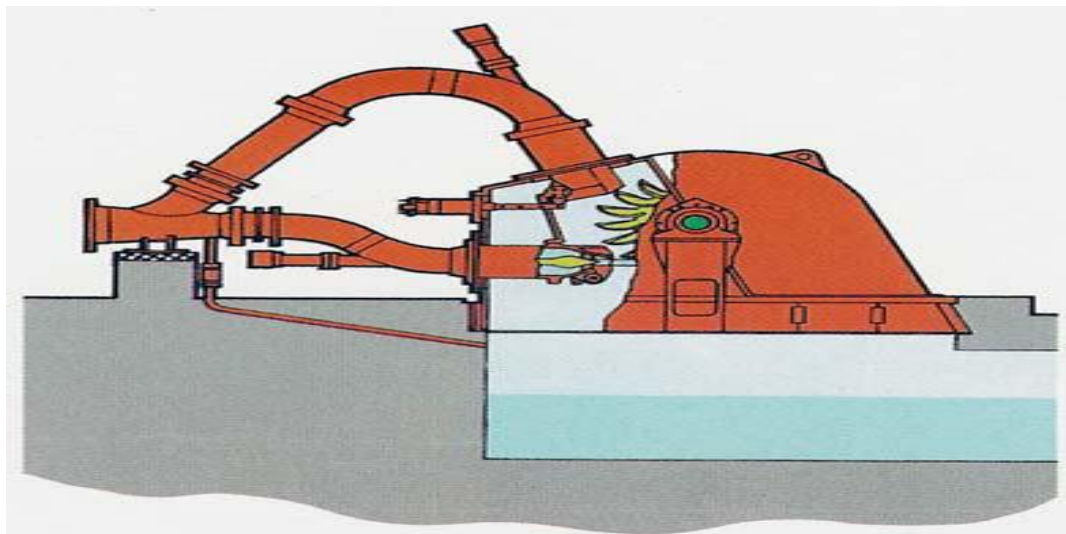
Σχήμα 3.10 Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton 2 ακροφυσίων, οριζοντίου άξονα και ονομαστικό σημείο λειτουργίας: $P = 1380 \text{ kW}$, $H = 330 \text{ mΣΥ}$, $Q = 0,835 \text{ m}^3/\text{sec}$, $n = 1000 \text{ RPM}$. [E3, Σχήμα 7.2]

- 1 Υδροστρόβιλος
- 2 Κοπλερ
- 3 Γεννήτρια
- 4 Βάννα εισόδου
- 5 Αγωγός by-pass

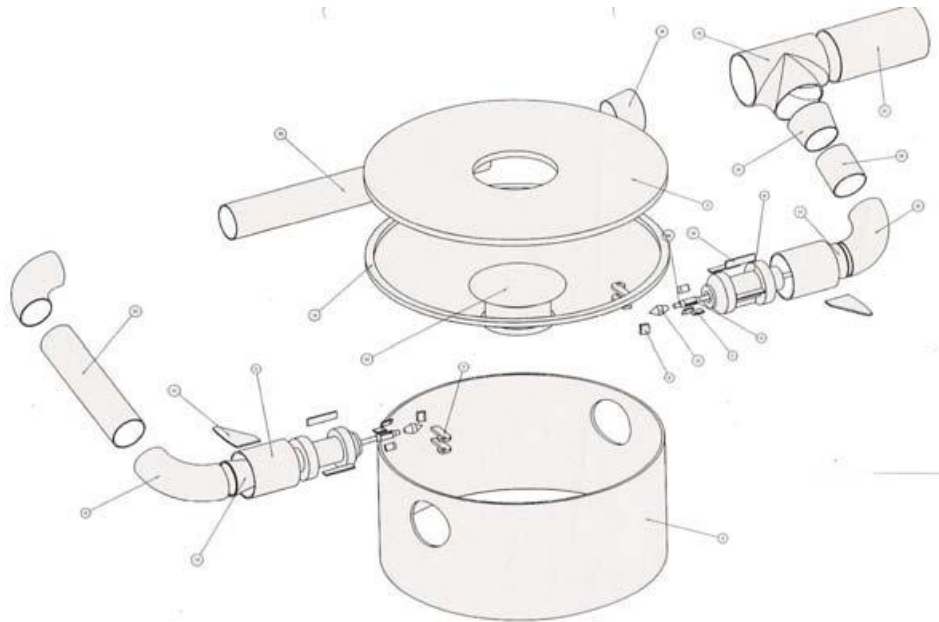


Σχήμα 3.11 Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton 1 ακροφυσίου, οριζοντίου άξονα και ονομαστικό σημείο λειτουργίας: $P = 456 \text{ kW}$, $H = 300 \text{ mΣΥ}$, $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{sec}$, $n = 1020 \text{ RPM}$. [E3, Σχήμα 7.3]

Στο σχήμα 3.12 φαίνεται η τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Pelton οριζοντίου άξονα με 2 ακροφύσια, όπου διακρίνεται η σφαιρική βάννα εισόδου (1), ο υδροστρόβιλος (2), η γερανογέφυρα (3) και ο χώρος ελέγχου (4). Στην περίπτωση που υπάρχουν παραπάνω από δύο ακροφύσια, τότε ο υδροστρόβιλος θα είναι σίγουρα κατακόρυφου άξονα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13.

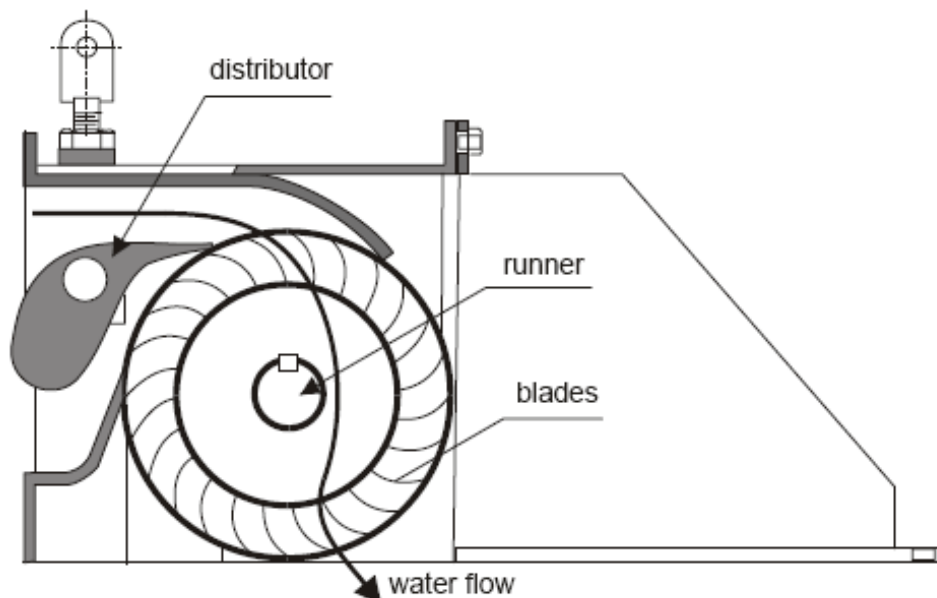


Σχήμα 3.12 Υδροστρόβιλος Pelton οριζοντίου άξονα με 2 ακροφύσια [E1, Figure 6.5]



Σχήμα 3.13 Pelton κατακόρυφου άξονα με 2 ακροφύσια, [Ξ1, Figure 6.6]

Οι υδροστρόβιλοι Cross Flow είναι οριζοντίου άξονα και για αυτό έχουν ομοιότητες με τους Pelton οριζοντίου άξονα. Το βασικό του χαρακτηριστικό και των δύο τύπων υδροστρόβιλων, είναι ότι η θέση του δρομέα τους βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη από τη μέγιστη πιθανή στάθμη του νερού στη διώρυγα απαγωγής. Το νερό μετά από την έξοδο του δρομέα πέφτει λόγω βαρύτητας στη διώρυγα απαγωγής, που αρχίζει κάτω από τον υδροστρόβιλο.

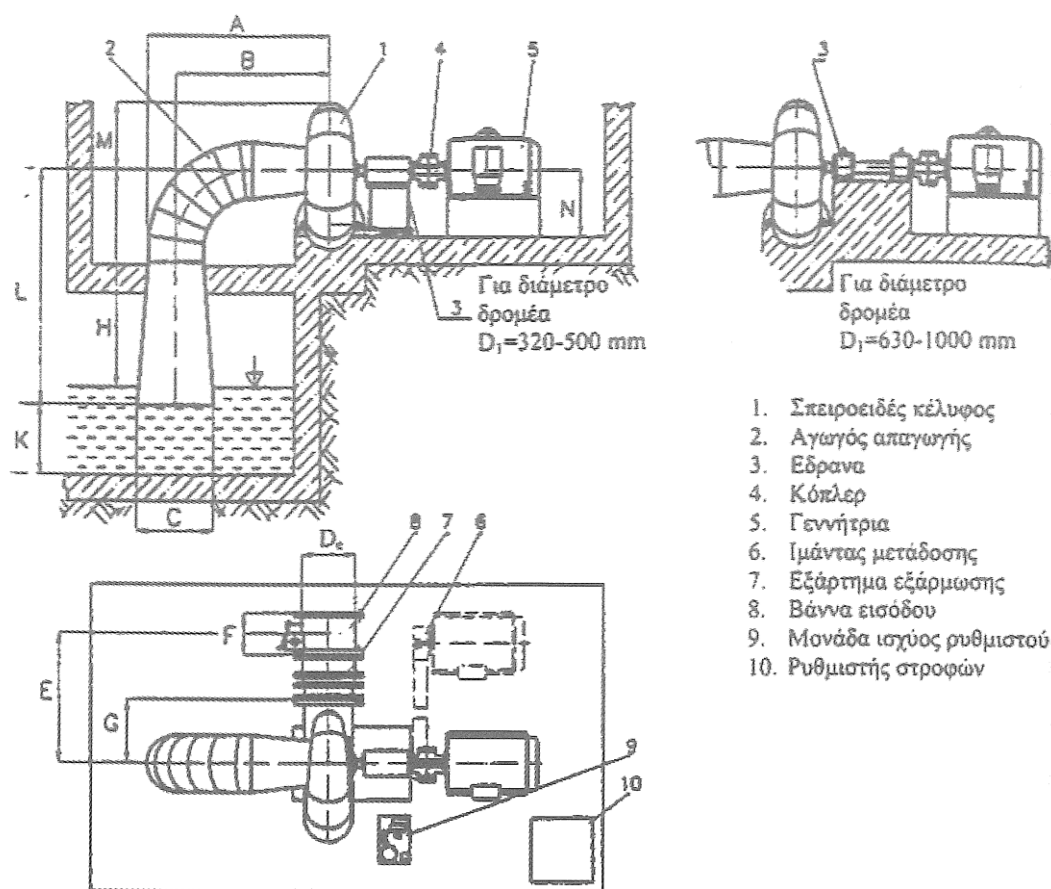


Σχήμα 3.14 Υδροστρόβιλος Cross Flow [Ξ1, Figure 6.8]

3.8 Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Francis

α) Francis οριζοντίου άξονα

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται μία τυπική κάτοψη και τομή ΥΗΣ μικρού υδροηλεκτρικού, με υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα, μαζί με τις κύριες διαστάσεις που δίνονται στον πίνακα 3.1 συναρτήσει της διαμέτρου D (σε m) του δρομέα. Με τη διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η θέση της γεννήτρια σε εναλλακτική σύνδεση μέσω τροχαλίας και ιμάντων.

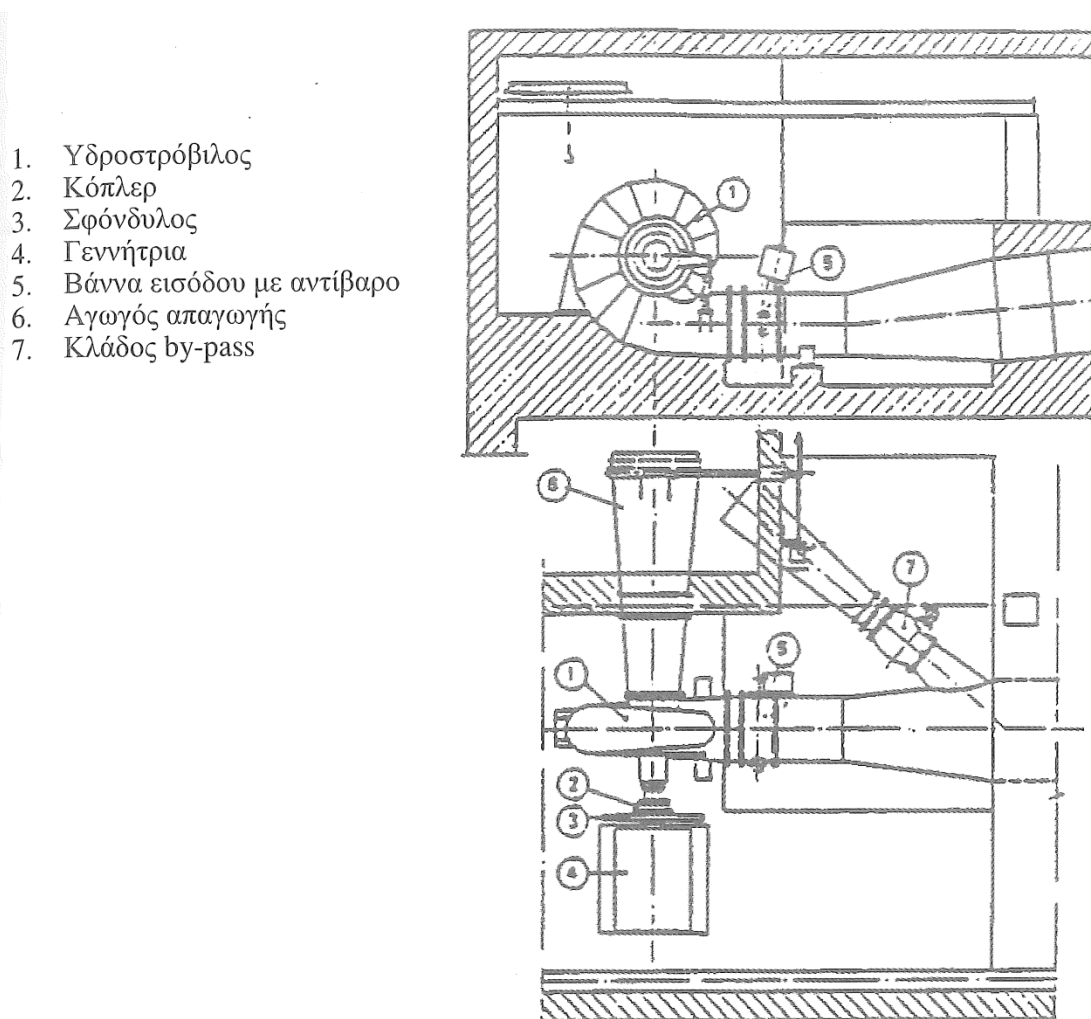


Σχήμα 3.15 Διάταξη με υδροστρόβιλο Francis, οριζοντίου άξονα (CKD, Τσεχία) [E3, Σχήμα 7.7]

D	A	B	C	D _e	E	F	G	H	K	L	M	N
0,32	1,39	1,18	0,59	0,38	0,97	0,31	0,47	1,38	0,53	1,75	0,51	0,49
0,40	1,75	1,48	0,73	0,48	1,21	0,39	0,59	1,72	0,66	2,19	0,64	0,61
0,50	2,18	1,85	0,92	0,60	1,52	0,48	0,74	2,15	0,83	2,74	0,81	0,77
0,63	2,75	2,32	1,16	0,75	1,92	0,61	0,94	2,71	1,04	3,45	1,01	0,97
0,80	3,49	2,95	1,47	0,96	2,43	0,77	1,19	3,44	1,33	4,38	1,29	1,23
1,00	4,36	3,69	1,84	1,20	3,04	0,97	1,49	4,30	1,66	5,48	1,61	1,54

Πίνακας 3.1 Ενδεικτικές διαστάσεις (σε m) ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα (CKD, Τσεχία) [E3, Σχήμα 7.7]

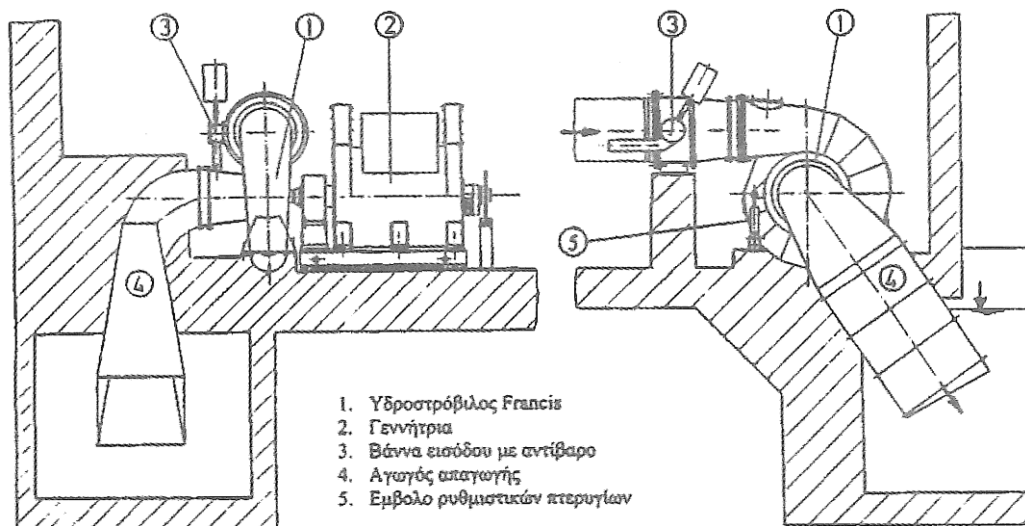
Στο σχήμα 3.16 δίνεται η διάταξη ΥΗΣ μικρού έργου με υδροστρόβιλο Francis, οριζοντίου άξονα. Ο αγωγός απαγωγής σε σχήμα κώνου είναι οριζόντιος, επίσης, καθώς και ο υδροστρόβιλος για την αποφυγή της σπηλαίωσης είναι τοποθετημένος σε στάθμη χαμηλότερη από αυτή της απαγωγής. Επιπλέον, φαίνεται η βάννα εισόδου με το αντίβαρο, καθώς και ο σφόνδυλος. Ο παρακαμπτήριος αγωγός (by – pass) πάνω από τη βάννα εισόδου, οδηγεί την παροχή του αγωγού προσαγωγής προς τη διώρυγα απαγωγής, όταν η μονάδα σταματάει απότομα, για να μειωθεί η ένταση των υπερπιέσεων κατά την εξέλιξη του υδραυλικού πλήγματος, δηλαδή μειώνεται γρήγορα η παροχή προς τον υδροστρόβιλο και σταδιακά η παροχή στον αγωγό. Μετά από αυτό το μεταβατικό φαινόμενο, η βάννα κλείνει σταδιακά, ενώ κατά τη φυσιολογική λειτουργία της μονάδας παραμένει κλειστή.



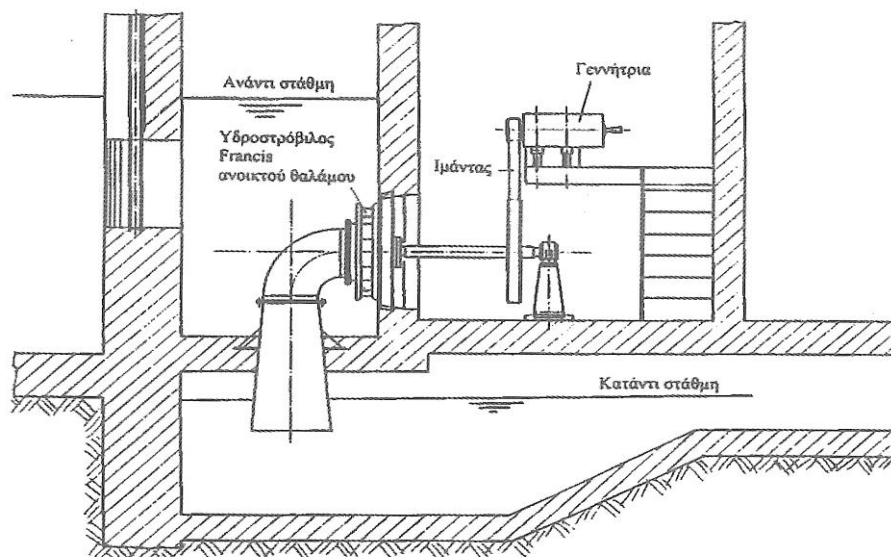
1. Υδροστρόβιλος
2. Κόπλερ
3. Σφόνδυλος
4. Γεννήτρια
5. Βάννα εισόδου με αντίβαρο
6. Αγωγός απαγωγής
7. Κλάδος by-pass

Σχήμα 3.16 ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα με ονομαστική λειτουργία $P = 740 \text{ kW}$, $H = 30 \text{ mΣΥ}$, $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 500 \text{ RPM}$
[E3, Σχήμα 7.8]

Στο σχήμα 3.17 φαίνεται η τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Francis, οριζοντίου άξονα, τοποθετημένο σε υψηλότερη στάθμη από αυτή της διώρυγας απαγωγής, με αποτέλεσμα ο αγωγός απαγωγής να καμπυλώνεται προς τα κάτω. Η διατομή σε αυτήν την περίπτωση είναι μεικτή και το αρχικά κωνικό τμήμα γίνεται σταδιακά χοανοειδές. Επιπλέον, διακρίνεται η βάννα εισόδου με το αντίβαρο και το έμβολο μέσω του οποίου περιστρέφεται η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων.



Σχήμα 3.17 ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα [Ε3, Σχήμα 7.9]



Σχήμα 3.18 ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα, ανοικτού θαλάμου με ονομαστικό σημείο λειτουργίας $P = 14\text{kW}$, $H = 3,5\text{ mΣΥ}$, $Q = 0,5\text{ m}^3/\text{s}$ [Ε3, Σχήμα 7.10]

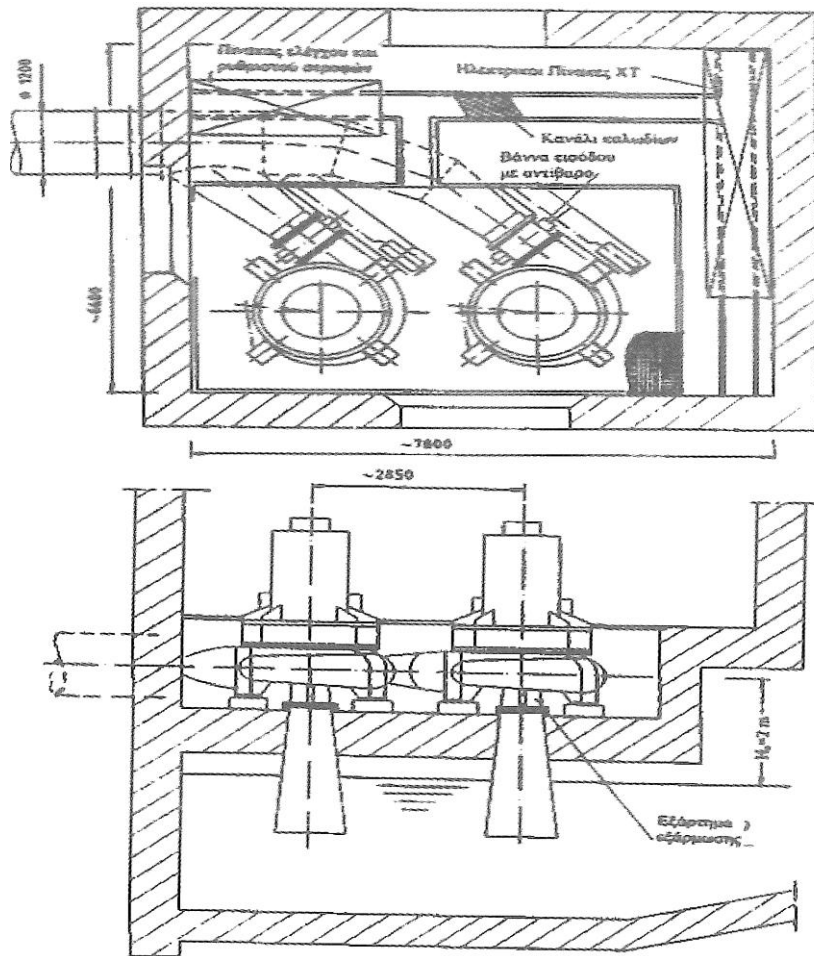
Στο σχήμα 3.18 παρουσιάζεται τομή μικρού ΥΗΣ για μικρό έργο με υδροστρόβιλο Francis, οριζόντιου άξονα, ανοιχτού θαλάμου. Φαίνεται το θυρόφραγμα, από το οποίο μπορεί να σταματήσει η τροφοδοσία του θαλάμου, ο καμπυλωμένος αγωγός απαγωγής και η διώρυγα απαγωγής, καθώς και η γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη με την άτρακτο του δρομέα μέσω ιμάντα και τροχαλίας, η οποία αυξάνει τη ροπή αδράνειας των στρεφόμενων μαζών και παράλληλα επιτυγχάνεται ο πολλαπλασιασμός της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας. Γενικά, η συγκεκριμένη διάταξη είναι σπάνια λόγω του περιορισμένου εύρους λειτουργίας υδροστροβίλων τέτοιου τύπου.

β) Francis κατακόρυφου άξονα

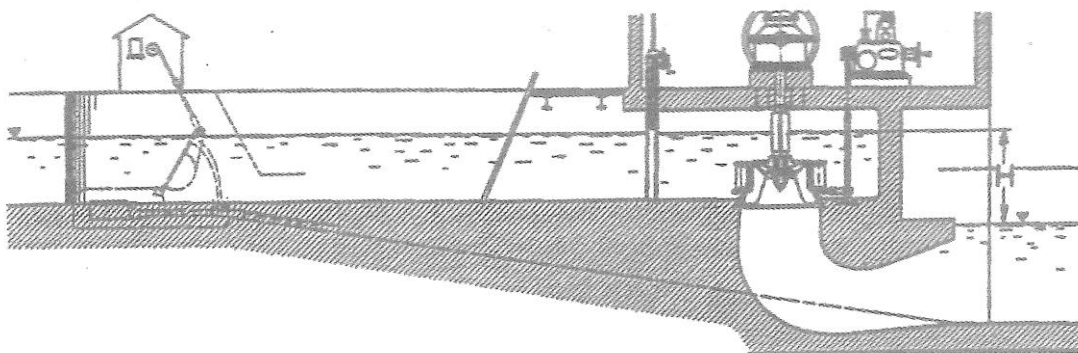
Στο σχήμα 3.19 δίνεται διάταξη ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με δύο υδροστρόβιλους Francis κατακόρυφου άξονα. Σε αυτό το παράδειγμα το ύψος της τοποθέτησης του υδροστροβίλου είναι θετικό, δηλαδή η στάθμη του δρομέα είναι πιο ψηλά από αυτήν της απαγωγής, έτσι ο αγωγός απαγωγής έχει τη μορφή ευθύγραμμου κωνικού αποκλίνοντος ακροφυσίου. Φαίνονται οι βάνες στην είσοδο των υδροστροβίλων, οι υδραυλικές μονάδες ισχύος των ρυθμιστών στροφών, η θέση των ηλεκτρικών πινάκων χαμηλής τάσης και των ρυθμιστών στροφών. Η τροφοδοσία των υδροστροβίλων πραγματοποιείται μέσω του αγωγού προσαγωγής που διακλαδώνεται.

Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται διάταξη ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Francis ανοιχτού θαλάμου, χωρίς σπειροειδές κέλυφος. Οι υδροστρόβιλοι αυτού του τύπου είναι κατάλληλοι για έργα, με χαμηλή ισχύ, από 50 έως 1000 kW περίπου, και με χαμηλή υδραυλική πτώση, από 3 έως 16 mΣΥ. Στη διάταξη φαίνεται το περιστρεφόμενο θυρόφραγμα κατά την αρχή της διώρυγας προσαγωγής, η εσχάρα και το θυρόφραγμα στην είσοδο του θαλάμου, ο καμπυλωτός αγωγός προσαγωγής, η γεννήτρια και το σύστημα περιστροφής των ρυθμιστικών πτερυγίων.

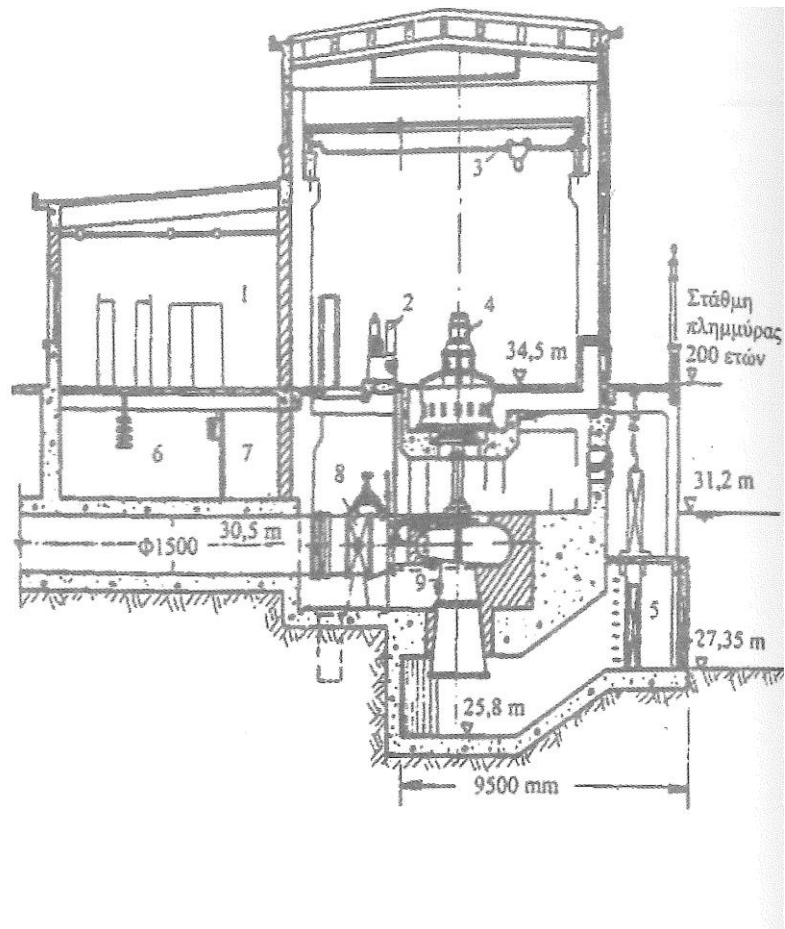
Στο σχήμα 3.21 δίνεται τομή του ΥΗΣ μικρού έργου με έναν υδροστρόβιλο Francis, κατακόρυφου άξονα ισχύος 1250 kW. Ο λόγος που επιλέγεται ο κατακόρυφος άξονας στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι εξαιτίας της έντονης μεταβολής της στάθμης απαγωγής, περίπου 5,5 m. Με τη συγκεκριμένη διάταξη η στάθμη της γεννήτριας και του ΥΗΣ καθορίζεται στη στάθμη απαγωγής που είναι ίδια με τη στάθμη πλημμύρας 200 ετών. Ο αγωγός προσαγωγής του υδροστροβίλου είναι ευθύγραμμος κωνικός, άρα και χαμηλότερος σε κόστος συγκριτικά με έναν αντίστοιχο καμπυλωτό.



Σχήμα 3.19 ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 2 υδροστρόβιλους Francis κατακόρυφου άξονα με ονομαστικό σημείο λειτουργίας $P = 1284\text{kW}$, $H = 97,9 \text{ mΣΥ}$, $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $n=1000\text{RPM}$, κατασκευής Koessler [Ε3, Σχήμα 7.11]



Σχήμα 3.20 ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με υδροστρόβιλο Francis κατακόρυφου άξονα τύπου ανοιχτού θαλάμου [Ε3, Σχήμα 7.13]



- 1 Γραφείο-Χειριστήριο
- 2 Ρυθμιστής στροφών
- 3 Γερανογέφυρα 10 t
- 4 Γεννήτρια
- 5 Δοκοί έμφραξης
- 6 Φρεάτιο ηλ. καλωδίων
- 7 Βοηθητικές σωλήν.
- 8 Βάννα σωληνώσεις
- 9 Ανθρωποθυρίδα

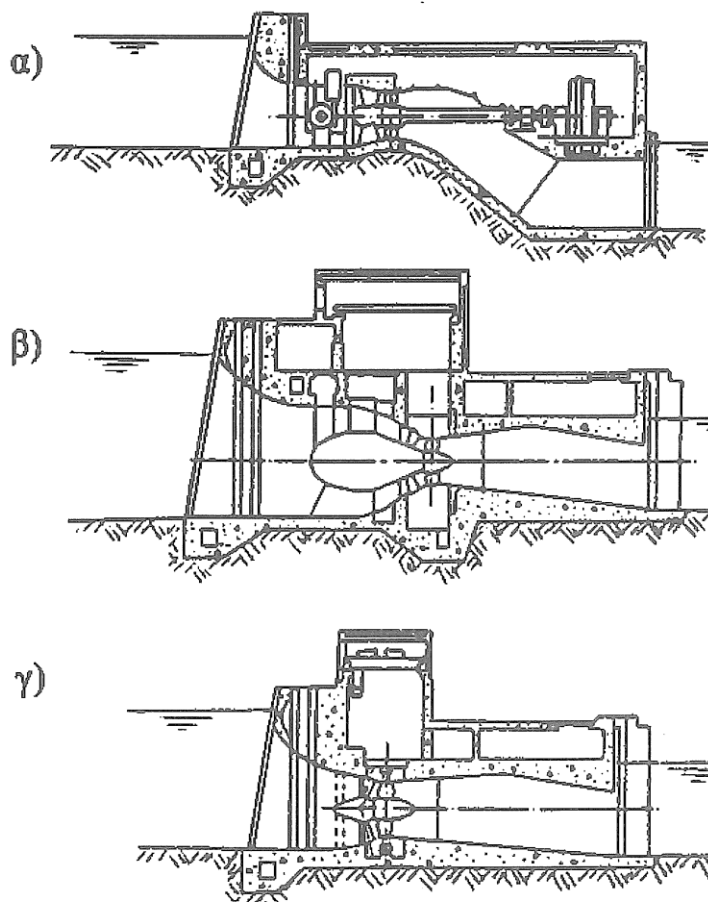
Σχήμα 3.21 Τομή ΥΗΣ μικρού ΥΗΕ με 1 υδροστρόβιλο Francis κατακόρυφου άξονα με ονομαστική ισχύ $P = 1250 \text{ kW}$. [Ε3, Σχήμα 7.12]

3.9 Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο αξονικής ροής

Η διαμόρφωση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού με υδροστροβίλους αξονικής ροής εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του υδροστροβίλου. Σε ορισμένες περιοχές λειτουργίας, η επιλογή διαφόρων ειδών υδροστροβίλων αξονικής ροής είναι δυνατή, όπως είναι του σωληνωτού, του βολβοειδούς και του τυπικού Kaplan. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εκτός από τα λειτουργικά στοιχεία, δηλαδή το βαθμό απόδοσης, το εύρος λειτουργίας, κλπ, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διάταξη και το μέγεθος του ΥΗΣ.

Στο σχήμα 3.22 δίνεται η σύγκριση των τομών τριών διαφορετικών ειδών υδροστροβίλων αξονικής ροής, σωληνωτού υδροστρόβιλου S ανάντη, βολβοειδούς υδροστροβίλου και υδροστροβίλου δακτυλίου. Από τη σύγκριση προκύπτει πως ο υδροστρόβιλος με το μικρότερο όγκο είναι ο σωληνωτός, ενώ αυτός με το μεγαλύτερο, ο βολβοειδής. Στην επιλογή πρέπει να ληφθεί υπόψη, επίσης, και ο βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου, όπου ανάμεσα στο βολβοειδή και το σωληνωτό, ο πρώτος έχει μεγαλύτερο. Τέλος, ο υδροστρόβιλος

δακτυλίου είναι το ίδιο συμπαγής με το σωληνωτό, όμως το κόστος του πρώτου είναι αρκετά υψηλότερο λόγω υψηλότερων κατασκευαστικών απαιτήσεων.

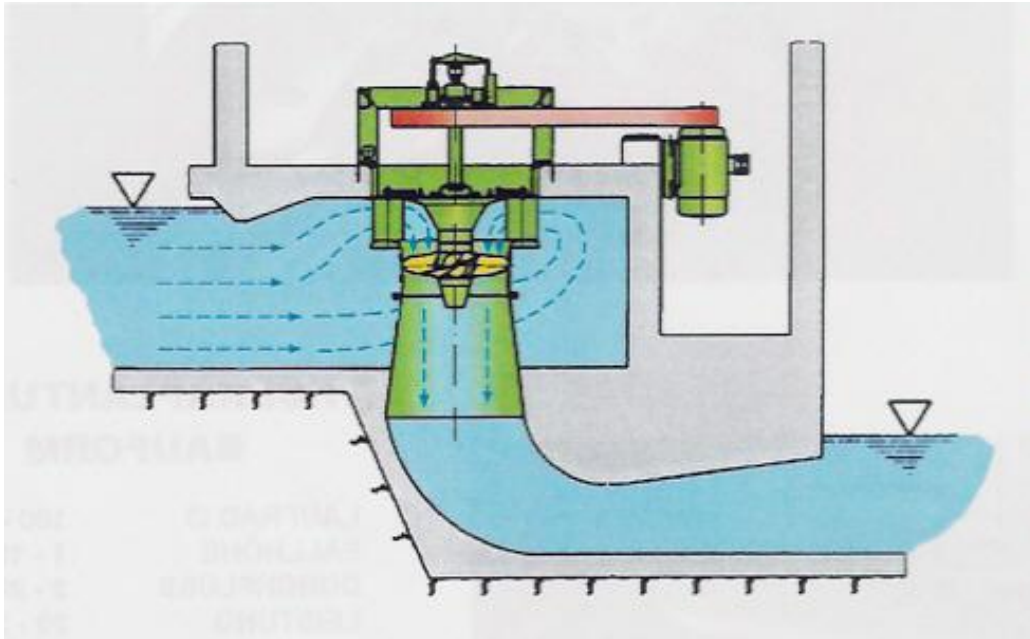


Σχήμα 3.22 Σύγκριση ΥΗΣ εξοπλισμού με το ίδιο σημείο λειτουργίας για υδροστρόβιλο α)σωληνωτό, β)βολβοειδή, γ) δακτυλίου. [Ε3, Σχήμα 7.15]

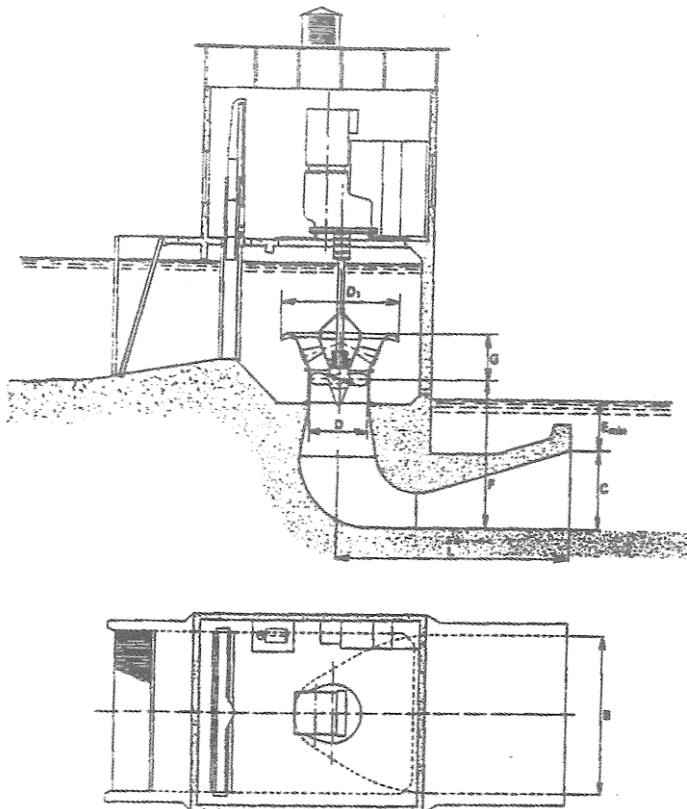
α)ΥΗΣ με κλασικό υδροστρόβιλο Kaplan

Στο σχήμα 3.23 δίνεται τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Kaplan, κατακόρυφου άξονα, με σπειροειδές κέλυφος. Η ακτινική ροή εισέρχεται σε μία ακτινικής μορφής στεφάνη προς τα μέσα και κάνει μία δεξιόστροφη γωνία πριν εισέλθει στο δρομέα κατά την αξονική κατεύθυνση.

Στο σχήμα 3.24 φαίνονται η τομή και η κάτοψη ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής τύπου έλικας ανοιχτού φρεατίου, όπου τα πτερύγια του δρομέα λειτουργούν με σταθερή κλίση και τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι τοποθετημένα με κωνική διάταξη.



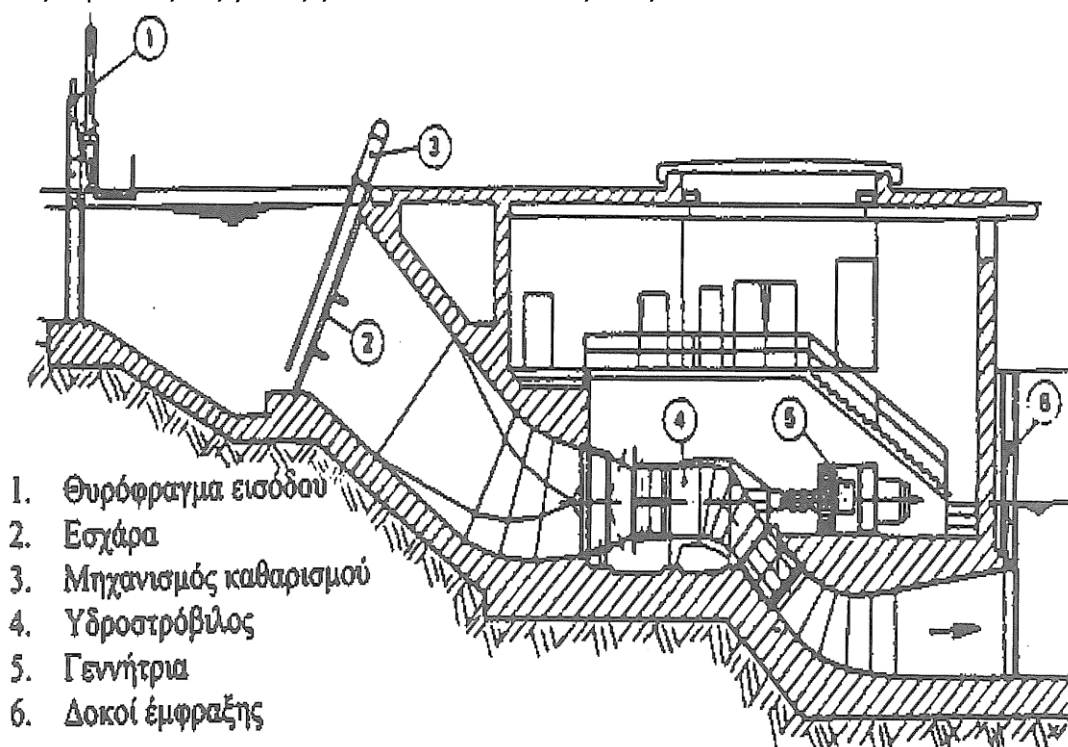
Σχήμα 3.23 Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο Kaplan, κατακόρυφου άξονα. [Ε1, Figure 6.12]



Σχήμα 3.24 Τομή και κάτοψη ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής τύπου έλικας, κατασκευής Sotumsand. [Ε3, Σχήμα 7.18]

β) ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστρόβιλο

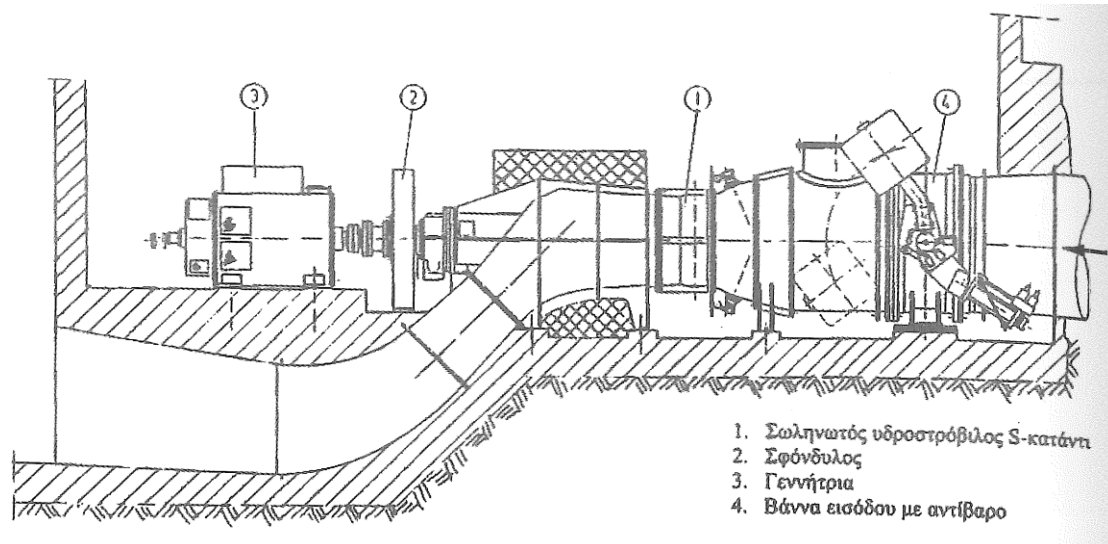
Στο σχήμα 3.25 δίνεται τομή ΥΗΣ μικρής υδραυλικής πτώσης με σωληνωτό υδροστρόβιλο, οριζόντιου άξονα, τύπου S – κατάντη. Φαίνονται, επίσης, τα θυροφράγματα εισόδου και απαγωγής, η εσχάρα στην είσοδο και ο μηχανισμός καθαρισμού της, η γεννήτρια, καθώς και οι ηλεκτρικοί πίνακες.



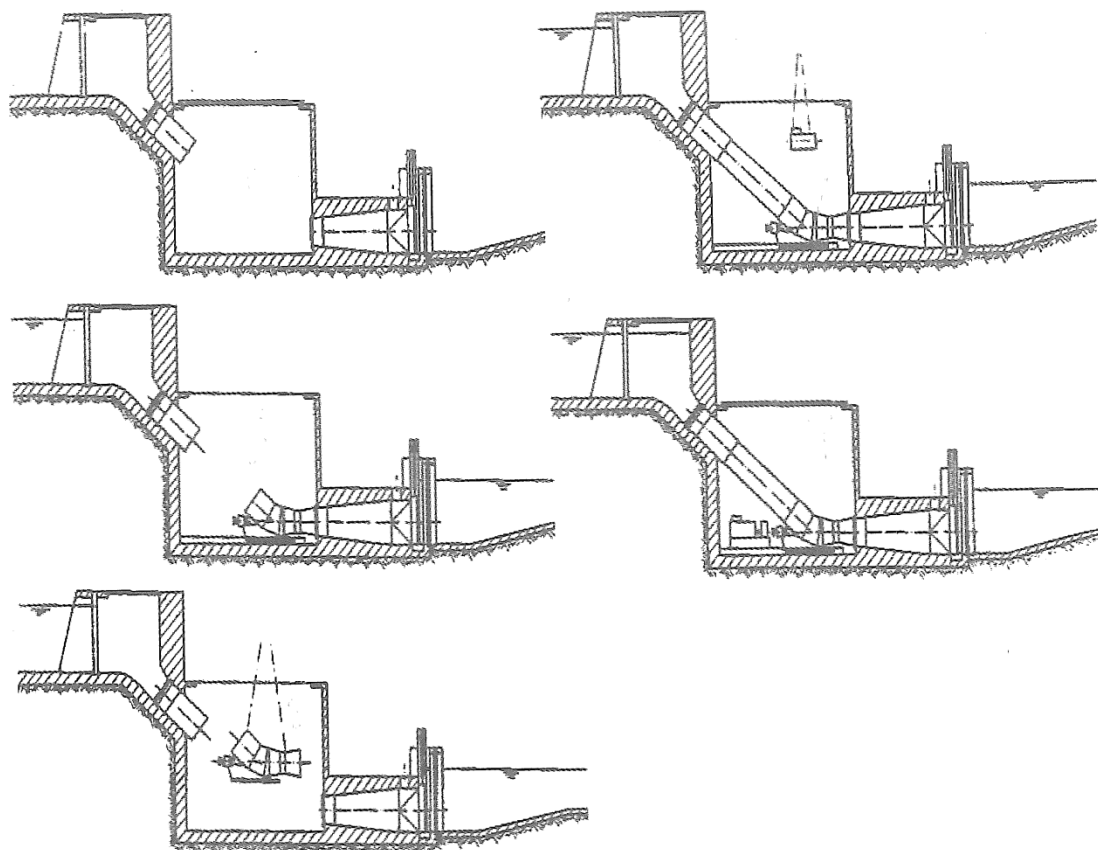
Σχήμα 3.25 Τομή ΥΗΣ μικρής υδραυλικής πτώσης με σωληνωτό υδροστρόβιλο αξονική ροής τύπου S – κατάντη. Ονομαστικό σημείο λειτουργίας υδροστροβίλου $P = 1068 \text{ kW}$, $H = 8,3 \text{ m ΣΥ}$, $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ [E3, Σχήμα 7.19]

Στο σχήμα 3.26 δίνεται τομή ΥΗΣ με σχετικά υψηλή υδραυλική πτώση με σωληνωτό υδροστρόβιλο οριζοντίου άξονα τύπου S – κατάντη. Σε αυτήν την περίπτωση ο υδροστρόβιλος τροφοδοτείται από αγωγό προσαγωγής και όχι απευθείας από τη δεξαμενή φόρτισης, εξαιτίας του μεγάλου ύψους. Η διακοπή της ροής πραγματοποιείται με βάνια εισόδου (4), εφοδιασμένη με αντίβαρο για αυτόματο κλείσιμο. Επιπλέον, διακρίνεται η γεννήτρια (3) και ο σφόνδυλος με τον οποίο αυξάνεται η ροπή αδρανείας των στρεφόμενων μαζών.

Στο σχήμα 3.27 δίνονται σχηματικά οι διάφορες φάσεις κατά την κατασκευή του ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστρόβιλο τύπου S – ανάντη.



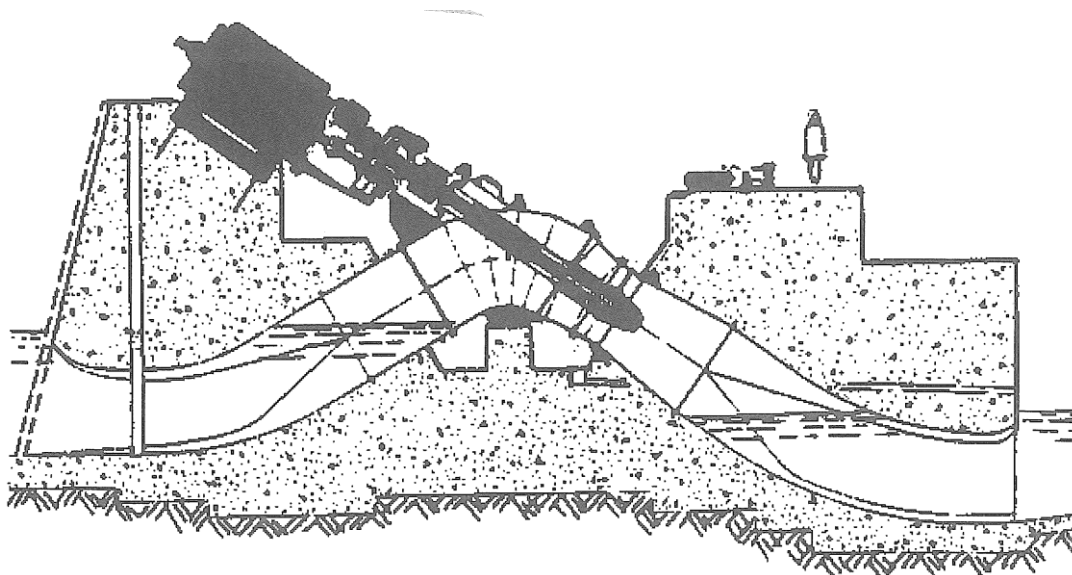
Σχήμα 3.26 Τομή ΥΗΣ σχετικά μεγάλης υδραυλικής πτώσης με σωληνωτό υδροστρόβιλο αξονική ροής τύπου S – κατάντη, ονομαστικής ισχύος $P = 1173$ kW, $H = 20,0$ m, $H = 20$ mΣΥ, $Q = 6,8$ m³/s, κατασκευής Koessler. [E3, Σχήμα 7.21]



Σχήμα 3.27 Φάσεις κατασκευής ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστρόβιλο τύπου S – ανάντη. [E3, Σχήμα 7.25]

γ)ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστροβίλο σε διάταξη σίφωνα

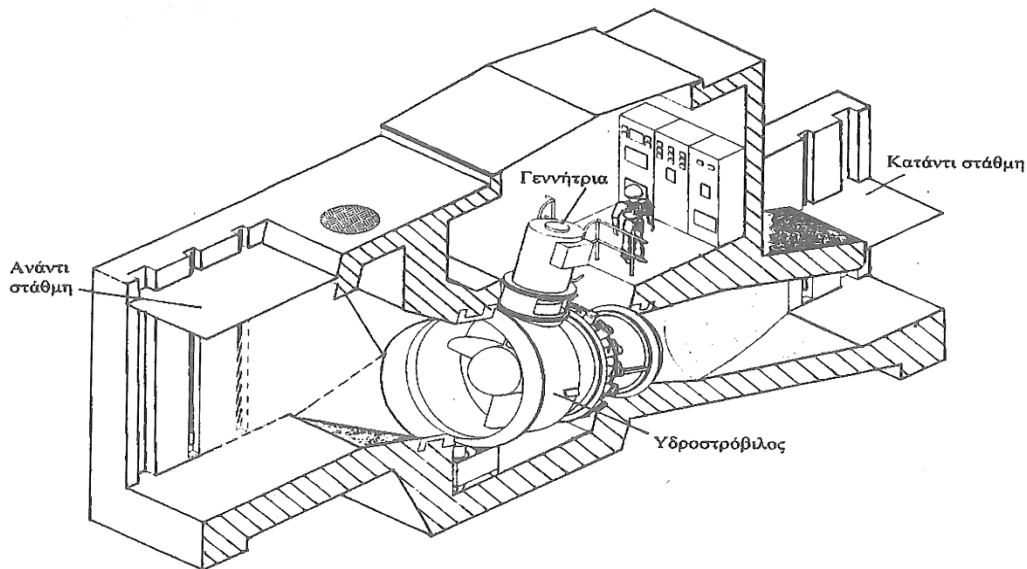
Ένας ενδιαφέρων τρόπος εγκατάστασης των σωληνωτών υδροστροβίλων τύπου S – ανάντη είναι η διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.27, στην οποία η στάθμη του δρομέα του υδροστροβίλου είναι υψηλότερη από την ανάντη στάθμη. Με αυτόν τον τρόπο καταργούνται τα θυροφράγματα στην προσαγωγή και απαγωγή του υδροστροβίλου, ενώ παράλληλα μειώνονται οι εκσκαφές. Για την εκκίνηση του υδροστροβίλου δημιουργείται κενό στο υψηλότερο σημείο του σίφωνα μέσω της αντλίας κενού. Η ανάντη στάθμη του νερού ανυψώνεται και όταν φθάσει την καμπυλότητα αρχίζει να λειτουργεί ο σίφωνας, δηλαδή να αναπτύσσεται ροή από την ανάντη στάθμη προς την κατάντη μέσω του υδροστροβίλου. Για τη διακοπή της λειτουργίας αρκεί το άνοιγμα της βάνας διακοπής κενού στο υψηλότερο σημείο μέσω της οποίας εισέρχεται αέρας, όποτε κατ' επέκταση διακόπτεται η λειτουργία του σίφωνα και η ροή.



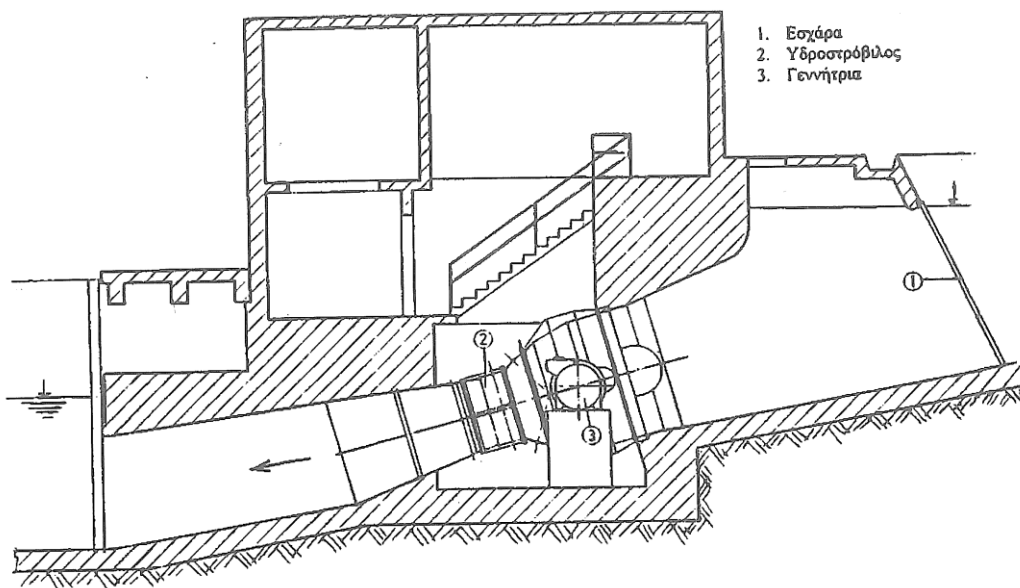
Σχήμα 3.28 Τομή ΥΗΣ με σωληνωτό υδροστροβίλο S ανάντη εγκατεστημένο σε διάταξη σίφωνα [Ε3, Σχήμα 7.25]

δ)ΥΗΣ με υδροστροβίλο αξονικής ροής τύπου βολβού, δακτυλίου ή γωνιακής μετάδοσης

Αυτοί οι τρεις τύποι υδροστροβίλων παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες μεταξύ τους που θα αναλυθούν παρακάτω. Οι υδροστροβίλοι με γωνιακή μετάδοση καλύπτουν περιοχή μικρής ισχύος μέχρι και 1500 kW περίπου, ενώ οι βολβοειδείς και οι υδροστροβίλοι δακτυλίου υψηλότερη περιοχή ισχύος.

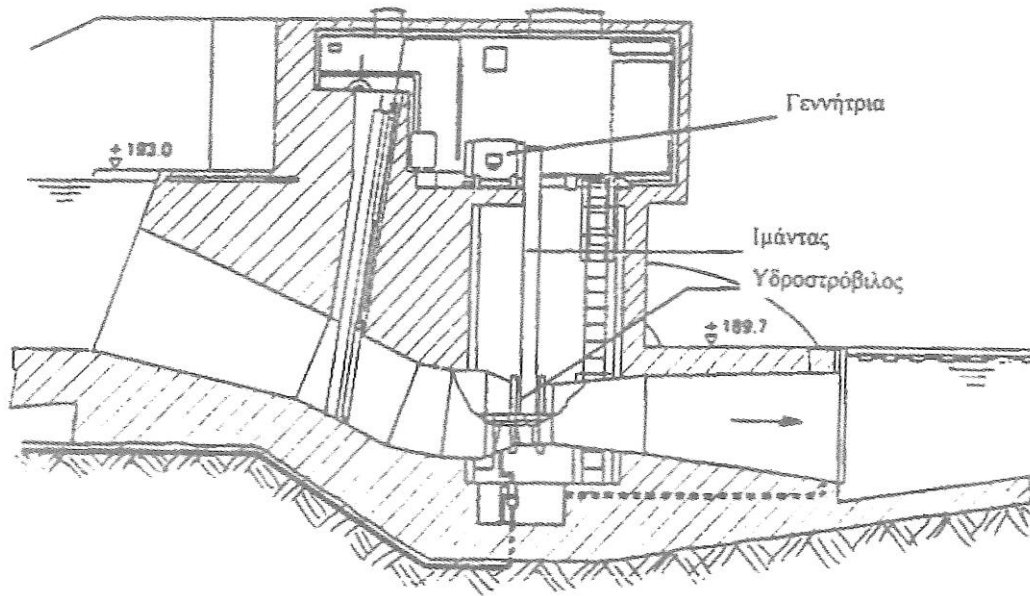


Σχήμα 3.29 Ισομετρικός ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής με γωνιακή μετάδοση κατασκευής Sulzer [Ε3, Σχήμα 7.29]



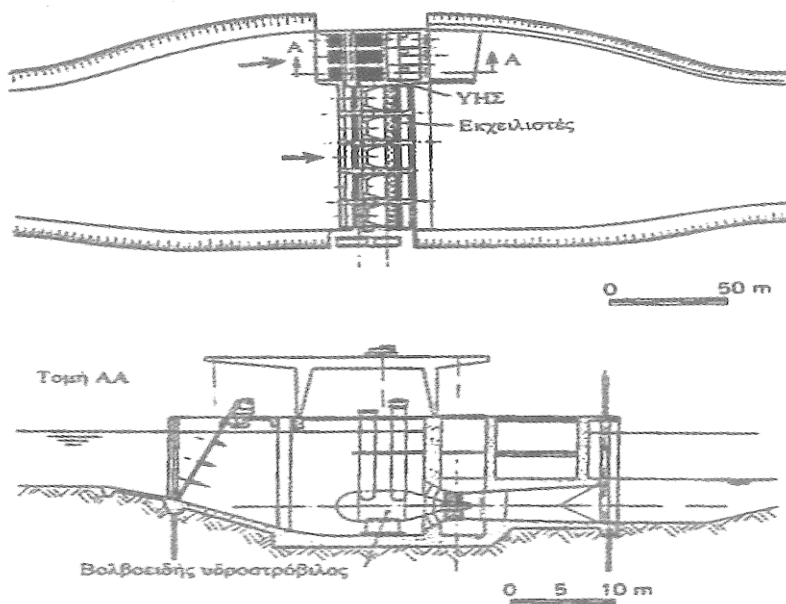
Σχήμα 3.30 Τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο αξονικής ροής με γωνιακή μετάδοση ονομαστική ισχύος 472 kW, $H = 4,15 \text{ mΣΥ}$ και $Q = 13,5 \text{ m}^3/\text{s}$, κατασκευής Koessler. [Ε3, Σχήμα 7.29]

Στο σχήμα 3.31 δίνεται τομή ΥΗΣ με υδροστρόβιλο δακτυλίου στον οποίο η σύνδεση με τη γεννήτρια γίνεται μέσω ιμάντα, κάτι που έχει εφαρμογή σε μικρές τιμές ισχύος. Με τη διάταξη αυτή, η γεννήτρια και ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός τοποθετούνται σε υψηλότερη στάθμη από την ανάπτυξη στάθμη του νερού, έτσι ώστε να αποφεύγονται αστοχίες.



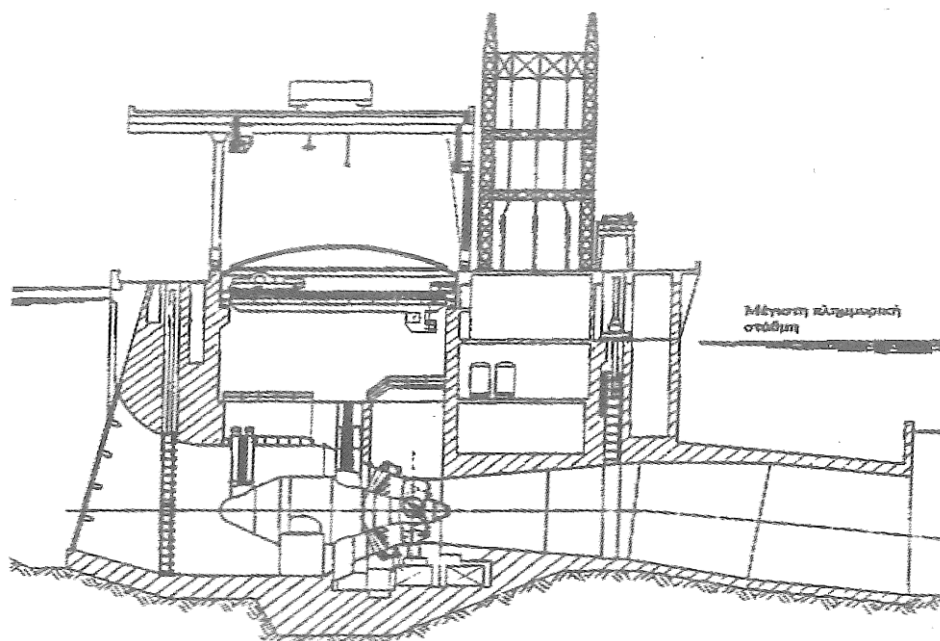
Σχήμα 3.31 Τομή ΥΗΣ με υδροστροβίλο δακτυλίου και μετάδοση με ιμάντα.
[Ε3, Σχήμα 7.32]

Στο σχήμα 3.32 (πάνω) δίνεται η κάτοψη ΥΗΕ ροής με τρεις βολβοειδείς υδροστροβίλους και διαμορφώνεται στην αριστερή πλευρά του εκχειλιστού που φέρει στην στέψη του περιστρεφόμενα τοξωτά θυροφράγματα. Στο σχήμα 3.32 (κάτω) δίνεται τομή του ΥΗΣ που διακρίνονται τα θυροφράγματα εισόδου και απαγωγής, η εσχάρα καθώς και η υπαίθρια γερανογέφυρα που εξυπηρετεί και τις τρεις μονάδες.



Σχήμα 3.32 (Πάνω) Κάτοψη ΥΗΕ ροής με τρεις βολβοειδείς υδροστροβίλους
(Κάτω) Τομή του ΥΗΣ με βολβοειδή υδροστροβίλο. [Ε3, Σχήμα 7.34]

Στο σχήμα του 3.33 δίνεται τομή ΥΗΣ εξοπλισμένο με κλασικό υδροστρόβιλο βολβοειδούς τύπου. Φαίνεται η εσχάρα εισόδου, τα θυροφράγματα στην είσοδο και απαγωγή, ο υδροστρόβιλος με την στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων σε κωνική διάταξη, η γερανογέφυρα του ΥΗΣ.



Σχήμα 3.33 Τομή ΥΗΣ εξοπλισμένου με κλασικό βολβοειδή υδροστρόβιλο [Ε3, Σχήμα 7.35]

3.10 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά η αρχή αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας και η περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού. Επιπλέον, αναλύθηκε η διαδικασία επιλογής της βέλτιστης θέσης για την κατασκευή μικρού υδροηλεκτρικού έργου. Γενικά φαίνεται πως δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες για την κατασκευή των υδροηλεκτρικών σταθμών, γιατί η διαμόρφωσή τους εξαρτάται από παράγοντες οι οποίοι δεν είναι μονοδιάστατοι για να δώσουν ένα μοναδικό αποτέλεσμα, αλλά και αυτοί επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους και μπορούν να δώσουν πολλά διαφορετικά αποτελέσματα. Τέτοιοι παράγοντες που συμβάλλουν στη μελέτη της κατασκευής του υδροηλεκτρικού σταθμού είναι ο τύπος και το μέγεθος των υδροστροβίλων και των γεννητριών, αλλά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του χώρου που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του.

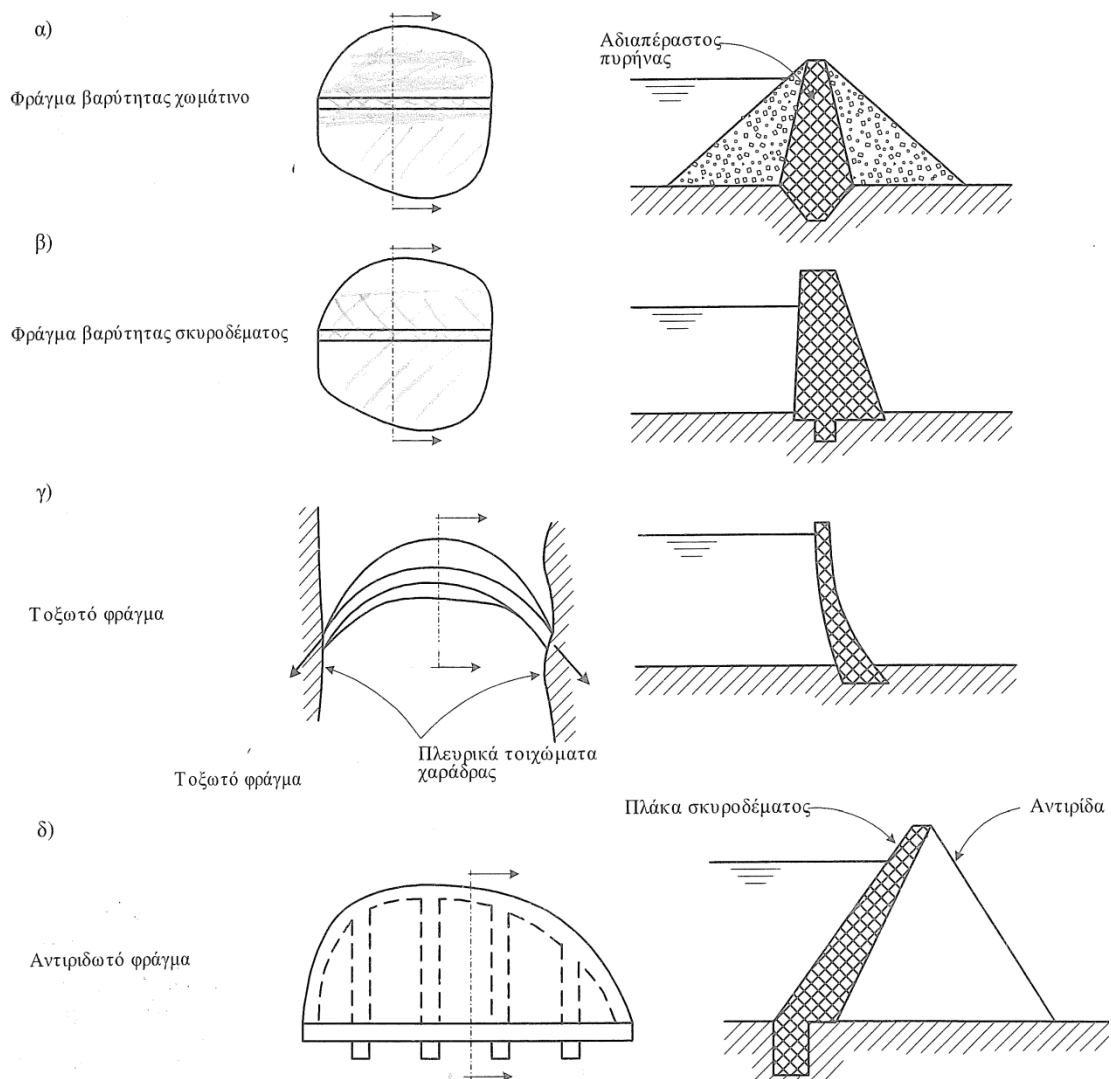
4.1 Φράγματα

4.1.1 Τύποι φραγμάτων

Φράγμα ονομάζεται το τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού υδατορεύματος με σκοπό την αποθήκευση μίας ποσότητας νερού για να καλυφθούν διάφορες ανάγκες, όπως είναι η ύδρευση, η άρδευση ή ακόμα και η ενεργειακή αξιοποίησή του σε ένα υδροηλεκτρικό έργο. Επειδή η στάθμη του νερού δε μπορεί να ξεπερνά τη στέψη του φράγματος, κάθε φράγμα συνοδεύεται και από έναν υπερχειλιστή, μέσα από τον οποίο η πλεονάζουσα παροχή θα μπορεί να υπερχειλίζει. Επιπλέον, για την αποθήκευση του νερού που αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται ο ταμιευτήρας στον οποίο διαμορφώνεται η υδροληψία, δηλαδή το έργο από το οποίο το αποθηκευμένο νερό μεταφέρεται με αγωγό προς την προβλεπόμενη κατανάλωση.

Η κατασκευή του φράγματος και του ταμιευτήρα επιβαρύνει αρκετά το κόστος ενός υδροηλεκτρικού έργου και ταυτόχρονα θεωρείται μία σημαντική περιβαλλοντική παρέμβαση. Για τους λόγους αυτούς, στα μικρά υδροηλεκτρικά, συνήθως αποφεύγονται, αφού αυτά δε χρησιμοποιούνται για κάλυψη αιχμών. Έτσι, όταν κατασκευάζονται φράγματα στα μικρά έργα, εξυπηρετούν κυρίως τις ανάγκες των καλών συνθηκών για την υδροληψία και όχι για αποθήκευση του νερού. Συγκεκριμένα, η είσοδος του νερού θα πρέπει να γίνεται πιο ψηλά από τον πυθμένα, έτσι ώστε να αποφεύγεται η εισχώρηση φερτών υλικών και αρκετά πιο χαμηλά από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, για την αποφυγή στροβιλισμών και την εισαγωγή αέρα στον αγωγό προσαγωγής.

Τα φράγματα διακρίνονται ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα και με τον τρόπο με τον οποίο παραλαμβάνουν τις ροπές και δυνάμεις που ασκεί το νερό σε αυτά (φράγματα βαρύτητας ή τοξωτά). Στα φράγματα βαρύτητας το ίδιο βάρος του φράγματος εξασφαλίζει την παραλαβή των δυνάμεων ανατροπής και ολίσθησης που εξασκεί σε αυτά το νερό. Σε αντίθεση, το τοξωτό έχει τη μορφή κελύφους, κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτού του είδους τα φράγματα μεταφέρονται στα πλευρικά αντερείσματα, τα οποία θα πρέπει να έχουν την κατάλληλη αντοχή για να τις δεχτούν. Τα φράγματα από γαιώδη υλικά (γαιοφράγματα ή χωμάτινα φράγματα) και τα λιθόρριπτα κατατάσσονται στα φράγματα βαρύτητας, όπως και τα αντηριδωτά φράγματα που αποτελούνται από επίπεδες ή τοξωτές πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος.

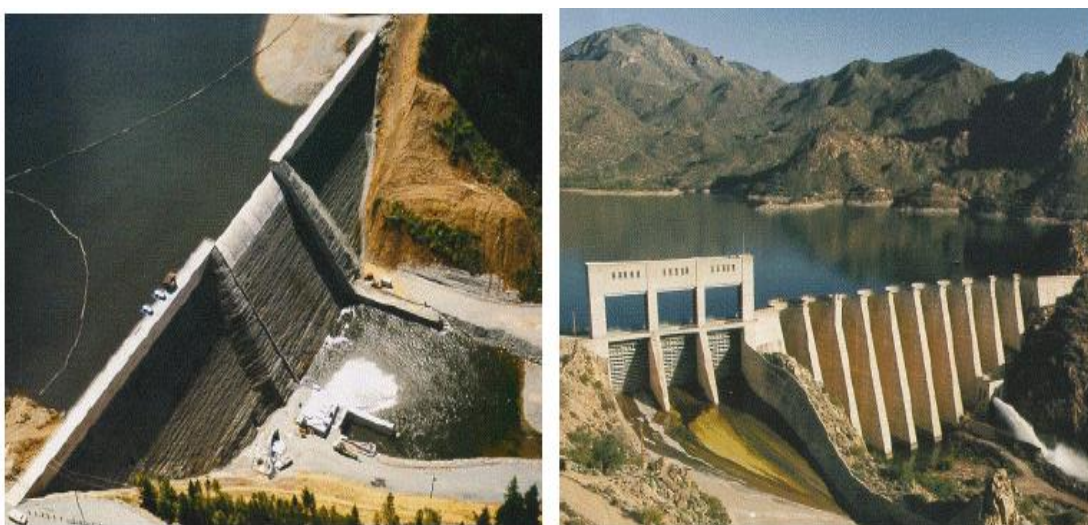


Σχήμα 4.1 α) Χωμάτινο φράγμα βαρύτητας, β) φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα, γ) τοξωτό φράγμα, δ) αντηριδωτό φράγμα. [Ε3, Σχήμα 4.1]

Η επιλογή για τον κατάλληλο τύπο φράγματος εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το ύψος και το άνοιγμα του φράγματος, το έδαφος στο οποίο θα θεμελιωθεί, η διαθεσιμότητα του εργατικού δυναμικού που θα συμβάλει στην κατασκευή του, η διαθεσιμότητα των υλικών κατασκευής, κλπ. Είναι σημαντικό στα φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα να πραγματοποιείται θεμελίωση του σε στιβαρό βράχο. Σε κάθε περίπτωση για τη σχεδίαση ενός φράγματος θα πρέπει να προβλέπεται η δυνατότητα υπερχειλίσης της πλημμυρικής παροχής με το σχεδιασμό υπερχειλιστή για την παροχέτευση της, ώστε να μην κινδυνεύσει το φράγμα ή ο υδροηλεκτρικός σταθμός.

Για τις περιπτώσεις των μικρών υδροηλεκτρικών, όπου η χρήση του ταμιευτήρα είναι πιο σπάνια, η λύση που εξετάζεται πρώτα είναι αυτή του φράγματος υπερχειλίσης. Σε τέτοιου είδους έργα προβλέπονται θυροφράγματα στη στέψη

του φράγματος, έτσι ώστε κατά τις πλημμυρικές περιόδους να ανοίγουν και να επιτρέπουν τη διοχέτευση της παροχής χωρίς την ανύψωση της ανάντη στάθμης. Τα φράγμα από χώμα είναι σαφώς πιο οικονομικά από τα φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα. Για την κατασκευή ενός χωμάτινου φράγματος θα πρέπει να υπάρχει αρχικά η πρώτη ύλη στις επαρκείς ποσότητες, καθώς και να υπάρχει διαθεσιμότητα του εξοπλισμού εκσκαφής και μεταφοράς. Σε τέτοιες κατασκευές ο υπερχειλιστής, επειδή δεν μπορεί να κατασκευαστεί από κάποιο υλικό πέραν του σκυροδέματος, αναγκαστικά κατασκευάζεται ως μία ξεχωριστή κατασκευή που ενσωματώνεται στο συνολικό έργο. Έτσι, αν το φράγμα είναι μικρό, επιλέγεται να κατασκευάζεται από σκυρόδεμα.



Σχήμα 4.2 Φράγμα βαρύτητας και φράγμα με αντηρίδες [Ξ1, Σχήμα 5.1]

4.1.2 Φράγματα βαρύτητας

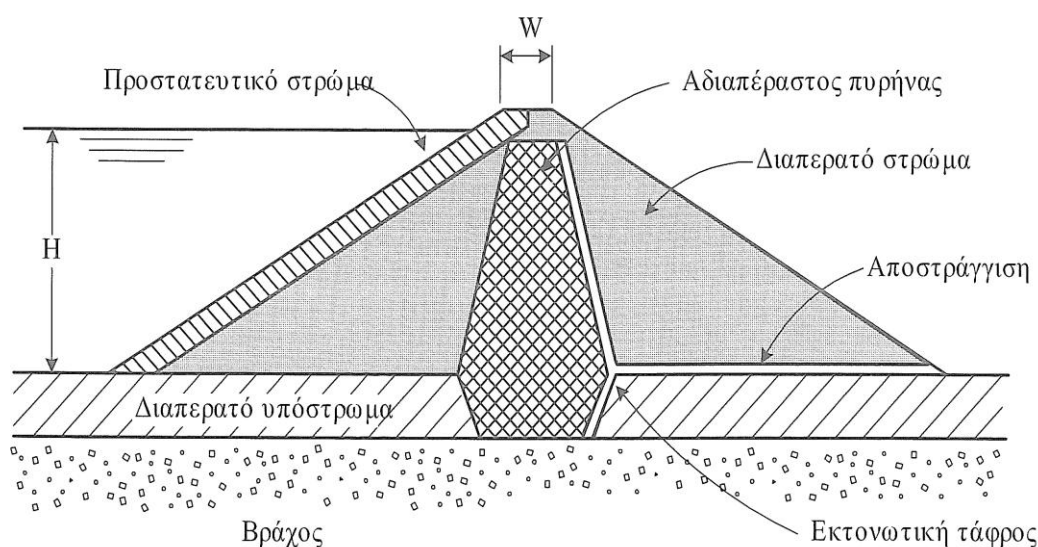
α) Χωμάτινα φράγματα

Τα χωμάτινα φράγματα αποτελούν τα πρώτα φράγματα που κατασκευάστηκαν εξαιτίας της απλής τεχνολογίας της κατασκευής τους. Σήμερα τα χωμάτινα φράγματα αποτελούν την πλειονότητα των φραγμάτων λόγω της δυνατότητας κατασκευής τους σε οποιοδήποτε συνθήκες θεμελίωσης και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μεγάλης ποικιλίας πρώτων υλών.

Η κλίση των πλευρικών επιχωματώσεων πρέπει να εξασφαλίζει την ευστάθειά τους κατά της διάρκειας της λειτουργίας του, αλλά και κατά τη διάρκεια κατασκευής του. Εξαρτάται από το είδος του υλικού που είναι συνήθως θραυσμένη πέτρα με μέγεθος που σταδιακά μεγαλώνει από την εσωτερική ζώνη προς τα εξωτερικά τοιχώματα.

Η ανάντη πλευρική επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό, έχει ανάγκη μεγαλύτερης προστασίας εξαιτίας των κυματισμών της ελεύθερης επιφάνειας,

αλλά και της μεταβολής της στάθμης του νερού. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση ενός προστατευτικού στρώματος, το οποίο αποτελείται από λίθους μεγάλου μεγέθους και βάρους και κατάλληλη διαβάθμιση μεγέθους από την εξωτερική επιφάνεια προς την εσωτερική. Το πάχος του προστατευτικού στρώματος είναι της τάξεως του 1,5 έως 2 φορές μεγαλύτερο του μέσου λίθου.



Σχήμα 4.3 Τυπική διατομή χωμάτινου φράγματος [Ε3, Σχήμα 4.2]

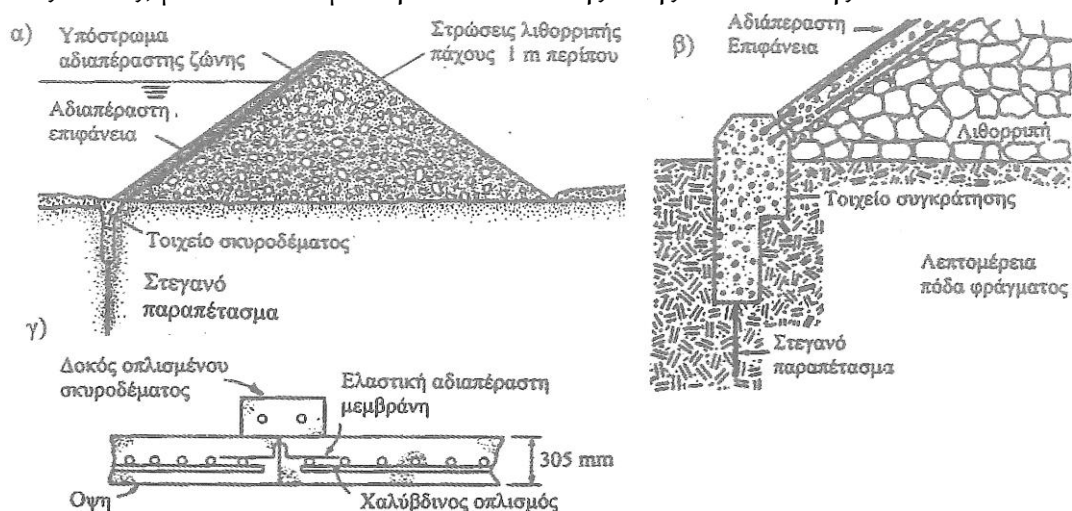
Στα χωμάτινα φράγματα δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση οποιοδήποτε αγωγού, επειδή αγωγός δεν μπορεί να ακολουθήσει τις μικρές μετακινήσεις των υλικών της επιχωμάτωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών μέσω των οποίων θα περάσει το νερό και στη συνέχεια θα παρασύρει κόκκους της επιχωμάτωσης με τελικό αποτέλεσμα την αστοχία της κατασκευής. Σε περίπτωση που η διέλευση του αγωγού είναι αναπόφευκτη, δημιουργείται μόνο μέσα από το έδαφος της θεμελίωσης, προβλέποντας εύκαμπτους συνδέσμους που θα επιτρέπουν την παραλαβή των μικρών παραμορφώσεων.

β) Φράγματα λιθορριπής

Το φράγμα λιθορριπής κατασκευάζεται ως ένα ανάχωμα με λίθους διαφόρων μεγεθών που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της ανάντη αδιαπέραστης ζώνης. Στην ίδια κατηγορία περιέχονται και τα φράγματα με κεντρικό χωμάτινο αδιαπέραστο πυρήνα, με τη διαφορά ότι η κυρία μάζα της επιχωμάτωσης αποτελείται από λίθους. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις πρέπει να προβλέπεται ζώνη φίλτρου και αποστράγγισης, ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση του πυρήνα.

Οι λίθοι που αποτελούν την κύρια μάζα του φράγματος πρέπει να έχουν γωνίες, δηλαδή να έχουν ακανόνιστο σχήμα και να προέρχονται από λατομεία. Στην

ιδανικότερη περίπτωση οι λίθοι πρέπει να είναι ομοιόμορφοι και να μην περιέχουν χαλίκια ή λεπτότερους κόκκους, διότι αυτά τα υλικά θα υποχωρήσουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την αστάθεια της όλης κατασκευής.



Σχήμα 4.4 α) Τυπική διατομή φράγματος λιθοριπής, β) λεπτομέρεια αγκύρωσης του πόδα του φράγματος, γ) διαμόρφωση αδιαπέραστων αρμών μεταξύ των πλακών σκυροδέματος. [Ε3, Σχήμα 4.4]

Ως επί το πλείστον, οι λίθοι τοποθετούνται ανά στρώσεις, καθεμία με πάχος της τάξεως του ενός μέτρου. Στη συνέχεια, κάθε στρώση συμπιέζεται με δονητή πριν την εφαρμογή της επόμενης. Στην περίπτωση αυτή, δεν είναι ανάγκη το υλικό να είναι ομοιόμορφου μεγέθους, αφού η συμπίεση αποτρέπει την τάση διαχωρισμού των λίθων διαφορετικού μεγέθους.

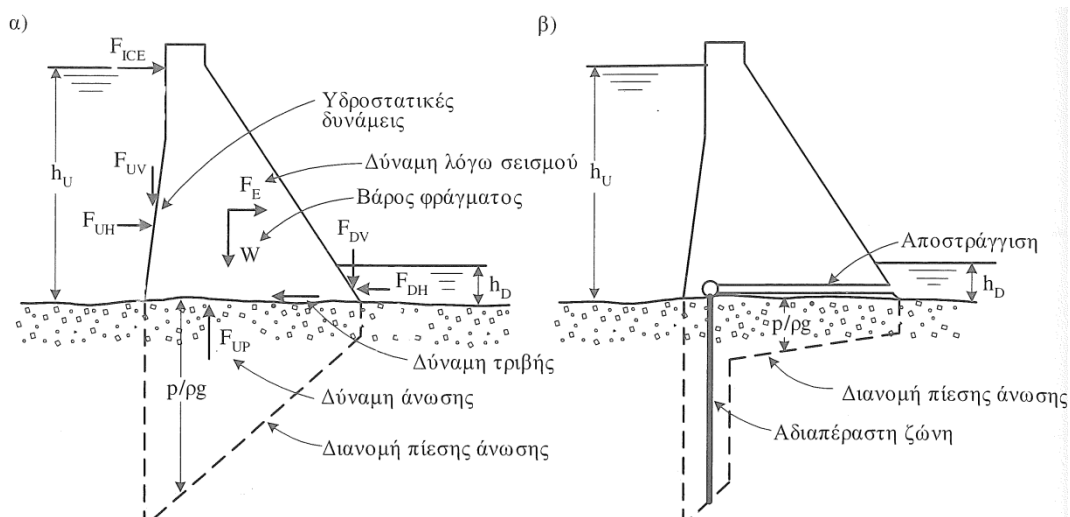
Στην πάνω βάση του φράγματος πρέπει να κατασκευάζεται αγκύρωση της αδιαπέραστης της ζώνης, η οποία κατασκευάζεται, συνήθως, από πλάκες ενισχυμένου σκυροδέματος που συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφους αρμούς. Το πλάτος των πλακών είναι της τάξεως των 10 m, ενώ το πάχος τους της τάξης των 30 cm στο πάνω μέρος του φράγματος και αυξάνεται προς τον πυθμένα. Οι αρμοί μεταξύ των πλακών κατασκευάζονται από λάστιχο (καουτσούκ) ή πλαστικό, έτσι ώστε να επιτρέπουν μικρές μετατοπίσεις λόγω κατακαθίσεων, χωρίς απώλεια της στεγανότητας. Κατά μήκος κάθε αρμού και στο εσωτερικό του φράγματος κατασκευάζεται δοκός από ενισχυμένο σκυρόδεμα.

γ) Φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα

Το φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα σχεδιάζεται έτσι ώστε το ίδιο το βάρος του να είναι επαρκές για να αντιστέκεται στις δυνάμεις και τη ροπή ανατροπής που ασκεί το νερό. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις είναι κυρίως υδροστατικές στην ανάντη και ενδεχόμενα στην κατάντη πλευρά, η δυναμική άνωση, το ίδιο βάρος του φράγματος και οι δυνάμεις τριβής με το έδαφος. Οι υδροστατικές δυνάμεις

οφείλονται στην υδροστατική πίεση του νερού και αναλύονται σε μία οριζόντια και μία κατακόρυφη συνιστώσα. Η οριζόντια προκύπτει από την ολοκλήρωση των δυνάμεων πίεσης στην κατακόρυφη προβολή κάθε στοιχειώδους επιφάνειας, ενώ αντίστοιχα η κατακόρυφη συνιστώσα από την ολοκλήρωση των δυνάμεων πίεσης στην οριζόντια προβολή κάθε στοιχειώδους επιφάνειας.

Εξαιτίας της διαφοράς της υδροστατικής πίεσης μεταξύ της ανάντη και της κατάντη πλευράς του φράγματος αναπτύσσεται μία ροή μέσω των πόρων του σκυροδέματος και του εδάφους, με αποτέλεσμα η στατική πίεση στη βάση του φράγματος να μεταβάλλεται σταδιακά. Σε μία πρώτη προσέγγιση η μεταβολή αυτή θεωρείται γραμμική, έτσι η δύναμη της άνωσης που αντιστοιχεί να είναι κατακόρυφη και να εφαρμόζεται σε απόσταση ίση προς το ένα τρίτο του πλάτους της βάσης από το πάνω άκρο. Για να μειωθεί η δύναμη της άνωσης που τείνει να ανατρέψει την κατασκευή, διαμορφώνεται αδιαπέραστη ζώνη στη θεμελίωση του φράγματος, κοντά στο πάνω άκρο.

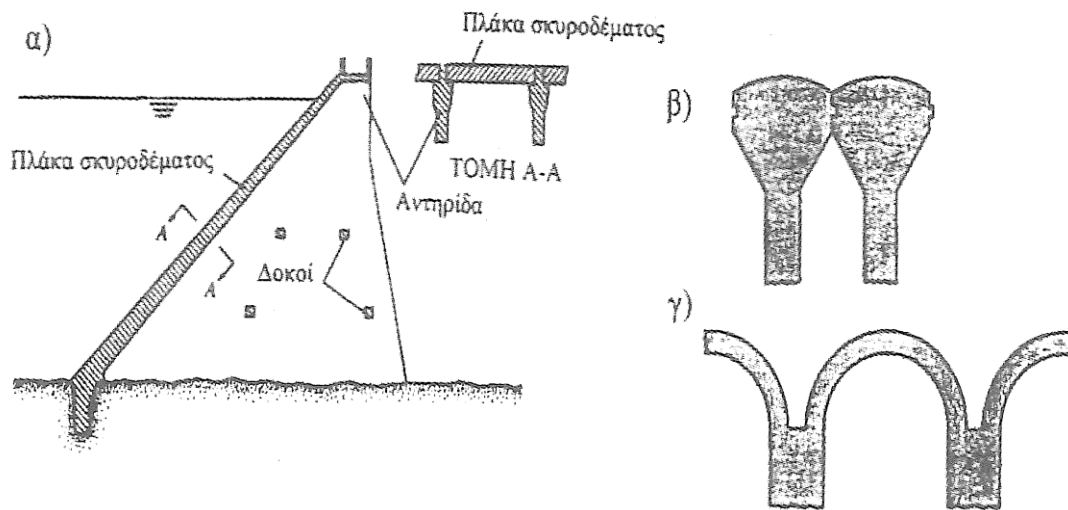


Σχήμα 4.5 α) Τυπική τομή φράγματος βαρύτητας από σκυρόδεμα και αναπτυσσόμενες δυνάμεις. β) μείωση της άνωσης με τη διαμόρφωση αδιαπέραστης ζώνης στη θεμελίωση του φράγματος. [Ε3, Σχήμα 4.5]

δ) Αντηριδωτά φράγματα

Τα αντηριδωτά φράγματα είναι κούφια φράγματα βαρύτητας που αποτελούνται από πλάκες, από σκυρόδεμα, κεκλιμένες προς την οριζόντιο, οι οποίες στηρίζονται στα δύο άκρα τους σε κατακόρυφες αντηρίδες τοποθετημένες ανά 15 έως 35 m, οι οποίες με τη σειρά τους μεταφέρουν τις δυνάμεις στο έδαφος. Είναι δυνατό να διαμορφώνονται από την κυκλική κεφαλή των αντηρίδων, ή να έχουν τη μορφή τοξωτού κελύφους. Αυτή η διαμόρφωση εξασφαλίζει την καλύτερη διανομή τάσεων στην περίπτωση φράγματος μεγάλου ύψους. Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτών των φραγμάτων είναι ότι απαιτούν περίπου 40% λιγότερο σκυρόδεμα από ένα αντίστοιχο συμπαγές φράγμα σκυροδέματος, ενώ το μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτούν αρκετά υψηλότερο κόστος εργασίας

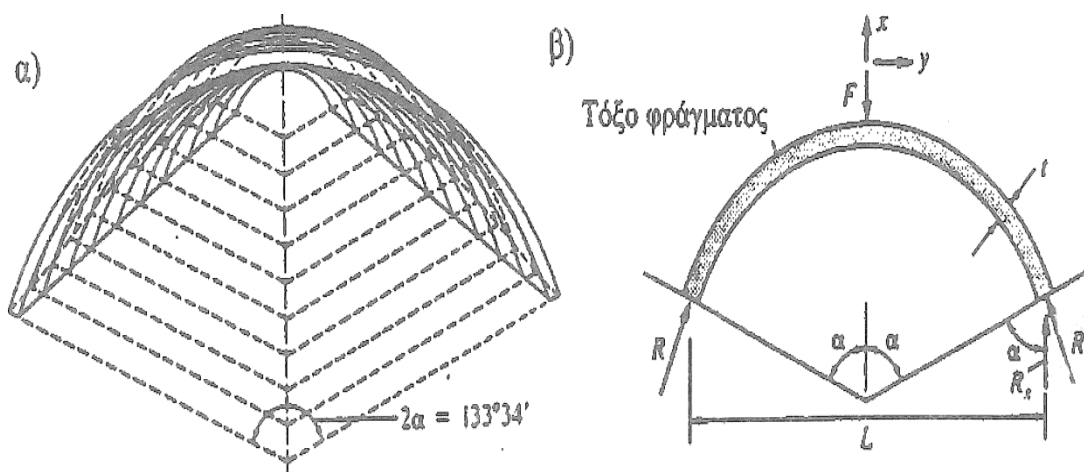
και οι αρμοί μεταξύ των πλακών και των αντηρίδων είναι ένα ευπαθές σημείο, κυρίως από την επίδραση ακραίων θερμοκρασιακών μεταβολών.



Σχήμα 4.6 α)Τυπική διατομή αντηριδωτού φράγματος, β)κυκλική διαμόρφωση της κεφαλής, γ)διαδοχικά τοξωτά κελύφη. [Ε3, Σχήμα 4.7]

4.1.3 Τοξωτά φράγματα

Τα τοξωτά φράγματα κατασκευάζονται κυρίως σε χαράδρες στενού πλάτους, όπου τα πλευρικά τοιχώματα αποτελούνται από στιβαρό βράχο, έτσι ώστε να μεταφέρονται με ασφάλεια σε αυτά οι οριζόντιες δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται από το νερό στο φράγμα. Ένας πρακτικός κανόνας για την επιλογή του τοξωτού φράγματος είναι όταν ο λόγος του ανοίγματος του φράγματος στη στέψη προς το ύψος του είναι μικρότερος του 5.



Σχήμα 4.7 α)Τυπική κάτοψη τοξωτού φράγματος, β)ανάλυση τοξωτού φράγματος σε στοιχειώδη τόξα. [Ε3, Σχήμα 4.8]



Σχήμα 4.8 Τοξωτό φράγμα. [Ξ1, Σχήμα 5.2]

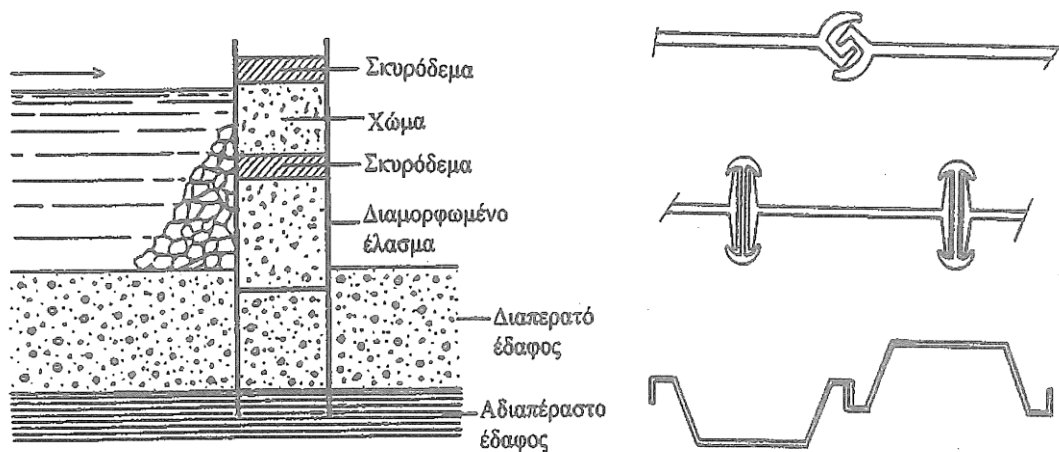
4.1.4 Λοιποί τύποι φραγμάτων

α) Λιθόκτιστα φράγματα

Τα λιθόκτιστα φράγματα απαιτούν πολλά εργατικά και πολύ καλής ποιότητας λίθους. Οι λίθοι στερεώνονται μεταξύ τους με τσιμεντοκονία. Αυτός ο τύπος του φράγματος συναντάται σε μικρότερα μεγέθους φράγματα και σε περιοχές με φτηνά εργατικά. Σχεδιάζονται και λειτουργούν, όπως τα φράγματα βαρύτητας σκυροδέματος με τη διαφορά ότι σε αυτά οι επιτρεπόμενες τιμές των τάσεων παρουσιάζουν κάποια αβεβαιότητα.

β) Φράγματα από χαλυβοέλασματα

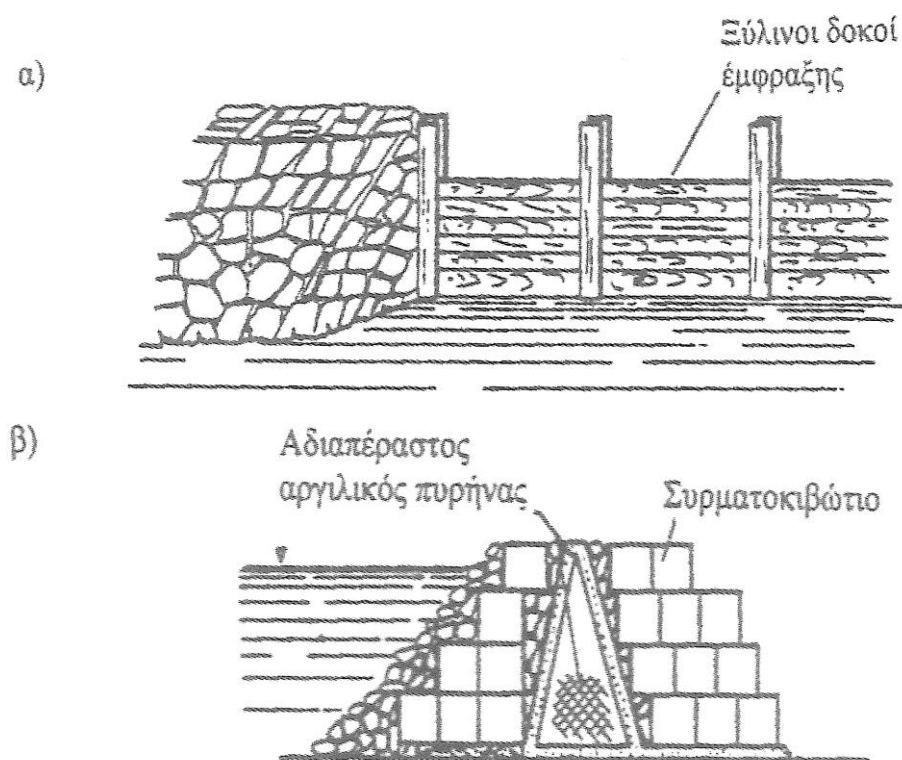
Στις περιπτώσεις εδάφους υψηλής διαπερατότητας και για ύψος έως και 3 μέτρα είναι δυνατή η διαμόρφωση στεγανού παραπετάσματος από χαλυβοέλασματα κατάλληλης διατομής σε μόνη ή διπλή σειρά. Σημειώνεται ότι για να βυθιστούν τα ελάσματα στο έδαφος, απαιτείται χρήση ειδικού μηχανήματος, όμως θα πρέπει να εξεταστεί το κόστος που επιβαρύνεται από το γεγονός ότι απαιτούνται υλικά και ειδικός εξοπλισμός, των οποίων το κόστος μεταφοράς είναι ενδεχόμενα αρκετά υψηλός, ειδικά για τις απομακρυσμένες περιοχές.



Σχήμα 4.9 Φράγμα από διαμορφωμένα χαλυβοελάσματα. [Ε3, Σχήμα 4.9]

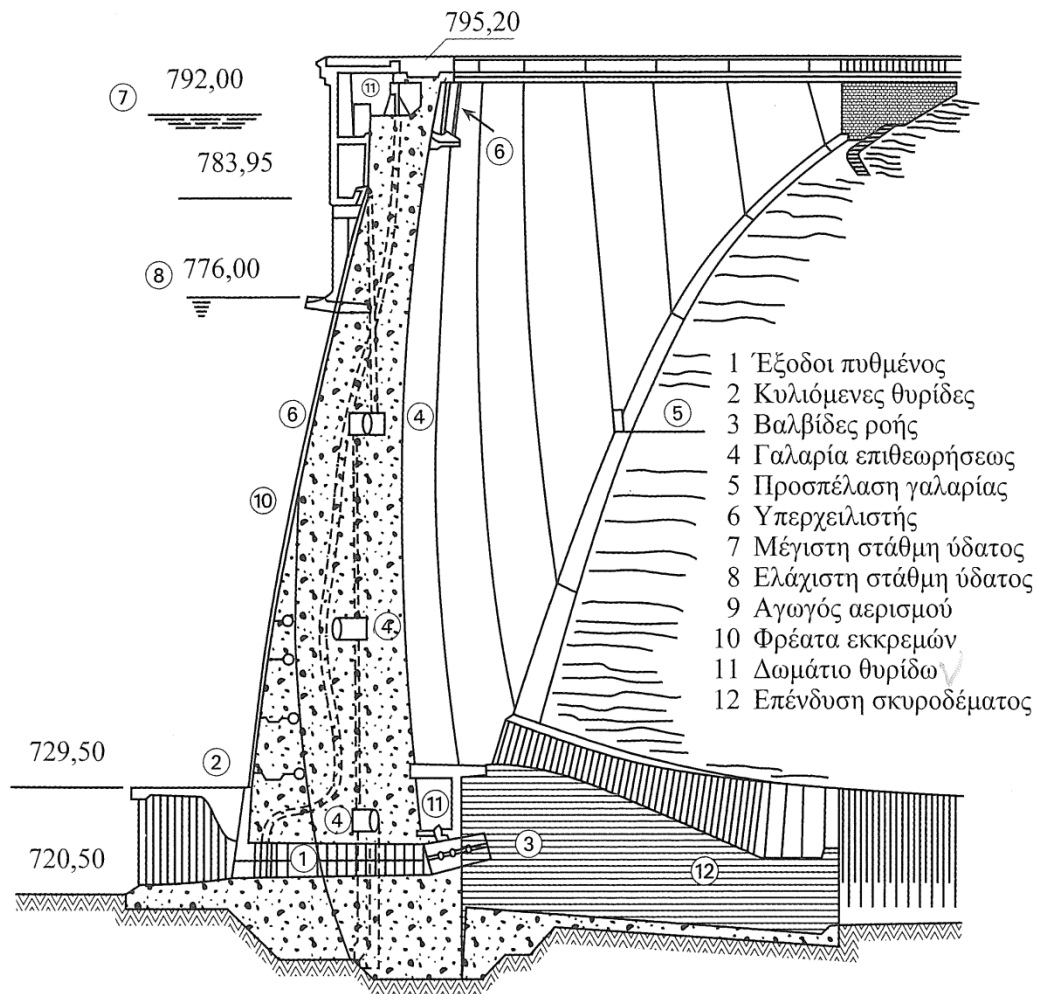
γ) Άλλοι τύποι πολύ μικρών φραγμάτων

Είναι δυνατή η κατασκευή μικρού φράγματος βαρύτητας με αργιλικό πυρήνα και ορθογώνια πλέγματα από ανοξειδωτό ή γαλβανισμένο συρματοπλέγμα, γεμισμένα με χαλίκια ή ακόμα και οριζόντιες ξύλινες δοκούς έμφραξης που κουμπώνουν σε κατακόρυφες υποδοχές.



Σχήμα 4.10 Φράγμα από οριζόντιες δοκούς έμφραξης. β) φράγμα από εγκιβωτισμένα χαλίκια [Ε3, Σχήμα 4.10]

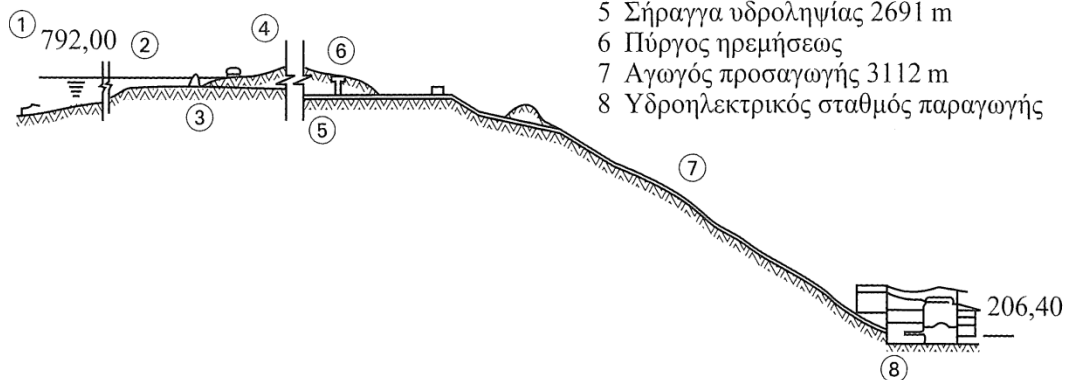
Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά φράγματα από ορισμένα υδροηλεκτρικά έργα.



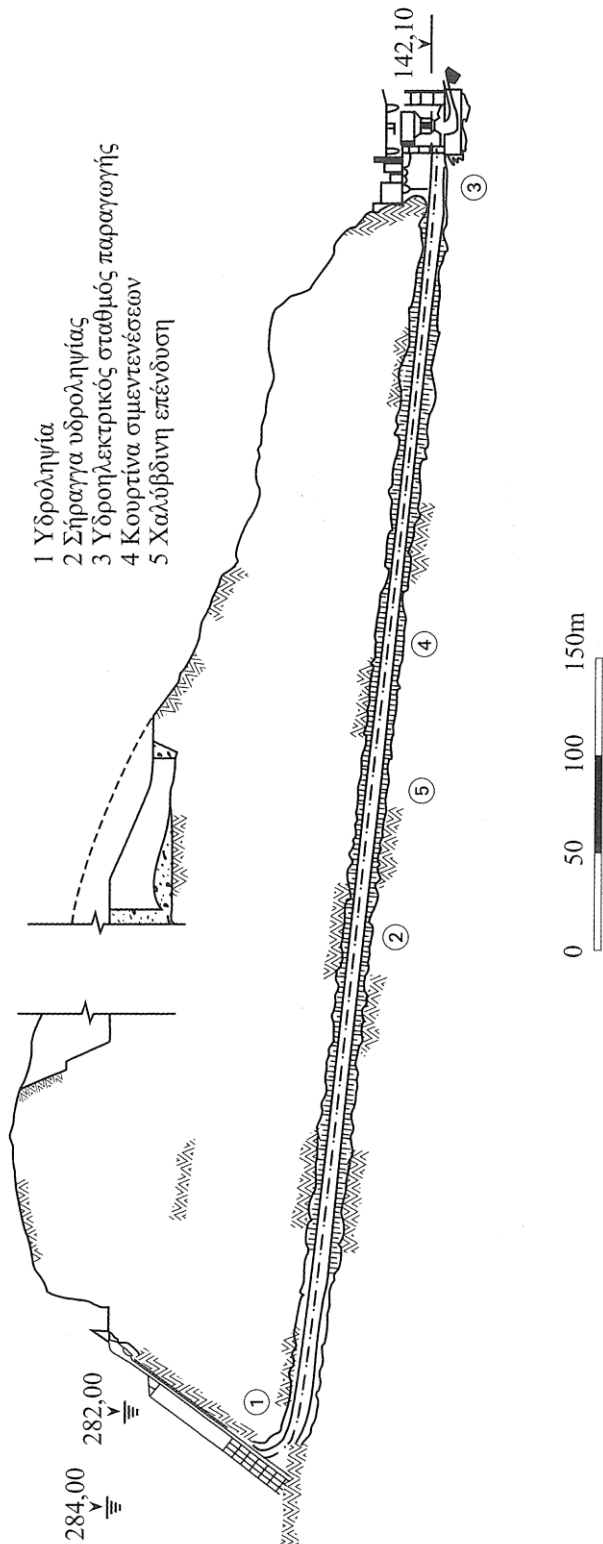
0 5 10 15 20m

ΤΥΠΟΣ: τοξωτό φράγμα
ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΨΟΣ: 83 m
ΜΗΚΟΣ ΣΤΕΨΕΩΣ: 220 m
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΗΤΑ: $400 \times 10^6 \text{ m}^3$
ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ: 130 MW

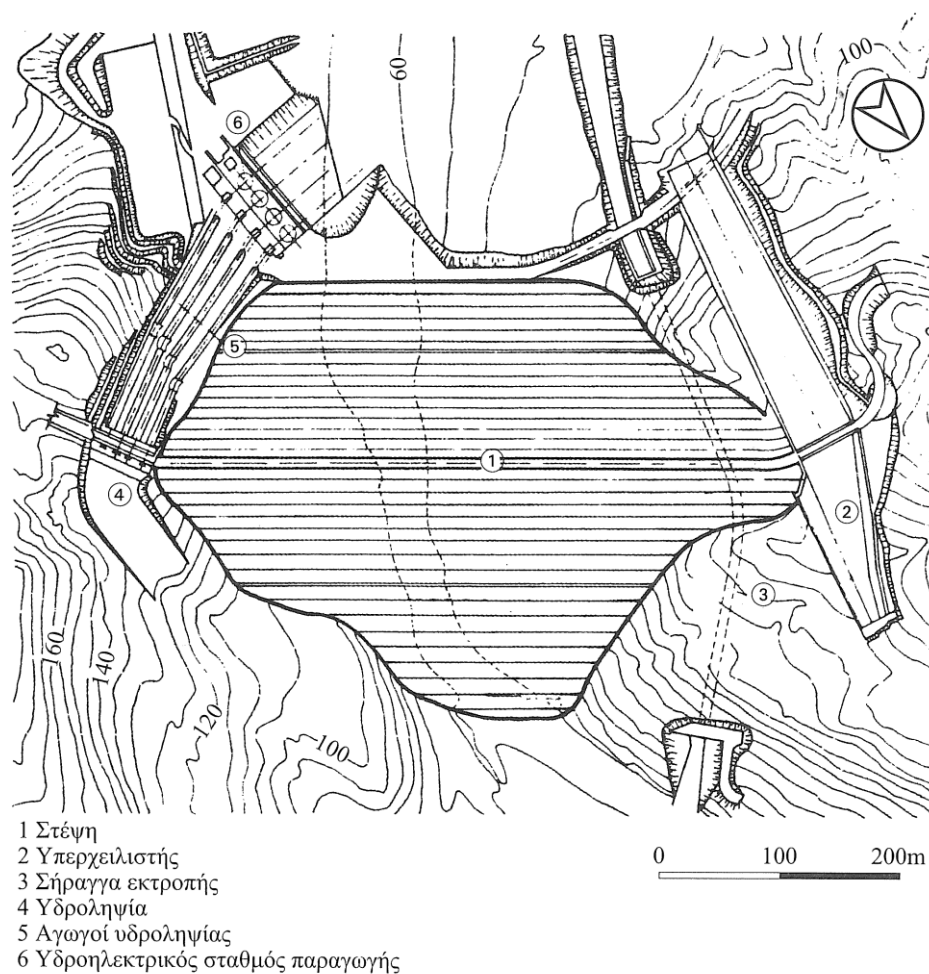
- 1 Φράγμα
- 2 Λίμνη
- 3 Υδροληψία
- 4 Δωμάτιο θυρίδων
- 5 Σήραγγα υδροληψίας 2691 m
- 6 Πύργος ηρεμιάσεως
- 7 Αγωγός προσαγωγής 3112 m
- 8 Υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής



Σχήμα 4.11 Τοξωτό φράγμα - υδροηλεκτρικό Ταυρωπού [E7, Σχήμα 4.20]



Σχήμα 4.12 Μηκοτομή αγωγού υδροληψίας - Υδροηλεκτρικό Κρεμαστών (Αχελώου) – Διαμήκης τομή σήραγγας προσαγωγής [E7, Σχήμα 4.22]



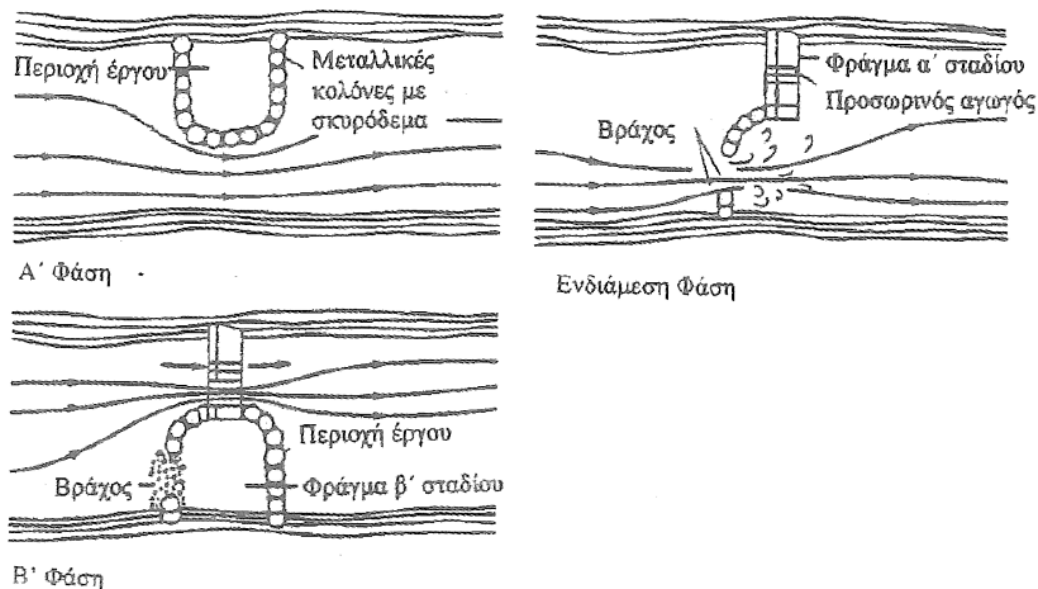
Σχήμα 4.13 Χωμάτινο φράγμα - υδροηλεκτρικό έργο Καστρακίου (Αχελώου) [Ε7, Σχήμα 4.23]

4.1.5 Εκτροπή υδατορεύματος για την κατασκευή φράγματος

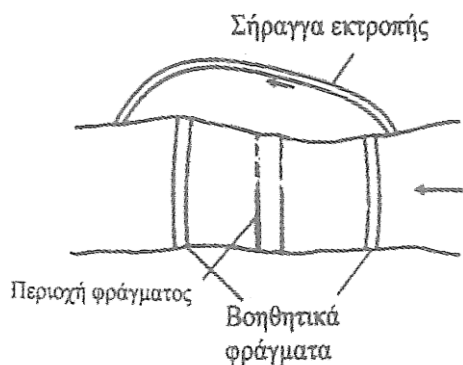
Κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός φράγματος στην κοίτη ενός υδατορεύματος θα πρέπει η κοίτη του να εκτραπεί προσωρινά μέχρι την ολοκλήρωση του έργου. Ο τρόπος και η διαδικασία της εκτροπής εξαρτάται από τη φυσική διαμόρφωση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος. Για την κατασκευή φράγματος βαρύτητας σκυροδέματος εφαρμόζεται πολύ συχνά εκτροπή κατά δύο φάσεις. Στην πρώτη, κατασκευάζεται ένα μικρό βοηθητικό φράγμα από πρόχειρα υλικά στο μισό περίπου πλάτος της κοίτης, το οποίο περιβάλλει τη θέση του κυρίου φράγματος, έτσι η ροή του υδατορεύματος διοχετεύεται προς την υπόλοιπη ελεύθερη κοίτη. Αφού πραγματοποιηθεί αφαίρεση του νερού με τη χρήση αντλιών, στο προστατευόμενο τμήμα, κατασκευάζεται αντίστοιχο τμήμα του κύριου φράγματος, όπου διαμορφώνεται η βάννα και το θυρόφραγμα εκκένωσης από

όπου θα διοχετεύει τη ροή κατά τη δεύτερη φάση. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης του αρχικού πρόχειρο φράγμα απομακρύνεται και κατασκευάζεται ένα άλλο στη θέση, γύρω από όπου θα κατασκευαστεί το υπόλοιπο μισό του κυρίου φράγματος. Μετά από την ολοκλήρωση του κυρίου φράγματος και την απομάκρυνση από την κοίτη όλων των υλικών και των πρόχειρων φραγμάτων είναι δυνατό το κλείσιμο του θυροφράγματος εκκένωσης, από ο από πάνω χώρος αρχίζει να συγκεντρώνει νερό και να ανεβαίνει σταδιακά η στάθμη του.

Στις περιπτώσεις που η κατασκευή του φράγματος πρόκειται να γίνει σε στενή χαράδρα που δεν υπάρχει αρκετός χώρος για την εφαρμογή της προηγούμενης τακτικής είναι δυνατή εκτροπή του υδατορεύματος μέσω σήραγγας εκτροπής. Ο χώρος όπου θα κατασκευαστεί το φράγμα και μέχρι την ολοκλήρωσή του θα προστατεύεται από δύο μικρά πρόχειρα φράγματα της πάνω και της κάτω της περιοχής του έργου.



Σχήμα 4.14 Εκτροπή του υδατορεύματος με χρήση πρόχειρων φραγμάτων [Ε3, Σχήμα 4.11]



Σχήμα 4.15 Εκτροπή του υδατορεύματος μέσω σήραγγας [Ε3, Σχήμα 4.12]



Σχήμα 4.16 Αστοχία μικρού φράγματος και πλημμύρα κατάντη. [Ξ1, Photo 5.3]

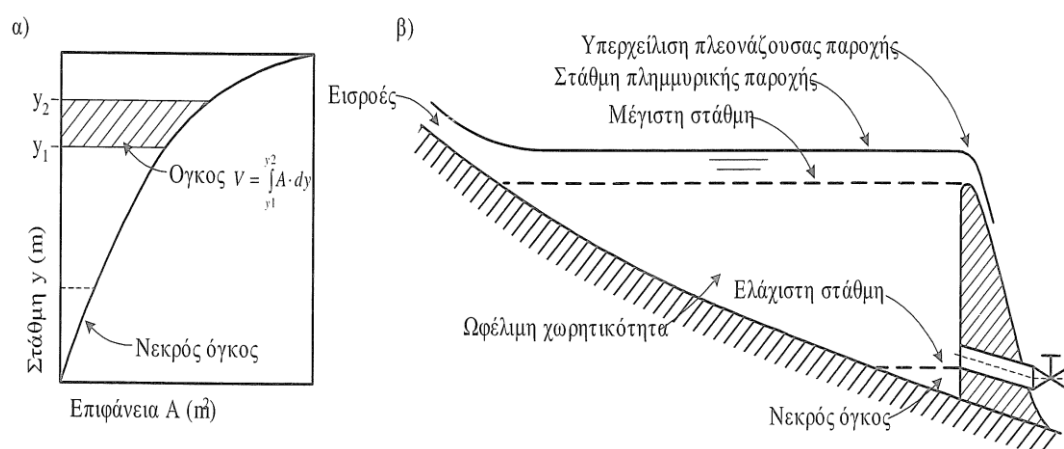
4.2 Ταμιευτήρες

4.2.1 Ταμιευτήρας

Ταμιευτήρας ονομάζεται μία δεξαμενή νερού η χωρητικότητα της οποίας είναι το βασικό στοιχείο για την υδροηλεκτρική αξιοποίηση της φυσικής απορροής. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός ταμιευτήρα είναι η καμπύλης της στάθμης – επιφάνειας και από την ολοκλήρωση της προκύπτει η καμπύλη στάθμης – χωρητικότητας. Οι δύο καμπύλες είναι πάντοτε αύξουσες. Η επιφάνεια στην οποία θα αντιστοιχεί ένας ταμιευτήρας προτιμότερο είναι να είναι μικρή, γιατί αντιστοιχεί σε επιφάνειες που θα πρέπει να απαλλοτριωθούν. Η στάθμη του εκχειλιστή του φράγματος καθορίζει τη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα και για κάθε έναν υπάρχει μία ελάχιστη στάθμη λειτουργίας που σχετίζεται με τις συνθήκες υδροληψίας και με την εισαγωγή φερτών υλικών ή αέρα στον αγωγό προσαγωγής. Ωφέλιμη χωρητικότητα ονομάζεται εκείνη που αντιστοιχεί ανάμεσα στην ελάχιστη και στη μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα και η ελάχιστη στάθμη λειτουργίας ονομάζεται νεκρός όγκος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου η κατασκευή ενός φράγματος και ο σχηματισμός ενός ταμιευτήρα συνδυάζεται με άλλες κοινωφελείς χρήσεις, όπως είναι η ύδρευση, η άρδευση, η τροφοδοσία βιομηχανικών μονάδων, οι ιχθυοκαλλιέργειες, κλπ. Επομένως, κατά τη φάση της μελέτης για την κατασκευή του φράγματος και του ταμιευτήρα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες αυτές οι ανταγωνιστικές και συμπληρωματικές χρήσεις του νερού με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος. Επιπλέον, η διήθηση νερού από τον πυθμένα, η κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους, η εξάτμιση του νερού, η ευστάθεια του εδάφους μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα, είναι ιδιαίτερης σημασίας, ειδικά για τους μεγάλους ταμιευτήρες, επειδή ενδέχεται να

συμβούν κατολισθήσεις με σχηματισμός κυματισμού, με αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης και την απόθεση φερτών υλικών.



Σχήμα 4.17 α) Ενδεικτική μορφή καμπύλης στάθμης – όγκου ταμιευτήρα
β) μέγιστη και ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα και ωφέλιμη χωρητικότητα
[Ε3, Σχήμα 4.13]

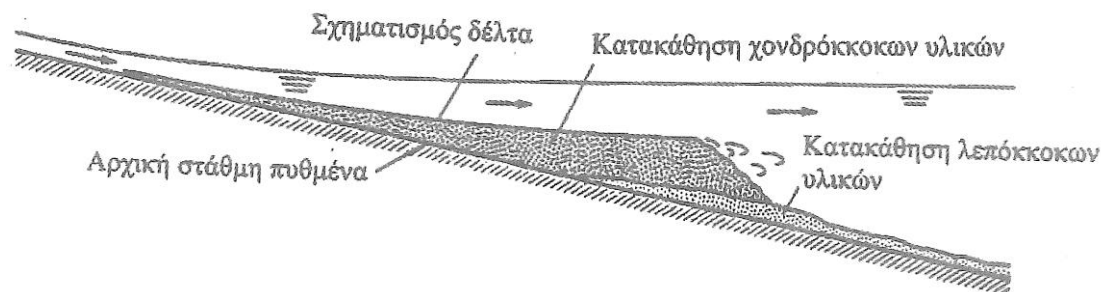
4.2.2 Απόθεση φερτών υλών

Σε κάθε επιφανειακή απορροή συμπαρασύρονται φερτά υλικά, όπως είναι η άμμος και τα χαλίκια, σαν αποτέλεσμα της διαβρωτικής δράσης και της ορμής του νερού. Όλα τα φερτά υλικά καταλήγουν στην εκβολή του ποταμού όπου σχηματίζεται το δέλτα του ποταμού. Σημειώνεται ότι σε κάθε διατομή ενός ποταμού που βρίσκεται σε ισορροπία η ποσότητα των φερτών υλικών έχει μηδενικό ισοζύγιο, δηλαδή δεν παρατηρείται αποψίλωση ή συσσώρευση. Έτσι, κατά την κατασκευή ενός φράγματος ή ενός εκχειλιστή για μία διατομή υδατορεύματος, είναι φυσικό επόμενο η ύπαρξη των φερτών υλικών, με αποτέλεσμα να καθιζάνουν στον πυθμένα του ταμιευτήρα.

Τα φερτά υλικά διακρίνονται σε αυτά που βρίσκονται στον αέρα κατά τη ροή και σε αυτά που συμπαρασύρονται και κυλούν στον πυθμένα της κοίτης. Τα χαλίκια, οι πέτρες και η άμμος χαρακτηρίζονται ως φορτίο του πυθμένα. Κατά τη διάρκεια της εκβολής ενός υδατορεύματος στον ταμιευτήρα, η ταχύτητα ροής μειώνεται γρήγορα και έτσι τα πιο βαριά υλικά κατακαθίζονται στον πυθμένα του ταμιευτήρα, σχηματίζοντας ένα δέλτα. Τα φερτά υλικά, τα οποία αιωρούνται στο νερό, κατακάθονται με πολύ πιο αργούς ρυθμούς και σε θέσεις κατάντη του δέλτα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.

Η γνώση του όγκου των φερτών υλικών είναι πολύ σημαντική, γιατί εκτός από τη μείωση του ωφελίμου όγκου που προκαλείται στον ταμιευτήρα, δημιουργείται, επιπλέον, η ανύψωση του πυθμένα του ταμιευτήρα που μπορεί να φτάσει και μέχρι τη στάθμη της υδροληψίας, κάτι που θα προκαλέσει τη διακοπή της

λειτουργίας των υδροστροβίλων, γιατί διαφορετικά το νερό θα συμπαρασύρει τα φερτά υλικά, με αποτέλεσμα την πρόκληση μηχανικών βλαβών στους υδροστροβίλους.



Σχήμα 4.18 Κατακρήση φερτών υλικών στον πυθμένα του ταμιευτήρα.

[Ε3, Σχήμα 4.14]

Για αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να προβλέπεται η δυνατότητα καθαρισμού του πυθμένα, είτε μέσω μηχανικών μέσων, δηλαδή εκσκαφών, είτε μέσω βάνας εκκένωσης πυθμένα, η οποία καθώς θα αδειάζει το νερό του ταμιευτήρα θα συμπαρασύρει και μέρος των φερτών υλικών. Για τους μικρούς ταμιευτήρες είναι δυνατή η διαμόρφωση ενός ανάντη προφράγματος από πρόχειρα υλικά, όπως μεγάλοι ογκόλιθοι, που θα προκαλεί την απόθεση των φερτών υλικών ανάντη του ταμιευτήρα.

Για τη μελέτη του φράγματος θα πρέπει να εκτιμηθεί και η ποσότητα των φερτών υλικών. Για τους θεωρητικούς υπολογισμούς η ανάλυση του φαινομένου απαιτεί την εισαγωγή παραμέτρων των οποίων οι τιμές δεν είναι δυνατό να εκτιμηθούν σε μία πραγματική περίπτωση και για αυτό τον λόγο η μόνη δυνατή εκτίμηση θα πρέπει να βασίζεται σε μετρήσεις στερεοπαροχής, τουλάχιστον μιας δεκαετίας, επειδή έτσι προκύπτει με ακρίβεια μία μέση ετήσια τιμή. Όμως, κάτι τέτοιο είναι αρκετά δύσκολο, γιατί μετρήσεις στερεοπαροχής για τόσα χρόνια δεν υπάρχουν, παρά μόνο για τα μεγάλα υδατορεύματα. Έτσι η εκτίμηση για μία συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με αναγωγή των μετρήσεων που θα έχουν υλοποιηθεί σε υδατόρευμα με παρόμοια χαρακτηριστικά.

4.3 Υπερχειλιστές

4.3.1 Γενικά

Υπερχειλιστής ονομάζεται η κατασκευή που παρεμβάλλεται στη ροή του νερού με ελεύθερη επιφάνεια με σκοπό να διατηρήσει τη στάθμη του υψηλότερα από αυτήν της στέψης του υπερχειλιστή. Η παροχή που διέρχεται διαμορφώνεται σε στάθμη υψηλότερη κατά ΔH από αυτήν τη στέψης του υπερχειλιστή, ώστε να τον

ξεπεράσει ως εμπόδιο. Οι υπερχειλιστές βάσει της λειτουργίας τους διακρίνονται σε δύο είδη:

- Υπερχειλιστές φραγμάτων: Σκοπό έχουν την αποφυγή της υπερχειλίσης του νερού από τη στέψη του φράγματος με τη διοχέτευση της μέγιστης πιθανής πλημμυρικής απορροής του υδατορεύματος. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα υπήρχε καταστροφή του φράγματος εξαιτίας της διάβρωσης της βάσης του.
- Υπερχειλιστές των μικρών υδροηλεκτρικών έργων: Σκοπό έχουν τη δημιουργία μίας λεκάνης νερού της οποίας οι διαστάσεις θα εξασφαλίζουν τις καλές συνθήκες υδροληψίας. Αυτό σημαίνει πως εξασφαλίζουν την είσοδο της παροχής στη διώρυγα ή στον αγωγό προσαγωγής για τις περιπτώσεις των μικρών υδροηλεκτρικών εκτροπής ή δημιουργούν την κατάλληλη υδραυλική πτώση στην περίπτωση μικρού υδροηλεκτρικού έργου με μικρό ύψος κατά το ρου του ποταμού. Αυτοί οι υπερχειλιστές κατασκευάζονται, ως επί το πλείστον, κατά το ρου ενός ποταμού.

Κατά τη διάρκεια της υπερχειλίσης της ροής από τη στέψη του υπερχειλιστή, η δυναμική ενέργεια της ανάντη στάθμης μετατρέπεται σε κινητική και έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη επιτάχυνση της ροής. Η αυξημένη ταχύτητα του νερού μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στη βάση της κατασκευής με αποτέλεσμα να θέσει σε κίνδυνο την έδραση του ίδιου του υπερχειλιστή, έτσι το νερό που υπερχειλίζει, οδηγείται σε δεξαμενή ηρεμίας, όπου μέρος της κινητικής του ενέργειας καταστρέφεται πριν αυτό καταλήξει στη φυσική κοίτη του υδατορεύματος. Εκχειλιστές ονομάζονται οι υπερχειλιστές των οποίων η γεωμετρία μεταβάλλεται μέσω θυροφραγμάτων.

4.3.2 Υπερχειλιστές καμπύλης στέψης

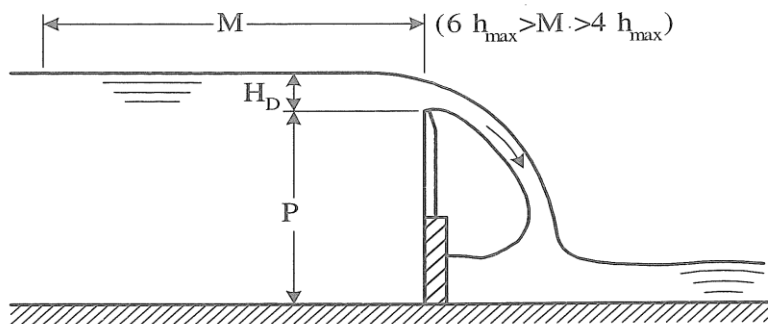
Έστω ένας υπερχειλιστής λεπτού τοιχώματος ως μετρητικό όργανο της παροχής. Η διερχόμενη παροχή Q εκφράζεται ως συνάρτηση του υδροστατικού ύψους H_D , δηλαδή της διαφοράς στάθμης της ροής ανάντη του υπερχειλιστή και της στέψης του, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.19.

$$Q = C_D \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot H_D^{3/2} \quad (4.1)$$

όπου:

L : το μήκος της στέψης, κάθετα προς τη διεύθυνση ροής,

C_D : αδιάστατος συντελεστής παροχής που εξαρτάται από το βάθος P του νερού ανάντη, τη μορφή της στέψης και την κλίση της πάνω πλευράς του υπερχειλιστή, η οποία είναι συνήθως κάθετη στη ροή.

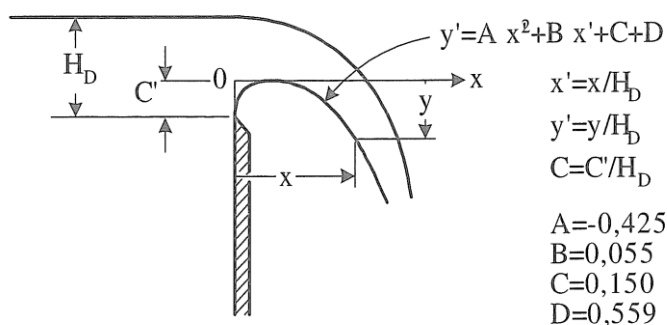


Σχήμα 4.19 Μετρητικός υπερχειλιστής λεπτού τοιχώματος. [Ε3, Σχήμα 4.15α]

Μία προσέγγιση για την τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή δίνεται από τη σχέση 4.2.

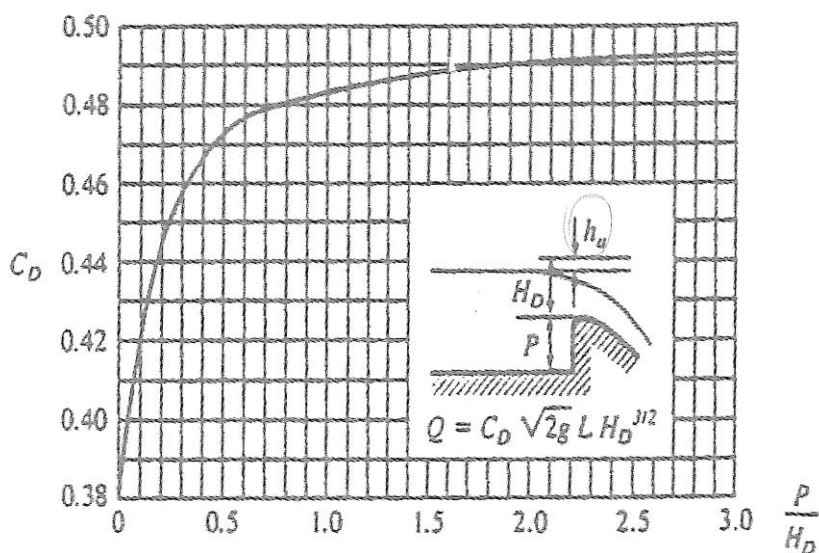
$$C_D = 0,4 + 0,05 \frac{H_D}{P} \quad (4.2)$$

Η κάτω παρειά της δέσμης του νερού που σχηματίζεται καθορίζει μία επιφάνεια πίεσης σταθερής και ίσης προς την ατμοσφαιρική. Οι συντεταγμένες της υδάτινης δέσμης εξαρτώνται από την παροχή που υπερχειλίζει. Αν η κάτω παρειά σταθεροποιείται, τότε διαμορφώνεται ένας υπερχειλιστής καμπύλης στέψης, που σε σύγκριση με έναν υπερχειλιστή λεπτού τοιχώματος έχει τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά, όμως η αντοχή του είναι πολύ μεγαλύτερη, για να μπορεί να παραλαμβάνει τις δυνάμεις που ασκεί το νερό σε αυτόν. Λόγω της στερεοποίησης της αντίστοιχης γραμμής ροής, επικρατεί σταθερή στατική πίεση και ίση προς την ατμοσφαιρική για παροχή ίση προς την παροχή σχεδίασης στη βρεγμένη επιφάνεια του υπερχειλιστή, με αποτέλεσμα οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτόν να είναι μηδενικές. Στο σχήμα 4.13 φαίνονται στοιχεία για τη χάραξη της κάτω παρειάς της ελεύθερης δέσμης, δηλαδή της διατομής της καμπύλης στέψης, για τη συνήθη περίπτωση που η κινητική ενέργεια της ανάντη ροής στη διώρυγα είναι αμελητέα.



Σχήμα 4.20 Σχηματισμός δέσμης νερού κατάντη του υπερχειλιστή. [Ε3, Σχήμα 4.15β]

Η μορφή του υπερχειλιστή καμπύλης προκύπτει από τη σταθεροποίηση της καμπύλης της κάτω παρειάς της δέσμης για την παροχή σχεδίασης του υπερχειλιστή. Επομένως, η μορφή του υπερχειλιστή συμπίπτει με την καμπύλη της ελεύθερης δέσμης, μόνο για την παροχή σχεδίασης, η επιφάνεια του είναι σταθερής πίεσης ίσης με την ατμοσφαιρική. Για παροχές μικρότερες από αυτήν της παροχής σχεδίασης αναπτύσσονται υπερπίεσεις στην επιφάνεια, άρα πρόσθετες δυνάμεις στην έδραση και για παροχές μεγαλύτερες από την παροχή σχεδίασης αναπτύσσονται υποπίεσεις, επομένως κίνδυνος διάβρωσης της επιφάνειας και εμφάνιση ανάπτυξης σπηλαιώσης.



Σχήμα 4.21 Συντελεστής παροχής C_D υπερχειλιστή καμπύλης στέψης με κατακόρυφη ανάντη παρειά. [Ε3, Σχήμα 4.16]

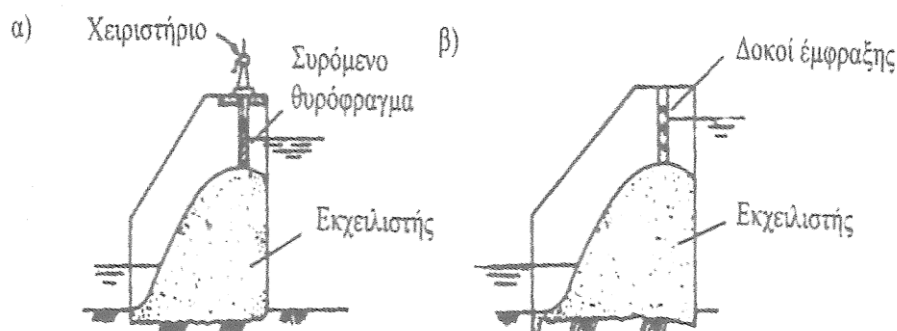
4.3.3 Ρυθμιζόμενοι υπερχειλιστές – εκχειλιστές

α) Εκχειλιστές μορφής θυροφράγματος

Ο εκχειλιστής είναι μία κατασκευή ρυθμιζόμενης υπερχειλίσης. Στις περιπτώσεις που η πλημμυρική παροχή είναι αρκετά μεγάλη, ενώ παράλληλα του απαιτούμενου μήκος L της στέψης του υπερχειλιστή καμπύλης στέψης ή το μέγιστο απαιτούμενο υδροστατικό ύψος H_D είναι αδύνατο να αναπτυχθεί σε μία συγκεκριμένη εγκατάσταση αντί του υπερχειλιστή, διαμορφώνει ο εκχειλιστής.

Η δυνατότητα εκχύλισης της πάνω στάθμης και ο έλεγχος της παροχής που υπερχειλίζει επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση θυροφραγμάτων με μορφή πτερυγίου ή κυκλικού τόξου, τα οποία τοποθετούνται στο πάνω μέρος της καμπύλης στέψης του σταθερού εκχειλιστή. Έτσι, αυξάνεται σημαντικά η δυνατότητα διοχέτευσης της πλημμυρικής παροχής, χωρίς να υπάρχει υπερβολική ανύψωση της πάνω στάθμης, δηλαδή του υδροστατικού ύψους. Επιπλέον, το θυρόφραγμα μπορεί να έχει τη μορφή περιστρεφόμενου πτερυγίου ή περιστρεφόμενου κυκλικού τόξου ή ακόμα να είναι επίπεδο συρόμενο. Ο χειρισμός της περιστροφής και της ανύψωσης πραγματοποιείται χειροκίνητα για τις μικρές μονάδες μέσω γραναζωτού μηχανισμού και καστάνιας ή μηχανικά μέσω στεγανού ηλεκτροκινητήρα ή υδραυλικών εμβόλων.

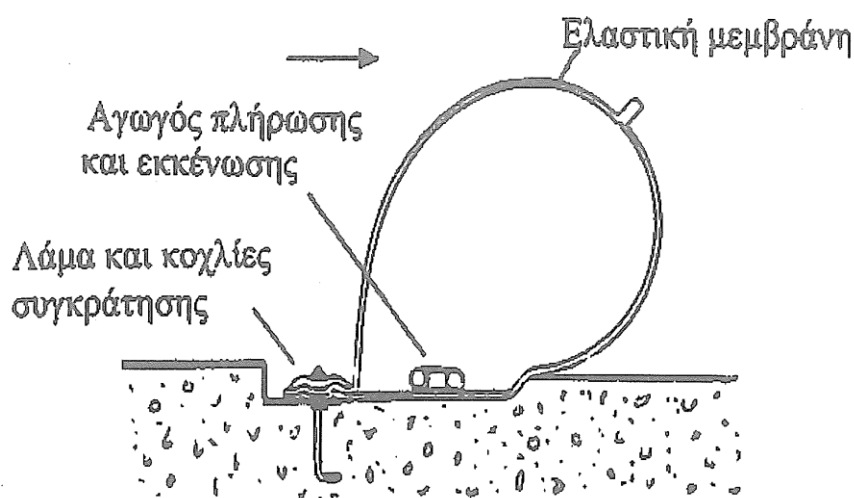
Συνήθως το περιστρεφόμενο θυρόφραγμα μορφής πτερυγίου έχει ύψος μεταξύ του 1 και 3,5 m. Όταν το ύψος είναι μεγαλύτερο των 3,5 m ο μηχανισμός περιστροφής είναι πολύ δαπανηρός, καθώς η απαιτούμενη ροπή περιστροφής αυξάνεται πολύ δεδομένου ότι είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης του υδροστατικού ύψους. Η μορφή του πτερυγίου είναι αρκετά σημαντική, αφού από αυτήν εξαρτάται η διανομή πίεσης όταν το νερό υπερχειλίζει, η απαιτούμενη δύναμη και ισχύ για την περιστροφή του. Η πιο ιδανική μορφή είναι η παραβολική, η οποία πλησιάζει τη μορφή της δέσμης που υπερχειλίζει καθώς αντιστοιχεί σε ισοθλιπτική επιφάνεια και με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται η απαιτούμενη ισχύς χειρισμού.



Σχήμα 4.22 Εκχειλιστής με επίπεδο συρόμενο θυρόφραγμα ή με δοκούς έμφραξης [Ε3, Σχήμα 4.18]

β) Εκχειλιστές ελαστικοί διογκούμενοι

Ο διογκούμενος ελαστικός εκχειλιστής κατατάσσεται και αυτός τους ρυθμιζόμενους εκχειλιστές. Έχει ύψος από 2 έως 3 m και το μήκος του μπορεί να φτάσει έως τα 160 m. Η κατασκευή του είναι μεμβράνη ενισχυμένου καουτσούκ ή από κάποιο άλλο συνθετικό ελαστικό που σχηματίζει ένα στεγανό ελαστικό θάλαμο. Τοποθετείται στην επίπεδη στέψη του μόνιμου εκχειλιστή μέσω λάμας, τοποθετημένης προς την πάνω πλευρά των κοχλιών. Αυτή η μεμβράνη συνήθως έχει πάχος 3,5 mm. Η μεταβολή του ύψους του εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης ή αφαίρεσης ποσότητας του νερού στο εσωτερικό της, έτσι ο ελαστικός θάλαμος διογκώνεται ή συρρικνώνεται αντίστοιχα. Η εισαγωγή επιτυγχάνεται με αντλητικό σύστημα.



Σχήμα 4.23 Λεπτομέρεια προσαγωγής εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης [Ε3, Σχήμα 4.22]

4.3.4 Λοιποί τύποι υπερχειλιστών – εκχειλιστών

α) Υπερχειλιστές απλής κατασκευής

Για τα πολύ μικρά υδροηλεκτρικά ή ακόμη και για αρδευτικούς σκοπούς συχνά κατασκευάζονται υπερχειλιστές με απλή κατασκευή. Πλεονέκτημα τους είναι ότι έχουν μικρό κόστος κατασκευής, όμως δεν μπορούν να έχουν μεγάλο ύψος κυρίως, εξαιτίας του προβλήματος της κινητικής ενέργειας του νερού κατάντη που υποσκάπτει τη θεμελίωση της κατασκευής. Επιπλέον δεν έχουν τη δυνατότητα καθαρισμού του πυθμένα από τα φερτά υλικά που συσσωρεύονται ανάντη και για αυτό το λόγο πρέπει να προβλέπεται η δυνατότητα περιοδικού καθαρισμού με μηχανικά μέσα. Ο καθαρισμός της λεκάνης θα πρέπει να πραγματοποιείται πριν η στάθμη των φερτών υλικών ανυψωθεί και αρχίσει να τα συμπαρασύρει προς τους υδροστρόβιλος μέσω της υδροληψίας.

β) Πλευρικοί υπερχειλιστές

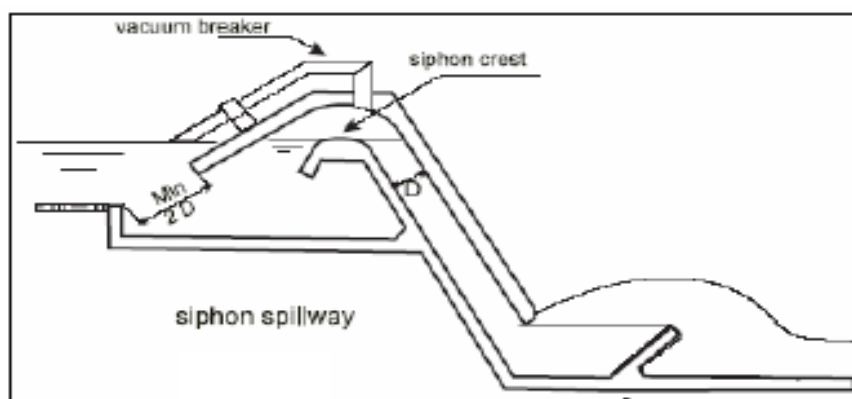
Η διώρυγα που μεταφέρει την παροχή και υπερχειλίζει σε ένα κεκλιμένο αγωγό ή σε κάποια σήραγγα κατασκευάζεται παράλληλα προς τη στέψη του πλευρικού υπερχειλιστή. Η πλευρική διώρυγα θα πρέπει να έχει κατάλληλη κλίση, έτσι ώστε να μπορεί να διοχετεύει τη μέγιστη παροχή. Η ροή στη διώρυγα δεν είναι ομοιόμορφη, εξαιτίας του έντονου στροβιλισμού που σχηματίζονται κατά την πτώση του νερού από τη στέψη.



Σχήμα 4.24 Πλευρικός υπερχειλιστής [Ξ1, Photo 5.16]

γ) Σιφωνοειδείς υπερχειλιστές

Αυτού του είδους οι υπερχειλιστές διαμορφώνονται συνήθως για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα με μικρό ύψος όταν είναι επιθυμητή η διατήρηση της ανάντη στάθμης με περιορισμένα όρια διακύμανσης. Η λειτουργία του σίφωνα είναι αυτόματη διατηρώντας την ανάντη στάθμη στα επιθυμητά όρια διακύμανσης, χωρίς την ανάγκη κινούμενων τμημάτων, όπως στην περίπτωση των θυροφραγμάτων. Η διακοπή της ροής μπορεί να γίνει όποτε χρειαστεί με το άνοιγμα της βάνας αερισμού, όπου επιτυγχάνεται η διακοπή του κενού.

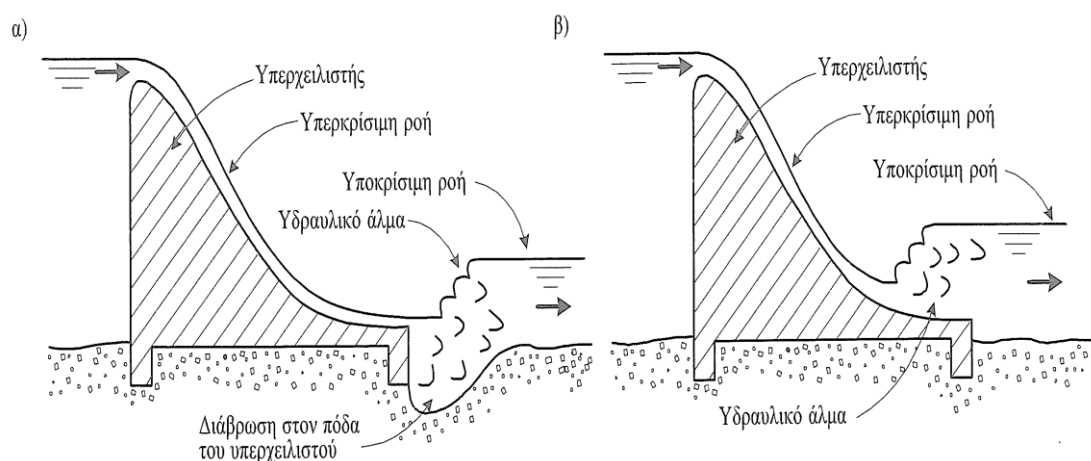


Σχήμα 4.25 Λεπτομέρεια προσαγωγής εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης [Ξ1, Figure 5.12]

4.4 Λεκάνη ηρεμίας

Η ροή μετά τη στέψη αποκτά μεγάλες τιμές ταχύτητας, διότι μετατρέπεται από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη. Οι υψηλές ταχύτητες ροής και ο στροβιλισμός μπορεί να προκαλέσουν σοβαρή διάβρωση στην κατασκευή, ειδικά εάν η κοίτη του ποταμού δεν είναι ανθεκτική στη διάβρωση, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του λάσπης, του αργίλου, της χαλαρής άμμου, του χαλικιού ή ακόμη και του σπασμένου βράχου. Για να αποφευχθούν τέτοιες φθορές, εφαρμόζονται διάφορες δομικές λύσεις, μερικές από τις οποίες είναι πολύ δαπανηρές. Έτσι, διαμορφώνεται η λεκάνη ηρεμίας που οδηγεί στην υποβάθμιση της κινητικής ενέργειας του νερού μέσω του σχηματισμού υδραυλικού άλματος, δηλαδή το μετασχηματισμό της κινητικής ενέργειας σε δυναμική, ανυψώνοντας τη στάθμη, ενώ ταυτόχρονα ένα μέρος της κινητικής ενέργειας καταστρέφεται υπό τη μορφή έντονων στροβιλισμών.

Η λεκάνη ηρεμίας είναι σχεδιασμένη έτσι, ώστε η ανάπτυξη του υδραυλικού άλματος να προκαλείται σε ελεγχόμενη θέση και το νερό κατά την είσοδο στην κατάντη διώρυγα ή στη φυσική κοίτη του υδατορεύματος να έχει αρκετά χαμηλή ταχύτητα, για να μην προκαλεί διάβρωση.



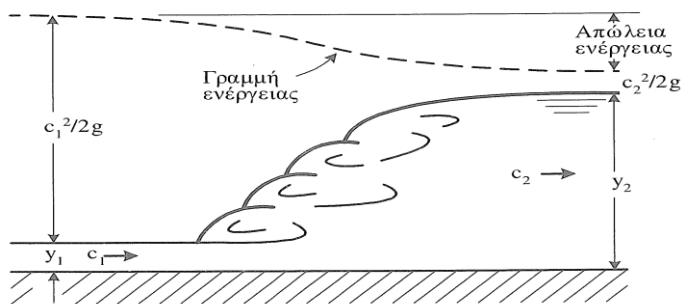
Σχήμα 4.26 α) Ανεπιθύμητη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος, β) Ελεγχόμενη ανάπτυξη υδραυλικού άλματος [Ε3, Σχήμα 4.26]

Στην πιο απλή περίπτωση διώρυγας ορθογωνικής διατομής η ανάντη και κατάντη στάθμη του υδραυλικού άλματος y_1 και y_2 αντίστοιχα συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \quad (4.3)$$

όπου:

Fr : η τιμή του αριθμού Froude της ανάντη ροής: $Fr_1 = \frac{c_1}{\sqrt{gy_1}}$



Σχήμα 4.27 Σχηματισμός υδραυλικού άλματος[E3, Σχήμα 4.27]

4.5 Έργα υδροληψίας

4.5.1 Γενικά

Η πρόσληψη νερού πρέπει να είναι σε θέση να εκτρέψει την απαιτούμενη ποσότητα νερού σε μία διώρυγα ή σε έναν αγωγό προσαγωγής, χωρίς να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στο τοπικό περιβάλλον, με τις ελάχιστες πιθανές υψομετρικές απώλειες. Επίσης, μια μεγάλη πρόκληση συναντάται στο χειρισμό και στη μεταφορά των φερτών υλικών. Ο σχεδιασμός της υδροληψίας βασίζεται σε γεωλογικά, υδραυλικά, δομικά και οικονομικά ζητήματα και απαιτεί ιδιαίτερη φροντίδα για την αποφυγή περιττών συντηρήσεων και λειτουργικών προβλημάτων που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν εύκολα κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Γενικά, πρέπει να λαμβάνονται τα εξής υπόψη:

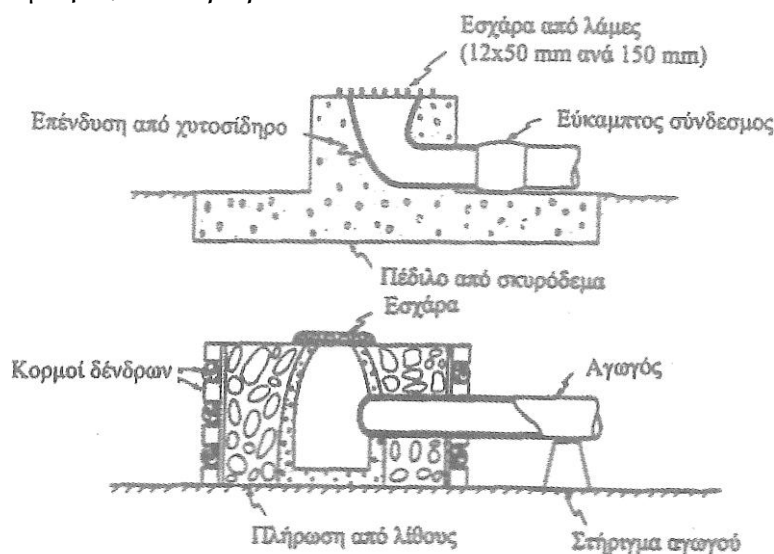
- Ίδια υδραυλικά και δομικά κριτήρια σε όλα τα είδη υδροληψίας
- Λειτουργικά κριτήρια (π.χ. ποσοστό εκτροπής ροής, διαχείριση απορριμμάτων, αποκλεισμός ιζημάτων κλπ) που ποικίλλουν από υδροληψία σε υδροληψία
- Χαρακτηριστικά περιβαλλοντικών κριτηρίων κάθε έργου (π.χ. που απαιτούν συστήματα εκτροπής ψαριών, περάσματα για ψάρια κλπ.).

Η θέση της υδροληψίας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η βύθιση, οι γεωτεχνικές συνθήκες, οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις (ειδικά εκείνες που σχετίζονται με τη ζωή των ψαριών), ο αποκλεισμός ιζημάτων και σχηματισμός πάγου, όπου απαιτείται. Ο προσανατολισμός της εισόδου της υδροληψίας στη ροή είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την ελαχιστοποίηση της συσσώρευσης φερτών στη σχάρα εισόδου, πηγή πιθανών μελλοντικών προβλημάτων συντήρησης. Η καλύτερη διάθεση νερού για την υδροληψία είναι σε ορθή γωνία προς τον υπερχειλιστή, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια των εποχών πλημμύρας, η ροή να ωθεί τα φερτά υλικά πάνω από την κορυφή. Η υδροληψία δεν πρέπει να βρίσκεται σε μια περιοχή με στάσιμο νερό, πολύ μακριά από τη ροή, διότι τα ρεύματα που είναι σε τέτοια νερά θα συσσωρεύουν φερτά στην είσοδο. Η υδροληψία θα πρέπει να είναι εξοπλισμένη με τον εξαμμωτή για την

ελαχιστοποίηση της ποσότητας των υπολειμμάτων και των ιζημάτων που μεταφέρονται από το εισερχόμενο νερό, τη λεκάνη καθίζησης, όπου μειώνεται η ταχύτητα ροής, για την απομάκρυνση όλων των σωματιδίων άνω των 0,2 mm, από ένα σύστημα εκκένωσης για να διώχνει τη λάσπη, την άμμο, τα χαλίκια και τα βότσαλα με την ελάχιστη απώλεια νερού και με έναν υπερχειλιστή για εκτροπή της περίσσειας νερού.

4.5.2 Βυθισμένη υδροληψία

Για την είσοδο του νερού στον αγωγό προσαγωγής σε καλές συνθήκες, απαιτούνται: συμμετρικές συνθήκες της ροής, αποφυγή σχηματισμού στροβιλισμών, ταχύτητα στην ανάντη διώρυγα μικρότερη των 0,65 m/sec και εξασφάλιση επαρκούς βυθίσματος (όχι στροβιλισμοί που μειώνουν την απόδοση του υδροστροβίλου κατά 4% με 5% και ευνοούν την αναρρόφηση του αέρα που οδηγούν σε κραδασμούς στροβίλου κατά τη λειτουργία. Το ελάχιστο βύθισμα h_m είναι ίσο με $1,7 \cdot D \cdot Fr$, όπου, $Fr = c/\sqrt{g \cdot D}$, c η μέση ταχύτητα εισόδου και D η διάμετρος του αγωγού.



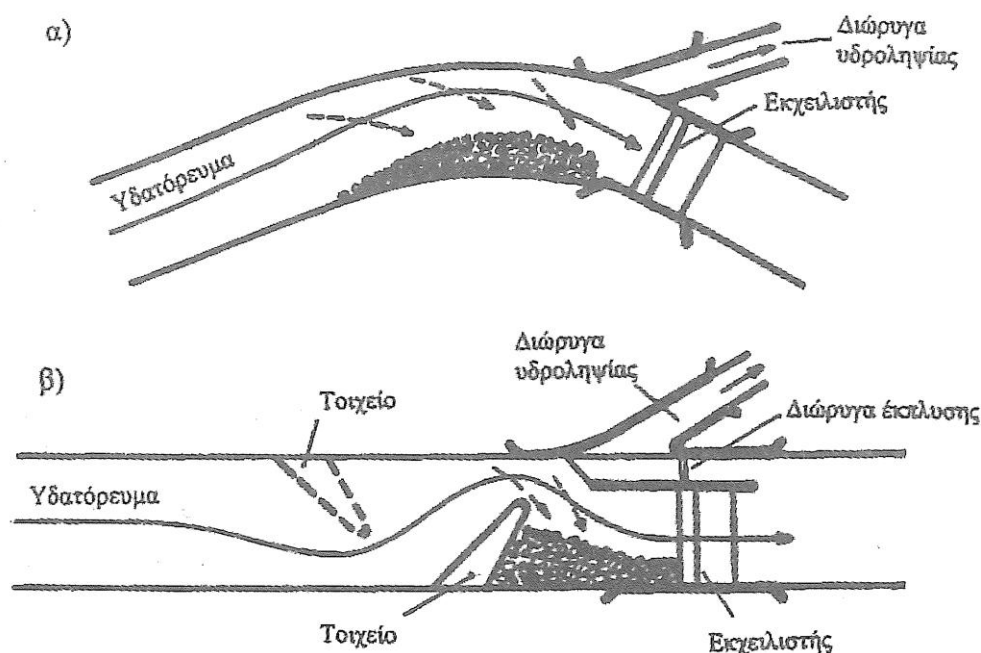
Σχήμα 4.28 Διάταξη βυθισμένης υδροληψίας [E3, Σχήμα 4.29]

4.5.3 Διώρυγες υδροληψίας

Ο βασικότερος στόχος για μία σωστή σχεδίαση διώρυγας υδροληψίας είναι να εξασφαλίσει πως η ροή που οδηγείται μέσω της διώρυγας υδροληψίας στη διώρυγα προσαγωγής ή και κατευθείαν στον αγωγό πτώσεως είναι απαλλαγμένη από τα φερτά υλικά. Επιπλέον, η διώρυγα θα πρέπει να προσανατολίζεται κατά τη διεύθυνση της ροής του υδατορεύματος, ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη ομοιομορφία της ροής. Πρέπει να σχεδιάζεται

κοντά στον υπερχειλιστή, για να αποφεύγεται ο σχηματισμός νεκρών ζωνών ή ζωνών ανακυκλοφορίας, όπου ευνοείται η κατακάθιση των αιωρούμενων σωματιδίων, δηλαδή της άμμου, ενώ παράλληλα διευκολύνεται ο καθαρισμός της εσχάρας εισόδου.

Εάν η ταχύτητα ροής του υδατορεύματος δεν ξεπερνά το 1 m/sec, η γωνία μεταξύ της διώρυγας υδροληψίας και διεύθυνσης της ροής του υδατορεύματος μπορεί να είναι ακόμα και ορθή. Συχνά προτιμάται η διαμόρφωση της υδροληψίας στο κοίλο τμήμα καμπύλης του υδατορεύματος, επειδή η ζώνη ανακυκλοφορίας και κατακάθισης των φερτών δημιουργείται στην απέναντι κυρτή καμπυλότητα.



Σχήμα 4.29 Διαμόρφωση (α)καμπύλη, (β)ευθύγραμμο τμήμα [Ε3, Σχήμα 4.30]

Στην είσοδο της διώρυγας υδροληψίας τοποθετείται εσχάρα για τη συγκράτηση των επιπλέον σωματιών. Η εσχάρα κατασκευάζεται από μεταλλικές ράβδους ή ράβδους από πλαστικό, στις οποίες η διαμόρφωση των ακμών παρουσιάζει τις μικρότερες δυνατές υδραυλικές απώλειες. Το κενό μεταξύ των ράβδων είναι περίπου 12 mm στους μικρούς υδροστρόβιλους Pelton και μέχρι 150 mm σε έργα μικρού ύψους πτώσης με υδροστρόβιλους αξονικής ροής. Οι εσχάρες βιδώνονται στο πλαίσιο του σκυροδέματος με ανοξείδωτες βίδες ή τοποθετούνται με συρταρωτό τρόπο σε υποδοχή του σκυροδέματος. Σε υδατορεύματα ομαλής ροής η συγκράτηση των σωματιών γίνεται με φράγμα πλωτήρων κατά πλάτος του υδατορεύματος ανάντη του υπερχειλιστή. Ο καθαρισμός της εσχάρας γίνεται χειροκίνητα με κατάλληλο εργαλείο όταν το βύθισμά της είναι μικρότερο από 4m και με ειδικό μηχανικό σύστημα όταν η συγκέντρωση των φερτών είναι αυξημένη.

Οι υδραυλικές απώλειες δίνονται από τη σχέση 4.4:

$$\delta h_e = \zeta_r \frac{c^2}{2g} \quad (4.4)$$

όπου:

c : η ταχύτητα εισόδου,

ζ_r : ο συντελεστής τριβών εσχάρας που εκφράζεται από τη σχέση 4.5

$$\zeta_r = \beta \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^{4/3} \cdot \sin a \quad (4.5)$$

όπου:

s : το πάχος/διάμετρος ράβδων,

b : το καθαρό διάκενο μεταξύ των ράβδων,

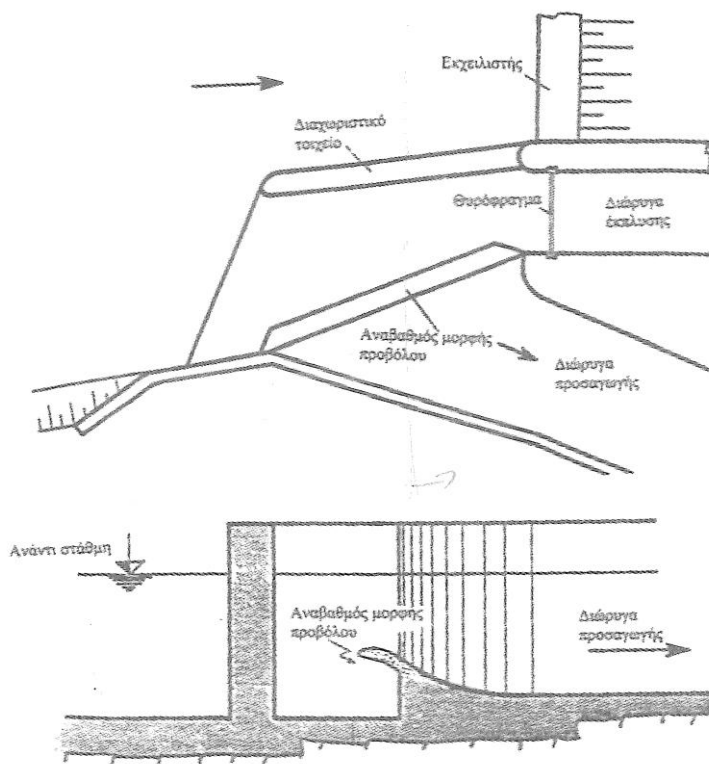
a : η κλίση της εσχάρας ως προς το οριζόντιο επίπεδο,

β : συντελεστής μορφής

Διατομή ράβδου εσχάρας						
β (-)	2,42	1,83	1,67	0,92	0,76	1,79

Σχήμα 4.30 Συντελεστής μορφής β της εσχάρας καθαρισμού [Ε3, Πίνακας 4.1]

Η μη εισχώρηση των φερτών υλικών στη διώρυγα υδροληψίας επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση πυθμένα, συνήθως με την κατασκευή αναβαθμού. Πιο συγκεκριμένα, ο πυθμένας της διώρυγας υδροληψίας κατασκευάζεται 1 με 2 m πιο ψηλά από τον αρχικό πυθμένα της λεκάνης. Πιο αποτελεσματικές από όλες τις διατάξεις για τη συγκράτηση των φερτών είναι ο ανάβαθμος με προέκταση μορφής προβόλου.

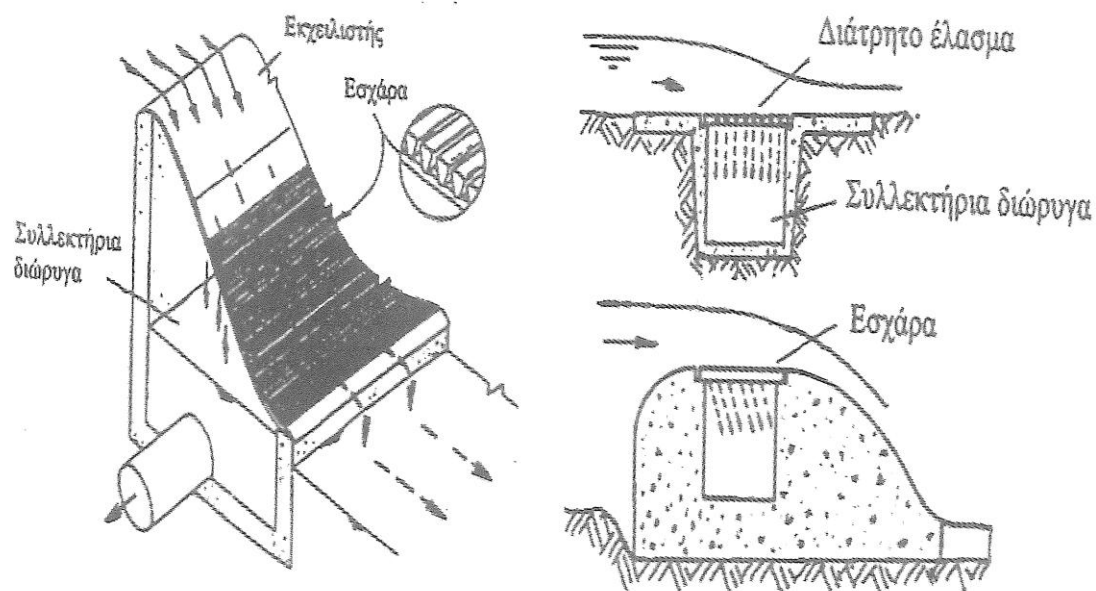


Σχήμα 4.31 Διώρυγα υδροληψίας με ανάβαθμο σε διαμόρφωση προβόλου [Ε3, Σχήμα 4.34]

4.5.4 Ορεινή υδροληψία

Είναι η κατάλληλη υδροληψία για ορεινές περιοχές με μεγάλη στερεοπαροχή και απότομες μεταβολές της παροχής του υδατορεύματος. Έχει τη μορφή του υπερχειλιστή και στο πάνω μέρος τοποθετείται μία εσχάρα με τις λάμες διατεταγμένες προς τη φορά της ροής ή ένα διάτρητο έλασμα. Η παροχή του υδατορεύματος υπερχειλίζει όλη την κατασκευή και ένα τμήμα ή όλη η παροχή περνά από τα διάκενα της εσχάρας ή από τις οπές του διάτρητου ελάσματος προς τη συλλεκτήρια διώρυγα, η οποία θεμελιώνεται κατά πλάτος του υπερχειλιστή. Η αξιοποιήσιμη παροχή οδηγείται από τη συλλεκτήρια διώρυγα στη διάταξη του εξαμμωτή, εάν κρίνεται απαραίτητο, κατόπιν στη διώρυγα ή στον αγωγό προσαγωγής, όπου η τροφοδοσία γίνεται σε ένα από τα δύο άκρα της συλλεκτήριας διώρυγας. Τα μεγάλα φερτά υλικά δεν εισχωρούν στην υδροληψία και υπερχειλίζουν, ενώ η άμμος συμπαρασύρεται από τη ροή. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ορεινής υδροληψίας είναι η απλή κατασκευή, η πλήρης απομάκρυνση των μεγάλων φερτών και η εύκολη συντήρηση. Όταν η τιμή της παροχής είναι μεγάλη, η κατακράτηση της άμμου βελτιώνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση στον πυθμένα και ανάντη της υδροληψίας ενός καμπυλωμένου ή ευθύγραμμου αναβαθμού με ύψος της τάξης του 0,5 έως 0,7 του βάθους του νερού. Η ροή πάνω από τον αναβαθμό κατευθύνεται προς την ορεινή υδροληψία χωρίς φερτά υλικά. Ο καθαρισμός της λεκάνης ανάντη του

αναβαθμού γίνεται μέσω θυροφραγμάτων έκπλυσης που βρίσκονται στο άλλο άκρο της διάταξης.



Σχήμα 4.32 Τομή ορεινής υδροληψίας[Ε3, Σχήμα 4.37]



Σχήμα 4.33 Ορεινή υδροληψία με εσχάρα[Ξ1, Photo 5.8]

4.5.5 Εξαμμωτής

Είναι η κατάλληλη υδροληψία για τις ορεινές περιοχές με μεγάλη στερεοπαροχή και απότομες μεταβολές της παροχής του υδατορεύματος. Χρησιμοποιείται, ως επί το πλείστον, για την αφαίρεση των αιωρούμενων σωματιδίων από τη ροή του νερού πριν η ροή φτάσει στη διώρυγα ή τον αγωγό προσαγωγής. Ως αιωρούμενα σωματίδια εννοούνται οι κόκκοι άμμου σε ποσότητα και μέγεθος

εξαρτώμενα από την κλίση ανάντη του υδατορεύματος και τη γεωλογική μορφή της λεκάνης απορροής. Στην περίπτωση που συμπαρασυρθούν οι κόκκοι άμμου με το σύστημα προσαγωγής προς τον υδροστρόβιλο, θα προκληθεί διάβρωση ανάλογη της ταχύτητας ροής, δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα της ροής τόσο πιο έντονη θα είναι η διάβρωση.

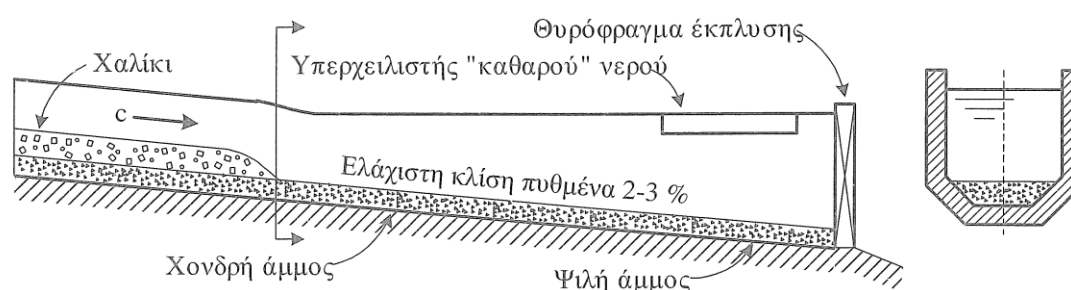
Αρχή λειτουργίας της εξάμμωσης: Ένας κόκκος στερεού υλικού, αιωρούμενος σε ακίνητο υγρό καθιζάνει με συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία οφείλεται στην επίδραση δυνάμεων βαρύτητας, υδροδυναμικών δυνάμεων αντίστασης και δυνάμεων επιφανειακής τάσης. Η ταχύτητα κατακάθισης w_k μειώνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία του νερού. Εάν το νερό κινείται, ο κόκκος του στερεού ωθείται τυχαία και βρίσκεται περισσότερο διάστημα σε αιώρηση, λόγω της τύρβης και των μικρών στροβιλισμών που αναπτύσσονται στη ροή, ενώ, αν το επίπεδο της τύρβης αυξηθεί αρκετά, οι στερεοί κόκκοι δεν κατακαθίζουν, αλλά παραμένουν σε αιώρηση. Το επίπεδο τύρβης εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα της ροής c και προκύπτει ότι, εάν η μέση ταχύτητα της ροής είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή c_{cr} , τότε ο στερεός κόκκος δεν κατακάθεται, δηλαδή, όταν $c > c_{cr}$, το σωματίδιο παραμένει σε αιώρηση. Αποδεικνύεται ότι η κρίσιμη ταχύτητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$c_{cr} \approx 10 \cdot w_k \cdot R_H^{1/6} \quad (4.5)$$

όπου:

R_H : η υδραυλική ακτίνα της διατομής της ροής

Η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας εξαρτάται από τη διάμετρο του μικρότερου κόκκου, όπου επιδιώκεται η κατακράτηση.



Σχήμα 4.34 Συγκέντρωση υλικών και αρχή λειτουργίας εξαμμωτή [Ε3, Σχήμα 4.43α]

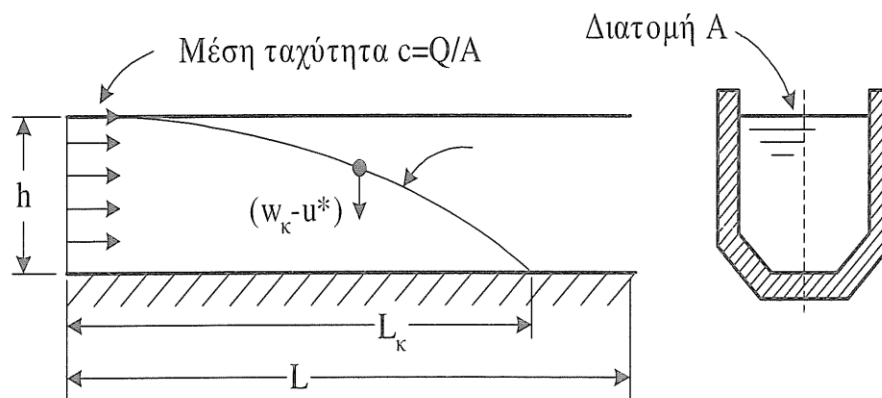
Η αρχή υπολογισμού του μήκους του εξαμμοτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$L_k = c \cdot t_k = \frac{c \cdot h}{w_k - u^*} \quad (4.6)$$

όπου:

u^* : η ταχύτητα τριβής,

w_k : η ταχύτητα κατακάθισης σε ακίνητο νερό



Σχήμα 4.35 Αρχή υπολογισμού μήκους δεξαμενής εξάμμοσης [Ε3, Σχήμα 4.43β]

Κανόνες για την αποτελεσματική διαδικασία συγκράτησης των αιωρούμενων σωματιδίων και την έκπλυση:

- η κλίση του πυθμένα πρέπει να είναι της τάξης του 2,5-5% εάν το επιτρέπει η τοπογραφία της περιοχής,
- η παροχή νερού έκπλυσης πρέπει να είναι από 100 έως 250% της παροχής λειτουργίας,
- τα τοιχώματα παρειών και πυθμένα να είναι λεία,
- η εγκάρσια διατομή που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα της ροής πρέπει να είναι 0,30 m/sec ή μικρότερη,
- η τραπεζοειδής διατομή με πλάτος στον πυθμένα πρέπει να είναι το 1/3 του πλάτους της δώρυγας εξάμμοτή και τα πλευρικά τοιχώματα με κλίση 1:1.

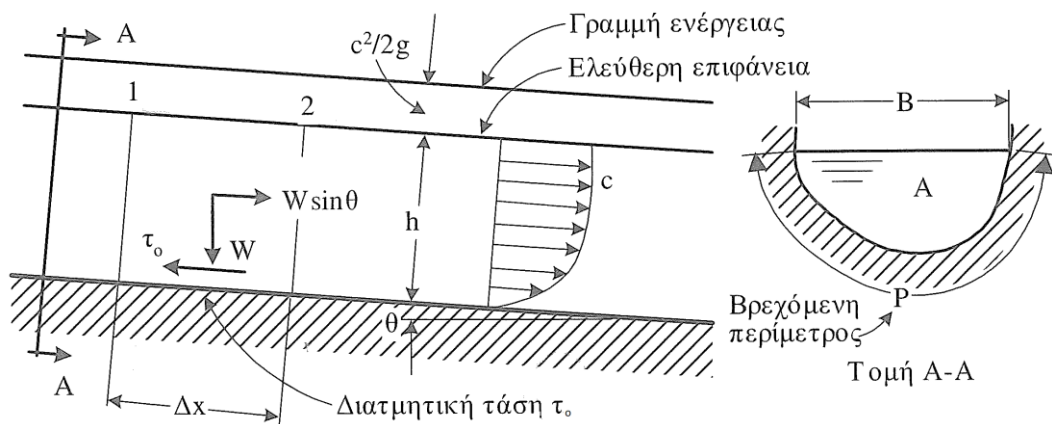


Σχήμα 4.36 Εξαμωπής μικρού υδροηλεκτρικού στο Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας, Ισχύς 1,95 MW, 2003 [112]

4.6 Διώρυγα

4.6.1 Στοιχεία μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα

Ως ομοιόμορφη ροή σε διώρυγα χαρακτηρίζεται αυτή κατά την οποία η ταχύτητας της ροής παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος της. Οι γραμμές ροής είναι ευθύγραμμες και παράλληλες και ο όρος της κινητικής ενέργειας παραμένει σταθερός, επομένως η γραμμή ενέργειας και η γραμμή της ελεύθερης επιφάνειας της ροής είναι παράλληλες, έχοντας την ίδια κλίση με αυτήν του πυθμένα της διώρυγας. Για να είναι ομοιόμορφη η ροή σε διώρυγα, θα πρέπει η διώρυγα να είναι ευθύγραμμη, χωρίς να μεταβάλλεται η διατομή και η κλίση της.



Σχήμα 4.37 Ομοιόμορφη ροή σε διώρυγα [Ε3, Σχήμα 4.46]

Οι δυνάμεις που ασκούνται στη μάζα του υγρού που βρίσκεται μεταξύ δύο διατομών σε απόσταση Δx είναι οι δυνάμεις βαρύτητας W και η δύναμη αντίστασης, λόγω της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στα βρεχόμενα τοιχώματα της διώρυγας. Από την ισορροπία των δυνάμεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της διώρυγας προκύπτει:

$$W \cdot \sin(\theta - \tau_o) \cdot P \cdot \Delta x = 0 \rightarrow \gamma \cdot A \cdot \Delta x \cdot \sin(\theta - \tau_o) \cdot P \cdot \Delta x = 0 \rightarrow$$

$$\tau_o = \gamma \frac{A}{P} \sin \theta \quad (4.7)$$

όπου:

P : η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής A και

$I = \sin \theta$: η κλίση της διώρυγας ως προς την οριζόντιο.

Ο λόγος $R_H = A/P$ είναι η υδραυλική διάμετρος.

Η διατμητική τάση κατά την κινηματική των ρευστών είναι ίση με:

$$\tau_o = 0,5 \cdot c_f \cdot \rho \cdot c^2 \quad (4.8)$$

όπου:

c : η ταχύτητα του ρευστού,

ρ : η πυκνότητα του ρευστού,

c_f : συντελεστής αντίστασης.

Από το συνδυασμό των 4.7 και 4.8 προκύπτει ότι:

$$c = \sqrt{C \cdot R_H \cdot I} \quad (4.9) \text{ με } C = \sqrt{\frac{2 \cdot g}{c_f}} \quad (4.10)$$

Όπως αυτή διατυπώθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Chezy τον 18ο αιώνα και C είναι ο συντελεστής απωλειών κατά Chezy. Από την εξίσωση 4.9 του Chezy, προκύπτει η εξίσωση Manning, εκφράζοντας το συντελεστή C ως εξής:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R_H^{1/6} = K \cdot R_H^{1/6} \quad (4.11)$$

Άρα η ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2} = K \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (4.12)$$

όπου:

K : $1/n$, ο συντελεστής Strickler.

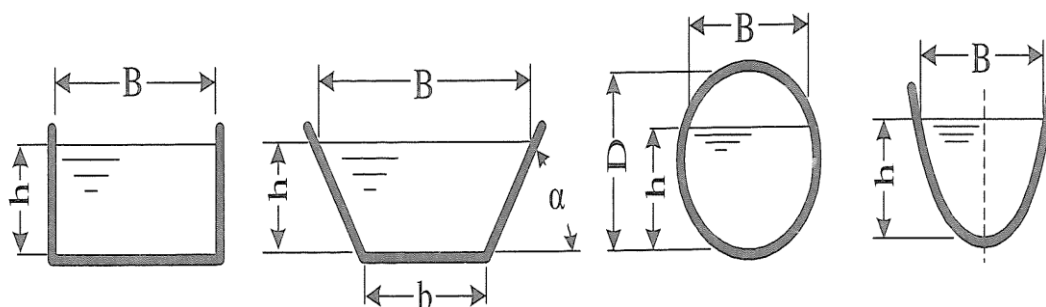
Η παροχή Q από τη διώρυγα με βρεχόμενη εγκάρσια διατομή A είναι ίση με:

$$Q = c \cdot A = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2} = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot A \cdot \left(\frac{A}{p}\right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (4.13)$$

Η διακινούμενη παροχή αυξάνεται όσο αυξάνεται η διατομή και όσο μειώνεται η βρεχόμενη περίμετρος, όπου αναπτύσσονται οι απώλειες τριβής. Για κάθε διατομή θα υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του βάθους και του πλάτους, όπου η παροχή γίνεται μέγιστη. Η διατομή αυτή λέγεται βέλτιστη, π.χ. σε τραπεζοειδή διατομή είναι αυτή που αντιστοιχεί στο μισό ενός κανονικού εξαγώνου.

Τύπος επένδυσης τοιχωμάτων	$n = 1/K$
Επένδυσητσιμεντοκονιάματος	0,011
Επένδυση με εκτοξευτικό σκυρόδεμα	0,016
Επένδυση με ακτοξευόμενο σκυρόδεμα (με κυματοειδείς ανωμαλίες)	0,018
Επένδυση σκυροδέματος φινιρισμένη	0,011
Επένδυση σκυροδέματος αφινιρίστη	0,015
Ξύλινη πλανισμένη επένδυση	0,012
Ξύλινη απλάνιστη επένδυση	0,013
Επένδυση ασφαλτικού υλικού (λεία)	0,013
Επένδυση ασφαλτικού υλικού (τραχειά)	0,016
Μη επενδυμένη διώρυγα	
Πυθμένας με σκύρα	0,025
Πυθμένας με σκύρα και λίθους	0,040
Πυθμένας λείος με μικρή βλάστηση	0,026
Πυθμένας με έντονες ραβδώσεις	0,050

Πίνακας 4.1 Τιμές του συντελεστού n της εξίσωσης της Manning [E3, Πίνακας 4.3]



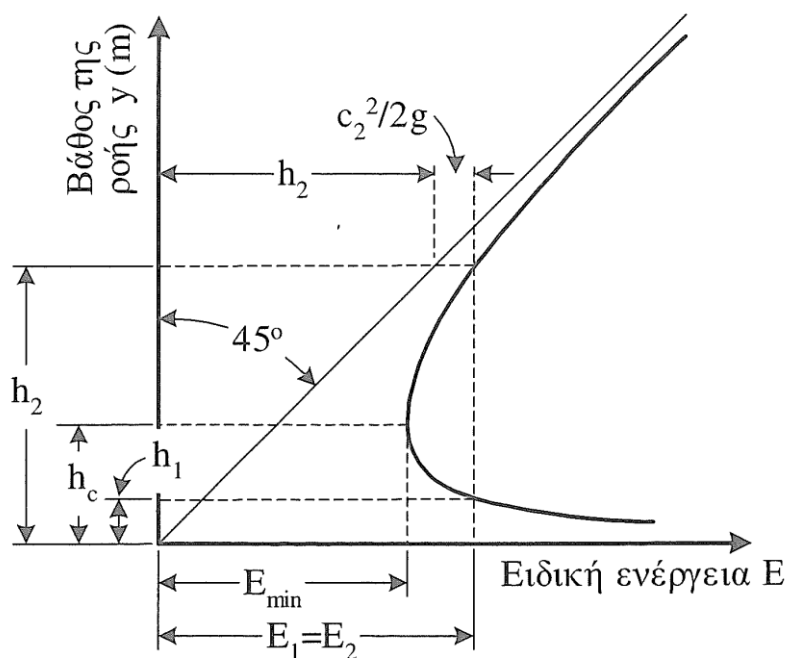
Σχήμα 4.38 Διάφορες συνήθεις διατομές διώρυγας [E3, Σχήμα 4.47]

Για ομοιόμορφη ροή και ορθογωνική διατομή ισχύει:

$$E = h + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot h^2 \cdot b^2} \quad (4.14) \quad \& \quad Fr = \frac{c}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (4.15)$$

- Υποκρίσιμη μεγάλο h_2 , μικρό c_2 : $Fr < 1$
- Υπερκρίσιμη μικρό h_1 , μεγάλο c_1 : $Fr > 1$
- Κρίσιμο βάθος: $Fr = 1$

Η μετάβαση από υπερκρίσιμη ροή σε υποκρίσιμη γίνεται με ανάπτυξη υδραυλικού άλματος. Στη βραδέως μεταβαλλόμενη ροή η παροχή είναι σταθερή, αλλά το βάθος της ροής μεταβάλλεται σταδιακά, εξαιτίας της μη πρισματικής διατομής της διώρυγας. Γενικά, πρόσθετες υδραυλικές απώλειες δεν υπάρχουν λόγω της βαθμιαίας μεταβολής των συνθηκών.



Σχήμα 4.39 Συζυγείς καταστάσεις ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα [Ε3, Σχήμα 4.48α]

4.6.2 Κατασκευαστικά και σχεδιαστικά στοιχεία διώρυγας

Η διώρυγα προσαγωγής ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου προσάγει την παροχή του νερού από την υδροληψία στη δεξαμενή φόρτισης, από την οποία τροφοδοτείται ο αγωγός πτώσης ή προσαγωγής. Οι υδραυλικές απώλειες της ροής στη διώρυγα είναι:

$$\delta z = (z_Y - z_E) = I \cdot L \quad (4.16)$$

όπου:

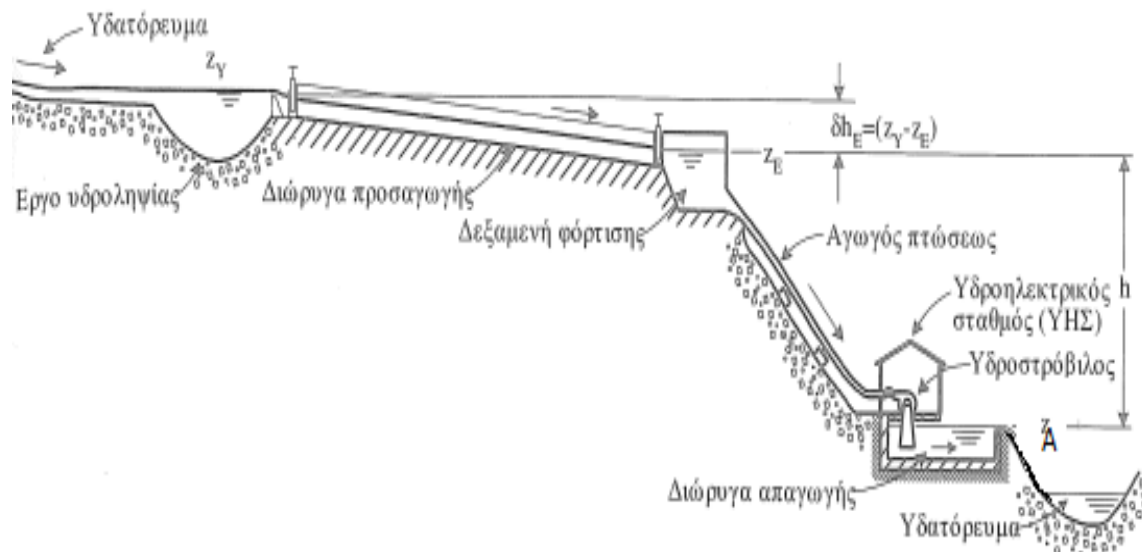
z_Y : η στάθμη του νερού στην αρχή της διώρυγας,

z_E : η στάθμη του νερού στο άκρο τέρματος της διώρυγας,

L : το ανεπτυγμένο μήκος,

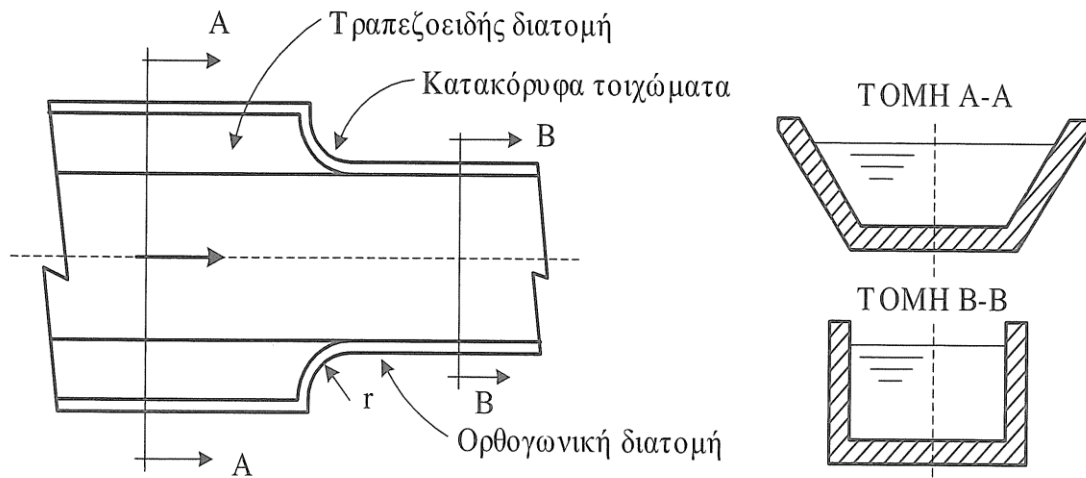
I : η μέση κλίση της διώρυγας

Σύμφωνα με τη σχέση 4.12, η μικρή κλίση μίας διώρυγας αντιστοιχεί και σε μικρή μέση ταχύτητα της ροής, επομένως για τη διακίνηση μίας δεδομένης παροχής, όταν μειώνεται η κλίση I της διώρυγας, μειώνεται η μέση ταχύτητα της ροής και αυξάνεται η απαιτούμενη διατομή και το κόστος της διώρυγας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, όμως, αυξάνεται και η υδραυλική πτώση, επομένως και η παραγωγή της ενέργειας. Ένα επιπλέον κριτήριο για τον καθορισμό της κλίσης I της διώρυγας, προκύπτει από το ότι η μέση ταχύτητα της ροής δε γίνεται να είναι μικρότερη των 0,3 – 0,5 m/sec, για να μην κατακάθονται στον πυθμένα της τα αιωρούμενα σωματίδια που διέφυγαν από τον εξαμμητή της υδροληψίας και θα πρέπει να παγιδευτούν στη δεξαμενή φόρτισης. Οι υψηλές ταχύτητες ροής στη διώρυγα μπορούν να προκαλέσουν μηχανική διάβρωση των διαβρεχόμενων τοιχωμάτων και η μέγιστη τιμή της εξαρτάται από το υλικό επένδυσης της διώρυγας και τη φύση των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 4.40 Σχηματική διάταξη μικρού ΥΗΕ με διώρυγα προσαγωγής και δεξαμενή φόρτισης [Ε3, Σχήμα 4.49]

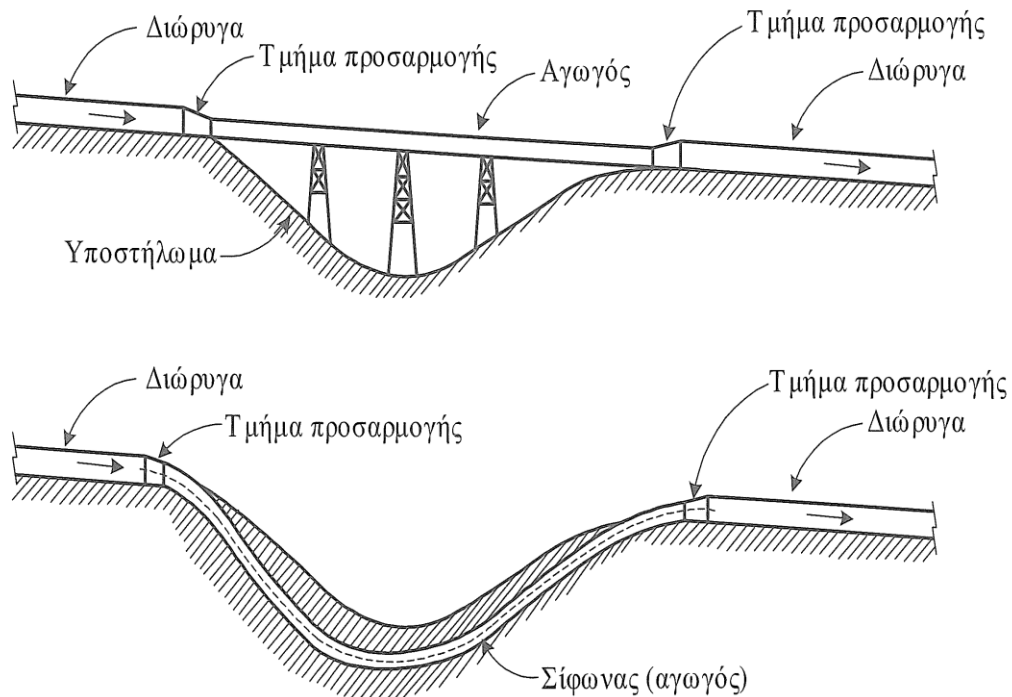
Ο περιορισμός των τοπικών υδραυλικών απωλειών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση τμημάτων προσαγωγής.



Σχήμα 4.41 Τμήμα προσαρμογής κατά την αλλαγή διατομής διώρυγας [Ε3, Σχήμα 4.50α]



Σχήμα 4.42 Διώρυγα και παγίδα φερτών υλικών μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού στο Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας, Ισχύος 1,95 MW, 2003 [112]



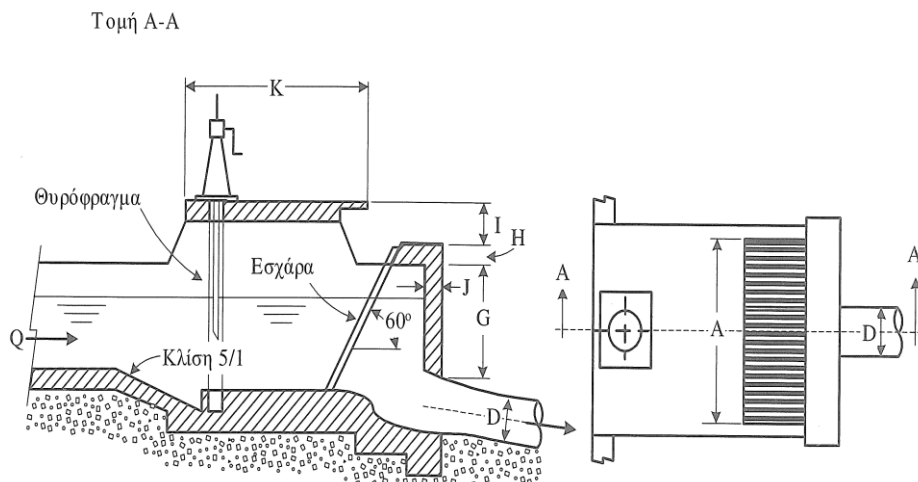
Σχήμα 4.43 Υπερπήδηση χαράδρας με κλειστό αγωγό πάνω σε χαλύβδινο φάτνωμα και με αντίστροφο σίφωνα. [Ε3, Σχήμα 4.51]

4.7 Δεξαμενή φόρτισης

Ο σκοπός της δεξαμενής φόρτισης είναι η απρόσκοπτη τροφοδοσία του αγωγού πτώσεως ή προσαγωγής και των υδροστροβίλων κατά τη φάση της εκκίνησης των μονάδων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των υδροστροβίλου είναι ο μικρός χρόνος εκκίνησης της τάξεων των 5 sec για τις μικρές μονάδες και των 10 sec για τις μεγάλες. Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο αγωγός δε θα μπορούσε να τροφοδοτηθεί από τη διώρυγα, έτσι στην είσοδο του αγωγού πτώσεως θα εισέρχονταν αέρας οδηγώντας στη μη ομαλή εξέλιξη της λειτουργίας μονάδας. Η δεξαμενή φόρτισης κατασκευάζεται στο άκρο της διώρυγας προσαγωγής έτσι ώστε να τροφοδοτεί τον αγωγό πτώσης. Η επιλογή της θέσης κατασκευής της γίνεται με βάση το μήκος του αγωγού πτώσης που πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο για τη μείωση του κόστους και τη μείωση της έντασης των μεταβατικών φαινομένων, όπως είναι το υδραυλικό πλήγμα.

Επειδή ο όγκος της δεξαμενής φόρτισης είναι μεγάλος και η ταχύτητα της ροής αρκετά μικρή, όλα τα αιωρούμενα σωματίδια καθιζάνουν και η δεξαμενή φόρτισης λειτουργεί σαν τελικός εξαμμωτής. Για την αποφυγή της ανακυκλοφορίας της ροής και των στροβιλισμών, απαιτείται κατάλληλη σχεδίαση της δεξαμενής φόρτισης. Στον πυθμένα κατασκευάζεται αναβαθμός και θυρόφραγμα έκπλυσης για τις ανάγκες συντήρησης, ενώ η δεξαμενή φέρει

υπερχειλιστή για τη διοχέτευση της υπερβάλλουσας παροχής, ειδικά κατά την απότομη διακοπή της λειτουργίας των υδροστροβίλων.



Σχήμα 4.44 Σχηματική διαμόρφωση δεξαμενής φόρτισης μικρού ΥΗΕ. [Ε3, Σχήμα 4.52]

Παροχή (m ³ /s)	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
A (m)	1,9	2,3	2,5	2,9	3,5	4,2	4,6
D (m)	1,0	1,2	1,3	1,5	1,9	2,3	2,4
G (m)	1,5	1,7	1,9	2,1	2,4	2,8	3,3
H (m)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9
I (m)	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0
J (m)	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
K (m)	1,6	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4
Πάχος ράβδων εσχάρας (mm)	45	50	50	50	50	60	70
Διάκενο ράβδων εσχάρας (mm)	25	25	30	30	32	34	35
Πλάτος ράβδων εσχάρας (mm)	5	5	6	6	6	6	6

Πίνακας 4.2 Διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης [Ε3, Πίνακας 4.4]



Σχήμα 4.45 Δεξαμενή φόρτισης μικρού ΥΗΕ Κρύας Βρύσης, Δήμος Υπάτης, Φθιώτιδας, Ισχύς 0,735 MW, 2006. [I12]

4.8 Αγωγός πτώσης

4.8.1 Υλικό του αγωγού προσαγωγής

Αγωγοί πτώσης από πλαστικό: Χρησιμοποιούνται όταν οι παροχές είναι μικρές μέχρι $0,03 \text{ m}^3/\text{sec}$ υδραυλική πτώση μικρότερη από 100 - 150 m. Συνήθως χρησιμοποιούνται πλαστικοί σωλήνες από εύκαμπτο πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο ή PVC. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι έχουν μικρό βάρος, μικρό κόστος και ευκολία στην κατασκευή του αγωγού πτώσεως, ακόμα και στο πιο απόκρημνο έδαφος. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι γήρανση του υλικού όταν αυτό εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, κάτι το οποίο το καθιστά εύθραυστο. Για αυτόν το λόγο οι πλαστικοί σωλήνες, συνήθως τοποθετούνται σε υπόγειες διατάξεις, εκτός και εάν προβλεφθεί επιφανειακή προστασία για την ηλιακή ακτινοβολία.

Αγωγοί πτώσης από αμίαντο: Χρησιμοποιούνται για τιμές παροχής έως $0,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ και για υδραυλική πτώση μικρότερη από τα 160 m. Τα διάφορα τμήματα του αγωγού μπορούν να συνδεθούν με ειδικούς συνδέσμους μορφής χιτωνίου και στεγανωτικούς δακτυλίους. Συνήθως, αποφεύγεται η εφαρμογή τους σε ασταθές ή κεκλιμένα εδάφη λόγω της έλλειψης ελαστικότητας.

Αγωγοί πτώσης από οπλισμένο σκυρόδεμα: Έχει εφαρμογή για υδραυλικές πτώσεις μικρότερες των 33 m.

Αγωγοί πτώσης από χάλυβα: Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος αγωγού πτώσεων για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, γιατί έχουν τη δυνατότητα συγκόλλησης και διαμόρφωσης των διαφόρων τμημάτων. Επιπλέον, έχουν μεγάλη αντοχή και ελαστικότητα και εφαρμόζονται κατάλληλα τόσο σε μεγάλες, όσο και σε μικρές πιέσεις, καθώς και υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα των εξαρτημάτων τους. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους διακρίνονται σε σωλήνες εξελάσεως χωρίς ραφή και σε σωλήνες με ραφή. Οι σωλήνες με ραφή χωρίζονται σε αυτούς με κατά μήκος ραφή και σε αυτούς με ελικοειδή ραφή. Στα υδροηλεκτρικά, ως επί το πλείστον, εφαρμόζονται συχνότερα οι σωλήνες με κατά μήκος ραφή.

Αγωγοί πτώσης από ελατό χυτοσίδηρο: Αποτελείται από κράμα σιδήρου, άνθρακα και πυριτίου, με τον άνθρακα να είναι σε καθαρή μορφή σφαιροειδή γραφίτη. Το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και δεν έχει ρηγματώσεις. Επιπλέον, δεν υπάρχει η δυνατότητα συγκόλλησης και τα διάφορα τμήματά του μπορούν να ενωθούν μόνο μέσω συνδέσμων αρσενικού - θηλυκού στα άκρα του με ειδικό ελαστικό παρέμβυσμα μορφής δακτυλίου για την

εξασφάλιση της στεγανότητας. Τα όργανα διακοπής και τα υπόλοιπα εξαρτήματα προσαρμόζονται με τυποποιημένες φλάντζες. Η εσωτερική επιφάνεια είναι επιστρωμένη με ειδική τσιμεντοκονία, η οποία τοποθετείται με φυγοκέντρηση και έτσι δημιουργείται λεία επιφάνεια με μείωση τριβών, ενώ εξωτερικά δεν υπάρχει κάποια επιφανειακή προστασία. Το πλεονέκτημα της σύνδεσης μέσω συνδέσμων, βρίσκεται στο ότι δεν απαιτούνται επιτόπιες συγκολλήσεις, άρα χρειάζεται λιγότερος χρόνος για την εγκατάσταση. Τέλος η εγκατάσταση δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, με συγκεκριμένα μηχανήματα και εργαλεία και η επίχωση των συνδέσμων είναι αρκετά οικονομική.

Αγωγοί πτώσης από περιτυλιγμένες ίνες γυαλιού GRP (Glass Reinforced Plastic):

Η κατασκευή τους προϋποθέτει το περιτύλιγμα ινών γυαλιού σε σπειροειδή μορφή γύρω από στερεό κυλινδρικό πυρήνα σε διάφορες στρώσεις και κατευθύνσεις για την αύξηση της αντοχής σε αξονική και περιφερειακή φόρτιση. Από τη σκλήρυνση του υλικού δημιουργείται ένας ομοιόμορφης και λείας εσωτερικής επιφάνειας σωλήνας με υψηλή αντοχή και μικρές υδραυλικές απώλειες. Οι συγκεκριμένοι σωλήνες συνδέονται μεταξύ τους, σε τμήματα μήκους 6 μέτρων, μέσω συνδέσμων μορφής χιτωνίου με τη στεγανότητα να εξασφαλίζεται από τους δακτυλίους ή μέσω ελεύθερων φλαντζών που συνοδεύονται από περιλαίμια του ίδιου υλικού GRP και μεταξύ των φλαντζών παρεμβάλλεται παρέμβυσμα που εξασφαλίζει τη στεγανότητα. Η σύνδεση μέσω συνδέσμων μορφής χιτωνίου απαιτούν αξονική ώση και ειδικά εργαλεία. Τα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων σωλήνων είναι το μικρό βάρος και κόστος, η ευκολία και η ταχύτητα της εγκατάστασης, η ανθεκτικότητα στη διάβρωση για υγρά, όπως το νερό ή τα λύματα και τα μειονεκτήματά τους είναι η μικρή αντοχή σε εξωτερικά φορτία, η ανάγκη προσεκτικής επίχωσης, η μικρή ακαμψία και το περιορισμένο εύρος εφαρμογών.

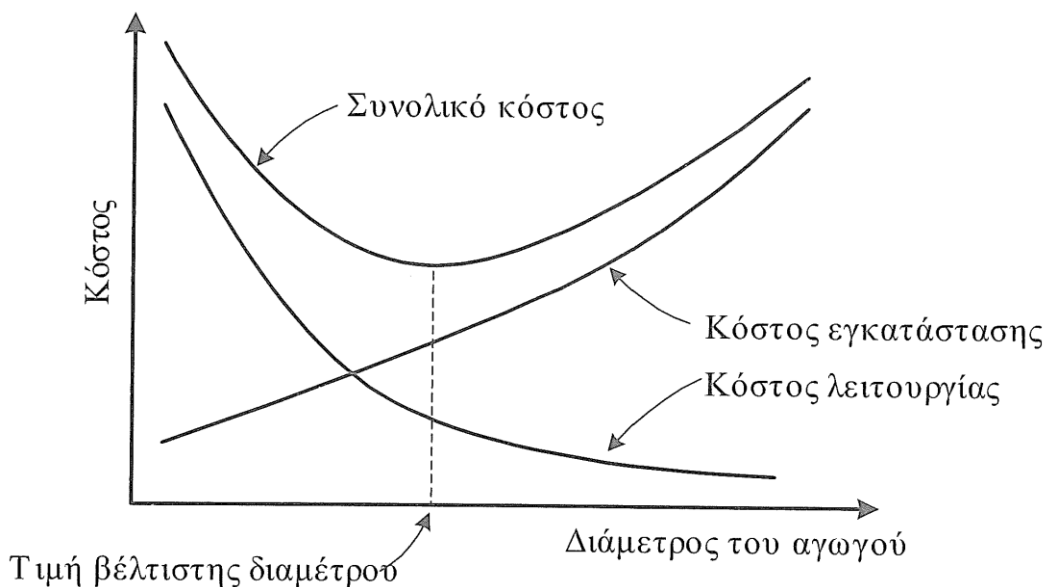
Αγωγοί πτώσης από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο HDPE (High Density Polyethylene Pipe):

Το πολυαιθυλένιο είναι πυκνότητας $\rho=940-965 \text{ kg/m}^3$ και έχει όριο πίεσης τα 220 bar. Είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό, δηλαδή ένα υλικό που μορφοποιείται όταν θερμαίνεται και σταθεροποιείται ξανά πολλές φορές, που θεωρείται κατάλληλο και για πόσιμο νερό. Παρουσιάζει υψηλή αντοχή στην επέκταση των ρηγματώσεων. Η σύνδεση των σωλήνων από πολυαιθυλένιο γίνεται με τη βοήθεια ειδικών εξαρτημάτων τύπου Gibault ή με συγκόλληση, η οποία γίνεται με δύο τρόπους: είτε με ηλεκτροσυγκόλληση, όπου δύο άκρα θερμαίνονται από ηλεκτρομούφα που περιέχει εσωτερικά σπειροειδή ηλεκτρική αντίσταση, είτε με μετωπική θερμική συγκόλληση, κατάλληλη για διαμέτρους άνω των 225 mm και πιέσεις λειτουργίας μεγαλύτερες από τα 12 bar. Η θέρμανση των δύο άκρων πραγματοποιείται με θερμαντική πλάκα και με τη χρήση σφιγκτήρων ψύχονται μέχρι να επιτευχθεί η συγκόλληση.

4.8.2 Επιλογή της διαμέτρου του αγωγού προσαγωγής

Η επιλογή της διαμέτρου του αγωγού προσαγωγής πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ταχύτητα της ροής που αντιστοιχεί στην παροχή της λειτουργίας μονάδας. Η τιμή της μέσης ταχύτητας της ροής επιλέγεται έτσι ώστε:

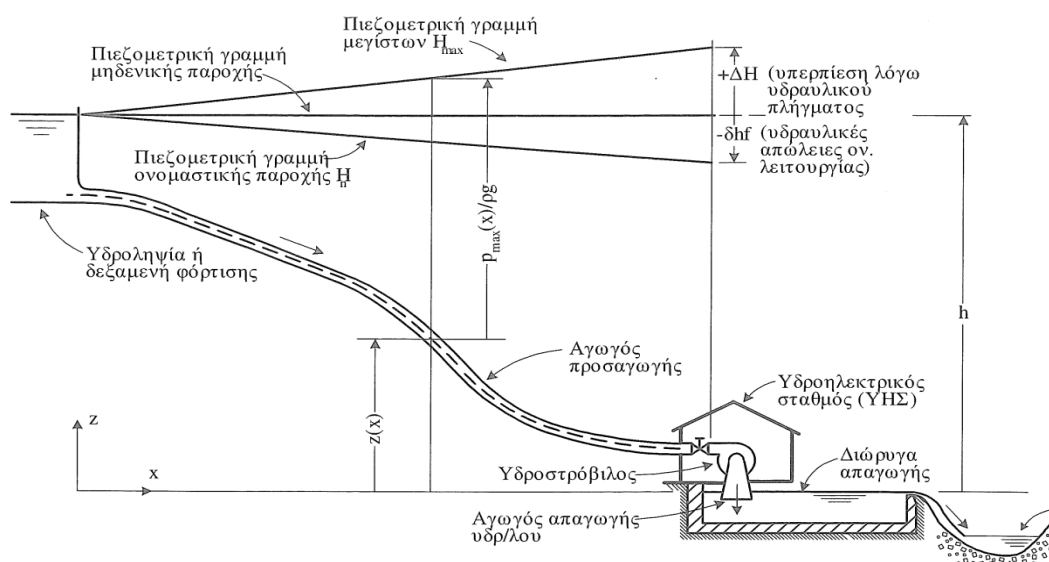
- η μέση τιμή να μην είναι μεγαλύτερη από μία μέγιστη, που λαμβάνεται από πίνακες ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση. Η μέση τιμή της ταχύτητας ροής εξαρτάται από τις επιτρεπόμενες υπερπίεσης και υποπίεσης που προκύπτουν κατά τη διάρκεια μεταβατικών δεδομένων και η τυπική οριακή τιμή για χαλυβωσολήνες είναι στα 4 m/s.
- να ικανοποιούνται τα ισχύοντα οικονομοτεχνικά κριτήρια από τα οποία προκύπτει η βέλτιστη τιμή της διαμέτρου της σωλήνωσης, με βάση τις υδραυλικές απώλειες και το κόστος κατασκευής. Ειδικότερα:
 - α. Γενικά υδραυλικές απώλειες προκαλούν τη μείωση της διαθέσιμης υψομετρικής διαφοράς και μειώνεται η ισχύς και η ικανότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, οι υδραυλικές απώλειες οδηγούν στη μείωση των εσόδων και συνήθως περιορίζονται στις 3% έως 5%, το πολύ 10% για τις μεγάλες υψομετρικές διαφορές με μεγάλα μήκη σωληνώσεων.
 - β. Το κόστος της σωλήνωσης είναι ανάλογο με την ονομαστική διάμετρό της.
- να μην πρέπει να αναπτύσσονται μεγάλες υποπίεσεις και υπερπίεσεις κατά τα μεταβατικά φαινόμενα και την πλήρη απόρριψη του φορτίου.



Σχήμα 4.46 Επιλογή της οικονομοτεχνικά βέλτιστης διαμέτρου. [Ε3, Σχήμα 4.54]

4.8.3 Υπολογισμός πάχους σωλήνα

Ο υπολογισμός του πάχους του σωλήνα βασίζεται στην απαραίτητη αντοχή που πρέπει να έχει, προκειμένου η αναπτυσσόμενη ορθή τάση που δημιουργείται εξαιτίας της εσωτερικής μέγιστης υπερπίεσης, να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τάση του υλικού του αγωγού. Η μέγιστη πίεση στον αγωγό προσαγωγής πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων και ειδικότερα κατά την απόρριψη του φορτίου. Όλα τα εξαρτήματα του αγωγού, όπως είναι οι βάνες και οι φλάντζες, επιλέγονται με βάση την αντοχή τους και ο έλεγχος αυτής, είναι εξαιρετικά δύσκολος. Συνήθως γίνεται μέσω πιστοποιητικών εργαστηριακών δοκιμών του κατασκευαστή, εξασφαλίζοντας η ονομαστική τους πίεση να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη πίεση του δικτύου. Για τα ισότροπα υλικά, όπως είναι τα GRP, δεν πραγματοποιείται ο υπολογισμός της αντοχής, αλλά η επιλογή του πάχους καθορίζεται από τον κατάλογο που πιστοποιεί την αντοχή τους. Για τους σωλήνες από χάλυβα πραγματοποιείται υπολογισμός του πάχους με τέτοιον τρόπο ώστε, η αναπτυσσόμενη ορθή τάση να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη του υλικού. Έτσι, υπολογίζεται το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος και στη συνέχεια επιλέγεται το αμέσως μεγαλύτερο τυποποιημένο πάχος. Κατά τον υπολογισμό, λαμβάνεται υπόψη και η μειωμένη αντοχή που παρουσιάζεται κατά τη ραφή συγκόλλησης των σωλήνων μέσω ενός συγκεκριμένου συντελεστή. Η τιμή που προκύπτει προσαυξάνεται εξαιτίας της πιθανής διάβρωσης του σωλήνα, της φύσης του υγρού, της διάρκειας ζωής και της δυνατότητας προσπέλασης για συντήρηση και επίσκεψη.



Σχήμα 4.47 Μηκοτομή αγωγού προσαγωγή ΥΗΕ, πιεζομετρική και στατική πίεση κατά μήκος του αγωγού προσαγωγής. [Ε3, Σχήμα 4.55α]

Το απαραίτητο πάχος του σωλήνα όταν υπάρχει εσωτερική στατική πίεση, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e = e_0 + e_1 + e_2 \quad (4.17)$$

όπου:

e_1 : η αντοχή ανομοιομορφίας ελάσματος κατασκευής σωλήνα,

e_2 : η ανοχή σε διάβρωση – φθορά (1 mm),

e_0 : το ελάχιστο πάχος που απαιτείται για να μην υπερβαίνει η αναπτυσσόμενη ορθή τάση την επιτρεπόμενη τάση $\sigma_{\varepsilon\pi}$ του υλικού του σωλήνα με συντελεστή ασφαλείας $k_1 \approx 1,7$.

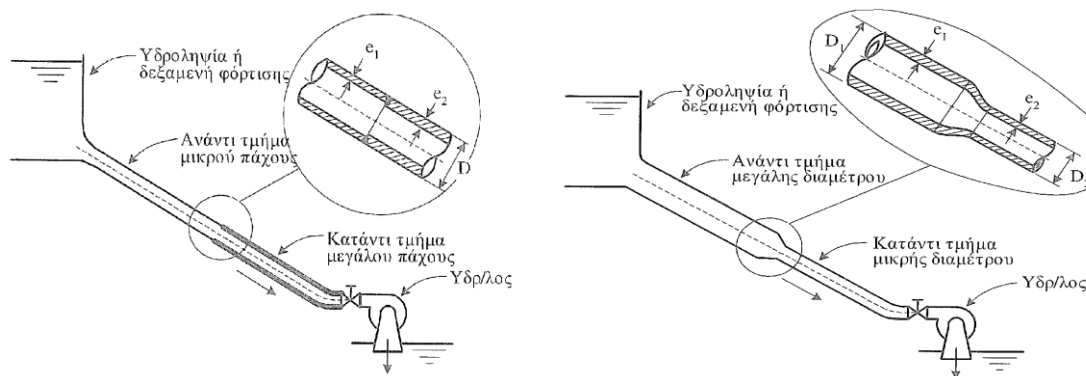
$$e_0 = \frac{d_2 \cdot p}{2k_2 \cdot \frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{k_1}} \quad (4.18)$$

όπου:

d_2 : η εσωτερική διάμετρος σωλήνα,

p : η εσωτερική πίεση ως προς την εξωτερική,

k_2 : ο συντελεστής που εκφράζει την αντοχή της ραφής 0,7 – 0,9 για ραφή και 0,1 χωρίς ραφή.



Σχήμα 4.48 Αγωγός μη ομοιόμορφου πάχους (αριστερά) και μη ομοιόμορφης διαμέτρου και πάχους δεξιά. [E3, Σχήμα 4.55β & 4.55γ]

4.8.4 Δυνάμεις και στήριγματα

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μία σωλήνωση πρέπει να υπολογίζονται με σκοπό τον έλεγχο της αντοχής του αγωγού στη δυσμενέστερα φορτισμένη διατομή. Επιπλέον, δυνάμεις και ροπές αναπτύσσονται και στα σημεία στήριξης. Για κάθε αλλαγή κλίσης αναπτύσσονται δυνάμεις από την εσωτερική

πίεση του αγωγού και τη μεταβολή της ορμής του νερού. Υπολογίζονται με το θεώρημα της ορμής σε επιφάνεια αναφοράς που περιβάλλει την καμπύλη και είναι ίσες με:

$$F_{mx} = \rho \cdot Q(c_{x1} - c_{x2}) = \rho \cdot Q^2 \cdot (\cos \theta_2 + \cos \theta_1)/A \quad (4.19)$$

$$F_{my} = \rho \cdot Q(c_{y1} - c_{y2}) = \rho \cdot Q^2 \cdot (\sin \theta_2 + \sin \theta_1)/A \quad (4.20)$$

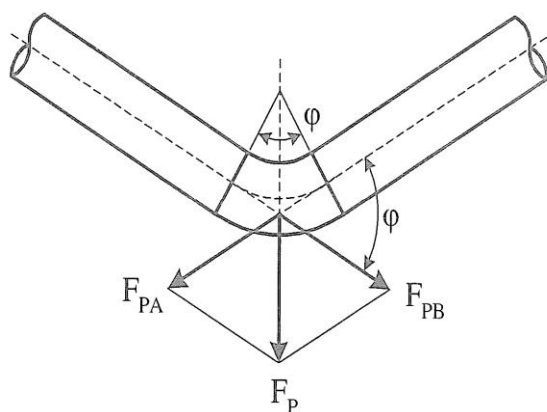
όπου:

ρ : η πυκνότητα του διακινούμενου ρευστού,

Q : η παροχή όγκου,

c_x & c_y : οι συνιστώσες της ταχύτητας της ροής κατά τους άξονες x και y στο ανάντη και κατόντη τμήμα,

θ_1 & θ_2 : οι γωνίες του σχήματος 4.50.

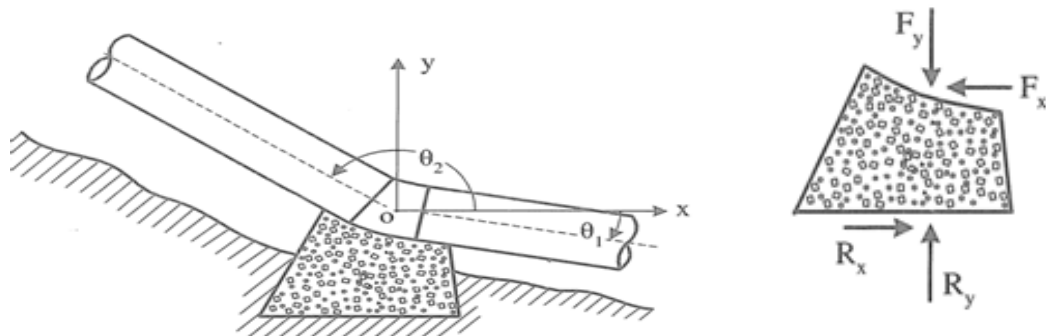


Σχήμα 4.49 Συνισταμένη δύναμη F_P , λόγω εσωτερικής πίεσης. [E3, Σχήμα 4.56β]

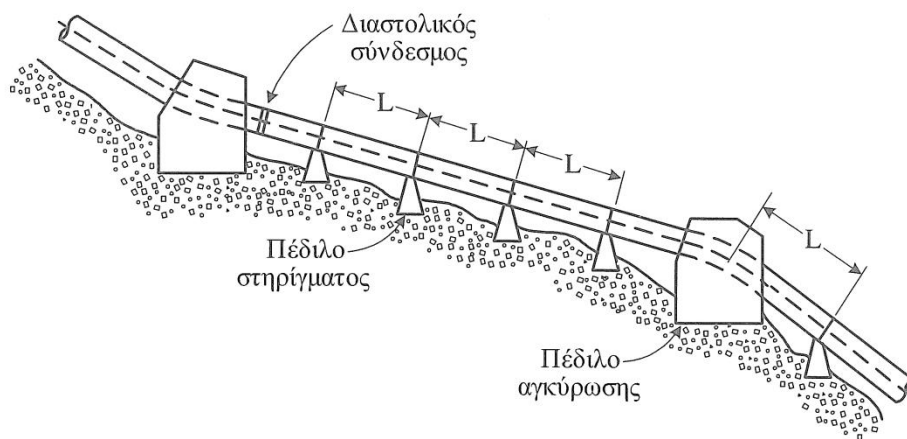
Ομοίως, προκύπτουν και για την εσωτερική στατική πίεση, τη μεταβολή της ορμής σε αλλαγή της διατομής του αγωγού (συστολή), σε διακλάδωση, σε βάνια και στον υδροστρόβιλο. Συνήθως, οι δυνάμεις εξαιτίας της εσωτερικής πίεσης του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που οφείλονται στην αλλαγή ορμής του υγρού.

Επιπλέον, δυνάμεις αναπτύσσονται εξαιτίας της αλλαγής της θερμοκρασίας του αγωγού, λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, του διακινούμενου ρευστού ή της ακτινοβολίας του ηλίου, φαινόμενα που προκαλούν γραμμικές διαστολές. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειωθούν σημαντικά αν η σωλήνωση αποκτήσει τη δυνατότητα απορρόφησης των θερμικών διαστολών, είτε μέσω των κατάλληλων συνδέσμων, είτε με την αύξηση της ελαστικότητας της σωλήνωσης.

Τέλος, τα στηρίγματα του αγωγού έχουν στόχο να παραλάβουν τα φορτία που αναπτύσσονται σε αυτόν από το ίδιο βάρος, το βάρος του υγρού που εμπεριέχεται στη σωλήνωση, την εσωτερική πίεση και τις δυνάμεις λόγω της μεταβολής της ορμής. Επιπλέον, φορτία αναπτύσσονται και από τις θερμικές διαστολές, την άνωση για αγωγούς που στηρίζονται στον πυθμένα ή το βυθό θαλάσσας ή λίμνης, τον πλευρικό άνεμο, τη σεισμική δραστηριότητα. Διακρίνονται σε απλά στηρίγματα, τα οποία επιτρέπουν στον αγωγό να αλλάξει κλίση και περιορίζουν τις μετατοπίσεις κάθετα προς τον άξονά του, και στις αγκυρώσεις, που εκτός από τις δυνάμεις, παραλαμβάνουν και ροπές μη επιτρέποντας ουδεμία περιστροφή ή μετακίνηση του αγωγού.



Σχήμα 4.50 Δυνάμεις σε αλλαγή διεύθυνσης λόγω της εσωτερικής πίεσης και της αλλαγής της ορμής του ρευστού. [Ε3, Σχήμα 4.56α]



Σχήμα 4.51 Υπέργειος χαλύβδινος αγωγός – διάταξη αγκυρώσεων και στηριγμάτων. [Ε3, Σχήμα 4.56γ]

4.8.5 Υδραυλικές απώλειες

α) Γραμμικές απώλειες

Σε ευθύ σωλήνα κυκλικής διατομή στον οποίο υπάρχει διακινούμενο νερό, οι υδραυλικές απώλειες δh (πτώση της πίεσης σε m στήλης διακινούμενου υγρού) σε μήκος L, δίνονται από τη σχέση των Darcy-Weisbach:

$$\delta h = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (4.21)$$

όπου:

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας,

d : η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα, ρ : η πυκνότητα του διακινούμενου υγρού
κινηματικής συνεκτικότητας ν ,

c : η μέση ταχύτητα της ροής στον αγωγό,

λ : ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών που δίνεται κατά τους Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71d} \right] \quad (4.22)$$

όπου:

ε : η απόλυτη τραχύτητα σωλήνα,

Re : ο αριθμός Reynolds, $Re = (c \cdot d_H) / \nu$, με d_H η υδραυλική διάμετρος που ταυτίζεται με τη d για σωλήνα στρογγυλής διατομής.

β) Απώλειες σε ειδικές διαμορφώσεις και εξαρτήματα σωλήνων

Οι υδραυλικές απώλειες που προκαλούνται από ειδικές διαμορφώσεις σε σωλήνες ή εξαρτήματα, όπως είναι οι βάνες, οι σύνδεσμοι, κλπ, ονομάζονται εντοπισμένες αντιστάσεις και εκφράζονται σε mΣΥ:

$$\delta h = \zeta \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (4.23)$$

όπου:

ζ : ο συντελεστής απωλειών τοπικής αντίστασης.

γ) Διακλάδωση κυκλικής διατομής

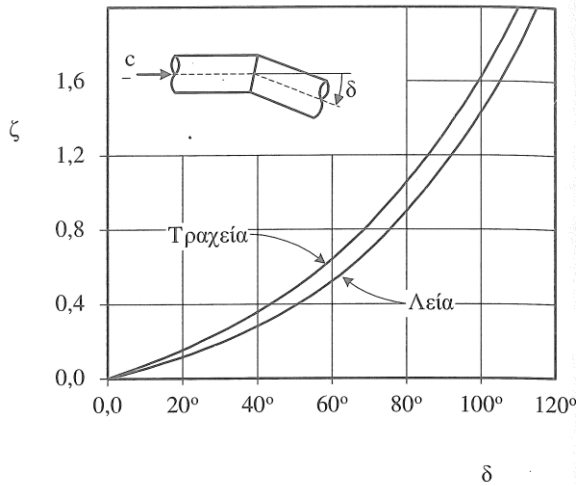
Με Q συμβολίζεται η παροχή στον κύριο κλάδο, με Q_z η παροχή στη διακλάδωση, με ζ η τιμή του συντελεστή απωλειών στον κατ' ευθεία κλάδο και με ζ_z κατά τη διακλάδωση.

δ) Καμπύλη γωνίας α

Η τιμή του συντελεστή αντίστασης ζ_x , εξαρτάται από την τιμή της γωνίας α , την καμπυλότητα r (τον λόγο r/d , όπου d_x , η εσωτερική διάμετρος της καμπύλης), και την τραχύτητα των τοιχωμάτων.

Διαμόρφωση	Q_z/Q	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
	ζ_z	0,96	0,88	0,89	0,96	1,10	1,29
	ζ	0,05	-0,08	-0,04	0,07	0,21	0,35
	ζ_z	-1,04	-0,40	0,10	0,47	0,73	0,92
	ζ	0,06	0,18	0,30	0,40	0,50	0,60
	ζ_z	0,98	0,79	0,64	0,57	0,60	0,75
	ζ	0,05	-0,05	-0,02	0,07	0,20	0,34
	ζ_z	-0,92	-0,30	0,13	0,40	0,57	0,66
	ζ	0,04	0,24	0,30	0,25	0,10	-0,19
	ζ_z	0,90	0,68	0,50	0,38	0,35	0,48
	ζ	0,04	-0,06	-0,04	0,07	0,20	0,33
	ζ_z	-0,90	-0,73	0,00	0,22	0,37	0,38
	ζ	0,05	0,18	0,19	0,06	-0,18	-0,54

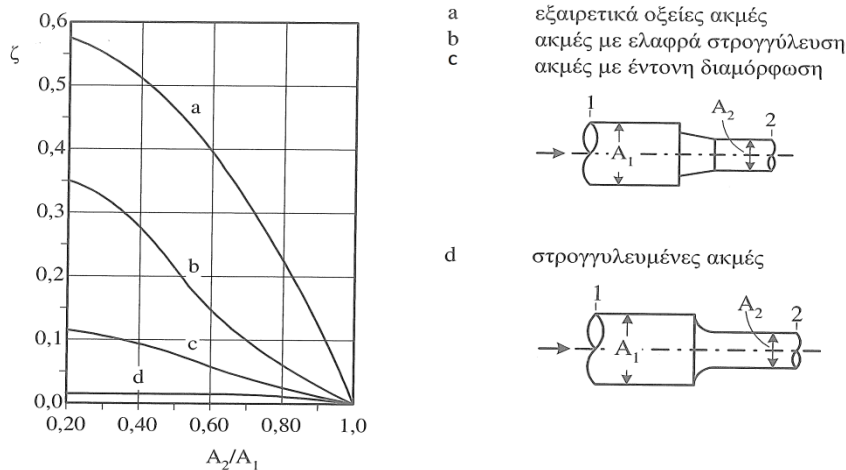
Πίνακας 4.3 Συντελεστής απωλειών σε διακλάδωση κυκλική διατομής [Ε3, Πίνακας 4.13]



Σχήμα 4.52 Συντελεστής αντίστασης για αλλαγή κλίσης χωρίς καμπυλότητα [E3, Σχήμα 4.57]

ε) Συστολή

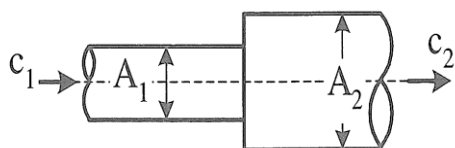
Η τιμή του συντελεστή ζ εξαρτάται από το λόγο των διατομών A_2/A_1 και τη διαμόρφωση της συστολής.



Σχήμα 4.53 Διαμορφώσεις και απώλειες σε συστολές. [E3, Σχήμα 4.59]

στ) Διεύρυνση της ροής

Τοπικές αντιστάσεις / συντελεστής απωλειών ζ διαστολής & στομιών (προεξέχουσα 0,75, απότομων άκρων 0,50, στρογγυλεμένων 0,01)



Σχήμα 4.54 Απότομη διεύρυνση της ροής. [E3, Σχήμα 4.60]

D ₂ /D ₁	2,00	1,67	1,43	1,25	1,11
ζ'	0,50	0,48	0,42	0,32	0,18

	D ₁ /D ₂	2,00	1,67	1,43	1,25	1,11
ζ'	α=8°	0,83	0,79	0,70	0,52	0,28
	α=15°	0,74	0,72	0,65	0,48	0,26
	α=20°	0,67	0,67	0,61	0,45	0,25

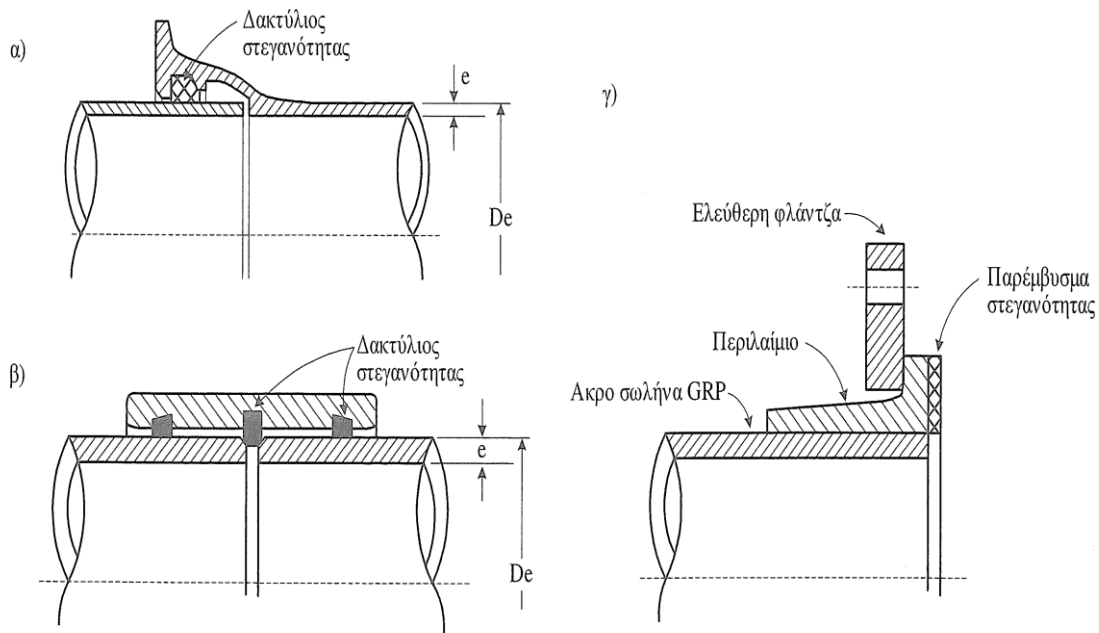
Πίνακας 4.4 Απότομη διεύρυνση (πάνω) και κωνική (κάτω) [E3, Πίνακας 4.15]

4.8.6 Εξαρτήματα αγωγού προσαγωγής

Ο αγωγός προσαγωγής κατασκευάζεται από τμήματα σωλήνων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους, είτε με ηλεκτροσυγκόλληση για την περίπτωση των χαλυβωσωλήνων, είτε μέσω ειδικών συνδέσμων, ανάλογα με το είδος των σωλήνων. Αυτοί οι ειδικοί σύνδεσμοι έχουν, επιπλέον, τη δυνατότητα παραλαβής μικρής αξονικής μετατόπισης και γωνιακής απόκλισης, με αποτέλεσμα να καθιστά την κατασκευή της σωλήνωσης πιο εύκολη. Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές γίνονται με συνδέσμους τύπου Gibault και Johnson στις περιπτώσεις σωλήνων από χάλυβα και σωλήνων από σκληρό PVC.

Η στεγανότητα τους επιτυγχάνεται με τη συμπίεση δύο ελαστικών στεγανωτικών δακτυλίων ανάμεσα σε ένα κεντρικό χιτώνιο και δύο στεφάνες, οι οποίες συσφίγγονται με εξωτερικούς κοχλίες, δηλαδή τις ντίτζες. Το υλικό των στεγανωτικών δακτυλίων επιλέγεται σύμφωνα με τη φύση του διακινούμενου υγρού και τη θερμοκρασία του. Φυσικά, η σύνδεση όλων των τμημάτων με ειδικούς συνδέσμους είναι αρκετά δαπανηρή και για αυτό το λόγο η χρήση του, συνήθως, περιορίζεται στα σημεία που απαιτείται η απορρόφηση των θερμικών δακτυλίων ή γωνιακών αποκλίσεων. Έτσι, η σύνδεση με φλάντζα εφαρμόζεται μόνο στις θέσεις, όπου προβλέπεται σύνδεση με όργανο που θα πρέπει να αφαιρείται, όπως για παράδειγμα είναι η βάνα.

Για την αλλαγή κλίσεων του αγωγού προσαγωγής πραγματοποιείται, είτε παρεμβολή τόξου τυποποιημένης καμπύλης μεταξύ δύο ευθύγραμμων τμημάτων, είτε συγκόλληση των τμημάτων με φάλτσο κόψιμο. Η χρήση του τόξου τυποποιημένης καμπύλης έχει μεγαλύτερη στιβαρότητα και μικρότερες υδραυλικές απώλειες, όμως παρουσιάζει αρκετά υψηλό κόστος, ειδικά για μεγάλες τιμές της ονομαστικής διαμέτρου. Για αυτό το λόγο αποφεύγεται η εφαρμογή του για κλίσεις μικρότερες από 15°.



Σχήμα 4.55 α) Σύνδεση σωλήνων χυτοσιδήρου (αρσενικό – θηλυκό), β) σύνδεση με χιτώνιο για σωλήνες GRP, γ) σύνδεση με ελεύθερη φλάντζα για σωλήνες GRP [E3, Σχήμα 4.62]

4.8.7 Διάταξη αγωγού πτώσης

Για μικρές διαμέτρους ο αγωγός προσαγωγής μπορεί να τοποθετηθεί υπέργειος με αρκετά μειονεκτήματα, όπως είναι η υποβάθμιση του τοπίου, η έκθεση σε κατολισθήσεις βράχων, η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και στις θερμοκρασιακές μεταβολές, οι θερμικές διαστολές που οδηγούν στην ανάπτυξη σημαντικών δυνάμεων στα στηρίγματα και τις πακτώσεις, οι σεισμικές δονήσεις. Για τους παραπάνω λόγους οι αγωγοί προσαγωγής μεσαίας και μεγάλης διαμέτρου κατασκευάζονται, ως επί το πλείστον, υπόγειοι μέσα σε όρυγμα.

Οι υπόγειοι αγωγοί προσαγωγής επικάθεται σε στρώμα άμμου που διαμορφώνεται στον πυθμένα του ορύγματος, έτσι ώστε οι μεγάλες πέτρες να μην καταπονούν τα τοιχώματα του σωλήνα. Μερικά μειονεκτήματα των υπόγειων αγωγών προσαγωγής είναι οι σεισμικές δονήσεις, η άνωση, το κόστος του σε σχέση με τον υπέργειο και η δυσκολία συντήρησής του.



Σχήμα 4.56 Υπόγειος αγωγός μικρού υδροηλεκτρικού Κρύας Βρύσης, Φθιώτιδα με ισχύ 0,735 MW, 2006. [I13]



Σχήμα 4.57 Υπέργειος αγωγός μικρού υδροηλεκτρικού Θερμόρεμα, Σπερχειάδα Φθιώτιδας με ισχύ 1,95 MW, 2003. [I13]

4.9 Αγωγός εξόδου

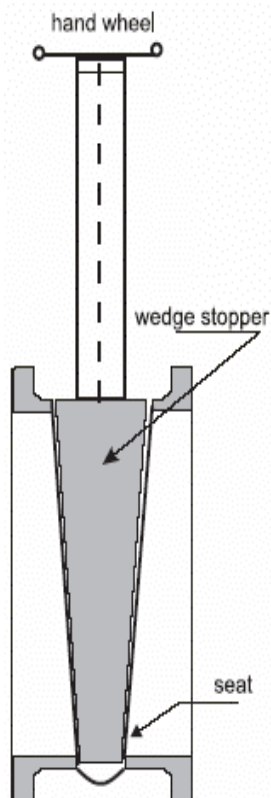
Το νερό αφού περάσει από τον υδροστρόβιλο, επιστρέφει στον ποταμό μέσω ενός μικρού καναλιού που ονομάζεται αγωγός εξόδου. Οι υδροστρόβιλοι δράσης μπορούν να έχουν σχετικά υψηλές ταχύτητες εξόδου, οπότε ο αγωγός εξόδου πρέπει να είναι σχεδιασμένος, έτσι ώστε να διασφαλίζει ότι δεν θα κινδυνεύσει το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Θα πρέπει να παρέχεται προστασία από σκυρόδεμα μεταξύ του σταθμού παραγωγής ενέργειας και του υδατορεύματος. Με έναν στρόβιλο αντίδρασης, το επίπεδο του νερού στον αγωγό εξόδου επηρεάζει τη λειτουργία του στροβίλου και πιο συγκεκριμένα την έναρξη της σπηλαίωσης. Αυτό το επίπεδο καθορίζει επίσης, το διαθέσιμο καθαρό ύψος και σε συστήματα χαμηλής υψομετρικής διαφοράς μπορεί να έχει καθοριστική επίδραση στα οικονομικά αποτελέσματα.

4.10 Όργανα διακοπής

Αγωγός όργανα διακοπής: Τα όργανα διακοπής είναι τα θυροφράγματα στην περίπτωση διώρυγας με ελεύθερη επιφάνεια ή δεξαμενής και οι δικλείδες ή οι βάνες στην περίπτωση των κλειστών αγωγών. Τα όργανα αυτά μπορεί να έχουν ρυθμιστικό ρόλο ή να είναι τύπου ON-OFF, να βρίσκονται δηλαδή είτε στην πλήρως ανοιχτή, είτε στην πλήρως κλειστή θέση.

Βάνα: Στα μικρά ΥΗΕ η βάνα τοποθετείται στον αγωγό προσαγωγής ακριβώς ανάντη του υδροστροβίλου, είναι πάντα ανοιχτή κατά τη λειτουργία του και κλείνει μετά το σταμάτημα της μονάδας. Ρόλος της βάνας είναι να σταματά τη ροή όταν ο υδροστρόβιλος είναι εκτός λειτουργίας, προκειμένου να μπορεί να γίνει συντήρησή του. Η επιλογή του τύπου της βάνας εξαρτάται από τη στατική πίεση, δηλαδή την τιμή της υδραυλικής πτώσης.

Θυρόφραγμα: Ρόλος του είναι η διακοπή ή η ρύθμιση της παροχής στη διώρυγα προσαγωγής, στην είσοδο της διάταξης υδροληψίας και στην είσοδο της δεξαμενής φόρτισης. Τοποθετούνται στην είσοδο του αγωγού απαγωγής του υδροστροβίλου, όταν αυτός είναι τοποθετημένος χαμηλότερα από τη στάθμη απαγωγής, ώστε να είναι δυνατή η επίσκεψη και η συντήρησή του.



Σχήμα 4.58 Θυρόφραγμα & Βάνα σε σχήμα πεταλούδας. [Ξ1, Figure 5.25 & Photo 5.13]

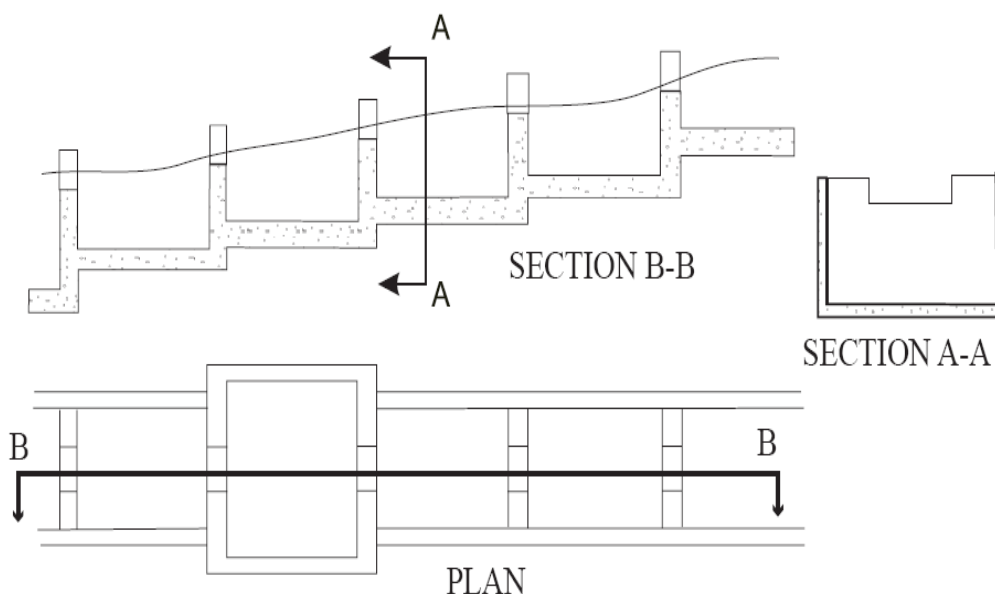
4.11 Λοιπά στοιχεία

4.11.1 Ιχθυόσκαλα/Γέφυρα ανόδου ψαριών

Η ανάντη διέλευση μπορεί να παρέχεται με διάφορα μέσα: σκάλες ψαριών, ανελκυστήρες (ανελκυστήρες ή κλωβοί) και αντλίες. Οι αντλίες είναι μια πολύ αμφιλεγόμενη μέθοδος. Αυτές οι τεχνικές προσεγγίσεις είναι μάλλον ασυνήθιστες σε μικρά συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας. Μια μεγάλη ποικιλία κατασκευών και σχεδιασμού συστημάτων παράκαμψης ψαριών είναι η κύρια προσέγγιση στα μικρά έργα. Τα οικονομοτεχνικά κριτήρια για την τοποθεσία και τα είδη καθορίζουν ποια λύση είναι η πιο κατάλληλη.

Τα συστήματα παράκαμψης ψαριών (φυσικός κολπίσκος χωρίς σκαλοπάτια, πισίνα και υδατοφράκτης, Denil-pass, κάθετες σχισμές, υβριδικά κ.λπ.) μπορούν να σχεδιαστούν για να φιλοξενήσουν ψάρια που είναι κολυμβητές βυθού, κολυμβητές επιφανείας ή κολυμβητές στομιών. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιούν όλα τα είδη ψαριών σκάλες. Οι ανελκυστήρες ψαριών και οι κλειδαριές προτιμούνται για ψάρια που δεν χρησιμοποιούν σκάλες. Το πιο συνηθισμένο πέρασμα ψαριού είναι το πέρασμα ψαριού υδατοφρακτών και δεξαμενές, μια σειρά από πισίνες με

νερό που ρέει από πισίνα σε πισίνα πάνω από ορθογώνιους υδατοφράκτες. Οι δεξαμενές έπειτα παίζουν διπλό ρόλο: παρέχουν χώρους ανάπαυσης και διαλύουν την ενέργεια του νερού που κατεβαίνει μέσω της σκάλας. Το μέγεθος και το ύψος των δεξαμενών πρέπει να σχεδιαστούν ανάλογα με το χειρισμό των ψαριών.



Σχήμα 4.59 Σχήμα από ορθογωνικά μικρά φράγματα. [Ξ1, Figure 7.6]

4.11.2 Ιχθυόσκαλα /Γέφυρα καθόδου ψαριών

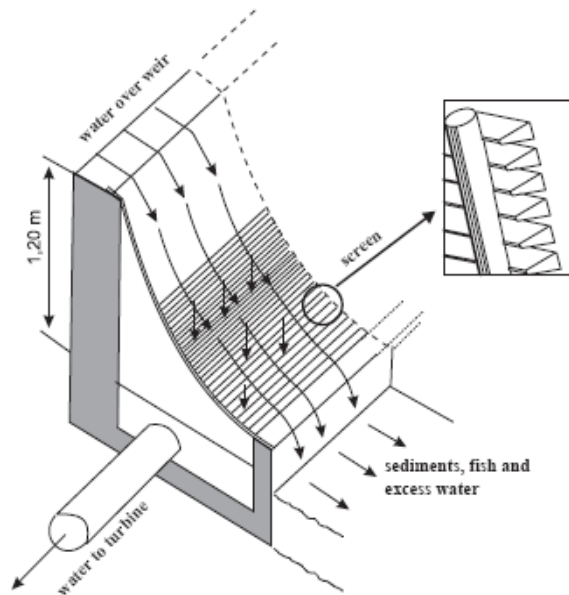
Στο παρελθόν ψάρια έτυχε να περάσουν από τον υδροστρόβιλο. Ο θάνατος ψαριών που σχετίζεται με αυτή τη μέθοδο φτάνει έως το 40%, ανάλογα με το σχεδιασμό του στρόβιλου και πιο συγκεκριμένα από την περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα. Σε ένα στρόβιλο Francis, αυξάνοντας την ταχύτητα του περιφερειακού δρομέα από 12 m/s σε 30 m/s, αυξάνει και το ποσοστό θνησιμότητας από 5% σε 35%.



Σχήμα 4.60 Πέρασμα ψαριών [Ξ1, Figure 7.13]

Οι στρόβιλοι Francis, λόγω των κατασκευαστικών τους χαρακτηριστικών προκαλούν μεγαλύτερη θνησιμότητα από τους στρόβιλους Kaplan. Οι βολβοειδείς μειώνουν τη θνησιμότητα σε λιγότερο από 5%. Προφανώς, το ύψος δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Ένα στρόβιλος που λειτουργεί με ύψος 12 m παράγει την ίδια θνησιμότητα με εκείνον που λειτουργεί στα 120 m. Η ανύψωση του δρομέα πάνω από τον αγωγό εξόδου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, πέρα από το αποτέλεσμα της σπηλαιώσης. Όσο πιο αποτελεσματική είναι η λειτουργία του στρόβιλου, τόσο λιγότερη θνησιμότητα παράγει. Ένας στρόβιλος που λειτουργεί με ονομαστική ισχύ προκαλεί συνεπώς λιγότερη θνησιμότητα από έναν που λειτουργεί με μερική φόρτιση. Μηχανικοί τραυματισμοί από σύγκρουση σε στερεά σώματα - πτερύγια οδήγησης ή πτερύγια στρόβιλου, έκθεση σε υποπίεσεις και φαινόμενα διάτμησης που παράγονται στις διασταυρώσεις ροών υψηλής ταχύτητας σε αντίθετες κατευθύνσεις είναι οι κύριες αιτίες θνησιμότητας.

Πρόσφατα, χρησιμοποιήθηκε μια καινοτόμος οθόνη στατικής πρόσληψης αυτό-καθαριζόμενης, που δεν χρειάζεται ισχύ, για την προστασία των ψαριών. Η σχάρα χρησιμοποιεί το φαινόμενο Coanda, ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται από ένα ρευστό, όπου η ροή τείνει να ακολουθεί την επιφάνεια ενός στερεού αντικειμένου που τοποθετείται στη διαδρομή του. Επιπλέον, το σύρμα διατομής σχήματος V έχει κλίση προς τις ράβδους στήριξης, παράγοντας πόλωση/αντιστάθμιση, τα οποία προκαλούν μια διάτμηση κατά μήκος της επιφάνειας της οθόνης.



Σχήμα 4.61 Διάταξη Coanda [Ξ1, Figure 7.12]

Το νερό ρέει στο σύστημα συλλογής του υδροστροβίλου μέσω των σχισμών σχάρας, οι οποίες συνήθως έχουν πλάτος 1 mm. 90% των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων, των οποίων η ταχύτητα έχει αυξηθεί στην πλάκα επιτάχυνσης, περνούν πάνω από τη σχάρα, παρέχοντας έτσι εξαιρετική προστασία για το στρόβιλο. Η υδρόβια ζωή εμποδίζεται, επίσης από την είσοδο του στροβίλου μέσω των αυλακώσεων. Στην πραγματικότητα, η ομαλή επιφάνεια της οθόνης από ανοξείδωτο χάλυβα παρέχει μια εξαιρετική δίοδο για παράκαμψη ψαριών



Σχήμα 4.62 Εφαρμογή διάταξης Coanda [Ξ1, Photo 7.17]

4.12 Συμπεράσματα

Τα έργα του πολιτικού μηχανικού αποτελούν ένα από τα βασικότερα στοιχεία για την ορθή κατασκευή ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου. Το φράγμα, ο ταμιευτήρας, ο υπερχειλιστής, αλλά και η λεκάνη ηρεμίας είναι μερικά από τα κυριότερα έργα κατασκευής από την πλευρά του πολιτικού μηχανικού. Η μελέτη της υδροληψίας, ενδεχομένως, να αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι της μελέτης του, αφού χωρίς αυτήν δε μπορεί να υπάρξει η διεκπεραίωση του έργου. Στη συνέχεια, η διώρυγα, η δεξαμενή φόρτισης, αλλά και ο αγωγός προσαγωγής και εξόδου με όλα τα απαραίτητα όργανα διακοπής σε περιπτώσεις ανάγκης, είναι, επιπλέον αντικείμενο μελέτης του πολιτικού μηχανικού. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πανίδας και της χλωρίδας του τόπου, στον οποίο πρόκειται να κατασκευαστούν όλα τα παραπάνω έργα.

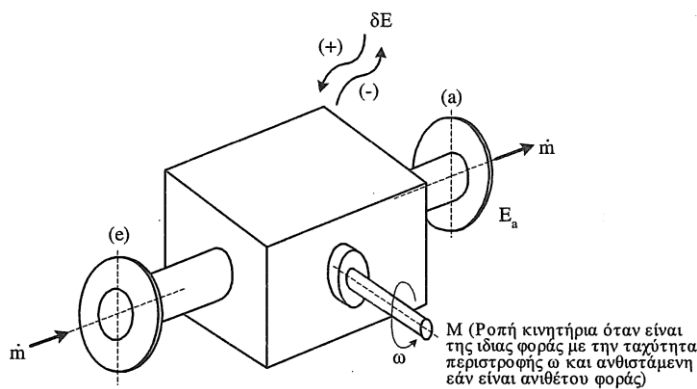
5.1 Αρχή λειτουργίας υδροστροβίλων

5.1.1 Ενεργειακός υπολογισμός

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά μία στροβιλομηχανή, όπου με e συμβολίζεται η συμβατική διατομή εισόδου στη μηχανή και με a η συμβατική διατομή εξόδου της διερχόμενης παροχής μάζας \dot{m} του ρευστού. Σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας η παροχή που εισέρχεται στη διατομή εισόδου θα είναι ίση με αυτή που εξέρχεται, θεωρώντας μηδενικές τις διαρροές του ρευστού προς τον εξωτερικό χώρο. Στη συνέχεια, από τη μηχανή εξέρχεται η άτρακτος που συνδέεται με την κινητήρια μηχανή στις περιπτώσεις εργοστροβιλομηχανής ή τη μηχανή που απορροφά την ισχύ όπως είναι για παράδειγμα η γεννήτρια στις περιπτώσεις του στροβίλου. Η άτρακτος περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω (rad/sec) και αναπτύσσει μηχανική ροπή M . Έτσι, η πραγματική ισχύς την άτρακτο που προκύπτει είναι ίση με:

$$P = M \cdot \omega \quad (5.1)$$

Στη συνέχεια εξετάζεται η λειτουργία μηχανής η οποία βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση, χωρίς να πραγματοποιείται δηλαδή εξέταση των μεταβατικών φαινομένων εκκίνησης ή κράτησης. Κατά συνέπεια όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως είναι η παροχή μάζας \dot{m} , η ροπή στην άτρακτο M και η ταχύτητα περιστροφής ω δε μεταβάλλονται με το χρόνο.



Σχήμα 5.1 Ενεργειακός ισολογισμός στροβιλομηχανής [E8, Σχήμα 1.2]

Η ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού που εναλλάσσεται στη μηχανή συμβολίζεται με E (Nt·m/kg) και σύμφωνα με τη μηχανική των ρευστών η ενεργειακή εξίσωση ή η εξίσωση Bernoulli εκφράζεται από τη σχέση:

$$E = \frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} + U + gz \quad (5.2)$$

όπου:

c : το μέτρο ταχύτητας του εξεταζόμενου στοιχείου του ρευστού,

p : η στατική του πίεση,

ρ : η πυκνότητα,

z : το γεωδαιτικό ύψος ως προς κάποια αυθαίρετη στάθμη αναφοράς,

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Πιο συγκεκριμένα:

$\frac{c^2}{2}$: ο όρος αυτός συμβολίζει την κινητική ενέργεια,

$\frac{p}{\rho}$: ο όρος αυτός συμβολίζει την ενέργεια εντατικής κατάστασης,

gz : ο όρος αυτός συμβολίζει δυναμική ενέργεια λόγω βαρύτητας,

U : η εσωτερική ενέργεια που χαρακτηρίζεται από την απόλυτη θερμοκρασία T του εξεταζόμενου ρευστού.

Γενικά φαίνεται πως η ολική ενέργεια E των στοιχείων του ρευστού εξαρτάται και από τα κινηματικά χαρακτηριστικά της ροής. Συμβολίζοντας με E_e και E_a τις ανά μονάδα μάζας ενέργειας στις διατομές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, η ανά μονάδα μάζας μεταβολή της ολικής ενέργεια του ρευστού, ανάμεσα στη διατομή εισόδου και εξόδου, που μπορεί να εναλλαχθεί με μηχανική ενέργεια είναι ίση με:

$$E_e - E_a \pm \delta E = \left(\frac{c_e^2}{2} + \frac{p_e}{\rho} + U_e + gz_e \right) - \left(\frac{c_a^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + U_a + gz_a \right) \pm \delta E \quad (5.3)$$

Όπου με δE θεωρείται η εναλλαγή ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας από το περίβλημα της μηχανής, αφού έχει γίνει αναγωγή στη μονάδα μάζας του διερχόμενου ρευστού. Αν υπάρχει απώλεια ενέργειας από τη μηχανή προς το περιβάλλον, το δE είναι αρνητικό. Θετικό, για την αντίθετη περίπτωση, σημαίνει πρόσδοση ενέργειας από το περιβάλλον προς τη μηχανή, δηλαδή το περίβλημα της μηχανής να έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος, ενώ στην πρώτη περίπτωση το περίβλημα της μηχανής να έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος. Γενικά όμως, στην περίπτωση των στροβιλομηχανών ο όρος αυτός θεωρείται αμελητέος, γιατί ακόμα και στις περιπτώσεις που θα υπάρχει δυνατότητα έντονης ενεργειακής συναλλαγής μέσω

του περιβλήματος, το περίβλημα της μηχανής περιβάλλεται με θερμική μόνωση. Επομένως, για αυτούς τους λόγους λαμβάνεται $\delta E = 0$.

Στην περίπτωση του στροβίλου, όπου και αφορά την παρούσα εργασία, η ισχύς που εναλλάσσεται με μηχανική ενέργεια, χαρακτηρίζεται θεωρητική ισχύς και είναι ίση με:

$$P_i = \dot{m} \cdot (E_e - E_a) \quad (5.4)$$

Στην ουσία η πραγματική ισχύς P που αναπτύσσεται στην άτρακτο του δρομέα είναι ίση με τη σχέση 5.1 και είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική ισχύς P_i της προηγούμενης σχέσης κατά τις ενεργειακές απώλειες της ίδιας μηχανής. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στις απώλειες των τριβών λόγω της ροής διαμέσου της στροβιλομηχανής και στις απώλειες τριβής των εδράνων της άτρακτου. Επομένως, στην περίπτωση του στροβίλου ισχύει $P < P_i$ και έτσι ο ολικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta = \frac{P}{P_i} \quad (5.5)$$

Υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ συμπιεστού (καυσαέρια, ατμός, αέρας) και ασυμπιεστού ρευστού (νερό). Ειδικότερα, η διαφορά είναι ότι τα ασυμπιεστά ρευστά, τα υγρά, έχοντας μεγάλη πυκνότητα ρ και ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο C , είναι ιδανικά για τη μεταφορά θερμότητας μέσω μεταβολής της θερμοκρασίας τους, δηλαδή μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας τους αντιστοιχεί στην αποθήκευση (αύξηση θερμοκρασίας) ή την αφαίρεση (μείωση θερμοκρασίας) σημαντικής ποσότητας ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας.

Σύμφωνα με τη θερμοδυναμική για να μετατραπεί η ενέργεια υπό τη μορφή θερμότητας σε μηχανικό έργο, θα πρέπει να συνοδεύεται με αντίστοιχη μεταβολή του όγκου, δηλαδή τη διαστολή ή τη συστολή της μάζας του. Επομένως, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στα ασυμπιεστά ρευστά, λόγω της συμπίεσης της μάζας τους. Έτσι δεδομένου ότι η ολική ενέργεια E ανά μονάδα μάζας είναι η ολική ενέργεια του ρευστού που πρόκειται να εναλλαχθεί με μηχανικό έργο για την περίπτωση των υγρών ροής στην εξίσωση 5.2, θα πρέπει να αφαιρεθεί η εσωτερική ενέργεια U του υγρού. Επομένως, στα ασυμπιεστά ρευστά η ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας του υγρού που μπορεί να εναλλαχθεί με μηχανική ενέργεια εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = g \left(\frac{c^2}{2} + \frac{p}{\rho} + z \right) = gH \quad (5.6)$$

Συγκεκριμένα, το νερό που είναι το ρευστό που εκμεταλλεύονται τα υδροηλεκτρικά έργα, θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό και ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$E_e - E_a = \frac{1}{\rho} \left[\left(\rho \frac{c_e^2}{2} + p_e + \rho g z_e \right) - \left(\rho \frac{c_a^2}{2} + p_a + \rho g z_a \right) \right] \quad (5.7)$$

Η ολική πίεση p_o δίνεται από τη σχέση:

$$p_o = \rho \frac{c^2}{2} + p + \rho g z \quad (5.8)$$

Στις υδροδυναμικές μηχανές, η ολική ενέργεια και η πίεση εκφράζονται με την αντίστοιχη τιμή τους σε μέτρα στήλης ύδατος από την παρακάτω σχέση:

$$H = \frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma} \quad (5.9)$$

Επομένως, η σχέση 5.7 γίνεται:

$$E_e - E_a = g (H_{oe} - H_{oa}) \quad (5.10)$$

όπου, H_o το ολικό ύψος που ισούται με $p_o/\rho g$.

Σε στρόβιλο ασυμπίεστου ρευστού η θεωρητική ισχύς που εκφράζεται από την εξίσωση 5.4 με την εισαγωγή του όγκου Q μετατρέπεται σε:

$$P_i = \dot{m} (E_e - E_a) = Q \cdot \rho \cdot g (H_{oe} - H_{oa}) = Q \cdot (p_{oe} - p_{oa}) = \gamma Q H_i \quad (5.11)$$

όπου, H_i το ωφέλιμο ύψος που ισούται με $H_{oe} - H_{oa}$.

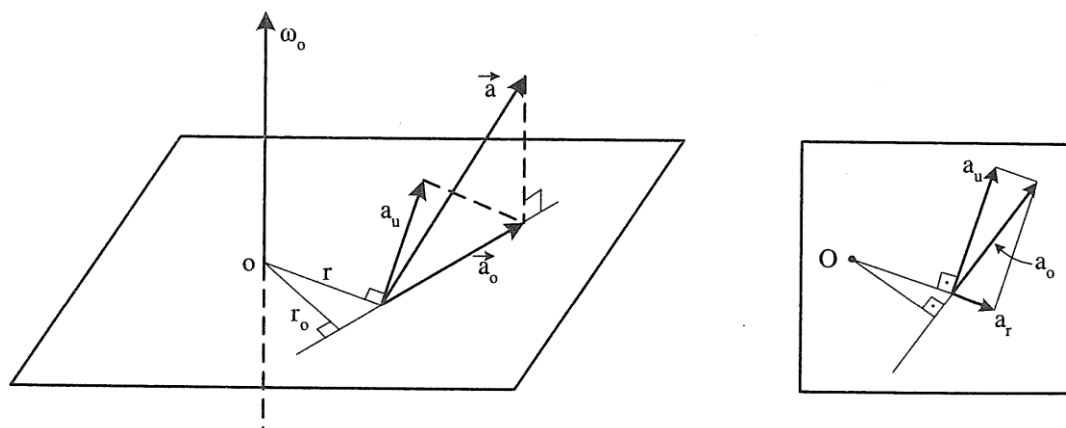
5.1.2 Εφαρμογή θεωρήματος της ροπής της ορμής

Αυτό που πραγματοποιείται στους υδροστροβίλους είναι ο ισολογισμός ροπών των δυνάμεων και της ροπής της ορμής του ρευστού, δηλαδή της συστροφής ως προς τον άξονα. Η ροπή διανύσματος ως προς τον άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$M_a = (\vec{r}_i \times \vec{a}) \hat{\omega}_0 = r_o \cdot a_o = r \cdot a_u \quad (5.12)$$

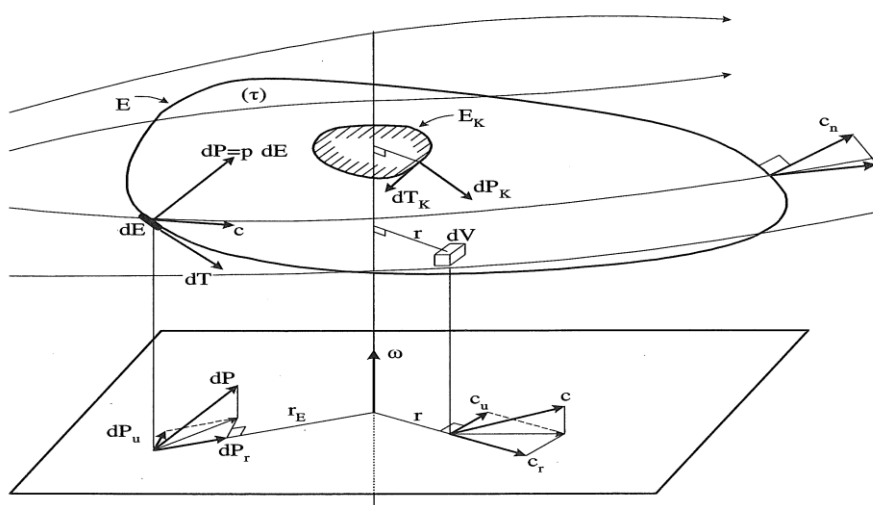
όπου,

- r : η επιβατική ακτίνα από το σημείο O του άξονα προς τυχόν σημείο του φορέα διανύσματος α ,
- α_a : η προβολή του διανύσματος α στο κάθετο επίπεδο στον άξονα ω ,
- r_a : η αντίστοιχη απόσταση,
- α_u : η περιφερειακή συνιστώσα,
- α_r : η ακτινική συνιστώσα.



Σχήμα 5.2 Ροπή διανύσματος ως προς τον άξονα [E8, Σχήμα 1.4]

Θεωρείται πεδίο ροής, το οποίο περιβάλλει ένα στερεό σώμα K ολόκληρο και ω_0 ο άξονας ως προς τον οποίο θεωρούνται οι ροπές των δυνάμεων και της συστροφής. Το στερεό έχει τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονα του και επιπλέον θεωρείται επιφάνεια E η οποία περιβάλλει όλο το σώμα K . Όσο ο άξονας ω_0 τόσο και η επιφάνεια E , είναι ακίνητα ως προς το σημείο αναφοράς τους.



Σχήμα 5.3 Διατύπωση θεωρήματος της ροπής της ορμής ως προς τον άξονα $\vec{\omega}_0$ [E8, Σχήμα 1.5]

Για το θεώρημα του ισολογισμού της ροπής των δυνάμεων και της ροπής της ορμής ως προς τον άξονα ω_0 , που οδηγεί στο θεώρημα της συστροφής για κάποια χρονική στιγμή t , θεωρώντας ότι το φαινόμενο δεν είναι μόνιμο, προκύπτει ότι:

$$\Sigma(\vec{r}_{iF} \times \vec{F}) \cdot \hat{\omega}_0 = \frac{d}{dt} \Sigma(\vec{r}_i \times \delta \vec{J}_0) \cdot \hat{\omega}_0 = \frac{d}{dt} (\vec{B}_0 \cdot \hat{\omega}_0) \quad (5.13)$$

όπου,

το άθροισμα Σ αφορά την επιφάνεια E ,

$\delta \vec{J}_0$: η ορμή στοιχειώδους ρευστού μάζας δm με ταχύτητα c ,

\vec{r}_{iF} : η επιβατική ακτίνα κάθε εξωτερικής δύναμης F_i ,

\vec{r}_i : η επιβατική ακτίνα τυχόντος στοιχείου του ρευστού,

\vec{B}_0 : η συστροφή ως προς τον άξονα ω_0 της μάζας ρευστού που περικλείεται από την επιφάνεια E τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή t .

Χωρίς εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές ή άλλες δυνάμεις, το 1^ο μέρος της εξίσωσης 5.13 μετατρέπεται σε:

$$\Sigma(\vec{r}_{iF} \times \vec{F}) \cdot \hat{\omega}_0 = M_P + M_T + M_G - M_K \quad (5.14)$$

όπου,

M_P : η ροπή ως προς τον άξονα ω_0 των εξωτερικών δυνάμεων dP λόγω της στατικής πίεσης που αναπτύσσεται επί της επιφάνειας E , με $dP=p \cdot dE$, όπου p η στατική πίεση που είναι κάθετη στην dE .

$$M_P = \int_E (\vec{r}_i \times \delta \vec{P}) \vec{\omega}_0 = \int_E r_E (pdE)_u = \int_E r_E dP_u \quad (5.15)$$

M_T : η ροπή ως προς τον άξονα ω_0 των εξωτερικών δυνάμεων dT λόγω της συνεκτικότητας που αναπτύσσεται επί το εξωτερικό της επιφάνειας E , με $dT=\tau \cdot dE$, όπου τ η διατμητική τάση η οποία είναι εφαπτομενική ως προς την dE .

$$M_T = \int_E (\vec{r}_i \times \delta \vec{T}) \vec{\omega}_0 = \int_E r_E (\tau dE)_u = \int_E r_E dT_u \quad (5.16)$$

M_G : η ροπή ως προς τον άξονα ω_0 των εξωτερικών δυνάμεων λόγω βαρύτητας επί του ρευστού που περιβάλλεται την επιφάνεια E , δηλαδή τον όγκο V του ρευστού. Κάθε δύναμη που αναπτύσσεται θα ισούται με $\rho \cdot dV \cdot g$ με ρ την πυκνότητα του ρευστού.

$$M_G = \int_V (\vec{r}_i \times \vec{g}) \vec{\omega}_0 \cdot \rho \cdot dV = \int_V \rho r g_u dV \quad (5.17)$$

M_K : η ροπή ως προς τον άξονα ω_o που αναπτύσσεται πάνω στο σώμα K που αναπτύσσεται στο ρευστό λόγω της παρουσίας του σώματος K θα είναι ίση με $-M_K$. Η ροπή αυτή θα είναι το ολοκλήρωμα των ροπών των δυνάμεων εξαιτίας της στατικής πίεσης και των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια E_K του σώματος που περιρρέεται από το ρευστό.

$$M_K = \int_{E_K} r_{EK} \cdot (dP_{uK} + dT_{uK}) \quad (5.18)$$

Για το 2^ο μέλος της εξίσωσης 5.13 ισχύει:

$$\frac{d}{dt} (\vec{B}_o \cdot \hat{\omega}_o) = \frac{dB_u}{dt} + M_S \quad (5.19)$$

όπου,

B_u : η ροπή της ροής της ορμής στη συγκεκριμένη θέση ως προς τον άξονα ω_o , της συστροφής του ρευστού τη χρονική στιγμή t .

$$B_u = \int_{\tau} \rho \cdot (\vec{r}_i \times \vec{c}) \cdot \vec{\omega}_o \cdot dV = \int_{\tau} \rho \cdot r \cdot c_u \cdot dV \quad (5.20)$$

M_S : η ροπή της ορμής, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της συστροφής του εξερχόμενου και εισερχόμενου ρευστού από την επιφάνεια αναφοράς E τη χρονική στιγμή t .

$$M_S = \int_E \rho \cdot (\vec{r}_i \times \vec{c}) \cdot \vec{\omega}_o \cdot c_n \cdot dE = \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE \quad (5.21)$$

με c_n , η ορθή συνιστώσα της ταχύτητα c στην επιφάνεια της dE , η οποία είναι θετική προς το εξωτερικό της E και με c_u , η περιφερειακή/εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας c στην επιφάνεια της E .

Επομένως, η εξίσωση 5.13 συνοψίζοντας γράφεται ως εξής:

$$M_P + M_T + M_G - M_K = \frac{dB_u}{dt} + M_S \quad (5.22)$$

Στην περίπτωση που η παραπάνω σχέση εφαρμοστεί στην πτερωτή μίας στροβιλομηχανής, δηλαδή σε ένα περιστρεφόμενο σώμα με αξονοσυμμετρική και περιοδική συμμετρία ως προς τον άξονα περιστροφής του, πρακτικά θα ισχύουν τα παρακάτω:

- Επιφάνεια αναφοράς E εκ περιστροφής, συμμετρικής ως προς τον άξονα ω .
- Οι συνθήκες ροής θα είναι αξονοσυμμετρικές από αξονοσυμμετρική πτερωτή ή διαφορετικά θα υπάρχουν συνθήκες με περιοδική συμμετρία, όπου $M_P = M_G = 0$.
- Θα υπάρχει μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω και dBv/dt .

Άρα η σχέση 5.22 λαμβάνει τη μορφή:

$$M_T - M_K = M_S \quad (5.23)$$

Η επιφάνεια E διακρίνεται σε τρεις επιφάνειες, την E_1 , E_2 , οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου τους ρευστού στην πτερωτή αντίστοιχα, ενώ με α συμβολίζονται όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες της E . Άρα λόγω συνεκτικότητας προκύπτει:

$$M_T = M_{TE1} + M_{TE2} + M_{TE\alpha} \quad (5.24)$$

Η ροπή που αναπτύσσεται στο σώμα K δίνεται από τη σχέση 5.25:

$$M_K = M_u + M_{TK} = M_u + M_{T\epsilon\sigma} + M_{TE\alpha} \quad (5.26)$$

όπου,

M_u : η περιφερειακή ροπή,

M_{TK} : η ροπή λόγω συνεκτικότητας που αναπτύσσεται στα στερεά τοιχώματα πτερωτής. Η ροπή εντατικής κατάστασης στα τοιχώματα πτερωτής είναι 0 εξαιτίας της συμμετρίας και μέρος της ροπής λόγω συνεκτικότητας που αναπτύσσεται στο σώμα K δε μετατρέπεται σε ωφέλιμη μηχανική, αλλά δαπανάται σε απώλειες συνεκτικότητας,

$M_{T\epsilon\sigma}$: η ροπή συνεκτικότητας που αναπτύσσεται στις εσωτερικές επιφάνειες τις πτερωτής.

Επομένως η σχέση 5.23 γίνεται:

$$M_S = M_T - M_K = M_{TE1} + M_{TE2} + M_{TE\alpha} - (M_u + M_{T\epsilon\sigma} + M_{TE\alpha}) = -M_u \quad (5.27)$$

Με θεώρηση πως $M_{TE1} + M_{TE2} = M_{T\epsilon\sigma}$ προκύπτει:

$$-M_u = M_s = \int_E \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE = \int_{E1+E2} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE \quad (5.28)$$

Για τον στρόβιλο ισχύει:

$$M_u = \int_{E1} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE - \int_{E2} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE \quad (5.29)$$

Με δεδομένο πως σε όλες τις επιφάνειες εκτός των $E1$ και $E2$ η κάθετη ταχύτητα c_n επί της επιφάνειας εμβαδού dE θα είναι μηδενική. Το πρόσημο M_u εξαρτάται από τη φορά της περιφερειακής συνιστώσας c_u , η οποία είναι θετική όταν είναι της ίδιας φοράς με την περιφερειακή ταχύτητα $\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}$. Η περιφερειακή ισχύς του δρομέα ισούται με την αναπτυσσόμενη ισχύ της ατράκτου που εκφράζεται με το ρυθμό μετατροπής ενέργειας σε μηχανική.

$$P_u = M_u \cdot \omega \quad (5.30)$$

Επομένως η εναλλαγή ενέργειας στο δρομέα πραγματοποιείται μόνο μέσω της μεταβολής της συστροφής του ρευστού κατά την είσοδο και έξοδο του δρομέα, δηλαδή ισχύει $M_u, P_u > 0$.

5.1.3 Συνιστώσες της ταχύτητας και τρίγωνο ταχυτήτων

Εξαιτίας της αξονοσυμμετρικής διαμόρφωσης και των συνθηκών λειτουργίας στο δρομέα των στροβιλομηχανών, γίνεται εφαρμογή πολικού συστήματος συντεταγμένων περί του άξονα περιστροφής / συμμετρίας, για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση γεωμετρίας και ταχυτήτων. Το διάνυσμα της ταχύτητας \vec{c} για ένα σημείο του πεδίου προς εξέταση αναλύεται στην αξονική c_z , στην ακτινική c_r και στην περιφερειακή c_u με τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα $\vec{i}_z, \vec{i}_r, \vec{i}_u$.

$$\vec{c} = \vec{i}_r \cdot c_r + \vec{i}_z \cdot c_z + \vec{i}_u \cdot c_u \quad (5.31)$$

Λόγω της περιοδικότητας των πτερυγίων και της αξονικής συμμετρίας πραγματοποιείται ανάλυση και για τη μεσημβρινή προβολή, δηλαδή της περιστροφής μίας χαρακτηριστικής γραμμής. Στη μεσημβρινή τομή, η ακτινική c_r και αξονική c_z συνιστώσα είναι αυτές που αποτελούν τη μεσημβρινή c_m συνιστώσα της ταχύτητας.

$$\vec{c}_m = \vec{i}_r \cdot c_r + \vec{i}_z \cdot c_z \quad (5.32)$$

Από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης το διάνυσμα της ταχύτητας αναλύεται σε μεσημβρινή c_m και περιφερειακή c_u συνιστώσα.

$$\vec{c} = \vec{i}_m \cdot c_m + \vec{i}_u \cdot c_u \quad (5.33)$$

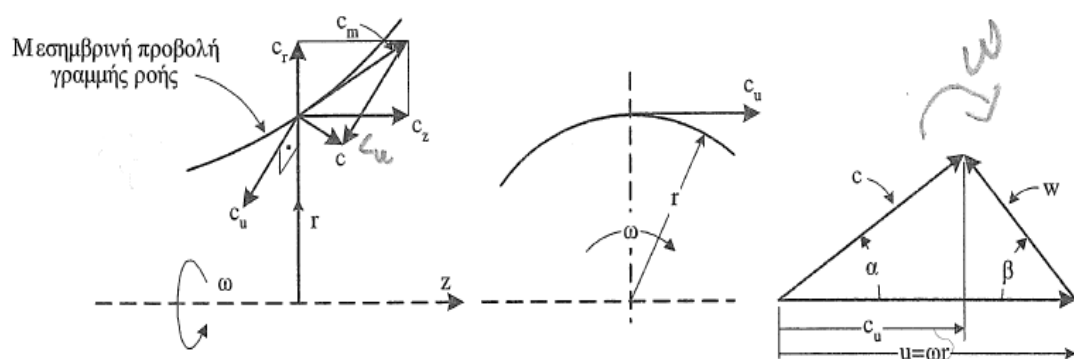
Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση της ροής σε στρεφόμενη πτερωτή επιβάλλεται και η ανάλυση της σχετικής ταχύτητας \vec{w} , δηλαδή της ταχύτητας της ροής που θα μπορούσε να μετρηθεί από κάποιο μετρητικό όργανο, καθώς περιστρέφεται μαζί με την πτερωτή. Η ταχύτητα του στρεφόμενου συστήματος στην εξεταζόμενη θέση σε ακτίνα r είναι ίση με:

$$\vec{u} = \vec{\omega} \cdot \vec{r} \quad (5.34)$$

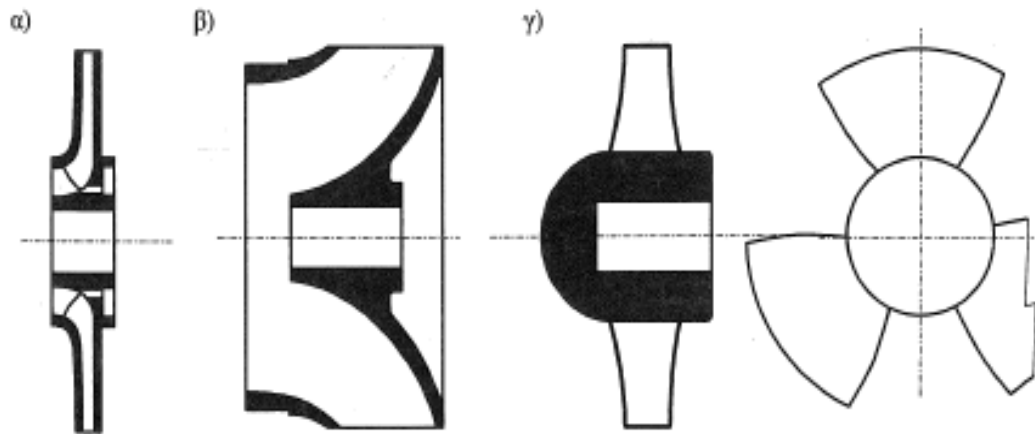
Με την υπόθεση πως στη συγκεκριμένη θέση η ταχύτητα του στοιχείου του ρευστού είναι ίση με \vec{c} , η σχετική ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w} \quad (5.35)$$

Με αυτόν τον τρόπο η μεσημβρινή συνιστώσα $w_m(w_r, w_z)$ της σχετικής ταχύτητας, θα είναι ίδια με τη μεσημβρινή συνιστώσα c_m , της αντίστοιχης απόλυτης ταχύτητας.



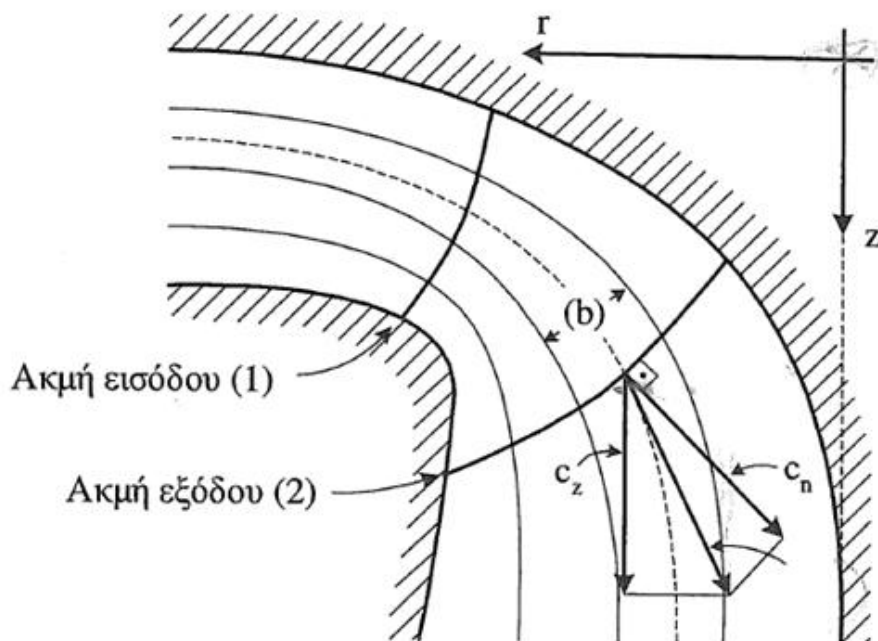
Σχήμα 5.4 Συνιστώσες του διανύσματος και τρίγωνο τα ταχυτήτων [E8, Σχήμα 1.5]



Σχήμα 5.5 Μεσημβρινή τομή πτερωτής (α) ακτινικής ροής, (β) μεικτής ροής, (γ) αξονικής ροής [E8, Σχήμα 1.5]

5.1.4 Εφαρμογή του θεωρήματος της ροπής της ορμής σε μερικό δρομέα

Μερική πτερωτή θεωρείται αυτή που το πλάτος του $b(r)$ είναι μικρότερο από την ακτίνα r με τέτοιον τρόπο, ώστε να είναι αποδεκτό το σενάριο πως πάνω σε αυτό το πλάτος δε μεταβάλλονται οι συνθήκες ροής. Η ίδια εφαρμογή υπάρχει και στις διατομές εξόδου και εισόδου $E2$ και $E1$ αντίστοιχα για κάθε μερική πτερωτή.



Σχήμα 5.6 Μερική πτερωτή στροβίλου και συνιστώσες της ταχύτητας [E8, Σχήμα 1.9]

Ο δείκτης u που έχει χρησιμοποιηθεί και στα μεγέθη της ροπής και της ισχύος αφορά στο αντίστοιχο μέγεθος της πτερωτής. Εμβαθύνοντας σε μεγαλύτερη ανάλυση ο συγκεκριμένος δείκτης θα χρησιμοποιηθεί και για άλλα μεγέθη, όπως είναι η παροχή μάζας \dot{m}_u , αλλά και του όγκου Q_u που διέρχεται από το δρομέα. Η θεωρητική ροπή που αναπτύσσεται στο δρομέα έχει δοθεί από τη σχέση 5.29, όμως λαμβάνοντας υπόψη την ομοιομορφία της ροής στις επιφάνειες $E1$ και $E2$ η εξίσωση γίνεται:

$$M_u = \rho_1 \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_1 \cdot E_1 - \rho_2 \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_2 \cdot E_2 \quad (5.36)$$

Σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας η παροχή της μάζας δια μέσου του δρομέα δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{m}_u = \rho_1 \cdot c_{n1} \cdot E_1 = \rho_2 \cdot c_{n2} \cdot E_2 \quad (5.37)$$

Επομένως η σχέση 5.36 για την περιφερειακή ροπή γίνεται:

$$M_u = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_1 - c_{u2} \cdot r_2) \quad (5.38)$$

Αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη πως $u_1 = \omega r_1$ και $u_2 = \omega r_2$, η περιφερειακή ισχύς θα είναι ισούται με:

$$P_u = M_u \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad (5.39)$$

Στην περίπτωση του ασυμπίεστου ρευστού ισχύει $\rho = \rho_1 = \rho_2 = \text{σταθερό}$ και η παροχή μάζας εκφράζεται από την αντίστοιχη παροχή όγκου:

$$Q_u = \frac{\dot{m}_u}{\rho} \quad (5.40)$$

Η περιφερειακή ισχύς:

$$P_u = \rho \cdot Q_u \cdot (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) = \rho \cdot g \cdot Q_u \cdot \frac{(c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2)}{g} = \gamma \cdot Q_u \cdot H_u \quad (5.41)$$

Το θεωρητικό ύψος H_u εκφράζει την ανά μονάδα ολική ενέργεια του υγρού σε m στήλης ύδατος και συνδέεται με τη μεταβολή ενέργεια μεταξύ εισόδου και εξόδου του δρομέα.

$$H_u = H_{o1} - H_{o2} - \delta h_{f12} = \frac{c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2}{g} \quad (5.42)$$

Όπου,

H_{o1} : ολική ενέργεια εισόδου,

H_{o2} : ολική ενέργεια εξόδου,

δh_{f12} : υδραυλικές απώλειες ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου του δρομέα.

Για την εφαρμογή του θεωρήματος της συστροφής σε μερική πτερωτή με μεικτή ροή για ασυμπίεστο ρευστό το θεωρητικό ύψος δίνεται από τη σχέση 5.42. Όμως από το νόμο των συνημιτόνων σε τρίγωνο ταχυτήτων και βάσει τριγωνομετρίας λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

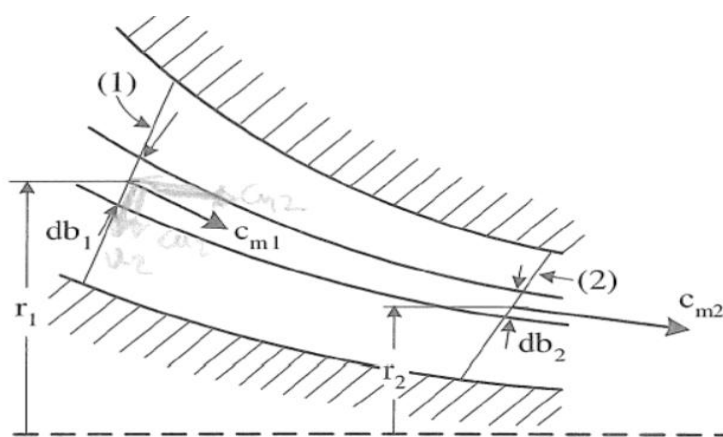
$$H_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2 \cdot g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2 \cdot g} \quad (5.43)$$

Γιατί ισχύει: $w_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot c_2 \cdot \cos a_2$ και $c_{u2} = c_2 \cdot \cos a_2$

5.1.5 Περιπτώσεις άεργης ισχύος

Άεργος ισχύς θεωρείται όταν η ροπή μίας ροής είναι μηδενική ($M=0$) ή όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι μηδενική ($\omega=0$). Όταν αναπτύσσεται ροπή σε μη στρεφόμενο σώμα, η ροή είναι άεργη, δηλαδή δεν πραγματοποιείται μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ή το αντίστροφο, αλλά απλώς μετατρέπεται η ενέργεια του ρευστού από μία μορφή σε μία άλλη με σταθερή ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Για την άεργο ισχύ διακρίνονται δύο περιπτώσεις.

α) Διατήρηση της συστροφής, όπου θεωρείται αξονοσυμμετρικός χώρος, ο οποίος περιορίζεται μεταξύ αξονοσυμμετρικών επιφανειών και η ροή μέσα σε αυτόν είναι επίσης αξονοσυμμετρική. Επιπλέον πραγματοποιείται διαχωρισμός σε μικρά τμήματα πλάτους db μεταξύ διαδοχικών επιφανειών ροής, έτσι ώστε οι συνθήκες ροής να θεωρούνται ομοιόμορφες.



Σχήμα 5.7 Αξονοσυμμετρική ροή – διατήρηση της συστροφής [E8, Σχήμα 1.12]

Ισχύει πως $M_u = -M_s = 0$, όπου M_s : ροπή της ροής της ορμής και M_u : η πραγματική περιφερειακή ροπή. Άρα:

$$M_u = \rho_1 \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_1 \cdot E_1 - \rho_2 \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_2 \cdot E_2 = 0$$

Από τη διατήρηση συνέχειας της μάζας που δίνεται από τη σχέση 5.37 ο ρυθμός μεταβολής της δίνεται από τη σχέση:

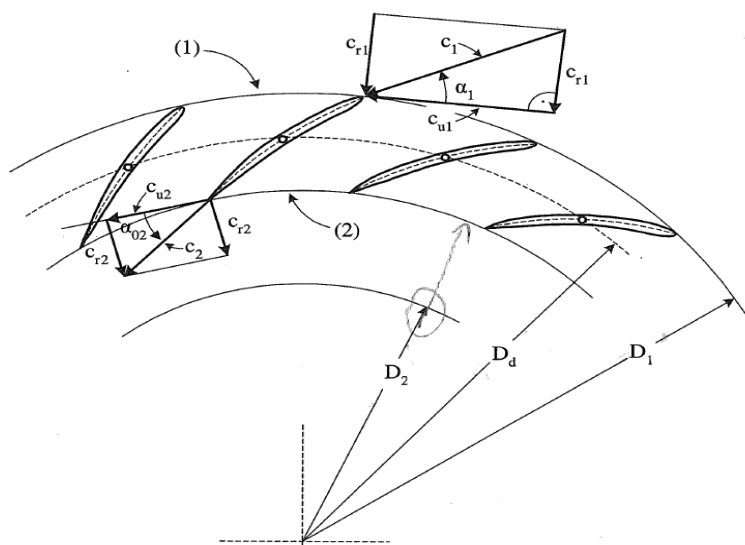
$$d\dot{m}_u = \rho_1 \cdot c_{n1} \cdot dE_1 = \rho_2 \cdot c_{n2} \cdot dE_2 \quad (5.44)$$

Προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot b \cdot c_{r1} &= 0 \rightarrow \\ M_u = d\dot{m}_u \cdot c_{u1} \cdot r_1 - d\dot{m}_u \cdot c_{u2} \cdot r_2 &= 0 \rightarrow \\ c_{u1} \cdot r_1 = c_{u2} \cdot r_2 &\rightarrow c_u \cdot r = \text{σταθερό} \quad (5.45) \end{aligned}$$

Η σχέση 5.45 εκφράζει την αρχή διατήρησης της συστροφής για αξονοσυμμετρική ροή που ισχύει και για μη ιδεατό ρευστό, μακριά από τα στερεά τοιχώματα, που υπάρχει μεγαλύτερη ροή εξαιτίας των διατμητικών τάσεων.

β) Άεργη μεταβολή της συστροφής, όπου θεωρείται αξονοσυμμετρική ροή που περιορίζεται από αξονοσυμμετρικά όρια με παρεμβολή ακίνητης στεφάνης, δηλαδή με κυκλικά διατεταγμένη πτερυγωση.



Σχήμα 5.8 Διάταξη ακίνητης ακτινικής στεφάνης πτερυγίων [E8,Σχήμα 1.13]

Ορίζονται οι κύλινδροι κυκλικής διατομής E_1 και E_2 ανάντη και κατάντη της στεφάνης ως διατομές εισόδου και εξόδου στις ακτίνες r_1 και r_2 αντίστοιχα. Εξαιτίας της μορφής των διατομών θα ισχύει $c_n = c_r$, επομένως η συνολική παροχή του όγκου από την αρχή της συνέχειας θα είναι:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot b \cdot c_{r1} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b \cdot c_{r2} \quad (5.46)$$

Έστω η ύπαρξη πυκνών πτερυγίων, έτσι ώστε ο λόγος βήματος προς τη χορδή πτερύγωσης να είναι μικρός με αποτέλεσμα η έξοδος του ρευστού να είναι παράλληλα σε διεύθυνση εκφυγής και να ισχύει:

$$c_{u2} = \frac{c_{r2}}{\tan \alpha_2} \quad (5.47)$$

όπου α_2 : η κλίση των πτερυγίων την ακμή εκφυγής.

Με την εφαρμογή του θεωρήματος της συστροφής:

$$M_u = -M_s = \int_{E1} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE - \int_{E2} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E \cdot dE \rightarrow$$

$$M_u = \rho \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_1 \cdot E_1 - \rho \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_2 \cdot E_2 \quad (5.47)$$

Επειδή η γωνιακή ταχύτητα είναι μηδενική ($\omega=0$) δεν υπάρχει παραγωγή έργου, επομένως οι απώλειες είναι μηδενικές και έτσι η ολική ενέργεια του ρευστού ανά μονάδα μάζας παραμένει σταθερή $H_{o1} = H_{o2}$

5.1.6 Διερεύνηση θεμελιώδους εξίσωσης στροβιλομηχανών

Έστω δρομέας στροβίλου ακτινικής ροής στο κανονικό σημείο λειτουργίας, με γωνιακή ταχύτητα ω . Η ανά μονάδα μάζας ενέργειας H_u που μετατρέπεται από την ενέργεια του υγρού σε μηχανική ενέργεια στο δρομέα δίνεται από την εξίσωση:

$$H_u = \frac{1}{g} (u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}) = H_{o1} - H_{o2} \quad (5.48)$$

Η κινητική ενέργεια, $\frac{c_2^2}{2g}$, είναι ένας όρος της ολικής ενέργειας H_{o2} και είναι ίση με:

$$\frac{c_2^2}{2g} = \frac{c_{r2}^2}{2g} + \frac{c_{u2}^2}{2g} \quad (5.49)$$

Η ακτινική ταχύτητα c_r είναι συνδεδεμένη με την αρχή της συνέχειας για να εξασφαλιστεί η διερχόμενη παροχή, ενώ η c_{u2} πρακτικά αυξάνει τις απώλειες της ροής κατάντη του δρομέα και αφορά μία μορφή ενέργεια που φεύγει από το δρομέα ανεκμετάλλευτη. Επομένως με μηδενική συστροφή η εξίσωση 5.48 γράφεται:

$$H_{ud} = \frac{1}{g} u_1 c_{u1} \quad (5.50)$$

όπου, ο δείκτης d αφορά στο κανονικό σημείο λειτουργίας (design point)

Βάσει των παραπάνω η σημασία της περιφερειακής ταχύτητας u κατά την εξωτερική περίμετρο της πτερωτής (δρομέα) είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Η ενεργειακή μεταβολή μπορεί να επιτευχθεί είτε επιλέγονται μεγάλη ταχύτητα περιστροφής n (RPM) με μικρή διάμετρο D και μικρότερη μηχανή σε μέγεθος, είτε το ακριβώς αντίστροφο.

5.1.7 Διαμόρφωση υδροστροβίλων

Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι διακρίνονται στους δράσεως και αντιδράσεως. Ο λόγος της μεταβολής της στατικής πίεσης της ροής από την είσοδο έως και την έξοδο του δρομέα προς τη συνολική μεταβολή της στατικής πίεσης από την είσοδο έως την έξοδο του δρομέα είναι αυτό που χαρακτηρίζει το βαθμό αντιδράσεως του υδροστρόβιλου.

$$r_\varepsilon = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_a} \quad (5.51)$$

όπου:

P_1, P_2 : η στατικές πιέσεις κατά τις διατομές εισόδου και εξόδου του δρομέα και
 P_a : η στατική πίεση στην έξοδο της μηχανής.

Υδροστρόβιλος αντιδράσεως ή ολικής προσβολής υφίσταται όταν η ροή που πραγματοποιείται μέσα στον δρομέα είναι παράλληλη με τη μεταβολή της στατικής πίεσης. Εν αντιθέσει όταν υπάρχει στατική πίεση στο χώρο του δρομέα με μηδενικό βαθμό αντίδρασης ο υδροστρόβιλος ονομάζεται δράσεως ή μερικής προσβολής. Μία ακόμα διάκριση που μπορεί να γίνει ανάμεσα στους υδροστροβίλους είναι με το κριτήριο της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1 και με το κριτήριο της ανά μονάδα μάζας ενέργεια του

νερού που προσδίδεται στο στρόβιλο, έτσι διακρίνονται σε μικρά - μεσαία, συνήθως $\leq 10\text{MW}$ και σε μεγάλα $\geq 10\text{MW}$.

Τύπος	Μεγάλο Υδρ. Ύψος	Μεσαίο Υδρ. Ύψος	Μικρό Υδρ. Ύψος
Δράσεως	Pelton Turgo	Pelton Turgo Cross-Flow	Cross-Flow
Αντιδράσεως		Francis	Kaplan Αξονικής Ροής Βολβοειδής

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας διάκρισης υδροστροβίλων [E23]

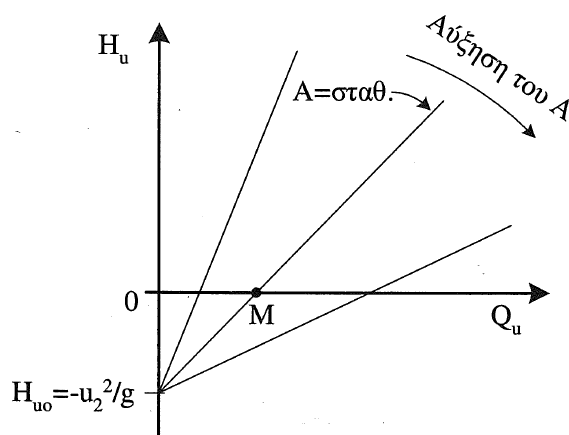
5.2 Καμπύλες λειτουργίας και βαθμοί απόδοσης υδροστροβίλων

5.2.1 Θεωρητική χαρακτηριστική

Για τις διάφορες κλίσεις των πτερυγίων (α_l) μπορεί να διαμορφωθεί ένα σύνολο χαρακτηριστικών (H_u, Q_u) , λαμβάνοντας υπόψη το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων για κάθε περίπτωση. Η κλίση της χαρακτηριστικής που προκύπτει είναι μεγαλύτερη καθώς η κλίση των πτερυγίων μικραίνει, δηλαδή όσο μειώνεται το άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων A . Λαμβάνοντας υπόψη σταθερό άνοιγμα πτερυγίων η κλίση α_l της ταχύτητας c_l κατά τη διατομή εισόδου του δρομέα είναι σταθερή έτσι η σχέση 5.48 γίνεται:

$$H_u = \left(\frac{C}{tga_1} + B \right) - \frac{u_2^2}{g} \quad (5.52)$$

Με C, B σταθερές της γεωμετρίας.



Σχήμα 5.9 Θεωρητικές χαρακτηριστικές του δρομέα του υδροστροβίλου. [E8, Σχ. 6.14]

5.2.2 Απώλειες και βαθμοί απόδοσης

Η απόδοση του στροβίλου η_{mech} δίνεται από το λόγο της παραγόμενης μηχανικής ισχύος (σχέση 3.2) προς τη διαθέσιμη υδραυλική ισχύ και είναι μικρότερος της μονάδας εξαιτίας των ενεργειακών απωλειών.

$$\eta = \frac{P}{P_i} = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q} < 1 \quad (5.53)$$

Οι ενεργειακές απώλειες μπορεί να είναι οι :

1. **Υδραυλικές απώλειες δh_{fea}** που διακρίνονται στις απώλειες τριβής δh_τ και στις απώλειες κρούσεως δh_α (μικρές στα ρυθμιστικά πτερύγια, αφού η περιοχή αυτή είναι εντόνως επιταχυνόμενη) και εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας.

Δηλαδή:

$$\delta h_{fea} = \delta h_\tau + \delta h_\alpha \quad (5.54)$$

όπου:

$$\delta h_\tau = \zeta_\tau Q^2 \quad (5.55)$$

Με ζ_τ σταθερό συντελεστή για την περιοχή πλήρους τυρβώδους ροής και αυξάνεται όσο μειώνεται η τιμή του αριθμού Reynolds της ροής κατά τη μεταβατική και στρωτή περιοχή της ροής. Ακόμα οι απώλειες κρούσεων στη διατομή εισόδου:

$$\delta h_\alpha = k \frac{w_c^2}{2g} \quad (5.56)$$

Με $k = 0,5 - 0,9$ και w_c η διαφορά περιφερειακής συνιστώσας.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης είναι:

$$\eta_h = \frac{H_u}{H} \quad (5.57)$$

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια προκύπτει από τη σχέση:

$$H_u = H - \frac{c_a^2}{2g} - \delta h_{fea} \quad (5.58)$$

2. **Ογκομετρικές απώλειες δQ** όπου αφορούν στη διαφορά της παροχής εισόδου και εξόδου Q με την παροχή του δρομέα Q_u .

$$\delta Q = Q - Q_u \quad (5.59)$$

Ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_Q = \frac{Q_u}{Q} = 1 - \frac{\delta Q}{Q} \quad (5.60)$$

3. **Μηχανικές απώλειες** εκφραζόμενες μέσα από τη μηχανική ισχύ P_m , η οποία αποτελείται από τις απώλειες εδράνων P_E και στρεφόμενου δίσκου P_S .

$$P_m = P_E + P_S \quad (5.61)$$

Η καθαρή μηχανική ισχύς P που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα θα ισούται με:

$$P = P_u - P_m \quad (5.62)$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσής η_m δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_m = \frac{P}{P_u} = 1 - \frac{P_m}{P_u} \quad (5.63)$$

Τέλος, ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου η , θα είναι ίσος με το γινόμενο του ογκομετρικού η_Q , του υδραυλικού η_h και του μηχανικού η_m βαθμού απόδοσης:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_Q \cdot \eta_h \quad (5.64)$$

5.2.3 Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλων

Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του υδροστροβίλου απεικονίζεται με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση H σε συνάρτηση με την παροχή Q λαμβάνοντας υπόψη το άνοιγμα των πτερυγίων A και τη σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Η χαρακτηριστική καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα 5.9 είναι μία ευθεία γραμμή με

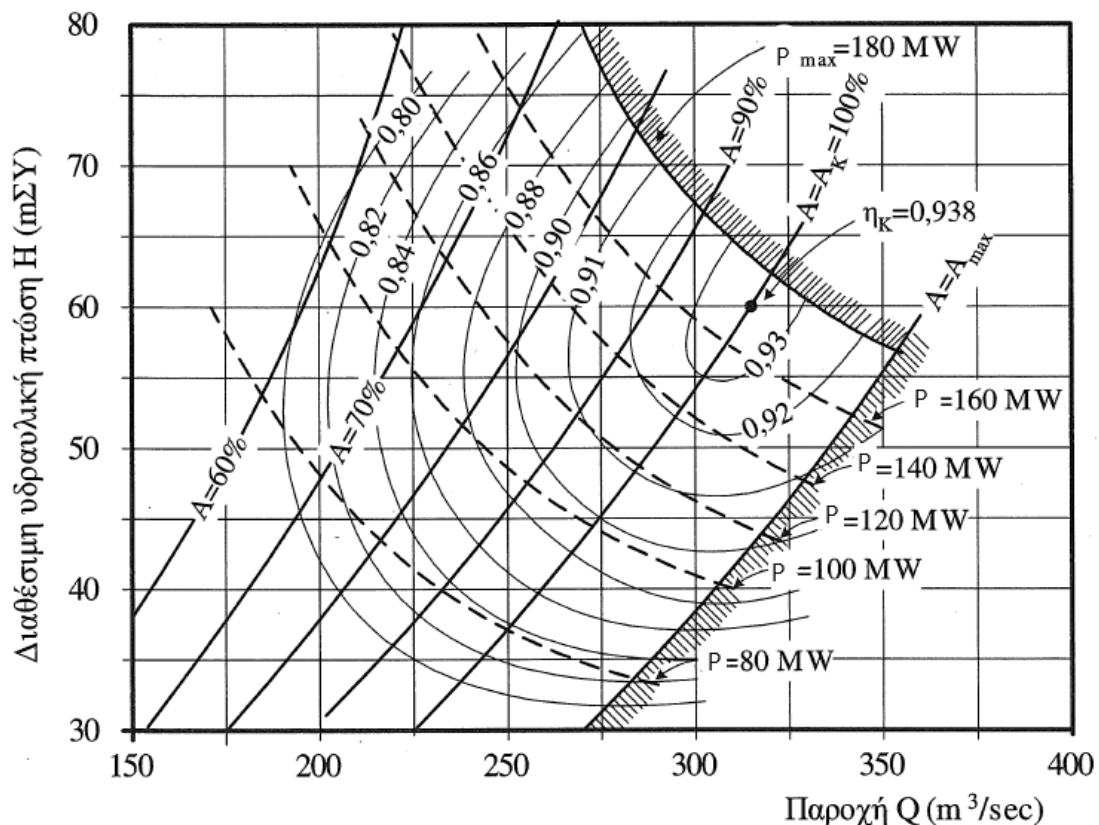
θετική κλίση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κινητική ενέργεια στην διατομή εξόδου, όσο και τις υδραυλικές απώλειες.

Οι καμπύλες λειτουργίας του υδροστροβίλου έχουν τη μορφή πλέγματος με θετική κλίση, ενώ στο ίδιο διάγραμμα χαράσσονται και οι καμπύλες του βαθμού απόδοσης, οι οποίες έχουν τη μορφή κλειστών ισουψών. Στο μέγιστο ύψος που σχηματίζουν αυτές οι ισουψείς αντιστοιχεί το κανονικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή το σημείο του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης. Όταν αναφέρεται το κανονικό σημείο λειτουργίας, νοείται το σημείο σε μία συγκεκριμένη τιμή ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων, για μία συγκεκριμένη παροχή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη διαθέσιμη υδραυλική πτώση H , κατά το οποίο ισχύει πως η ροή στην είσοδο του δρομέα πραγματοποιείται χωρίς κρούση και ταυτόχρονα η συστροφή του υγρού στην έξοδο του δρομέα είναι αμελητέα.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των υδροστροβίλων μπορούν να γίνουν αρκετά πολύπλοκες, ανάλογα με τον τύπο του υδροστροβίλου. Για παράδειγμα οι υδροστροβίλοι με διπλή ρύθμιση, όπως είναι αυτή της αξονικής ροής (bulb, Kaplan, κλπ.) ή αυτοί με διαγώνια ροή (Deriaz), έχουν τη δυνατότητα της ρύθμισης της κλίσης των ρυθμιστικών πτερυγίων, καθώς και της ρύθμισης των πτερυγίων του δρομέα. Προκειμένου να επιτευχθεί η ισχύς εξόδου P για μία δεδομένη υδραυλική πτώση H πρέπει να επιλεχθεί συνδυασμός των δύο παραπάνω κατά τον οποίο προκύπτει και μεγαλύτερος ολικός βαθμός απόδοσης.

Επιπλέον, σημειώνεται πως για κάθε ζεύγος στροβίλου – γεννήτριας η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή για κάθε σημείο λειτουργίας, επειδή η παραγόμενη ισχύς από τον υδροστροβίλο απορροφάται από την ηλεκτρική γεννήτρια. Αν για οποιοδήποτε ζήτημα βλάβης, η γεννήτρια σταματήσει τη λειτουργία της, τότε η συνολική παραγόμενη ισχύς δεν απορροφάται από αυτήν, αλλά μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια της ατράκτου, του δρομέα και του ρότορα της γεννήτριας, με αποτέλεσμα να επιταχύνονται οι στρεφόμενες μάζες και να φτάνουν στο σημείο της ταχύτητας φυγής n_e . Στην ταχύτητα φυγής η μηχανική ισχύς μηδενίζεται και η διαθέσιμη υδραυλική πτώση καταναλώνεται πλήρως στις υδραυλικές απώλειες στο εσωτερικό τμήμα της μηχανής. Λόγω του παραπάνω οι στρεφόμενες μάζες δε θα υπερβαίνουν την ταχύτητα φυγής.

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται ένα παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας για υδροστροβίλο Francis πάνω στο οποίο έχουν χαραχθεί και οι καμπύλες σταθερού βαθμού απόδοσης, αλλά και οι καμπύλες ισχύος. Η πραγματική ισχύς P που αντιστοιχεί για το κάθε σημείο λειτουργίας προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης $P=\gamma \cdot H \cdot Q \cdot \eta$



Σχήμα 5.10 Χαρακτηριστικές υδροστροβίλου Francis Ον. ισχύος 165 MW, δρομέας με διάμετρο $D=6,4$ m και σταθερή ταχύτητα περιστροφής $n = 88,3$ m [E8, Σχ. 6.21]

5.2.4 Νόμοι ομοιότητας και αναγωγής του βαθμού απόδοσης

Η εφαρμογή της ομοιότητας για τους υδροστροβίλους είναι αρκετά δαπανηρή, αλλά αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού δίνει στους κατασκευαστές την δυνατότητα ελέγχου σε ότι αφορά το κόστος σχεδίασης και μελέτης για μία ίδια σειρά. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται εργαστηριακά για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών των υδροστροβίλων σε ένα γεωμετρικά όμοιο μοντέλο (πρότυπο). Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει στους κατασκευαστές τη ρύθμιση και διόρθωση διαφόρων παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι για παράδειγμα τα πτερύγια των υδροστροβίλων, παρέχοντας άμεσα τη δυνατότητα βελτίωσής τους. Για τους μικρούς τυποποιημένους υδροστροβίλους γίνεται εφαρμογή των νόμων ομοιότητας, προκειμένου να δημιουργηθεί μία σειρά ομοίων υδροστροβίλων λειτουργικά χαρακτηριστικά ίδια με αυτά του όμοιου γεωμετρικά μοντέλου τους.

Σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας που ισχύουν για τα γεωμετρικά αυτά μοντέλα σε αντίστοιχα σημεία λειτουργίας, καθώς και για τη ροή της πλήρους τυρβώδους περιοχής ισχύουν τα παρακάτω:

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \cdot \frac{n'}{n''} \quad (5.65\alpha)$$

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \cdot \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad (5.65\beta)$$

$$\frac{N'}{N''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^5 \cdot \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \cdot \left(\frac{\eta'}{\eta''}\right) \quad (5.65\gamma)$$

Ο λόγος $\frac{D'}{D''}$ αφορά στη διάμετρο του δρομέα των γεωμετρικά όμοιων μηχανών και ονομάζεται γεωμετρικός λόγος ομοιότητας, όλων των αντίστοιχων μεγεθών των δύο όμοιων μηχανών. Ο όρος $\frac{\eta'}{\eta''}$ είναι ο λόγος των ολικών βαθμών απόδοσης και θα ισούται με τη μονάδα στις περιπτώσεις που υπάρχει ατελής δυναμική ομοιότητα της ροής μεταξύ των γεωμετρικών όμοιων μοντέλων. Επιπλέον, η γεωμετρική ομοιότητα φτάνει ως την επιφανειακή τραχύτητα, επομένως μεταξύ πρωτοτύπου και μοντέλου (M) ισχύει:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\varepsilon_M}{D_M} \quad (5.66)$$

Επειδή η επιφανειακή τραχύτητα του πρωτοτύπου θα είναι πολύ μικρή, αν θεωρηθεί πως $\varepsilon = \varepsilon_M$, τότε $\varepsilon_M/D_M > \varepsilon/D$, επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του υδροστροβίλου, τόσο μειώνεται η σχετική τραχύτητα και οδηγεί στη μείωση των υδραυλικών απωλειών λόγω τριβής, καθώς και στην αύξηση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης η_h . Για να εκτιμηθεί η ποσοτική μεταβολή του υδραυλικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με το μέγεθος του υδροστροβίλου έχουν αναπτυχθεί κάποιες σχέσεις, ανάλογα με τον τύπο αυτού, όπως για παράδειγμα φαίνεται παρακάτω:

Σχέση Moody για τους υδροστρόβιλους Francis:

$$\frac{1-\eta}{1-\eta_M} = \left(\frac{D_M}{D}\right)^{0,2} \quad (5.67)$$

Σχέση Hutton για τους υδροστρόβιλους αξονικής ροής (π.χ. βολβοειδείς, Kaplan):

$$\frac{1-\eta}{1-\eta_M} = 0,30 + 0,70 \left(\frac{Re_M}{Re}\right)^{0,2} \quad (5.68)$$

όπου: Re ο αριθμός Reynolds: $\frac{D}{\nu} \sqrt{2gH}$, με ν : το κινηματικό ιξώδες.

Για τους υδροστροβίλους Pelton ισχύει:

$$\eta = \eta_M + \Delta\eta \quad (5.69)$$

όπου:

$$\Delta\eta = \delta r \left[\left(\frac{Re_r}{Re_M} \right)^{0,16} - \left(\frac{Re_r}{Re} \right)^{0,16} \right] \quad (5.70)$$

Κατά την οποία:

$$\delta r = \frac{1-\eta_M}{\left(\frac{Re_r}{Re_M} \right)^{0,16} + \frac{1-q}{q}} \quad (5.71)$$

Με:

$Re_r = 7 \cdot 10^6$ (τιμή αναφοράς),

$Re = u/D \cdot v$, η τιμή του αριθμού Reynolds πρωτοτύπου,

Re_M : η τιμή του αριθμού Reynolds του μοντέλου,

$q=0,7$ για Francis ή έλικας με σταθερά πτερύγια και

$q=0,8$ για υδροστροβίλους με πτερύγια ρυθμιζόμενης κλίσης, όπως είναι ο

Karlan, οι βολβοειδείς, οι σωληνωτοί κ.α.

5.2.5 Αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας υδροστροβίλων

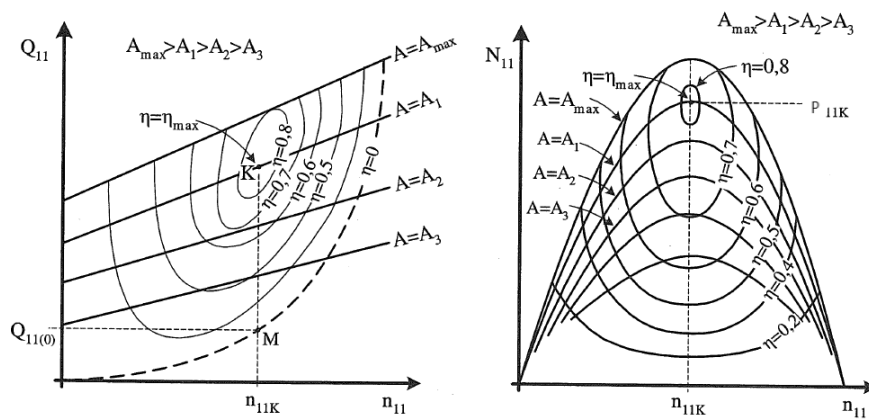
Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που αφορούν στα χαρακτηριστικά λειτουργίας πρωτοτύπου – μοντέλου, είναι δυνατό να εισαχθούν αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας με τέτοιον τρόπο, ώστε οι χαρακτηριστικές καμπύλες για μια σειρά γεωμετρικά όμοιων υδροστροβίλων για οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής να δίνονται μέσα από το ίδιο διάγραμμα. Τέτοιες παράμετροι είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από τον δείκτη 11, αλλά και οι παράμετροι παροχής Φ και ύψους Ψ .

Όλες οι αδιάστατες παράμετροι που έχουν το δείκτη 11 αντιστοιχούν σε έναν ιδεατό υδροστρόβιλο, όμοιο προς τον εξεταζόμενο με διάμετρο $D' = 1\text{m}$ και διαθέσιμη υδραυλική πτώση $H' = 1\text{m}$. Εφαρμόζοντας αυτές τις τιμές στις σχέσεις 5.65 για υδροστρόβιλο διαμέτρου D , στο σημείο λειτουργίας με υδραυλική πτώση H , παροχή Q , ροπή M , ισχύς P για ταχύτητα περιστροφής n , προκύπτουν τα παρακάτω γεωμετρικά μεγέθη όμοιου υδροστροβίλου στο σημείο λειτουργίας, χαρακτηρίζονται με το δείκτη 11 και ονομάζονται μοναδιαίες αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας.

$$n_{11} = n \frac{D}{H^{1/2}}, \quad Q_{11} = \frac{Q}{D^2 H^{1/2}}, \quad M_{11} = \frac{M}{D^3 H}, \quad P_{11} = \frac{P}{D^2 H^{3/2}} \quad (5.72)$$

Τέλος, οι παράμετροι Φ και Ψ , δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\Phi = \frac{Q/\pi}{R_{2e}^2 \cdot u_{2e}} \quad \text{και} \quad \Psi = \frac{2gH}{u_{2e}^2} \quad (5.73)$$



Σχήμα 5.11 Μεταβολή ανηγμένης παροχής Q_{11} και ισχύος P_{11} σε συνάρτηση με το n_{11} [E8, Σχ. 6.21]

5.2.6 Ειδικός αριθμός στροφών

Ο ειδικός αριθμός στροφών είναι ένα αριθμητικό μέγεθος που είναι ενδεικτικό για τη μορφή των υδροστροβίλων, έτσι όλοι οι γεωμετρικά όμοιοι υδροστρόβιλοι θα πρέπει να έχουν τον ίδιο ειδικό αριθμό στροφών. Έστω, ένας υδροστρόβιλος που βρίσκεται στο κανονικό σημείο λειτουργίας με παροχής Q_K , πτώση ύδατος H_K , ισχύ P_K και ταχύτητα περιστροφής n . Ο ειδικός αριθμός στροφών n_q ως προς την παροχή του υδροστροβίλου ορίζεται η ταχύτητα περιστροφής του ιδεατού γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου προς τον υδροστρόβιλο στο κανονικό σημείο λειτουργίας θα ισχύει $Q_K' = 1$ & $H_K' = 1$. Αν στις σχέσεις 5.65α και 5.65β απαλειφθεί ο γεωμετρικός λόγος ομοιότητας, προκύπτει ο ειδικός αριθμός στροφών προς την παροχή και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_q = n \frac{Q_K^{1/2}}{H_K^{3/4}} \quad (5.74)$$

Αντιστοίχως, ο ειδικός αριθμός περιστροφής δίνεται από τον τύπο:

$$v_{περ} = \omega \frac{(Q/\pi)^{1/2}}{(2gH)^{3/4}} \quad (5.75)$$

Συναρτήσσει των παραμέτρων Φ_K και Ψ_K , στο κανονικό σημείο λειτουργίας για τον αριθμό περιστροφή $v_{περ}$ ισχύει:

$$v_{περ} = \omega \frac{\Phi_K^{1/2}}{\Psi_K^{3/4}} \quad (5.76)$$

Επιπλέον για τους υδροστροβίλους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς την ισχύ, n_s , και εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής για τον γεωμετρικά όμοιο υδροστροβίλο στο κανονικό σημείο λειτουργίας $H_s = 1$ και $P_s = 1$ για $\eta = \eta_s$. Άρα για ίδιες αποδόσεις :

$$n_s = n \frac{P_K^{1/2}}{H_K^{5/4}} \quad (5.77)$$

Τέλος, με θεώρηση ολικού βαθμού απόδοσης $\eta = 0,9$ η σχέση που συνδέει τον ειδικό αριθμό στροφών ως προς την παροχή n_q με τον ειδικό αριθμό στροφών ως προς την ισχύ n_s δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_s \cong 2,97 \cdot n_q \quad (5.78)$$

5.2.7 Επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, του ειδικού αριθμού στροφών και της ταχύτητας περιστροφής

α)Υδραυλική πτώση – Μορφή και τύπος δρομέα

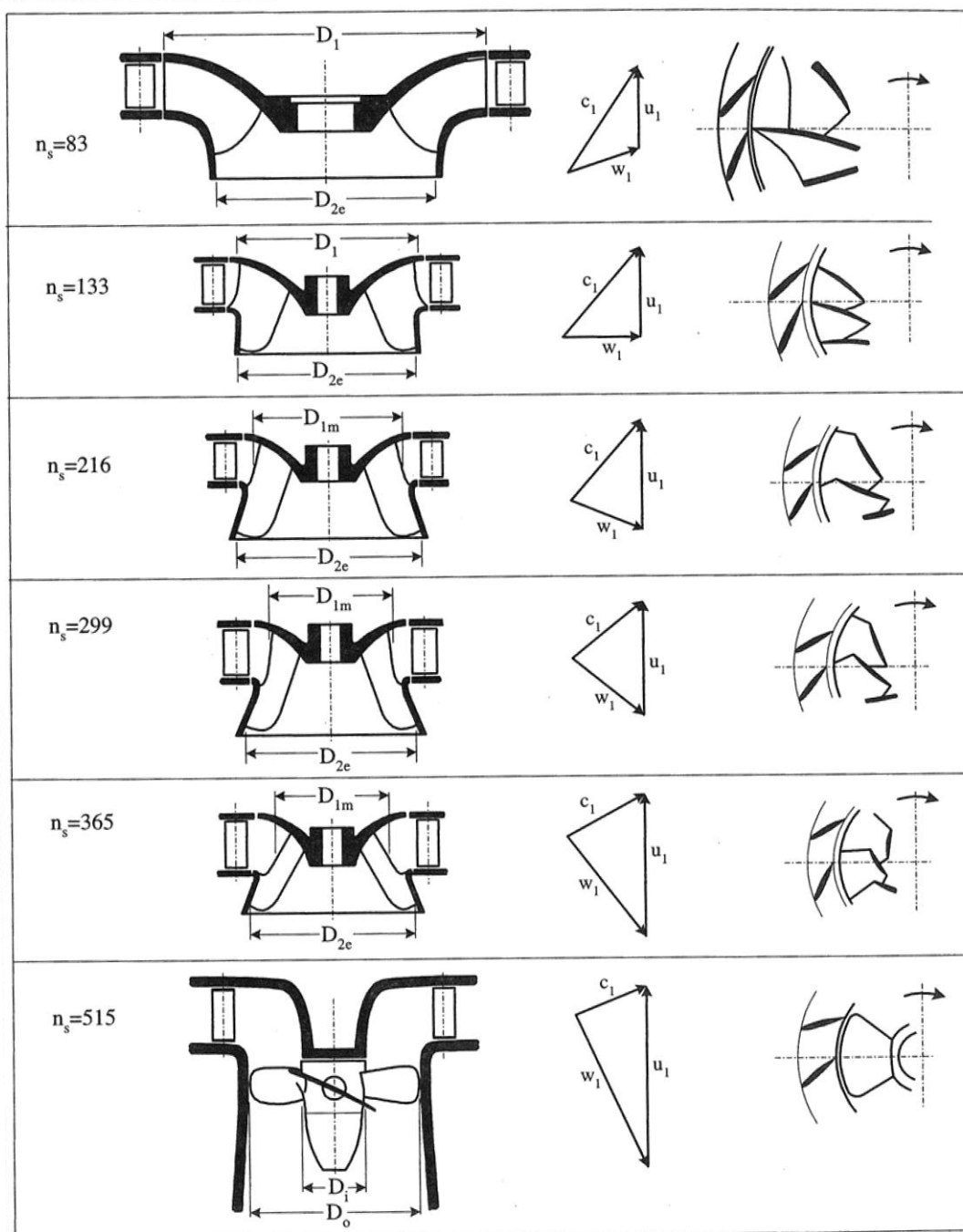
Στην προηγούμενη παράγραφο δίνοντας τον ορισμό των ειδικών στροφών n_q και n_s προκύπτει πως για την ίδια ταχύτητα περιστροφής n , όσο η παροχή Q αυξάνει σε σχέση με το υδραυλικό ύψος H , τόσο αυξάνονται και οι ειδικές στροφές. Για καλά σχεδιασμένους υδροστροβίλους, ανεξάρτητα από τον τύπο του δρομέα, ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης η_{hK} στο κανονικό σημείο λειτουργίας είναι σχεδόν σταθερός και κυμαίνεται από 0,85 – 0,945 (μικρότερο προς μεγαλύτερο μέγεθος υδροστροβίλου, με μέση τιμή 0,9). Από την εξίσωση 5.50 μέσω αδιαστατροποίησης σχέσεων προκύπτει $H_{OK} = (1/g)u_1 c_{u1K}$.

$$u_1 \cdot c_{u1K} = \eta_{hK} \cdot g \cdot H \approx 0,90 \cdot 9,81 \cdot H \quad (5.79)$$

Η τιμή της περιφερειακής ταχύτητας u_1 καθορίζεται από την αντοχή του υλικού που είναι κατασκευασμένο ο δρομέας, αφού οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις θα είναι u_1^2 . Για αυτό το λόγο η τιμή αυτή δεν ξεπερνά τα 50 – 60 m/s για τα περισσότερα κράματα κατασκευής, εκτός και αν τίθεται περιορισμός λόγω σπηλαιώσης. Επομένως από τη σχέση 5.79 με σταθερό σχετικά u_1 , όσο αυξάνεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H , ανεξάρτητα από τον τύπο του στροβίλου θα πρέπει να αυξάνεται η c_{u1K} και να μετασχηματίζεται το τρίγωνο ταχύτητας με δεδομένο ότι η ορθή συνιστώσα c_{n1} της ταχύτητας είναι μικρή

χωρίς μεταβολές. Σε περίπτωση μεγάλης τιμής της c_{n1} θα υπήρχε μικρή διατομή εισόδου και κατ' επέκταση μικρή υδραυλική διάμετρος, αυξάνοντας σημαντικά τις απώλειες τριβής και τις δυσκολίες κατά την κατασκευή του δρομέα. Έτσι, η αντίστοιχη παράμετρος της ορθής ταχύτητας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο τύπος του δρομέα, δίνεται από τη σχέση:

$$C_{n1} = \frac{c_{n1}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,1 - 0,2 \quad (5.80)$$



Σχήμα 5.12 Μεσημβρινή τομή δρομέα και τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου για διάφορες τιμές του ειδικού αριθμού στροφών [E8, Σχ. 7.2]

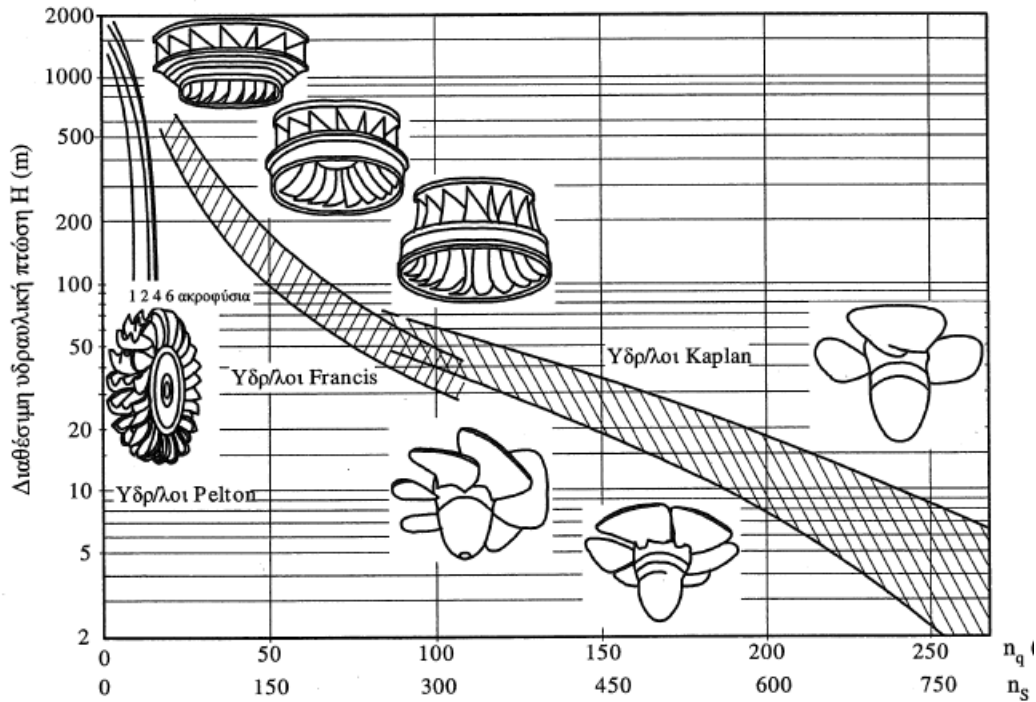
Για πολύ μεγάλες τιμές υδραυλικής πτώσης H , προκύπτει πως η c_{u1} θα είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη u_1 και το τρίγωνο που θα σχηματιστεί θα είναι αμβλυγώνιο, όπως στους υδροστροβίλους Pelton, όπου η γωνία β_1 στο τρίγωνο εισόδου ισούται περίπου με 180° . Για χαμηλότερες τιμές υδραυλικής πτώσης H , η τιμή της γωνίας β_1 κυμαίνεται από 80° έως 100° , όπως γίνεται στους υδροστροβίλους τύπου Francis, ενώ για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης H η τιμή της β_1 είναι μικρότερη από 90° , με αποτέλεσμα το τρίγωνο να γίνεται οξυγώνιο, όπως στους υδροστροβίλους αξονικής ροής. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται ακόμα πιο έντονος ο ρόλος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H στη διαμόρφωση του τριγώνου εισόδου, στην κατασκευή του δρομέα και στον αριθμό ειδικών στροφών τους.

β) Υδραυλική πτώση – ειδικός αριθμός στροφών και βαθμός απόδοσης

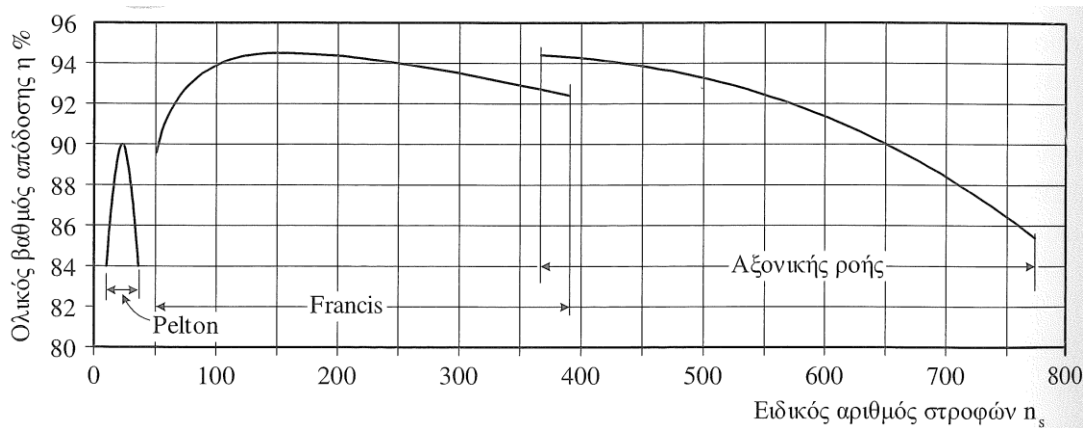
Η επιλογή του ειδικού αριθμού στροφών και ο τύπος του υδροστροβίλου προκύπτει από την τιμή της υδραυλικής πτώσης H για το κανονικό σημείο λειτουργίας της μονάδας με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης οικονομικοτεχνικής λύσης. Στο σχήμα 5.12 δίνεται αυτή η συσχέτιση των δύο μεγεθών για το κανονικό σημείο λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα της συσχέτισης προκύπτει πως ο ειδικός αριθμός στροφών σχετίζεται και με τη διανομή των υδραυλικών και άλλων απωλειών, άρα με τη μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή την τιμή του στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Η συσχέτιση αυτή δίνεται στο σχήμα 5.13 και γίνεται φανερό τόσο σε αυτό, όσο και στο σχήμα 5.14 πως για τους υδροστροβίλους δράσεως, Pelton και Turgo, η αποτελεσματικότερη λειτουργία επιτυγχάνεται σε στενή περιοχή του ειδικού αριθμού στροφών. Στον πίνακα 5.2 δίνονται οι ενδεικτικές τιμές ειδικών στροφών για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων, ενώ στον πίνακα 5.3 δίνονται οι συσχετίσεις που δίνονται για τους κυριότερους τύπους υδροστροβίλων, ως επί το πλείστον μεγάλων ισχύων.

Υδροστροβίλος	n_s (P σε kW)	η_k
Pelton	9 – 82	0,888 – 0,920
Francis	68 – 300	0,930 – 0,945
Deriaz	142 – 470	0,930 – 0,940
Kaplan	290 – 860	0,930 – 0,945
Bulb	645 – 1150	0,910 – 0,940

Πίνακας 5.2 Ενδεικτικές τιμές n_s και του ολικού βαθμού απόδοσης για τους διάφορους τύπους των υδροστροβίλων [E8, Πίνακας 7.1]



Σχήμα 5.13 Συσχέτιση ειδικού αριθμών στροφών – τύπου υδροστροβίλου σε συνάρτηση με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση [E8, Σχ. 7.1]



Σχήμα 5.14 Μέγιστη τιμή ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων σε συνάρτηση με τον ειδικό αριθμό στροφών [E3, Σχ. 5.25α]

Υδροστρόβιλος	n_s (P σε kW, H σε mΣΥ)
Francis	$n_s = 1304 \cdot H^{-0,654}$
Kaplan	$n_s = 79,01 \cdot H^{-0,486}$
Βολβοειδής	$n_s = 1059 \cdot H^{-0,625}$
Pelton	$n_s = 196 \cdot H^{-0,50}$
Cross - Flow	$n_s = 513,25 \cdot H^{0,505}$

Πίνακας 5.3 Συσχετίσεις n_s και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H για τους διάφορους τύπους των υδροστροβίλων [E3, Πίνακας 5.1]

γ) Υπολογισμός – επιλογή της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής

Στα υδροηλεκτρικά έργα οι ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι είτε σύγχρονες, είτε ασύγχρονες για τις περιπτώσεις μικρών ισχύων της τάξης 1,5 με 2 MW. Όταν χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι η σύγχρονη, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια, η ταχύτητα περιστροφής είναι λίγο μεγαλύτερη από τη σύγχρονη ταχύτητα. Για αυτόν το λόγο ο δρομέας θα πρέπει να στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Μερικές φορές ενδέχεται για οικονομικούς λόγους μεταξύ του στροβίλου και της γεννήτριας να υπάρχει ένα κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών ή να πραγματοποιείται μετάδοση με τη χρήση ιμάντων. Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής n_{σ} δίνεται από τη σχέση:

$$n_{\sigma} = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5.81)$$

όπου:

f : συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (για την Ευρώπη $f=50$ Hz)

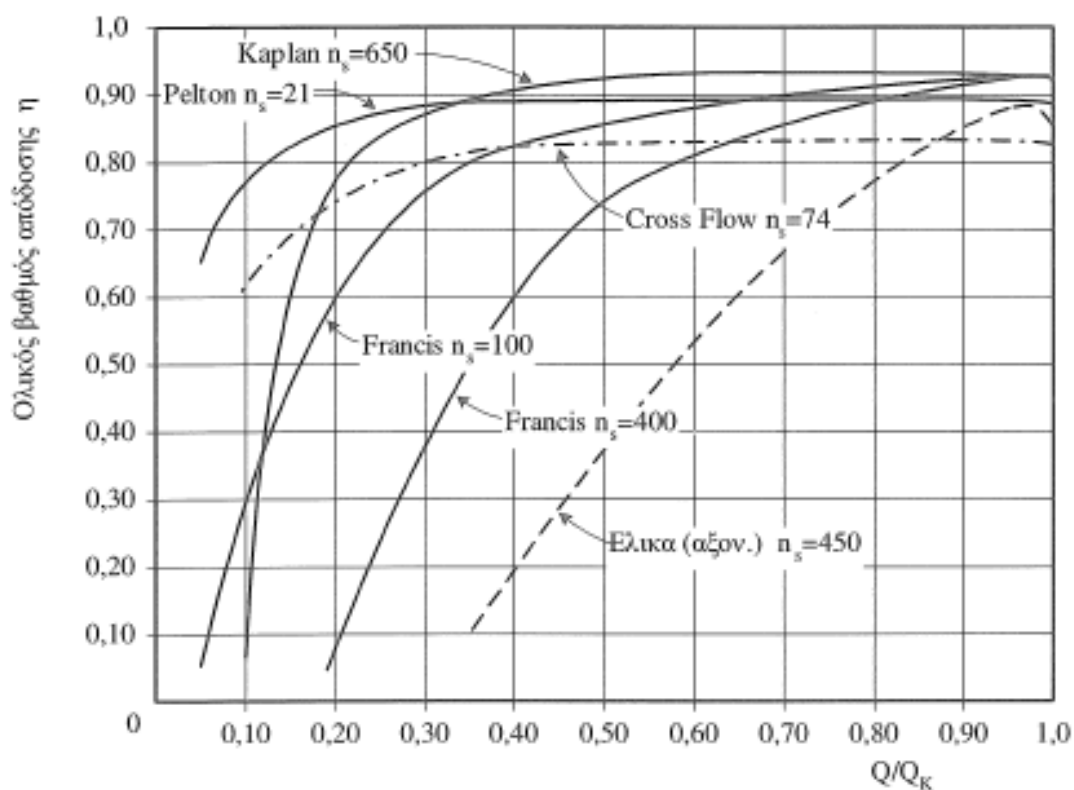
p : το πλήθος των ζευγών των πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας.

Έχοντας στα δεδομένα τις τιμές της υδραυλικής πτώσης H και της παροχής Q στο κανονικό σημείο λειτουργίας από το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 5.15) μπορεί να προκύψει η τιμή της ταχύτητας περιστροφής. Για την τιμή H_K επιλέγεται η τιμή που αντιστοιχεί στο n_q . Από την εξίσωση 5.74 βρίσκεται η ταχύτητα περιστροφής n (RPM). Η ταχύτητα περιστροφής όμως, είναι σύγχρονη και θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση 5.81. Η τιμή που θα προκύψει από τις δυο παραπάνω σχέσεις θα είναι μεταξύ δύο σύγχρονων τιμών, έτσι κατά τη φάση της μελέτης θα πρέπει να επιλεγεί είτε η μία, είτε η άλλη και με βάση αυτή να γίνει ο υπολογισμός της τελικής τιμής n_q . Αναλυτικότερα, η μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής αντιστοιχεί σε γεννήτρια και υδροστρόβιλο μικρότερου κόστους μεγέθους, καθώς σε μικρότερα έργα του πολιτικού μηχανικού. Αλλά, με την αύξηση των ειδικών στροφών η λειτουργία του υδροστροβίλου μπορεί να γίνει πιο ευαίσθητη κατά τη σπηλαίωση, πράγμα που σημαίνει πως ο υδροστρόβιλος θα πρέπει να τοποθετηθεί σε χαμηλότερο στάθμη (υπόγειος), αλλά με μεγαλύτερες εκσκαφές. Για αυτούς τους λόγους η επιλογή των δύο ταχυτήτων περιστροφής θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ύστερα από μελέτη οικονομοτεχνικών κριτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απαραίτητες παραμέτρους.

δ) Καμπύλη μεταβολής βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με το φορτίο του.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης για διάφορους τύπους υδροστροβίλων, καθώς και του ειδικού αριθμού στροφών n_s σε συνάρτηση με το φορτίο, δηλαδή την παροχή Q προς την παροχή στο κανονικό σημείο λειτουργίας Q_k . Για σταθερή πτώση ύδατος ($H = \text{σταθ.}$) η μεταβολή του βαθμού απόδοσης και της παροχής είναι ενδεικτική της ισχύος εξόδου.

Στο σχήμα είναι εμφανές πως οι υδροστροβίλοι Pelton και Kaplan παρουσιάζουν καλύτερο βαθμό απόδοσης από τους υπολοίπους, αφού σε μεγάλο εύρος φορτίου η καμπύλη τους παραμένει επίπεδη, χωρίς πτωτικές τάσεις. Οι υδροστροβίλοι Pelton οφείλουν αυτό το πλεονέκτημα στο γεγονός πως με τη μεταβολή του φορτίου, πραγματοποιείται μεταβολή της δέσμης και όχι της ταχύτητας της με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεταβολή στις σχετικές ταχύτητες. Επιπλέον, οι Pelton είναι αρκετά ευαίσθητοι στις μεταβολές της διαθέσιμης πτώσης ύδατος και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μειωθεί έντονα ο ολικός βαθμός απόδοσης για μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές του H_k .



Σχήμα 5.15 Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων σε συνάρτηση με τα φορτία του [E3, Σχ. 5.25β]

Οι υδροστροβίλοι Kaplan είναι διπλής ρύθμισης, αφού υπάρχει η δυνατότητα περιστροφής των περυγίων του δρομέα με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιλέγεται ο καλύτερος συνδυασμός της κλίσης των περυγίων και του δρομέα των ρυθμιστικών περυγίων. Η διαφορά αυτή γίνεται ακόμα πιο εμφανής αν συγκριθεί η καμπύλη του Kaplan με αυτήν του τύπου έλικας με αξονική ροή, έχοντας σταθερά τα περύγια του δρομέα. Φαίνεται πως η καμπύλη τύπου έλικας, είναι πολύ απότομη και θεωρείται κατάλληλη εφαρμογή για πολύ μικρό εύρος λειτουργίας.

ε) Κριτήρια επιλογής του τύπου του υδροστροβίλου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η περιοχή και το εύρος λειτουργίας για διάφορους τύπους υδροστροβίλων. H , P , είναι η διαθέσιμη υδραυλική πτώση και η ισχύς, αντίστοιχα, στο κανονικό σημείο λειτουργίας.

α/α	Τύπος Υδροστροβίλου	H(mΣΥ)	$\frac{H_{min}}{H_K} - \frac{H_{max}}{H_K} \%$	P_K (MW)	$\frac{Q_{min}}{Q_K} - \frac{Q_{max}}{Q_K} \%$	n_e/n
1	Francis Κατακόρυφος	10 – 250	50 – 125	0,25 – 15	50 – 115	1,8 – 2,2
2	Francis Οριζόντιος	10 – 250	50 – 125	0,25 – 2	50 - 115	1,8 – 2,2
3	Francis ανοιχτού θαλάμου	2 – 11	90 – 110	0,25 – 2	50 - 115	1,8 – 2,2
4	Αξονικής ροής έλικας	2 – 20	55 – 125	0,25 - 15	30 - 115	1,8 – 2,2
5	Karlan Κατακόρυφος	2 – 20	45 – 150	1,0 – 15	10 - 115	2,4 – 2,8
6	Σωληνωτός (Σταθερά περύγια δρομέα, στεφάνης)	2 – 18	65 – 140	0,25 – 15	45 - 115	2,4 – 2,8
7	Σωληνωτός (Σταθερά περύγια δρομέα, ρυθμιζόμενα στεφάνης)	2 – 28	55 – 140	0,25 – 15	35 - 115	2,0 – 2,4
8	Βολβοειδής	2 – 20	45 – 140	1,0 – 15	10 - 115	2,4 – 2,8
9	Δακτυλίου (Straflo)	2 – 20	45 – 140	1,0 – 8	10 - 115	2,4 – 2,8
10	Σωληνωτός γραναζωτής μετάδοσης	2 – 18	55 – 140	0,25 – 2	45 - 115	2,0 – 2,4
11	Cross – Flow	6 – 200	50 – 125	0,25 – 2	10 - 115	1,8 – 1,9
12	Pelton	70 – 1200	85 – 125	0,15 – 15	15 - 115	1,9
13	Turgo	40 - 200	60 – 125	0,10 – 2,0	25 - 115	1,9

Πίνακας 5.4 Εύρος λειτουργιών και περιοχή για διάφορους τύπους υδροστροβίλων [E3, Πίνακας 5.1]

Λαμβάνοντας σα δεδομένο τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση και την ισχύ ενός υδροστροβίλου δεν αρκεί για να επιλεγεί ο κατάλληλος υδροστροβίλος. Θα πρέπει να εξεταστούν παράλληλα και άλλα κριτήρια σχετικά με την επιλογή του,

όπως είναι το κόστος του, το συνολικό κόστος του υδροηλεκτρικού σταθμού, το εύρος λειτουργίας του, η ροπή αδράνειας, καθώς και η στιβαρότητά του.

Από το σχήμα 5.13 προκύπτει πως η επιλογή ενός υδροστροβίλου και του ειδικού αριθμού στροφών για κάποιες περιοχές λειτουργίας δεν είναι μονοσήμαντη. Δηλαδή, για υδραυλική πτώση 40m δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί τόσο ο Kaplan (ή αξονικής ροής), όσο και ο Francis. Όμως πρέπει να ληφθεί υπόψη πως για την ίδια ονομαστική ισχύ ο Francis έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις και κόστος από τον Kaplan, καθώς παρουσιάζει και καλύτερη συμπεριφορά στο φαινόμενο της σπηλαίωσης και έτσι η στάθμη τοποθέτησής του μπορεί να είναι υψηλότερη από του Kaplan. Αντίστοιχα, ο Kaplan διαθέτει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας με αρκετά υψηλούς ολικούς βαθμούς απόδοσης και τον καθιστά καταλληλότερο για έργα που η λειτουργία τους απαιτεί συχνή μεταβαλλόμενη παροχή.

Σε συνέχεια αν εξεταστεί η περιοχή με υδραυλική πτώση 200 με 300 m φαίνεται πως οι επιλογές είναι Francis και Pelton. Για την ίδια ονομαστική παροχή ο Pelton απαιτεί περισσότερο χώρο τοποθέτησης, αφού ο Francis έχει μικρότερες διαστάσεις με μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επομένως προκύπτει πως το κόστος υδροστροβίλου, της γεννήτριας και του υδροηλεκτρικού σταθμού θα είναι χαμηλότερο για την περίπτωση του Francis. Όμως, από το σχήμα 5.15 φάνηκε πως η καμπύλη απόδοσης του Pelton είναι επίπεδη, παρουσιάζοντας υψηλούς βαθμούς απόδοσης σε μεγάλο εύρος λειτουργίας, με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί σε μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής. Ακόμα, η κατασκευή του Pelton, είναι πιο στιβαρή από αυτή του Francis, αφού δεν αναπτύσσονται αξονικά φορτία και δεν έχει ωστικό έδρανο, καθώς και η συντήρησή του είναι αρκετά πιο εύκολη, λόγω της τοποθέτησής του πάνω από τη στάθμη διώρυγας απαγωγής που είναι πιο εύκολη η πρόσβαση.

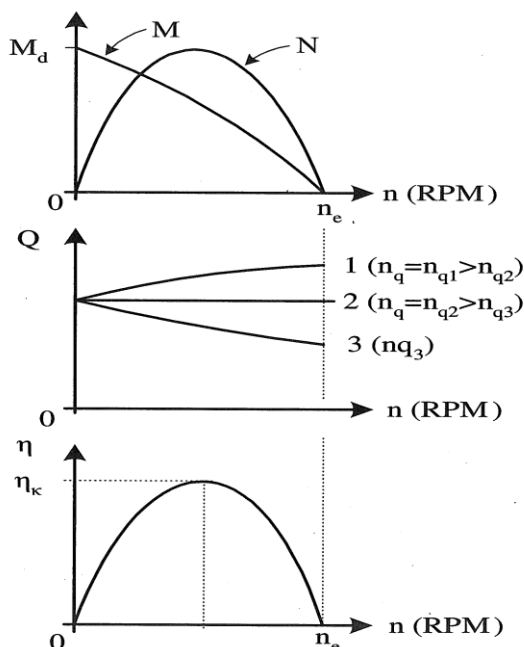
Για τους διάφορους τύπους αξονικής ροής, επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση όλων των παραμέτρων για την εύρεση του καταλληλότερου στροβίλου. Η χαμηλότερη απόδοση παρουσιάζεται στους σωληνωτούς τύπου S και στους σωληνωτούς με γωνιακή μετάδοση. Αντίθετα, ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης των τύπων αξονικής ροής, δίνεται από τον υδροστρόβιλο δακτυλίου, που συγκρινόμενος με το βολβοειδή, παρουσιάζει και πλεονέκτημα υψηλής ροπής αδρανείας των περιστρεφόμενων μαζών, γιατί οι πόλοι της γεννήτριας έχουν διάταξη σε μεγάλη διάμετρο. Ο βολβοειδής έχει χαμηλή ροπή αδρανείας, γιατί έχει μικρή γεννήτρια που στεγάζεται στο εσωτερικό του βολβού. Η επίτευξη της υψηλής ροπής αδρανείας είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους υδροστροβίλους, γιατί ευνοεί την ευστάθειά τους όταν συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου κατά τη διάρκεια των μεταβολών του φορτίου. Κάτι τέτοιο βέβαια αυξάνει αρκετά και τις απαιτήσεις για τη ζυγοστάθμιση του στροφείου. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν τόσο ο βολβοειδής, όσο και ο υδροστρόβιλος δακτυλίου είναι οι δυσκολίες σχετικά με τη στεγανότητα και την ψύξη και για αυτόν το λόγο μέχρι τα 10 MW οι τύποι που προσφέρονται είναι ελάχιστοι. Ακόμα ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει ο βολβοειδής αφορά στη δύσκολη

συντήρησή του, εξαιτίας του μικρού χώρου και της δυσκολίας προσπέλασής του.

Ο Cross – Flow υδροστροβίλος, έχει χαμηλότερη μέση τιμή ολικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με τον Francis, αλλά το κόστος του είναι μικρότερο και παρουσιάζει μεγάλο εύρος λειτουργίας. Επιπλέον, η εγκατάστασή και συντήρησή του είναι αρκετά απλή με μειονέκτημα το μεγαλύτερο όγκο που καταλαμβάνει συγκριτικά με τον Francis.

5.2.8 Λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές

Η λειτουργία των υδροστροβίλων με μεταβλητές στροφές για τροφοδότηση ηλεκτρικού δικτύου σταθερής συχνότητας, επιλέγεται όλο και συχνότερα, ενώ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά. Με τον τρόπο αυτόν γίνεται η προσαρμογή του σημείου λειτουργίας των αναστρέψιμων μηχανών, δηλαδή για τη λειτουργία αντλίας χρειάζεται υψηλή ταχύτητα περιστροφής και για τη λειτουργία στροβίλου χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής. Στα μικρά υδροηλεκτρικά δεν υπάρχει μεγάλο νόημα αναστρέψιμων συστημάτων, εκτός αν είναι μέρος υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα σύνδεση με ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά. Ιδιαίτερα στις ανεμογεννήτριες η εφαρμογή αυτή έχει υψηλή σημασία λόγω της συχνής και έντονης διακύμανσης του ανέμου.



Σχήμα 5.16 Χαρακτηριστικές υδροστροβίλου σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής για σταθερή υδραυλική πτώση και άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων [E8, Σχ. 7.9]

Όταν ο υδροστρόβιλος είναι αξονικής ροής η συγκεκριμένη εφαρμογή περιορίζεται όταν ο δρομέας έχει σταθερά πτερύγια. Το εύρος λειτουργίας αυξάνεται και έχει μεγαλύτερη ευκολία στη λειτουργία και τη συντήρηση, καθώς και χαμηλότερο κόστος εξαιτίας της απλής ρύθμισης που έχει. Στην κατηγορία με την περιορισμένη εφαρμογή είναι και οι περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη υδραυλική πτώση με μεγάλη διακύμανση. Ο αξονικής ροής υδροστρόβιλος μονής ή διπλής ρύθμισης σε αυτήν την περίπτωση θα λειτουργεί για μεγάλα διαστήματα με μικρό βαθμό απόδοσης και επομένως με μικρή παραγωγή ενέργειας. Με την εφαρμογή της λειτουργίας μεταβλητών στροφών θα υπάρχει προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής του υδροστρόβιλου με την υδραυλική πτώση για να λειτουργεί κάθε φορά με το μέγιστο βαθμό απόδοσης.

5.3 Εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής μικρών υδροηλεκτρικών

Για την εκτίμηση της ταχύτητα περιστροφής και της διαμέτρου του δρομέα έχουν αναπτυχθεί διάφορες συσχετίσεις που αναλύθηκαν στα παραπάνω κεφάλαια. Για τα μικρά υδροηλεκτρικά, ωστόσο, τα αποτελέσματα που δίνουν αυτές οι συσχετίσεις είναι μη ρεαλιστικές, όπως για παράδειγμα μικρή διάμετρο του δρομέα και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι συνθήκες σχεδίασης και ροής μικρών και μεγάλων υδροστρόβιλων διαφέρουν μεταξύ τους. Οι μεγάλοι υδροστρόβιλοι έχουν υψηλή τιμή αριθμού Reynolds με μικρό πάχος των οριακών στρωμάτων σε σχέση με το πλάτος και μεγαλύτερες μέσες ταχύτητες ροής. Επιπλέον, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη μείωση των διαστάσεων των μεγάλων υδροστρόβιλων με την προϋπόθεση πως θα τοποθετηθούν σε χαμηλότερη στάθμη από αυτήν της απαγωγής για την αποφυγή του φαινομένου της σπηλαίωσης.

Το βασικό κριτήριο για έναν μικρό υδροστρόβιλο για την επιλογή της διαμέτρου του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής είναι η δυνατότητα της λειτουργίας του υδροστρόβιλου σε υψηλότερη στάθμη από αυτήν της στάθμης απαγωγής για να μην τοποθετηθεί ο υδροηλεκτρικός σταθμός υπόγεια και να είναι όσο πιο απλοποιημένα γίνεται τα έργα κατασκευής τους. Οι συσχετίσεις που προτείνονται για την εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα D (m) και της ταχύτητας περιστροφής n (RPM) για τους διάφορους τύπους μικρών υδροηλεκτρικών δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών n_s για υδροστρόβιλους Cross - Flow μετά από τη θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας τους δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_s \approx 120 \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (5.82)$$

όπου D, B η διάμετρος και το πλάτος του δρομέα αντίστοιχα. Για λόγους αντοχής ο λόγος B/D δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 3,5.

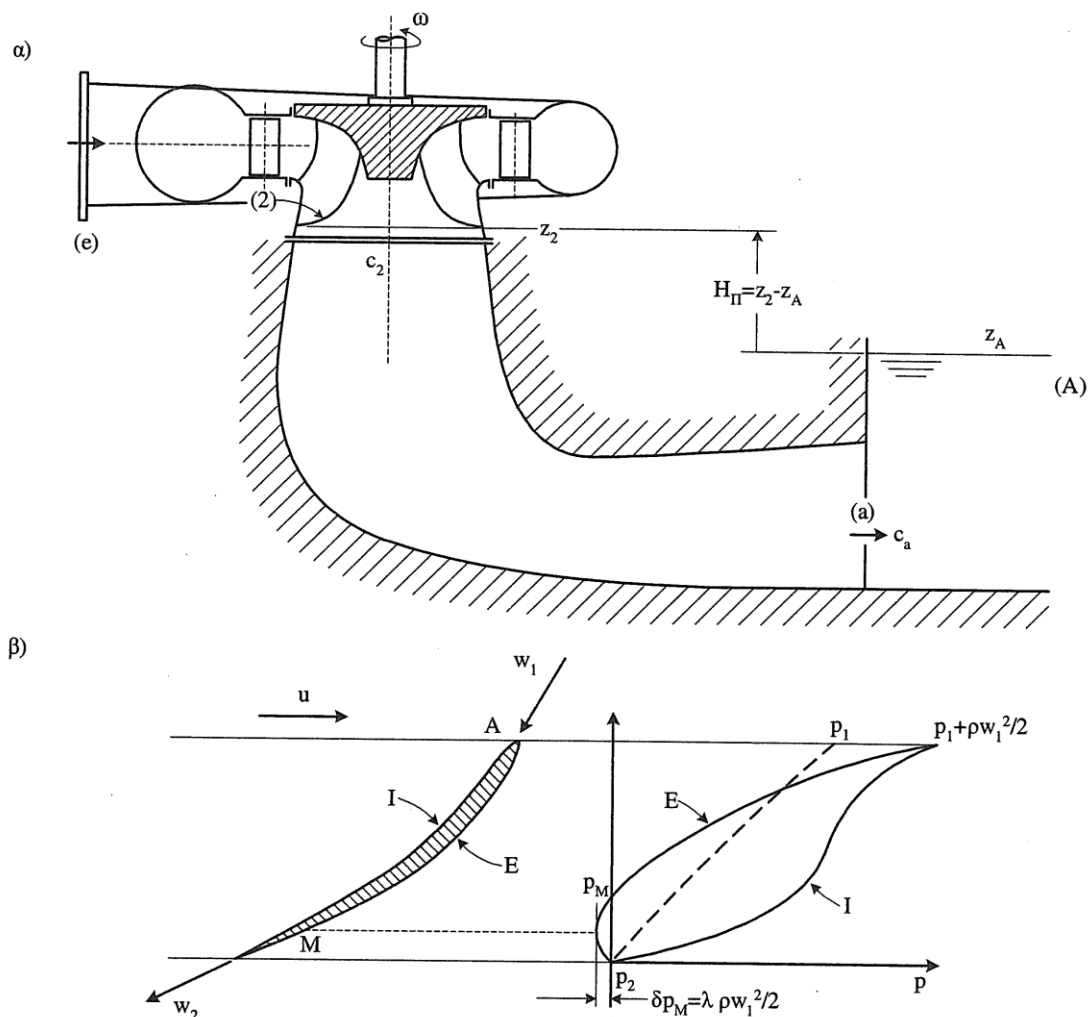
Τύπος Υδροστροβίλου	Διάμετρος δρομέα D (m)	Ταχύτητα περιστροφής n (RPM)
Francis	$D = 0,160 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,471}$	$n = 110,113 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{0,809}$
Kaplan	$D = 0,157 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,489}$	$n = 156,662 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{0,922}$
Βολβοειδής	$D = 0,183 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,446}$	$n = 156,662 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{0,922}$
Σωληνωτός	$D = 0,143 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,512}$	$n = 156,193 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{0,890}$
Pelton	$D = 0,315 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,483}$	$n = 32,549 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{1,079}$
Cross - Flow	$D = 0,329 \cdot \left(\frac{P}{H}\right)^{0,275}$	$n = 38,451 \cdot \left(\frac{H^{0,5}}{D}\right)^{1,032}$

Πίνακας 5.5 Συσχετίσεις μικρών υδροστροβίλων για εύρεση της ταχύτητας περιστροφής και της διαμέτρου του δρομέα. [E3]

5.4 Το πρόβλημα της σπηλαίωσης και η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου

Σε μία περιοχή ροής όπου η στατική πίεση τείνει να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης p_s δημιουργείται το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Στους υδροστροβίλους αντιδράσεων η πιο πιθανή περιοχή ροής που θα μπορούσε να παρατηρηθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης είναι κατά την έξοδο του δρομέα, εκεί που η μέση στατική είναι μικρή. Η σπηλαίωση προκαλεί διάβρωση στις επιφάνειες των πτερυγίων, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων με κρουστική μορφή που αναπτύσσονται στο δρομέα από την επανυγροποίηση των φυσαλίδων του ατμού. Η διάβρωση παρατηρείται εντονότερα στα πιο ανομοιόμορφα κράματα στη δομή τους, όπως είναι αυτό του ανοξειδωτού χάλυβα. Στο παρακάτω σχήμα 5.17α φαίνεται η εγκατάσταση υδροστροβίλου στη στάθμη της διώρυγας απαγωγής και στο 5.17β φαίνεται η διανομή της στατικής πίεσης στις επιφάνειες του πτερυγίου του δρομέα και σε ένα σημείο κοντά στο σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου. Σε κάθε πτερύγιο υπάρχει η πλευρά υπερπίεσης (I) και υποπίεσης (E). Η διαφορά ($p_I - p_E$) που δημιουργεί την κινητήρια ροπή της ίδιας φοράς με την ταχύτητα περιστροφής. Για την αποφυγή του φαινομένου της

σπηλαίωσης θα πρέπει η μέση ελάχιστη στατική πίεση να είναι μεγαλύτερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού.



Σχήμα 5.17 α) Στάθμη τοποθέτησης υδροστροβίλου β) Διανομή της στατικής πίεσης γύρω από το πτερύγιο [Ε8, Σχ. 8.1]

Μετά από εφαρμογή της εξίσωσης Βερνουλι μεταξύ διατομής εξόδου του υδροστροβίλου και της ελεύθερης επιφάνειας της διώρυγας απαγωγής και της εξόδου του δρομέα προκύπτει μία συνθήκη μη σπηλαίωσης στο δρομέα του υδροστροβίλου:

$$H_{\theta} > H_{κρ} \rightarrow H_{\theta} = H_B - H_{\pi} - H_S > H_{κρ}$$

όπου:

H_{θ} : η τιμή του καθαρού ύψους τοποθέτησης του υδροστροβίλου,

$H_{κρ}$: το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης,

H_B : η ατμοσφαιρική πίεση,

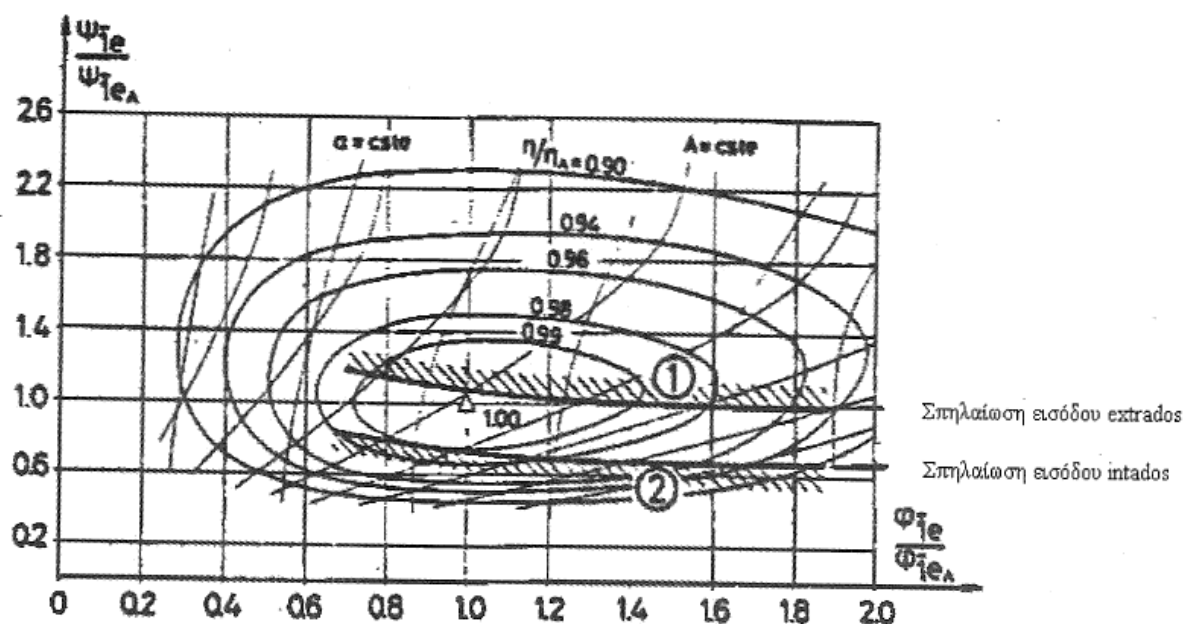
H_{π} : το ύψος τοποθέτησης του υδροστροβίλου,

H_s : η τάση ατμών.

Το ύψος της τοποθέτησης του υδροστροβίλου προς τη στάθμη της διώρυγας απαγωγής καθορίζει τελικά τη στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου. Έτσι, ορίζεται η μέση στάθμη της διατομής εξόδου του δρομέα του στην περίπτωση υδροστροβίλου κατακόρυφης διάταξης, ενώ η στάθμη του υδροστροβίλου είναι η στάθμη της διατομής εξόδου, στην περίπτωση που ο υδροστροβίλος είναι οριζόντιος.

Υπάρχουν διάφορες μορφές σπηλαίωσης όπως:

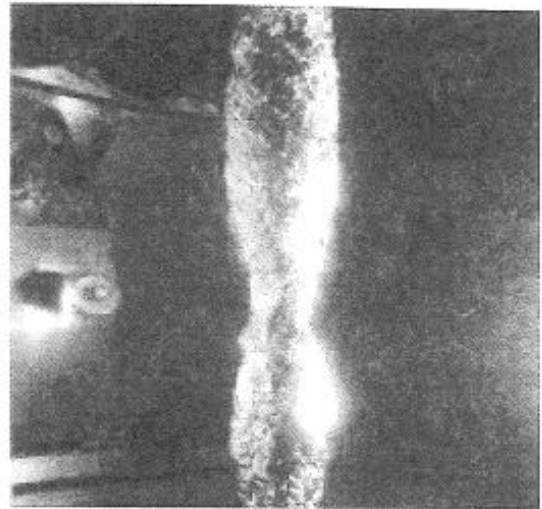
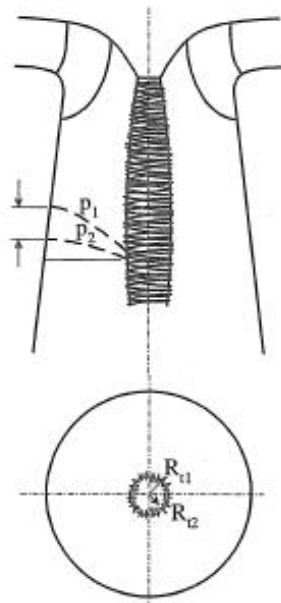
- Εξωτερική επιφάνεια – σπηλαίωση εισόδου (extrados): Δημιουργείται κυρίως στη διατομή εισόδου των περυγίων στην εξωτερική επιφάνεια και προς το μέρος της στεφάνης.
- Εσωτερική επιφάνεια – σπηλαίωση εισόδου (intrados): Δημιουργείται στην εσωτερική επιφάνεια του περυγίου και στην περιοχή ακμής της εισόδου, εμφανίζοντας φουσαλίδες ατμού.



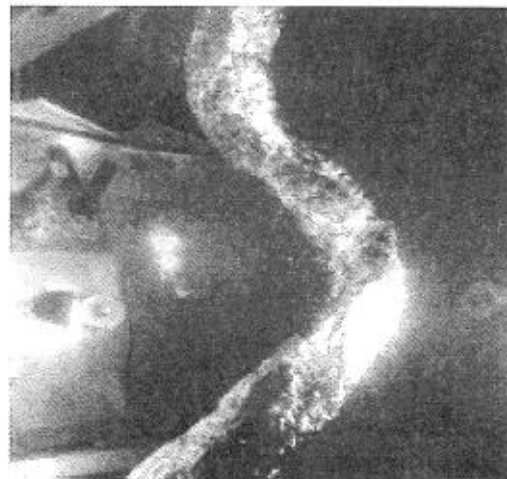
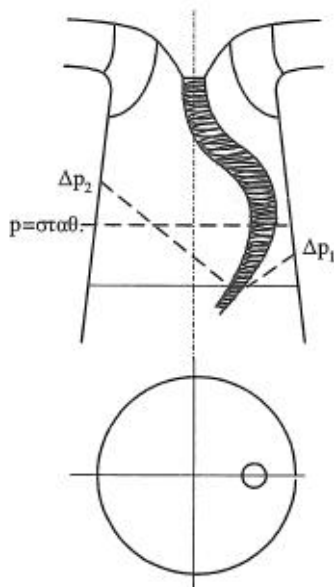
Σχήμα 5.18 Διάγραμμα λειτουργίας Francis και επιτρεπόμενα όρια λειτουργίας λόγω ανάπτυξης της σπηλαίωσης στην είσοδο [E8, Σχ. 8.3]

- Στήλη σπηλαίωσης: Δημιουργείται στην πλήμνη του δρομέα και οφείλεται σε δύο περιπτώσεις που προκαλούν αρνητική ή θετική συστροφή στην έξοδο του δρομέα αντίστοιχα. Αν η παροχή είναι μικρότερη από την κανονική σε σημείο λειτουργίας εκτός του κανονικού σημείου, δημιουργείται θετική συστροφή στην έξοδο του δρομέα. Σε αντίθεση, αν η παροχή είναι μεγαλύτερη από την κανονική, δημιουργείται αρνητική συστροφή. Έτσι, οι γραμμές της ροής τείνουν προς το άπειρο, η δημιουργείται πτώση της στατικής πίεσης και αναπτύσσεται το

φαινόμενο της σπηλαίωσης σε μορφή στήλης, κωνικού ή ελικοειδούς σχήματος. Με αυτήν την ανάπτυξη της σπηλαίωσης δεν προκαλείται ιδιαίτερη διάβρωση, λόγω του ότι συμβαίνει μακριά από τις επιφάνειες του υδροστροβίλου, όμως μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις στη λειτουργία του υδροστροβίλου και μηχανικές απώλειες. Για την αποφυγή της μπορεί να πραγματοποιηθεί έγχυση αέρα στον κώνο της πλήμνης ή η διαμόρφωση πιο λεπτών πτερυγίων στον κώνο απαγωγής.



Σχήμα 5.19α Ανάπτυξη στήλης σπηλαίωσης για μεγαλύτερη παροχή [E8, Σχ. 8.4]



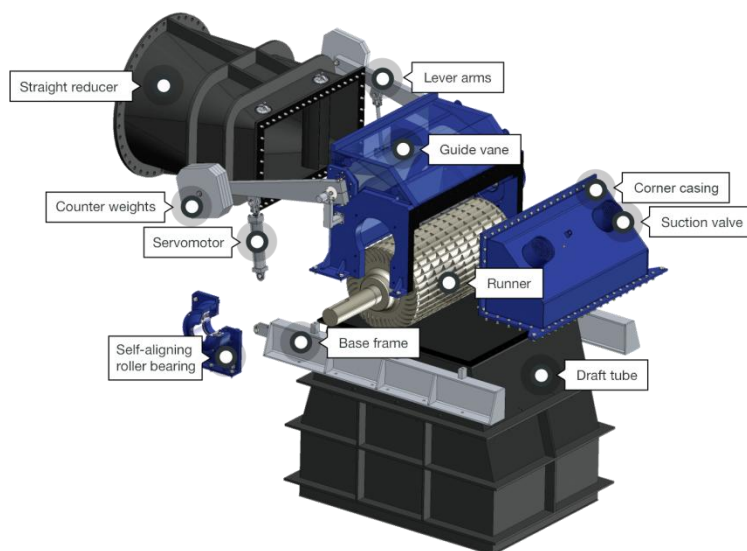
Σχήμα 5.19β Ανάπτυξη στήλης σπηλαίωσης για μικρότερη παροχή [E8, Σχ. 8.5]

5.5 Τυποποίηση μικρών υδροηλεκτρικών

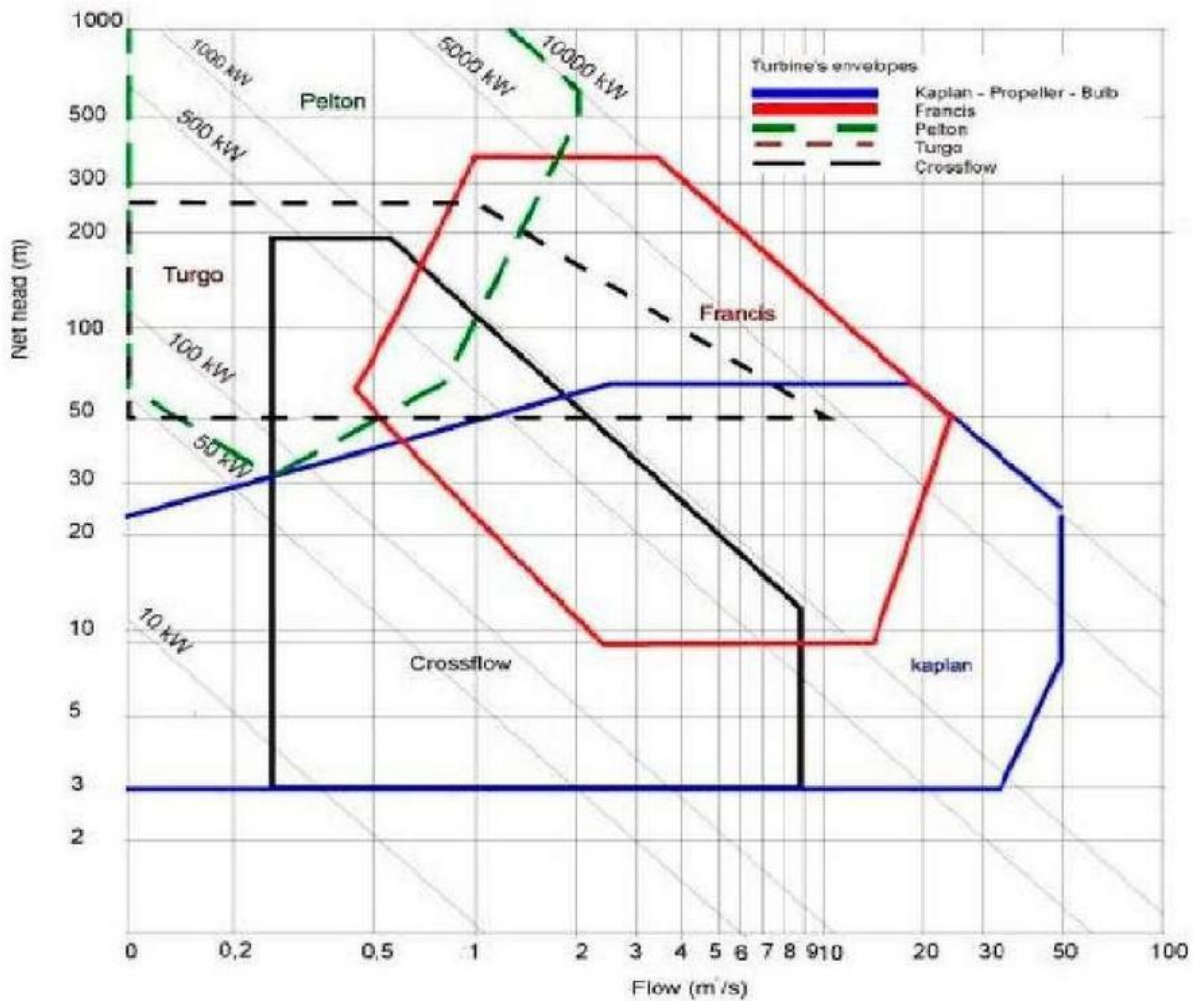
5.5.1 Γενικά

Η επιλογή τυποποιημένου υδροστροβίλου έχει αρκετά πλεονεκτήματα, τόσο στο κόστος, όσο και στο χρόνο παράδοσης σε ένα έργο. Το κόστος ενός τυποποιημένου υδροστροβίλου είναι συγκεκριμένο και δε μεταβάλλεται εύκολα, αφού θα έχει περάσει ήδη από όλα τα στάδια ανάπτυξης και δοκιμών από τον κατασκευαστή του πριν βγει στην αγορά. Επιπλέον, για τα υδροηλεκτρικά έργα είναι πολύ σημαντικός ο χρόνος παράδοσης όλου του εξοπλισμού και με την χρήση τυποποιημένου υδροστροβίλου κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται άνετα, αφού ο χρόνος παράδοσης για τον υδροστρόβιλο θα είναι σίγουρα μέσα στα 2 έτη που απαιτείται συνήθως για να ολοκληρωθεί ένα μικρό υδροηλεκτρικό έργο. Επιπλέον, με τη χρήση τυποποιημένου εξοπλισμού η αξιοπιστία και η συντήρησή του καθίσταται πιο εύκολη από άλλες περιπτώσεις, λόγω άμεσης διαθεσιμότητας ανταλλακτικών στην αγορά. Το κύριο μειονέκτημα εφαρμογής τυποποιημένου εξοπλισμού είναι πως ενδέχεται κανένας υδροστρόβιλος να μην ταιριάζει με τα χαρακτηριστικά που έχουν σχεδιαστεί για το εκάστοτε έργο και επομένως να μην πληροί τα κριτήρια για να επιλεγθεί.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές στην αγορά έχουν παραγωγή υδροστροβίλων που καλύπτουν από μερικά kW έως 10 με 15 MW. Αυτό το εύρος τιμών συνήθως κυκλοφορεί σε όλους τα κατασκευαστές υδροστροβίλων, αν και κάποιος εξ αυτών μπορεί να ειδικεύονται μόνο σε ένα συγκεκριμένο τύπο, όπως για παράδειγμα η εταιρεία OSSBERGER που ειδικεύεται μόνο σε Cross – Flow στροβίλους. Επιπλέον, κάποιος κατασκευαστής στροβίλων μπορεί να έχουν στη γκάμα τους υδροστροβίλους αρκετά χαμηλής ισχύος από 0,1 έως 100 kW.



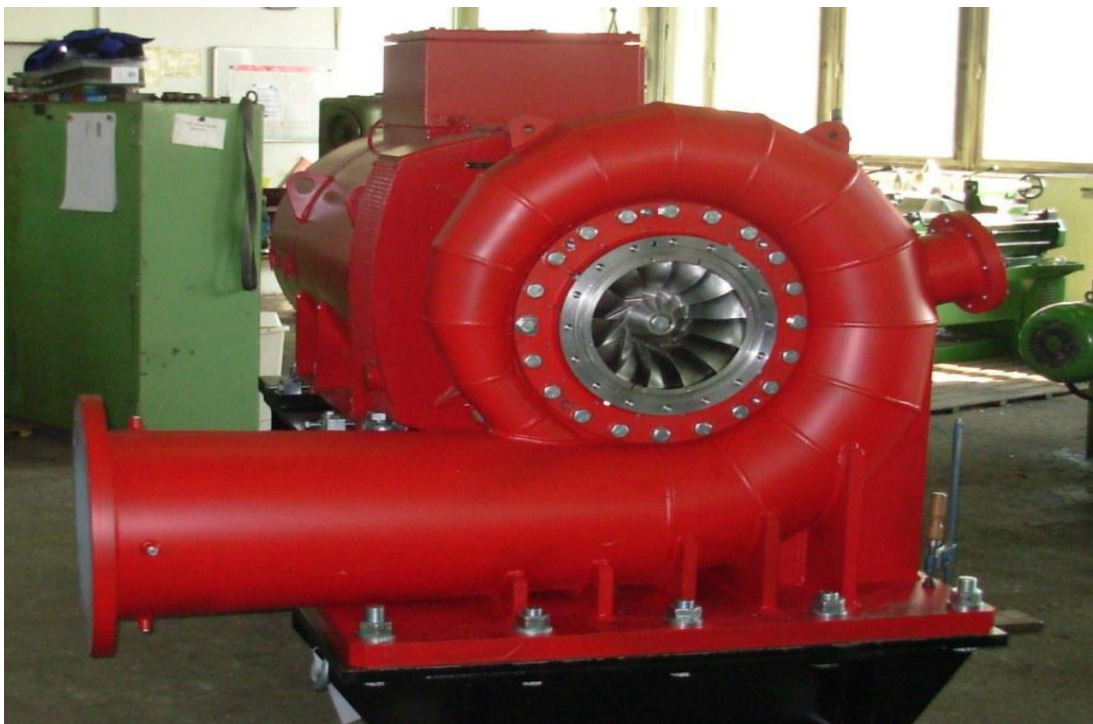
Σχήμα 5.20 Υδροστρόβιλος εταιρείας Cink (Hydro – Energy) [125]



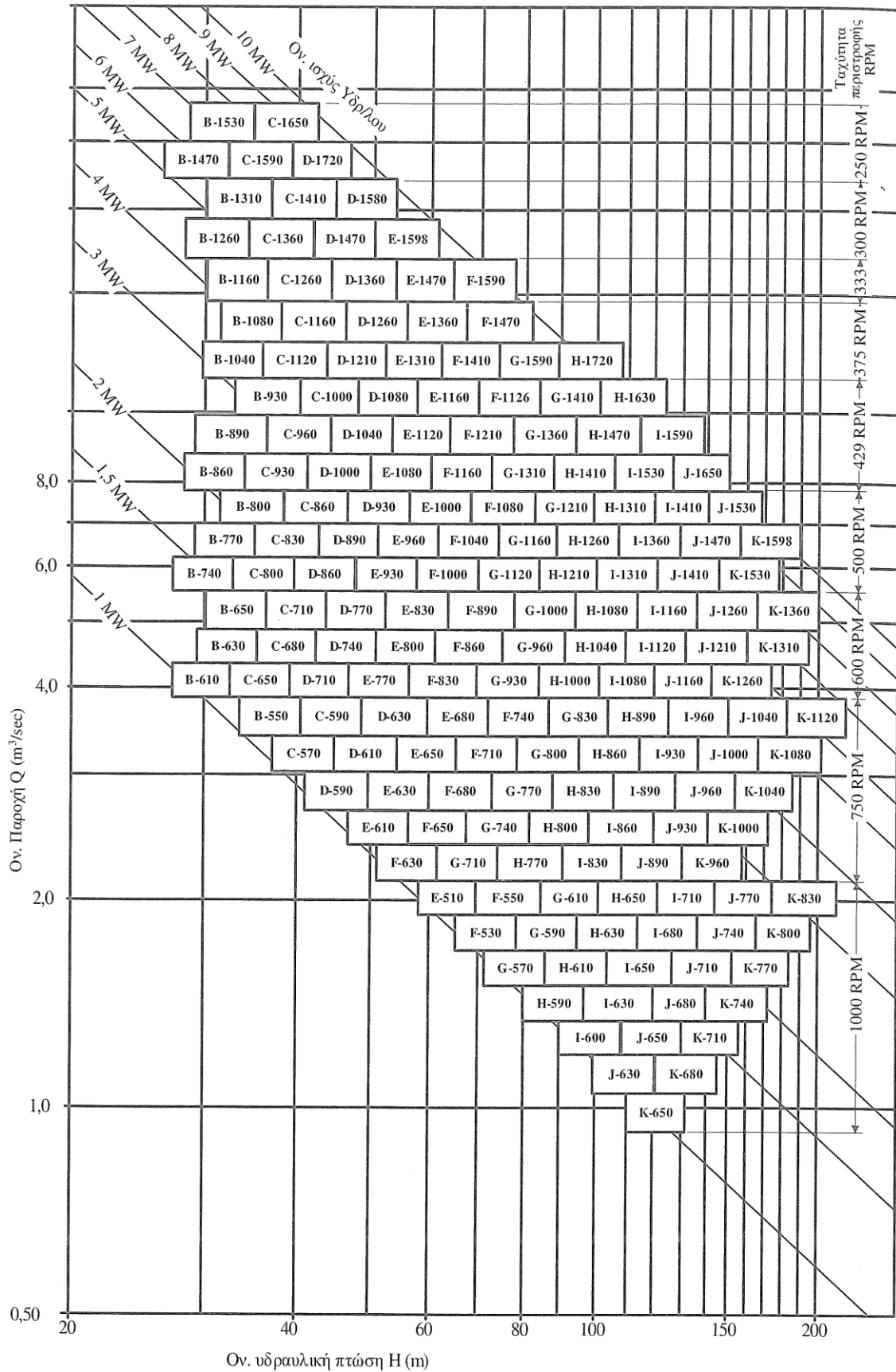
Σχήμα 5.21 Διάγραμμα επιλογής υδροστροβίλου [Ε3, Σχήμα 5.29]

5.5.2 Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Francis

Ο στροβίλος Francis περιλαμβάνει ένα δρομέα ακτινικής ροής στον οποίο το νερό χτυπά ακτινικά τα πτερύγια του και φεύγει αξονικά κατά μήκος του άξονά του μέσω του σωλήνα απαγωγής. Ο στροβίλος Francis είναι μικτής ροής και το νερό διέρχεται από τα καμπύλα οδηγά πτερύγια δημιουργώντας έντονα περιστροφική ροή στην έξοδο. Ο σωλήνας απαγωγής συνδέεται στο άκρο του στροβίλου και βοηθά στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του στροβίλου αντίδρασης ηρεμώντας την περίσσεια κινητική ενέργεια του ρευστού. Οι σύγχρονοι στροβίλοι Francis παρουσιάζουν μέγιστες αποδόσεις μεταξύ 80% και 95% [Ε62]. Ωστόσο, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω μεταξύ 90% και 95% όταν ο στροβίλος είναι καλά σχεδιασμένος. Αυτοί οι στροβίλοι είναι γενικά κατάλληλοι για μεσαία ύψη με μέτρια παροχή.



Σχήμα 5.22 Υδροστρόβιλοι Francis της εταιρείας Cink Hydro – Energy (κατακόρυφου άξονα πάνω – οριζόντιου άξονα κάτω) [125]

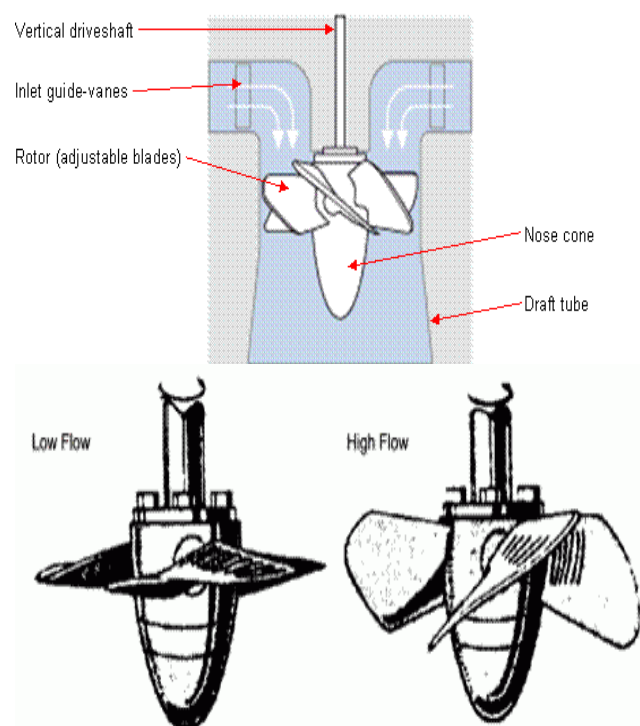


Σχήμα 5.23 Διαγράμματα εύρους λειτουργίας υδροστροβίλων Francis της εταιρείας Toshiba [E3, Σχήμα 5.33]

5.5.3 Τυποποιημένοι αξονικής ροής

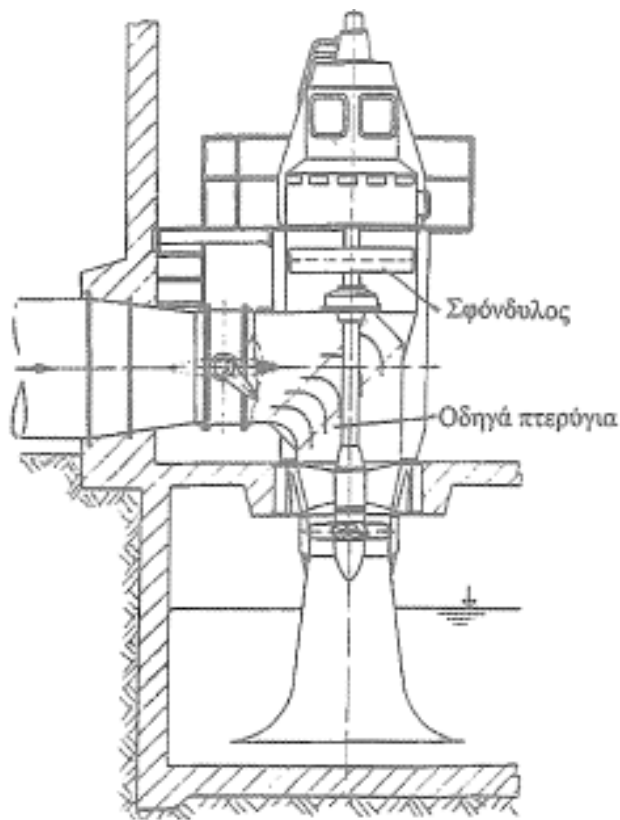
α) Kaplan Στρόβιλος

Ο στρόβιλος Kaplan είναι ελικοειδούς μορφής με ρυθμιζόμενα πτερύγια μέσα σε ένα σωλήνα. Είναι ένας στρόβιλος αξονικής ροής, που σημαίνει ότι η κατεύθυνση ροής δεν αλλάζει, καθώς διασχίζει το δρομέα. Το σχήμα 5.24 δείχνει έναν απλοποιημένο στρόβιλο Kaplan. Τα πτερύγια-οδηγοί εισαγωγής μπορούν να ανοίγουν και να κλείνουν για να ρυθμίζουν την ποσότητα της ροής που μπορεί να περάσει μέσα από το στρόβιλο. Όταν κλείσουν πλήρως, θα σταματήσουν τελείως το νερό και θα φέρουν την τουρμπίνα σε ηρεμία. Ανάλογα με τη θέση των πτερυγίων-οδηγών εισαγωγής, εισάγουν διαφορετικές ποσότητες «στροβιλισμού» στη ροή και διασφαλίζουν ότι το νερό χτυπά το δρομέα στην πιο αποτελεσματική γωνία για την υψηλότερη απόδοση. Το βήμα του πτερυγίου του δρομέα είναι επίσης ρυθμιζόμενο, από ένα επίπεδο προφίλ για πολύ χαμηλές ροές έως ένα προφίλ με μεγάλο βήμα για υψηλές ροές. Αυτή η δυνατότητα προσαρμογής τόσο των πτερυγίων-οδηγών εισαγωγής, όσο και των πτερυγίων του δρομέα σημαίνει ότι το εύρος λειτουργίας ροής είναι πολύ μεγάλο (χαρακτηριστικό των πτερυγίων οδηγών εισόδου) και η απόδοση του στροβίλου είναι υψηλή και η καμπύλη απόδοσης πολύ επίπεδη (ένα χαρακτηριστικό από τα ρυθμιζόμενα πτερύγια του δρομέα, επιτρέποντας τη βέλτιστη ευθυγράμμιση της λεπίδας στην επερχόμενη ροή).

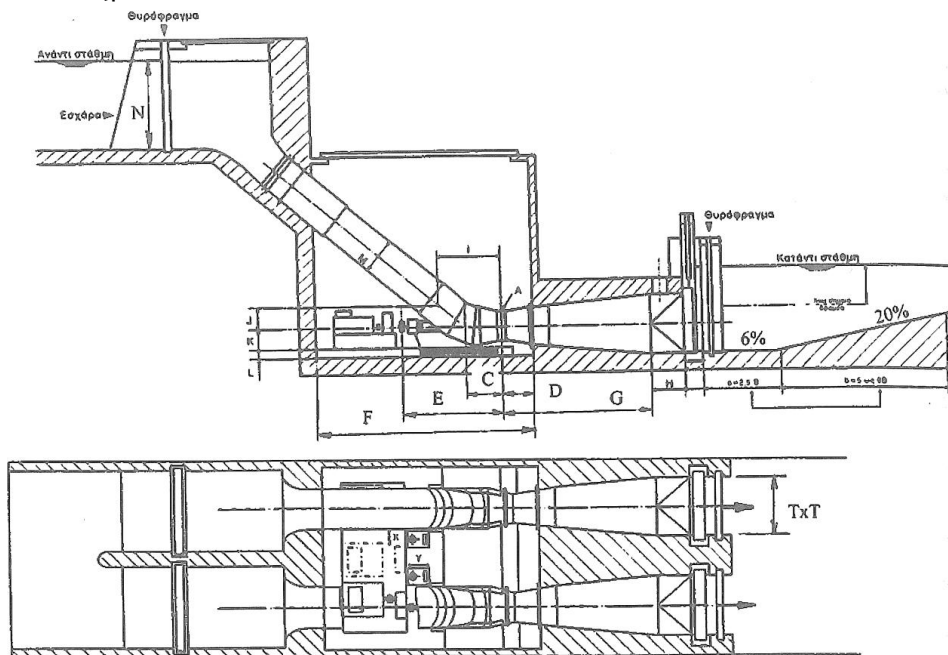


Σχήμα 5.24 Τυπικό σχεδιάγραμμα και πτερύγια υδροστροβίλου Kaplan [I22]

β) Σωληνάτος S ανάντη κατακόρυφου άξονα



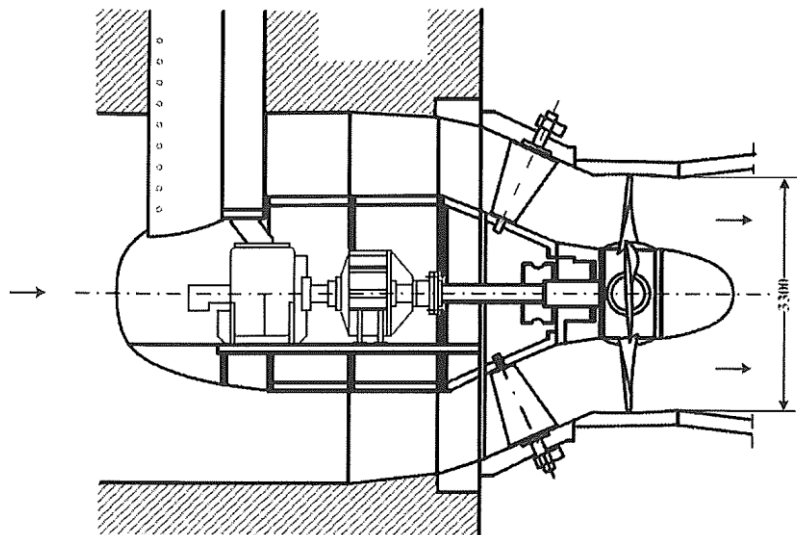
Σχήμα 5.25 Τομή σωληνωτού υδροστροβίλου S-ανάντη κατακόρυφου άξονα [E3, Σχήμα 5.44]



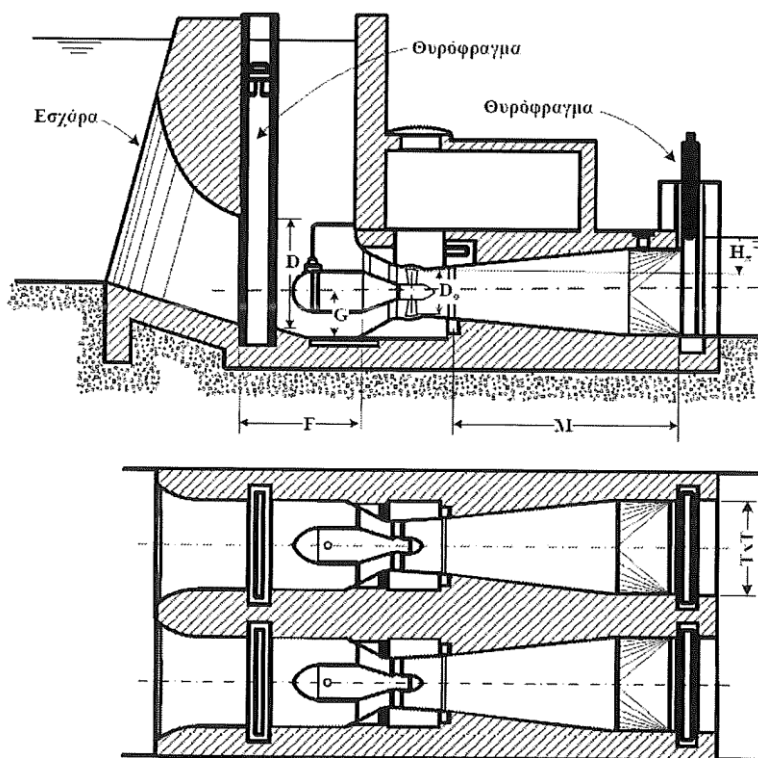
Σχήμα 5.26 Διαστάσεις του σωληνωτού υδροστροβίλου S – ανάντη της εταιρείας Dumont [E3, Σχήμα 5.43]

γ) Βολβοειδείς υδροστρόβιλοι

Οι βολβοειδείς υδροστρόβιλοι με ανάντη δρομέα περιλαμβάνουν βολβό μέσα στον οποίο εδράζεται η γεννήτρια. Η ροή αναπτύσσεται αξονοσυμμετρικά μεταξύ του βολβού και του κελύφους. Η κατασκευή για μικρά μεγέθη είναι τυποποιημένη (από 5 έως 25 MW της νορβηγικής εταιρείας Kvaerner / 0,8 έως 5 MW της εταιρείας Dumont).



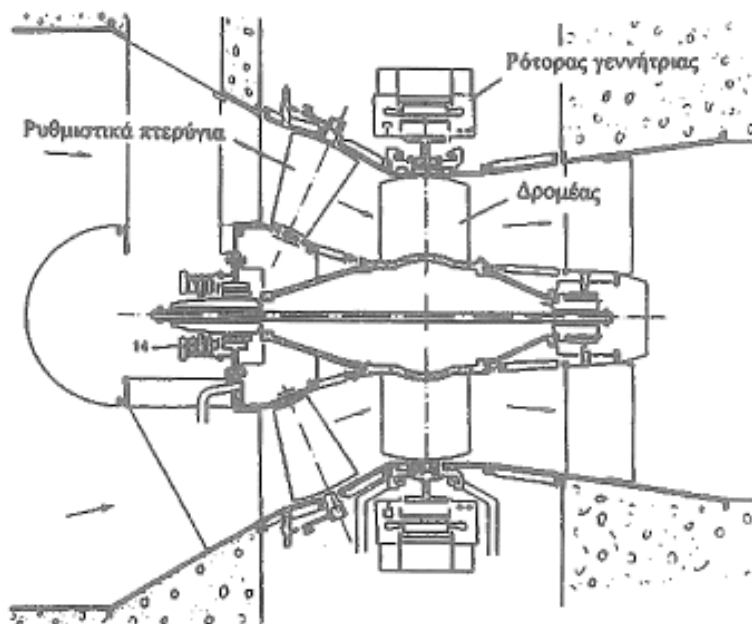
Σχήμα 5.27 Τομή βολβοειδούς στροβίλου [E3, Σχήμα 5.51]



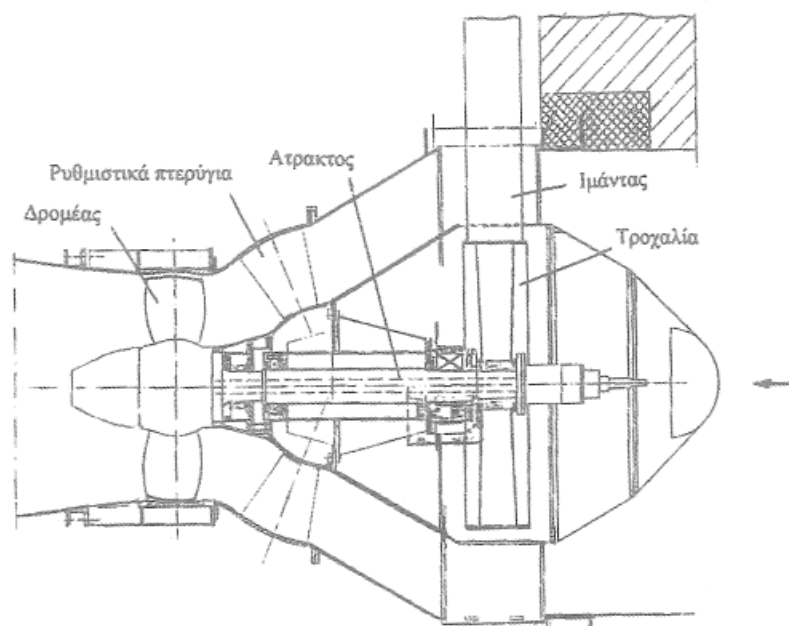
Σχήμα 5.28 Κάτοψη, Όψη και κύριες διαστάσεις βολβοειδούς στροβίλου της εταιρείας Dumont [E3, Σχήμα 5.54]

δ) Υδροστρόβιλοι δακτυλίου

Οι υδροστρόβιλοι δακτυλίου είναι μία ακόμα κατηγορία υδροστροβίλων αξονικής ροής. Τα πτερύγια του δρομέα έχουν προεξοχές στα άκρα τους κατά τον άξονα περιστροφής, όπου προσαρμόζεται ο κυκλικός δακτύλιος, ο οποίος ευθύνεται για την κινητήρια ροπή του δρομέα. Έχουν μικρότερο όγκο και κόστος συγκριτικά με τους υδροστροβίλους βολβοειδούς τύπου και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροπή αδρανείας, αλλά και καλύτερο βαθμό απόδοσης. Στην ίδια κατηγορία επίσης, ανήκουν και οι στρόβιλοι με τροχαλία.



Σχήμα 5.29 Υδροστρόβιλος δακτυλίου [Ε3, Σχήμα 5.57]



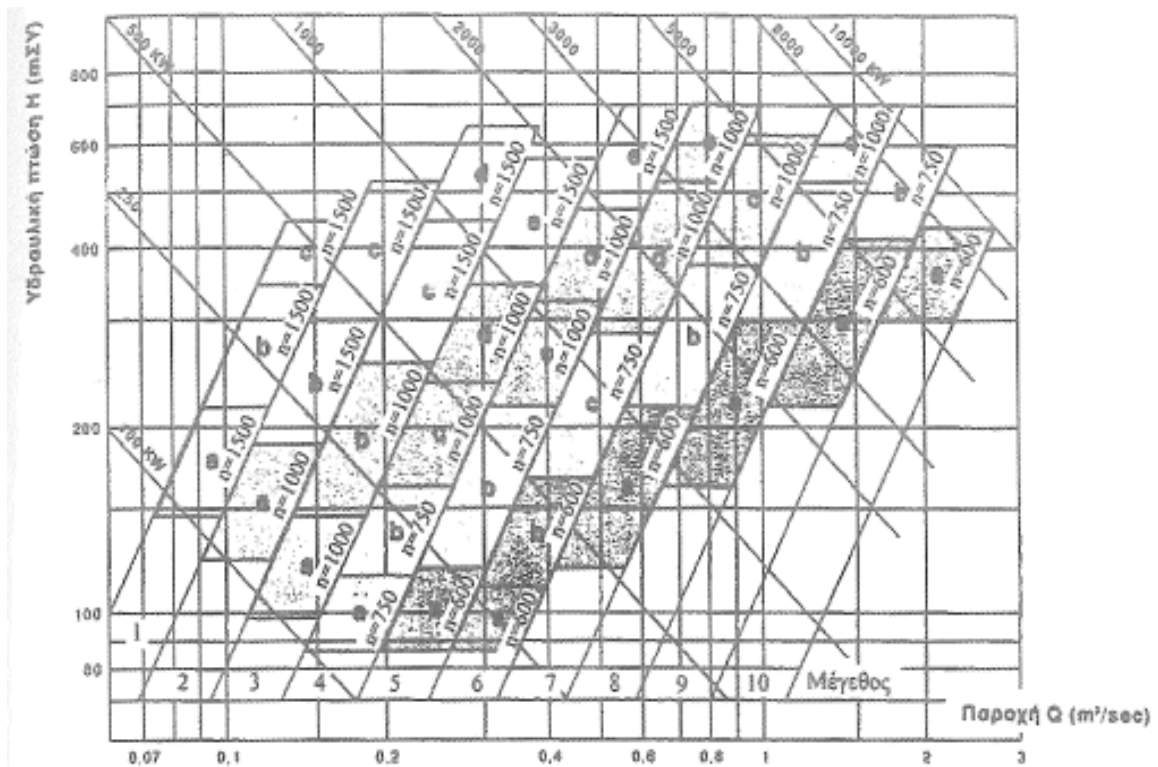
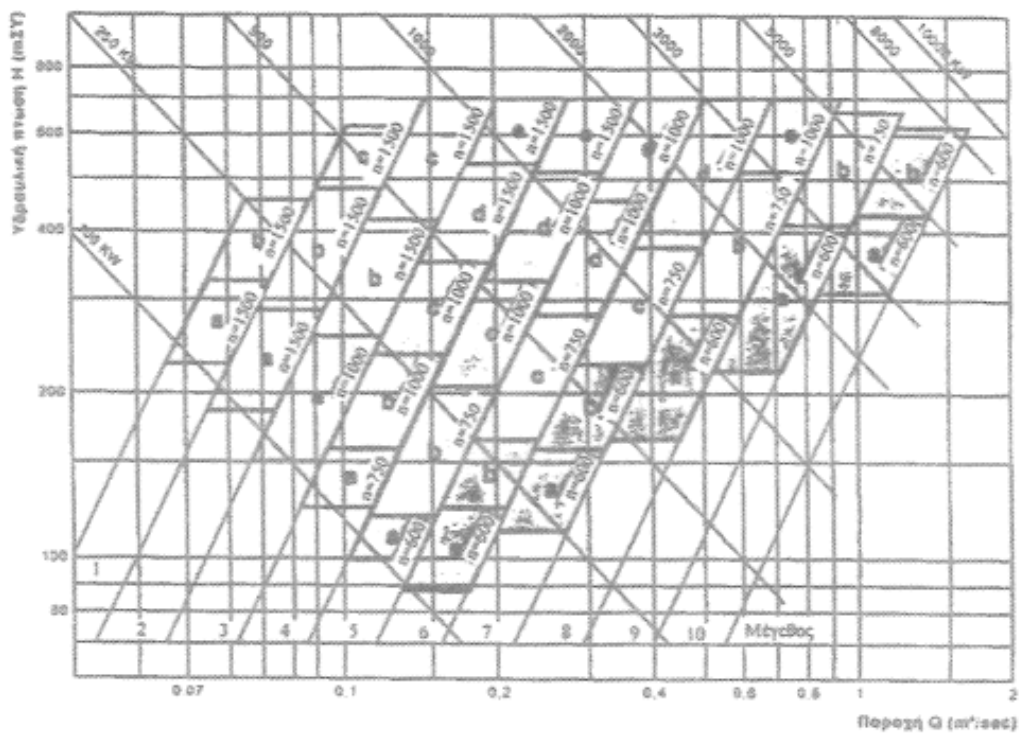
Σχήμα 5.30 Τομή υδροστροβίλου με ιμάντα [Ε3, Σχήμα 5.58]

5.5.4 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Pelton

Οι στρόβιλοι Pelton χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια για υδραυλικές πτώσεις μεγαλύτερες από τα 300 m με οριζόντιο άξονα. Για τους στρόβιλους χαμηλής ισχύος, έως 70 kW με ένα ακροφύσιο, ο άξονας τους κατασκευάζεται κατακόρυφος, γιατί η γεννήτρια, λόγω της μικρής της διάστασης, εδράζεται στο κέλυφος του υδροστρόβιλου με την ίδια άτρακτο και δρομέα. Το νερό σε έναν στρόβιλο Pelton κινείται γρήγορα και ο στρόβιλος λαμβάνει την ενέργεια από το νερό επιβραδύνοντας το, γεγονός που τον κάνει έναν παλμικό στρόβιλο. Όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει συνήθως μια δεξαμενή νερού που βρίσκεται σε κάποιο ύψος πάνω από τον στρόβιλο Pelton. Στη συνέχεια, το νερό ρέει μέσω του αγωγού πτώσης σε εξειδικευμένα ακροφύσια που εισάγουν νερό υπό πίεση στον στρόβιλο. Για να αποφευχθούν οι ανωμαλίες στην πίεση, υπάρχει μια δεξαμενή υπερχειλίσης που απορροφά τις απότομες διακυμάνσεις του νερού που θα μπορούσαν να αλλάξουν την πίεση. Σε αντίθεση με άλλους τύπους αντίδρασης, ο στρόβιλος Pelton είναι γνωστός ως στρόβιλος ώθησης. Αυτό σημαίνει πως αντί να κινείται ως αποτέλεσμα μιας αντίδρασης, το νερό δημιουργεί κάποια ώθηση στο στρόβιλο για να τον κάνει να κινηθεί.



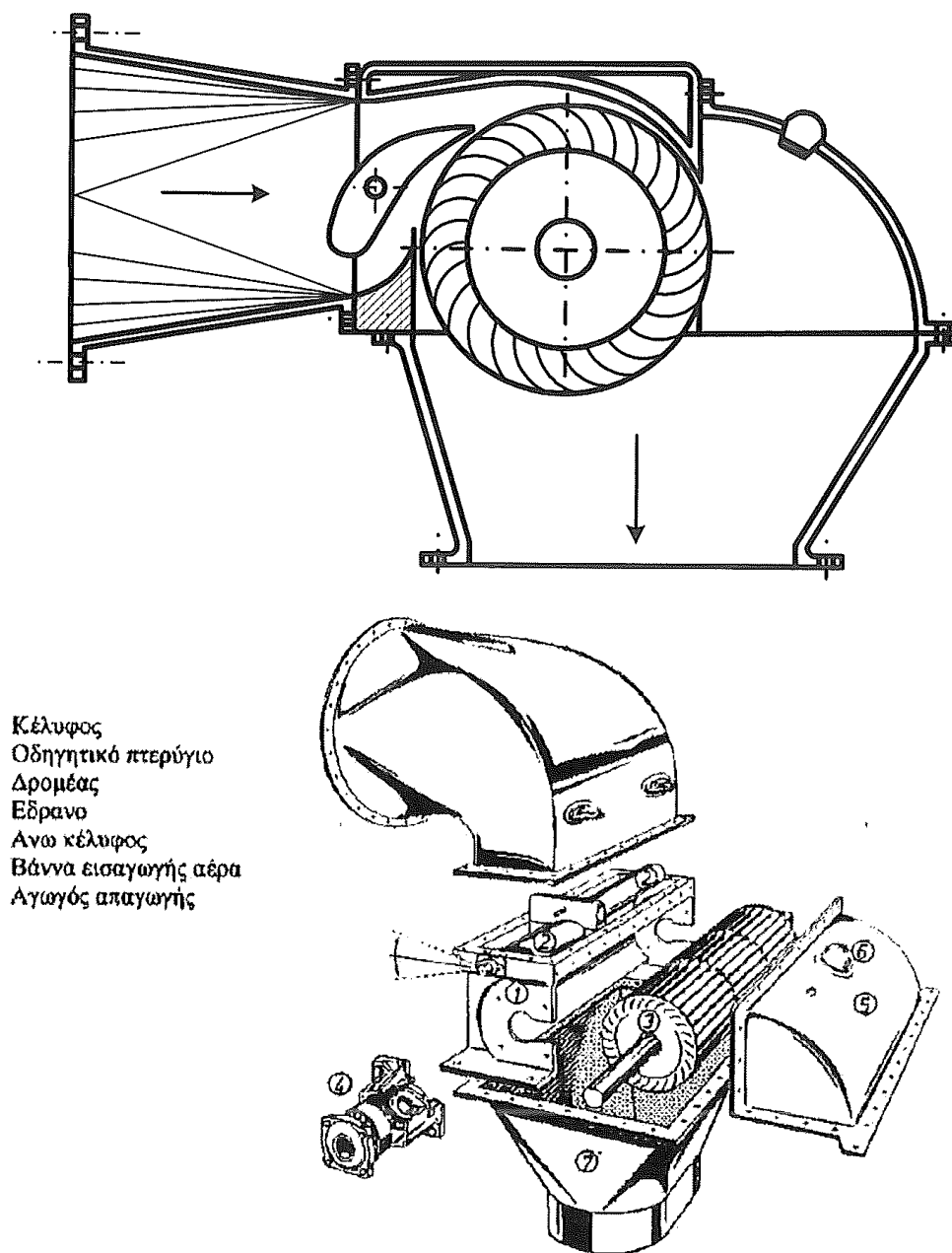
Σχήμα 5.31 Στρόβιλος Pelton (πάνω) και διάταξη στροβίλου Pelton της εταιρείας Voith [I23, I24]



Σχήμα 5.32 Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton της εταιρείας Voith με 1 ακροφύσιο (πάνω) και με 2 ακροφύσια (κάτω) οριζοντίου άξονα [Ε3, Σχήμα 5.64]

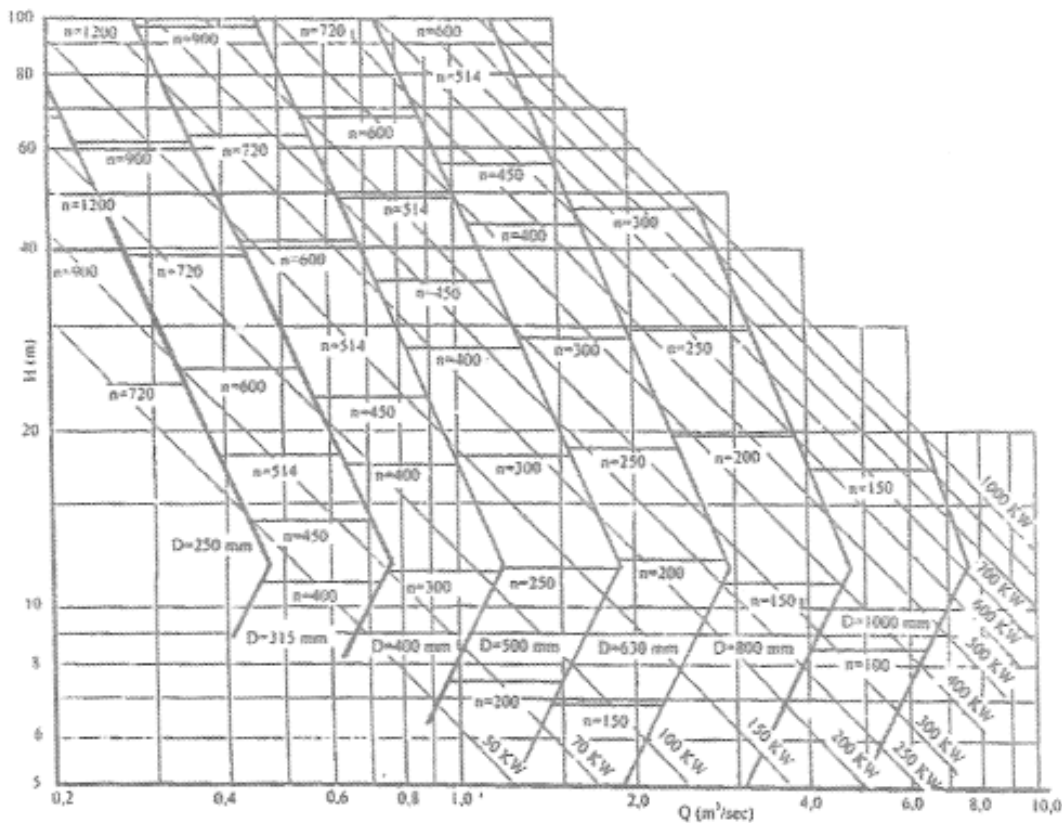
5.5.5 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Cross – Flow

Σε αντίθεση με τους περισσότερους υδροστρόβιλους, οι οποίοι έχουν αξονικές ή ακτινικές ροές, σε έναν στρόβιλο εγκάρσιας ροής το νερό διέρχεται από τον στρόβιλο εγκάρσια ή κατά μήκος των πτερυγίων του στροβίλου. Όπως και με έναν τροχό νερού, το νερό εισέρχεται στην άκρη του στροβίλου, αφού περάσει στο εσωτερικό του δρομέα, φεύγει από την αντίθετη πλευρά, πηγαίνοντας προς τα έξω. Περνώντας από τον δρομέα δύο φορές παρέχει πρόσθετη απόδοση. Το γεγονός πως το νερό φεύγει από τον δρομέα, βοηθά επίσης στον καθαρισμό του από διάφορα υπολείμματα.



Σχήμα 5.33 Τομή και αρχή λειτουργίας υδροστροβίλου Cross – Flow [E3, Σχήμα 5.65]

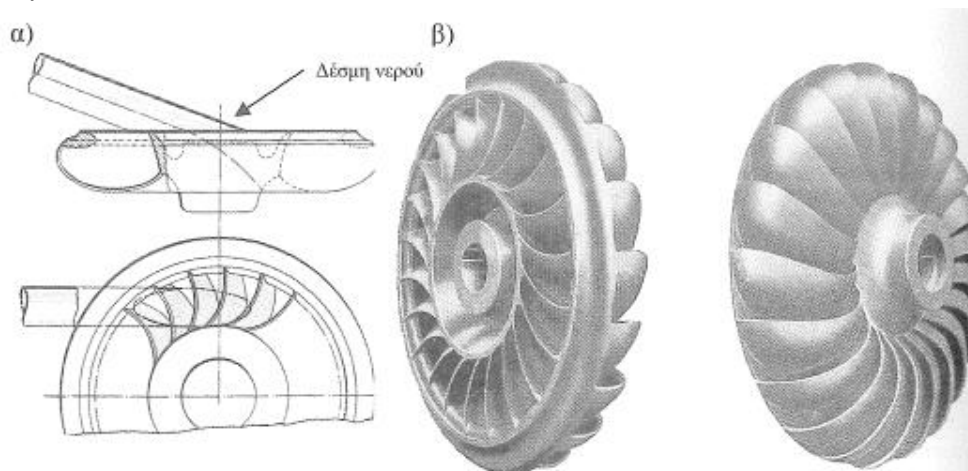
Οι στρόβιλοι Cross – Flow αφορούν σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας που είναι κατάλληλες για θέσεις με χαμηλή πτώση ύδατος και μεγάλη ροή. Οι Cross - Flow κατασκευάζονται συχνά ως δύο στρόβιλοι διαφορετικής χωρητικότητας που μοιράζονται τον ίδιο άξονα. Οι τροχοί του στροβίλου έχουν την ίδια διάμετρο, αλλά διαφορετικά μήκη για να χειρίζονται διαφορετικούς όγκους με την ίδια πίεση και οι υποδιαιρεμένοι τροχοί κατασκευάζονται συνήθως με όγκους σε αναλογίες 1:2. Η υποδιαιρεμένη ρυθμιστική μονάδα, το σύστημα πτερυγίων οδήγησης στο ανάντη τμήμα του στροβίλου, παρέχει ευέλικτη λειτουργία, με φόρτιση 33, 66 ή 100%, ανάλογα με τη ροή. Επιπλέον, ο συγκεκριμένος τύπος στροβίλου παρέχει χαμηλό λειτουργικό κόστος διότι έχει απλή κατασκευή. Τέλος αυτοί οι υδροστρόβιλοι τοποθετούνται πάνω από τη στάθμη απαγωγής, διότι μετά την έξοδο του νερού από το δρομέα, εξαιτίας της βαρύτητας, αυτό πέφτει και η τροφοδοσία του πραγματοποιείται από ένα ορθογωνικής διατομής ακροφυσίου εισόδου με τη διάταξη της πεταλούδας.



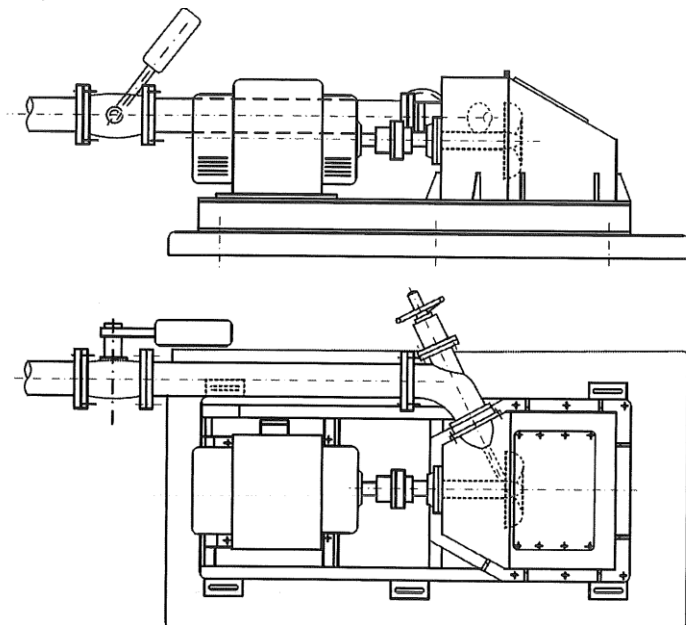
Σχήμα 5.34 Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστροβίλων Cross – Flow της εταιρείας Hitachi[E3, Σχήμα 5.68]

5.5.6 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Turgo

Ο στρόβιλος Turgo είναι ένας στρόβιλος δράσης με χαρακτηριστικό πως το νερό δεν αλλάζει την πίεση, καθώς κινείται μέσα από τα πτερύγια του. Η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια μέσω ενός ακροφυσίου. Το νερό κατευθύνεται με υψηλή ταχύτητα στα πτερύγια του στρόβιλου που εκτρέπουν και αντιστρέφουν τη ροή και στη συνέχεια περιστρέφει το δρομέα, μεταδίδοντας ενέργεια στον άξονα του. Είναι χαρακτηριστικό πως το νερό, λόγω της κατασκευής του εξέρχεται με πολύ μικρή ενέργεια. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι αρκετά αποτελεσματικός και θυμίζει τον τύπο Pelton, χωρισμένο στη μέση. Για την ίδια ισχύ, ο Turgo έχει τη μισή διάμετρο ενός αντίστοιχο Pelton, επομένως θα έχει και διπλάσια ειδική ταχύτητα.



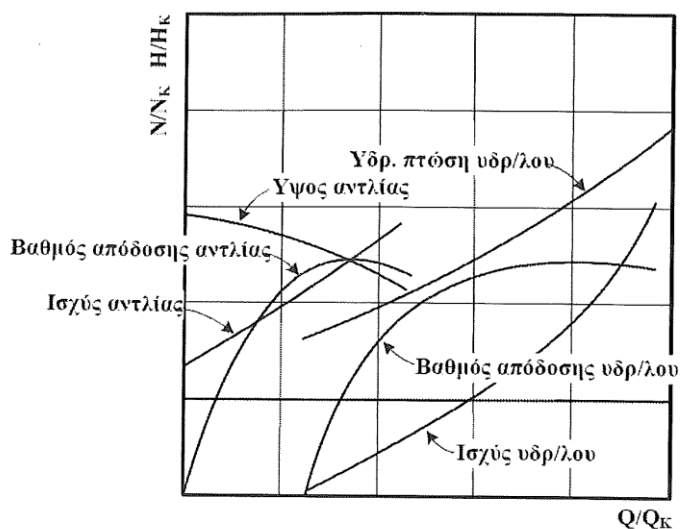
Σχήμα 5.35 (α) Πρόσπτωση δέσμης και (β) όψεις δρομέα Turgo [E3, Σχήμα 5.71]



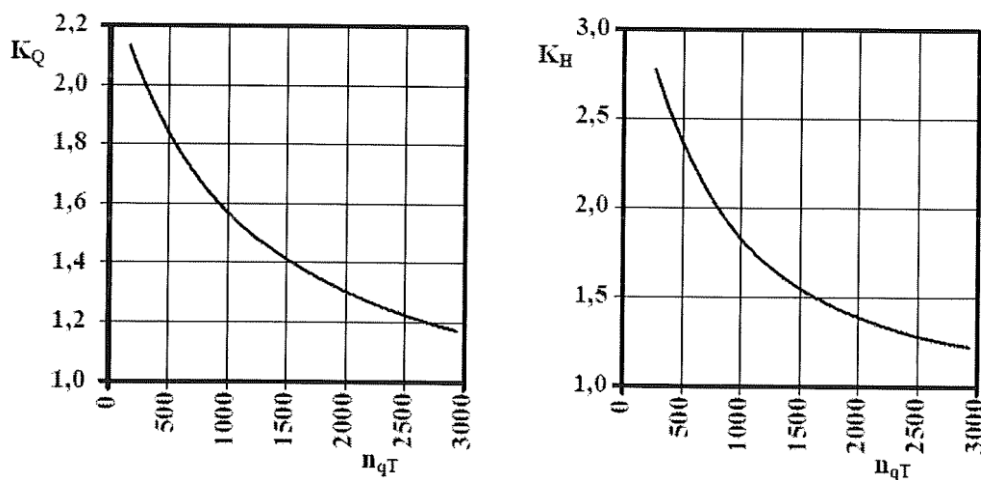
Σχήμα 5.36 Διάγραμμα τυποποιημένων υδροστρόβιλων Cross – Flow της εταιρείας Hitachi [E3, Σχήμα 5.68]

5.5.7 Αντίστροφη λειτουργία φυγόκεντρων αντλιών

Αν αντιστραφεί η φορά της πτερωτής μίας φυγόκεντρης αντλίας και η φορά ροής, θα παρατηρηθεί πως τα τρίγωνα ταχυτήτων εισόδου και εξόδου της πτερωτής παραμένουν το ίδιο με διαφορετική φορά των συνιστωσών. Επομένως, για συγκεκριμένη παροχή το θεωρητικό σημείο λειτουργίας, παραμένει ίδιο τόσο στην κανονική, όσο και στην αντίστροφη λειτουργία, δηλαδή τη λειτουργία του υδροστροβίλου. Για τη λειτουργία ως αντλία θα ισχύει $H_P = H_U - \delta h_f$ (δείκτης P – λειτουργία αντλίας), ενώ για την αντίστροφη λειτουργία (δείκτης T) $H_T = H_U + \delta h_f$. Αντίστοιχα για την παροχή, $Q_P = Q_U - \delta Q$ και $Q_T = Q_U + \delta Q$, έτσι ισχύει $Q_T > Q_P$ & $H_T > H_P$. Αυτή η απόκλιση μεταξύ των συγκεκριμένων κανονικών σημείων λειτουργίας εκφράζεται από τις αδιάστατες παραμέτρους, $K_H = H_T/H_P > 1$ και $K_Q = Q_T/Q_P > 1$



Σχήμα 5.37 Χαρακτηριστικές φυγόκεντρης αντλίας και υδροστροβίλου για την ίδια ταχύτητα περιστροφής [Ε3, Σχήμα 5.73]



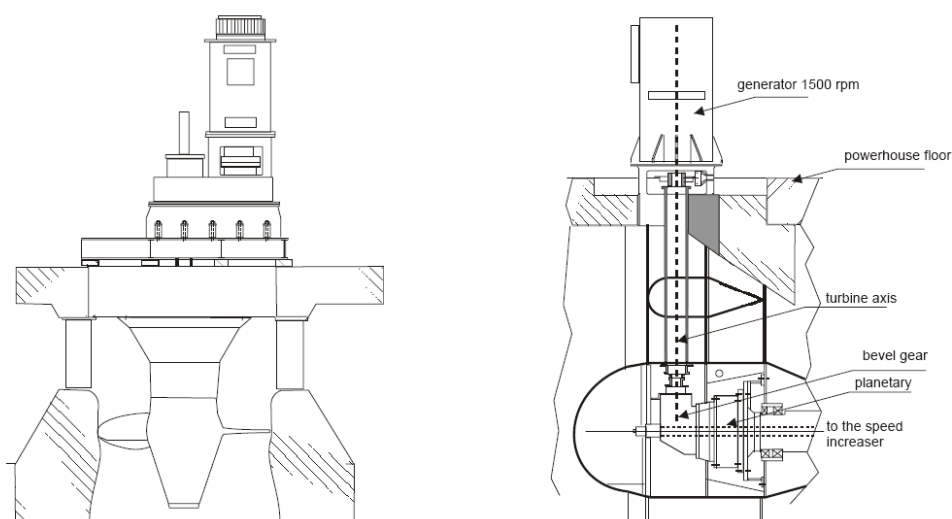
Σχήμα 5.38 Μεταβολή των αδιάστατων παραμέτρων συναρτήσει του ειδικού αριθμού στροφών [Ε3, Σχήμα 5.74]

5.6 Κιβώτιο ταχυτήτων

Όταν ο στρόβιλος και η γεννήτρια λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα, μπορούν να τοποθετηθούν έτσι, ώστε οι άξονές τους να είναι σε ευθεία και η άμεση σύζευξη να είναι η σωστή λύση. Ουσιαστικά δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος και η συντήρηση είναι πολύ σπάνια. Οι κατασκευαστές στροβίλων προτείνουν τον τύπο ζεύξης που θα χρησιμοποιηθεί, άκαμπτος ή εύκαμπτος, αν και συνήθως συνιστάται ένας εύκαμπτος σύνδεσμος που μπορεί να ανεχθεί την όποια κακή ευθυγράμμιση. Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις χαμηλής πτώσης ύδατος, οι στρόβιλοι λειτουργούν με λιγότερο από 400 RPM, απαιτώντας έναν αυξητή ταχύτητας για να καλύψει τις 750-1000 RPM των τυπικών εναλλακτών. Στο εύρος των δυνάμεων που προβλέπονται σε μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα, αυτή η λύση είναι συχνά πιο οικονομική από τη χρήση ενός προσαρμοσμένου εναλλάκτη. Σήμερα, οι κατασκευαστές εναλλάκτη προτείνουν επίσης μηχανές χαμηλής ταχύτητας που επιτρέπουν την άμεση σύζευξη.

Τα κιβώτια ταχύτητας ανάλογα με τα γρανάζια που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους διακρίνονται σε:

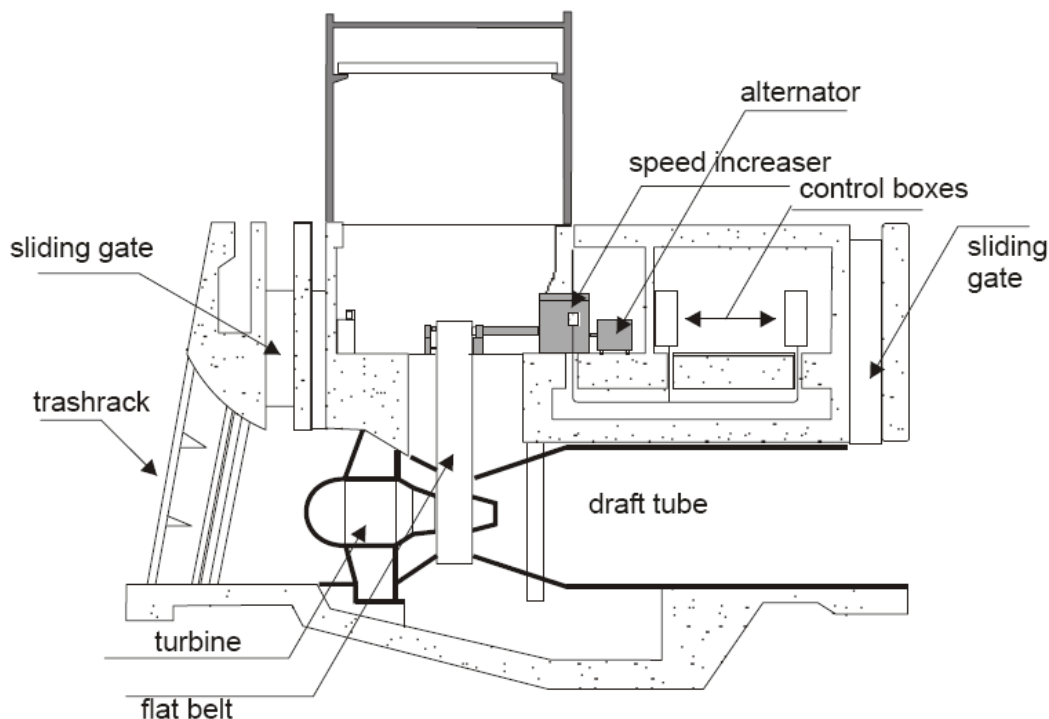
1. Παράλληλος άξονας με ελικοειδή γρανάζια, το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετείται σε παράλληλο άξονα και είναι ιδιαίτερα ελκυστικός για εφαρμογές μέσης ισχύος. Το σχήμα 5.38 αριστερά δείχνει μια κατακόρυφη διαμόρφωση, συνδεδεμένη με έναν κατακόρυφο στρόβιλο Kaplan.
2. Τα κωνικά γρανάζια συνήθως περιορίζονται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιούν σπειροειδή κωνικά γρανάζια για κίνηση 90°. Το σχήμα 5.38 δεξιά δείχνει έναν αυξητή ταχύτητας δύο φάσεων.



Σχήμα 5.39 Κατακόρυφη διαμόρφωση, συνδεδεμένη με έναν κατακόρυφο στρόβιλο Kaplan και αυξητής ταχύτητας δύο φάσεων (αριστερά), Κιβώτιο ταχυτήτων με κωνικά γρανάζια για αύξηση ταχύτητας περιστροφής (δεξιά).

[Ξ1, Figures 6.31, 6.32]

3. Αύξηση ταχύτητας ιμάντα που χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές μικρής ισχύος και προσφέρει δυνατότητες εύκολης συντήρησης



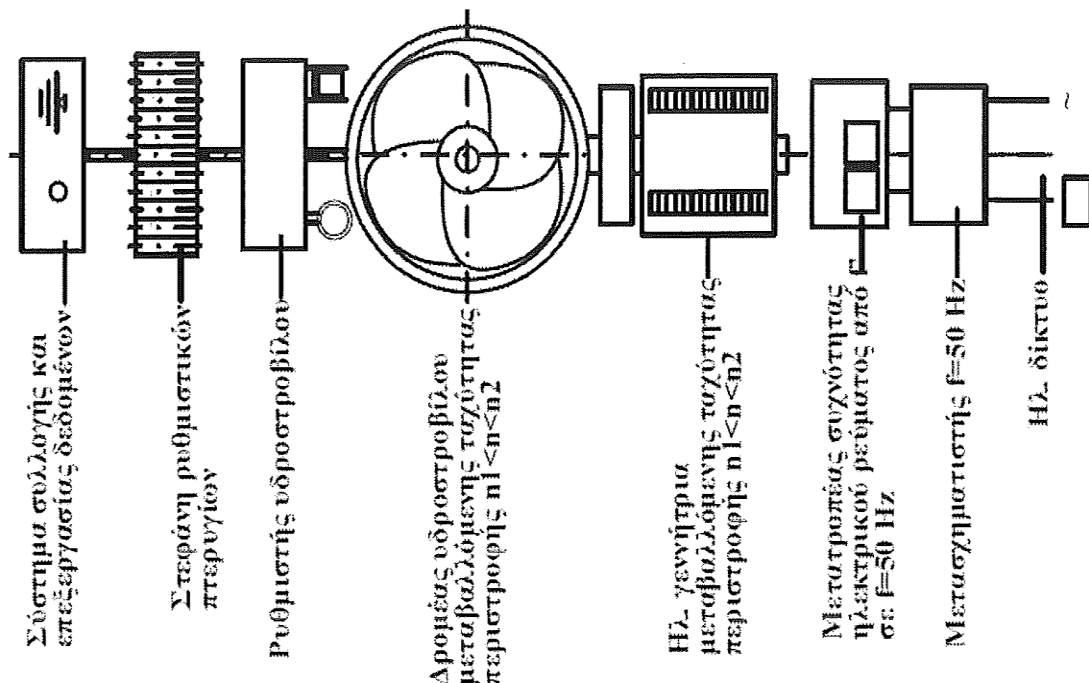
Σχήμα 5.40 Κιβώτιο ταχυτήτων προς αύξηση της ταχύτητας με χρήση ιμάντα [E1, Figures 6.33]

5.7 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύθηκαν εκτενώς τα έργα του μηχανολόγου μηχανικού τόσο στο σχεδιασμό ενός έργου, όσο και στην επιλογή του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού. Η σωστή τεchnοοικονομική μελέτη με όλα τα απαραίτητα στοιχεία κρίνεται ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα του έργου. Όπως αναφέρθηκε για τα μικρά υδροηλεκτρικά προτιμάται ο τυποποιημένος εξοπλισμός, αφού πλέον οι περισσότερες κατασκευάστριες εταιρείες μπορούν να καλύψουν σχεδόν όλες τις ανάγκες της αγοράς. Παρόλα αυτά η επιλογή θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, αφού μία λανθασμένη κρίση, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα και να θέσει σε κίνδυνο τη συνολική βιωσιμότητα του έργου.

6.1 Βασική δομή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν τα διάφορα πλεονεκτήματα που υπάρχουν όταν η λειτουργία των υδροστροβίλων πραγματοποιείται με μεταβλητές στροφές, ενώ ταυτόχρονα η γεννήτρια τροφοδοτεί ηλεκτρικό δίκτυο με σταθερή συχνότητα f . Στο σχήμα 6.1 φαίνεται μία τέτοια διάταξη που περιλαμβάνει γεννήτρια συνδεδεμένη με τον υδροστρόβιλο. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει η γεννήτρια έχει μεταβαλλόμενη συχνότητα f' και είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (AC) συχνότητας f' σε συνεχές (DC) χρησιμοποιείται μετατροπέας (AC – DC & DC – AC). Στη συνέχεια το ηλεκτρικό ρεύμα ξαναμετατρέπεται σε εναλλασσόμενο με σταθερή συχνότητα ίση με την f του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση ο μετατροπέας (converter) λαμβάνει τον αντίστοιχο ρόλο του ηλεκτρονικού κιβωτίου συνεχούς μεταβολής των στροφών.



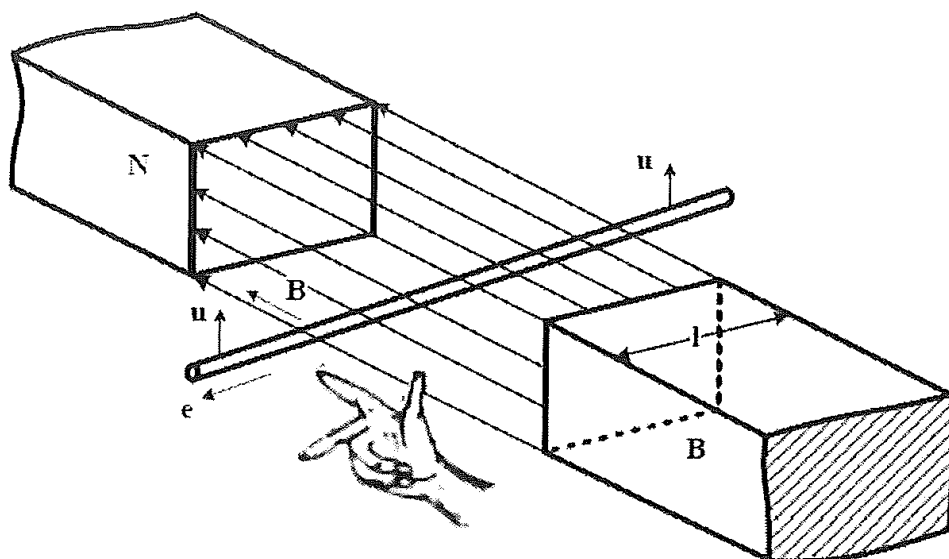
Σχήμα 6.1 Σχηματική διάταξη λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές [E3, Σχήμα 6.19]

6.2 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά γεννητριών

6.2.1 Εισαγωγή

Η μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται γεννήτρια. Ο νόμος του Faraday είναι η βασική αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών, σύμφωνα με τον οποίο μπορεί να αναπτυχθεί ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή e , σε ένα στρεφόμενο σώμα που τέμνει σταθερό μαγνητικό πεδίο, ή το αντίθετο, δηλαδή σε ένα σταθερό σώμα που τέμνει μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μέγεθος αυτής της δύναμης είναι ανάλογο της έντασης του μαγνητικού πεδίου, B , του μήκους του l , καθώς και της ταχύτητας με την οποία κινείται το σώμα μέσα σε αυτό u . Η φορά της δύναμης ορίζεται από τον κλασικό κανόνα του δεξιού χεριού που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για δύο λόγους θα μπορούσε να αλλάξει η πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής τάσης, πρώτον να αλλάξει η πολικότητα στο μαγνητικό πεδίο ή να αντιστραφεί η ταχύτητα με την οποία κινείται το σώμα.

$$e = B \cdot l \cdot u \quad (6.1)$$

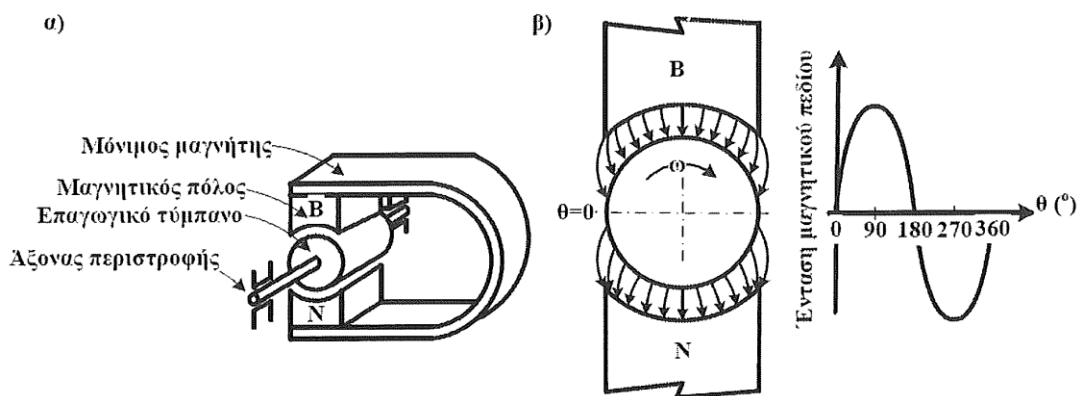


Σχήμα 6.2 Αρχή ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικής δύναμης [E3, Σχήμα 6.1]

Η γεννήτρια αποτελείται από έναν μόνιμο πεταλοειδή μαγνήτη, καθώς και από ένα κυλινδρικό τύμπανο που είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του μεταξύ των δύο πόλων του μαγνήτη. Το κυλινδρικό αυτό τύμπανο μαζί με τους αγωγούς του ονομάζεται επαγωγικό τύμπανο. Η ένταση της μαγνητικής επαγωγής του τυμπάνου θα είναι

264

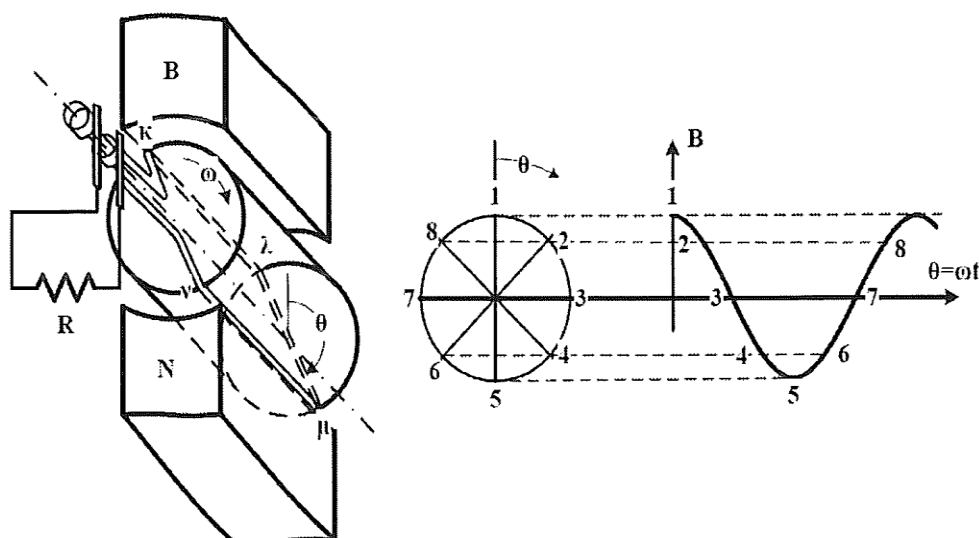
μέγιστη κατά το μέσο των πόλων και θα μειώνεται σταδιακά προς την ουδέτερη ζώνη, όπου και θα μηδενίζεται. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η ένταση της μαγνητικής επαγωγής σε συνάρτηση με τη γωνία θ , όπου θα είναι θετικό όταν οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου έχουν κατεύθυνση προς το τύμπανο και αρνητικές όταν οι γραμμές απομακρύνονται.



Σχήμα 6.3 Ηλεκτρική γεννήτρια (α), Μαγνητικό πεδίο σε διάκενο (β) [E3, Σχήμα 6.2]

Αν τοποθετηθούν δύο αγωγοί που ενώνονται στο πίσω μέρος, σχηματίζεται μία σπείρα του τυλίγματος της μηχανής. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτήν τη σπείρα δίνεται από τη σχέση, όπου με $u = \omega \cdot r$ συμβολίζεται η περιφερειακή ταχύτητα της σπείρας και l το μήκος του τυμπάνου:

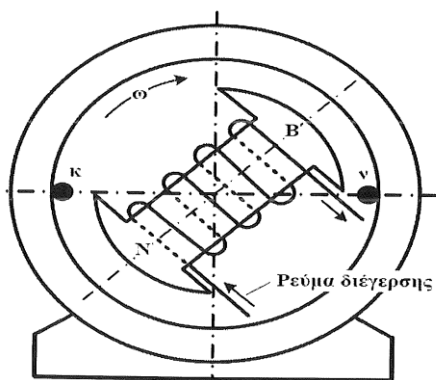
$$e = 2 \cdot B(t) \cdot l \cdot u \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.4 Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σπείρα [E3, Σχήμα 6.5]

Τα άκρα της συνδέονται με ωμική αντίσταση R και διαρρέεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} \quad (6.3)$$



Σχήμα 6.5 Στοιχειώδης σύγχρονη εναλλασσόμενη γεννήτρια με περιστρεφόμενους πόλους [Ε3, Σχήμα 6.6]

6.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητα ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής τους και η διέγερσή τους τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Διακρίνονται σε αυτές με τους εξωτερικούς πόλους και σε εκείνες με τους εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους. Μεταξύ της συχνότητας της ταχύτητας περιστροφής και του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος προκύπτει η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου.

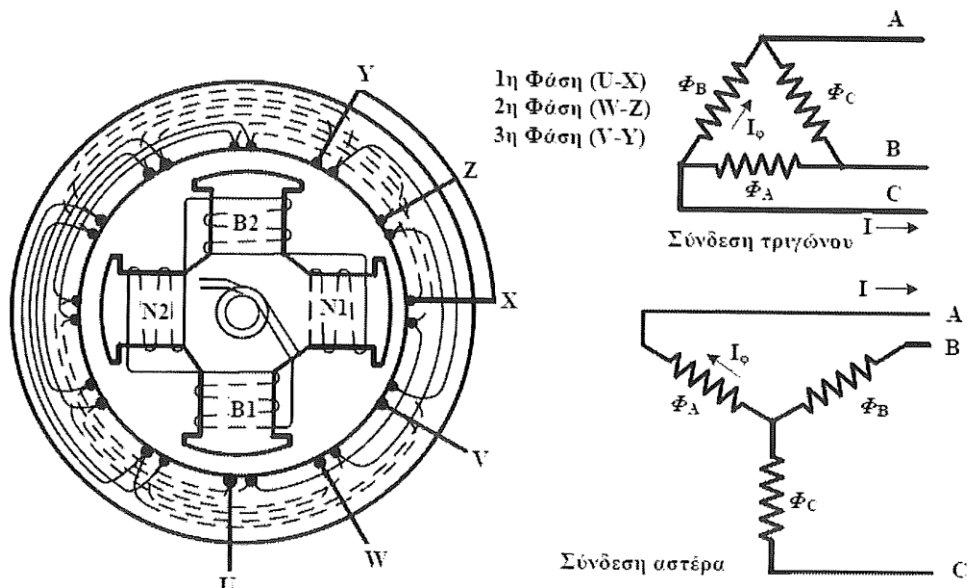
$$n_{\sigma} = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (6.4)$$

Όπου p , το πλήθος των ζευγών των μαγνητικών πόλων.

Επειδή στην Ευρώπη ισχύει $f = 50 \text{ Hz}$, η παραπάνω σχέση γίνεται

$$n_{\sigma} = \frac{3000}{p} \quad (6.5)$$

Οι τριφασικές γεννήτριες έχουν τρία ίδια και ανεξάρτητα μεταξύ του τυλίγματα (3 φάσεις) στο επαγωγικό τους τύμπανο. Κάθε τύλιγμα έχει δύο άκρα και μπορούν να έχουν διάταξη τριγώνου ή αστέρα.



Σχήμα 6.6 Τριφασική σύγχρονη γεννήτρια με τέσσερις πόλους [E3, Σχήμα 6.7]

Αν η ηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ του ουδέτερου κόμβου και των φάσεων ονομάζεται φασική E_{ϕ} και η ηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των ακροδεκτών δύο φάσεων, ονομάζεται πολική E_{Π} , τότε θα ισχύει:

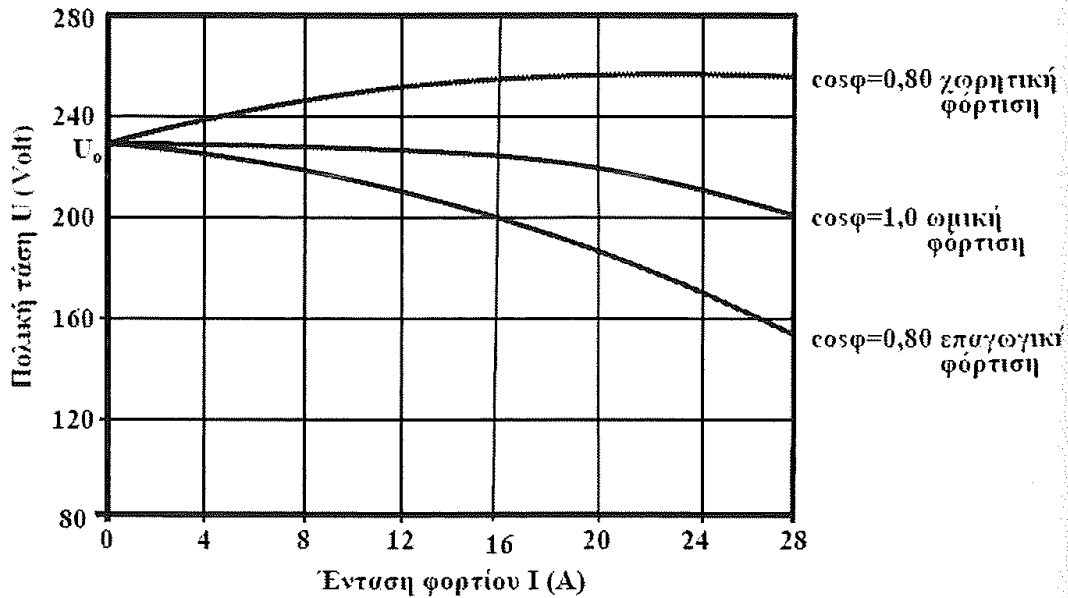
$$E_{\Pi} = \sqrt{3} \cdot E_{\phi} = 1,73 \cdot E_{\phi} \quad (6.6)$$

Για συνδεσμολογία αστέρα: $I = I_{\phi}$

Για συνδεσμολογία τριγώνου: $I = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} = 1,73 \cdot I_{\phi}$

Για να μπορέσει να μεταβληθεί η ηλεκτρεγερτική δύναμη θα πρέπει είτε να υπάρξει μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής n του δρομέα, είτε μεταβολή στη μαγνητική ροή κάθε πόλου. Από χαρακτηριστικές καμπύλες της σύγχρονης γεννήτριας γίνεται αντιληπτό πως αν η γεννήτρια τροφοδοτεί επαγωγικό ή ωμικό φορτίο, για να διατηρηθεί σταθερή η τάση U , πρέπει συνεχώς να αυξάνει η διέγερση, ενώ αυξάνεται η ένταση φόρτισης. Αν υπάρχει χωρική φόρτιση, τότε πρέπει να μειώνεται η ένταση της διέγερσης. Η υπερδιέγερση ή η υποδιέγερση θα είναι αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή $\cos\phi$. Η απόδοση της γεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος προς τη μηχανική ισχύ του υδροστοβίλου.

$$\eta_G = \frac{N_e}{N} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi}{M \cdot \omega} \quad (6.7)$$



Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστική σύγχρονης γεννήτριας[E3, Σχήμα 6.14]

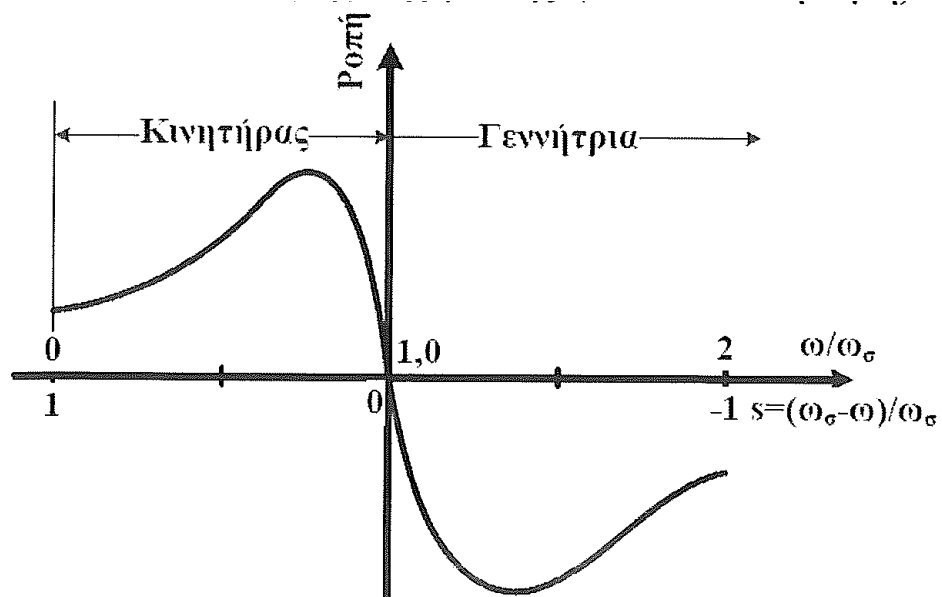
Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σύγχρονων γεννητριών είναι: η ονομαστική τάση (V), η ονομαστική ισχύς (kVA), η ονομαστική ένταση A, ο αριθμός των φάσεων, η συχνότητα (Hz), η ονομαστική τιμή του συντελεστή $\cos\phi$, η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και η επιτρεπόμενη ένταση και τάση διέγερσης σύμφωνα με τα όρια του κατασκευαστή. Επιπλέον, μέριμνα πρέπει να δοθεί και για η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να δεχθεί, η οποία συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα φυγής του υδροστροβίλου.

6.2.3 Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι ασύγχρονες γεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα και η συχνότητά τους δεν ταυτίζεται με την ταχύτητα περιστροφής τους, αλλά είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Η διέγερσή τους τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα σε αντίθεση με τις σύγχρονες που τροφοδοτούνται με συνεχές. Στην περίπτωση επαγωγικού κινητήρα η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα είναι μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς του κλωβού θα αντιστοιχεί στην ανάπτυξη της ροπής. Έτσι, η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη προς τους στρεφόμενους αγωγούς θα είναι θετική και δίνεται από την παρακάτω σχέση και χαρακτηρίζεται από την τιμή του συντελεστή ολίσθησης s :

$$n_{\sigma} - n \cdot R \cdot \frac{\pi}{30} \quad (6.8) \quad \& \quad s = \frac{n_{\sigma} - n}{n_{\sigma}} \quad (6.9)$$

Ο παραπάνω συντελεστής s έχει θετική τιμή όταν λειτουργεί ως κινητήρας ($n < n_s$) και αρνητική όταν λειτουργεί ως γεννήτρια. Όταν $s=0$, τότε $n=n_s$, άρα ο δρομέας περιστρέφεται χωρίς αναπτυσσόμενη ροπή, δηλαδή χωρίς φορτίο.



Σχήμα 6.8 Μεταβολή ροπής σε συνάρτηση με το συντελεστή ολίσθησης[E3, Σχήμα 6.15]

6.2.4 Σύγκριση γεννητριών

Η βασική σύγκριση των δύο ειδών γεννητριών φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

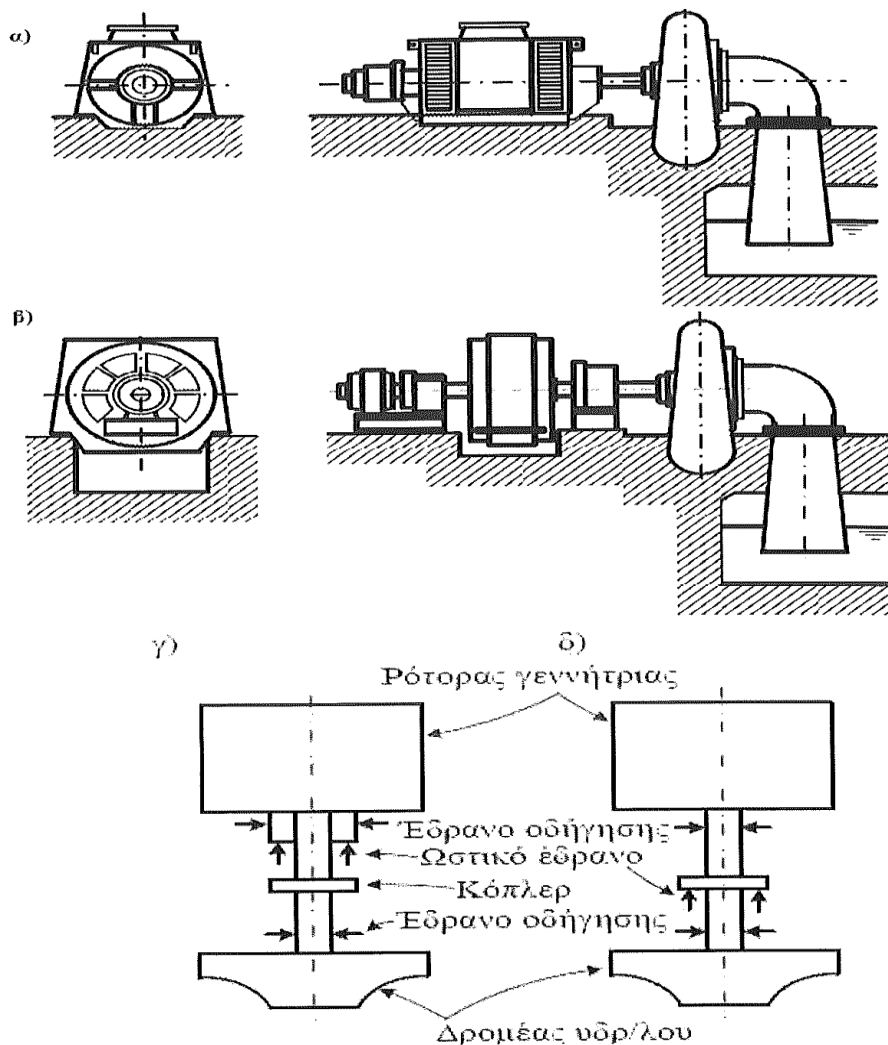
Χαρακτηριστικά	Σύγχρονη	Ασύγχρονη
Συντ. ισχύος – Άεργος ισχύς	Καθορισμός από τη ρύθμιση της διέγερσης	Άεργη ισχύς απαραίτητη από το δίκτυο. Ο συντ. ισχύος μειώνεται λόγω επαγωγικής συμπεριφοράς. Μη αυτόνομη λειτουργία.
Βαθμός απόδοσης	Πλεονεκτεί ελαφρώς έναντι επαγωγικής γεννήτριας	Καμία διαφορά
Ρύθμιση τάσης	Εξοπλισμός παραλληλισμού τάσης, συχνότητας και διαδοχής φάσης με το δίκτυο προς σύνδεση	Δε χρειάζεται παραλληλισμός, μόνο σωστή διαδοχή των φάσεων για τη φορά της ταχύτητας.
Μεταβατικά φαινόμενα κατά τη σύνδεση με το δίκτυο	Δεν υπάρχουν	Αναπτύσσονται έντονες διακυμάνσεις του ρεύματος. Απαιτείται συχνός έλεγχος ευστάθειας του συστήματος
Κατασκευή - Διαστάσεις - Βαρός	Πολύπλοκη – μεγάλες διαστάσεις και βάρος	Απλή και συμπαγής με μικρότερο βάρος
Ρυθμιστής υδροστροβίλου	Απαραίτητος για τροφοδοσία ανεξάρτητου αυτόνομου συστήματος	Δεν απαιτείται, γιατί η ταχύτητα περιστροφής, η τάση και η συχνότητα εξαρτώνται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο. Μη αυτόνομη λειτουργία.
Συντήρηση	Αυξημένη	Εύκολη
Κόστος	Αυξημένο	Μικρότερο έναντι σύγχρονης

Πίνακας 6.1 Σύγκριση σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών [Ε3, Πίνακας 6.7]

Το όριο επιλογής μεταξύ σύγχρονης και ασύγχρονης γεννήτριας βρίσκεται εμπειρικά στην τάξη του 1 MVA, αν και σε κάθε περίπτωση πρέπει να πραγματοποιείται οικονομοτεχνική μελέτη.

6.2.5 Τυποποίηση και διαστάσεις γεννητριών

Στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα γίνεται προσπάθεια επιλογής τυποποιημένων γεννητριών που μπορούν να ανταποκριθούν στις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις κατά τη μέγιστη υπερτάχυνση. Για τα μικρά έργα αποφεύγεται η απευθείας σύνδεση υδροστροβίλου με γεννήτρια, κυρίως όταν ο υδροστρόβιλος έχει ταχύτητα περιστροφής μικρότερη από 500 RPM και ισχύ μικρότερη από 1 – 2 MW. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρεμβάλλεται μεταξύ τους πολλαπλασιαστής στροφών, έτσι η γεννήτρια μπορεί να είναι ταχύστροφη και μικρότερη σε μέγεθος, αλλά και κόστος με μικρότερη επίδρασή της ροπής αδρανείας του δρομέα της και καλύτερη ευστάθεια του συστήματος κατά τη φάση απόρριψης φορτίου που αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 6.9 α) Διάταξη οριζόντια με εδράσεις του δρομέα του υδροστροβίλου στο κέλυφος της γεννήτριας, β) Οριζόντια διάταξη με 2 εξωτερικές εδράσεις δρομέα της γεννήτριας, γ) Κατακόρυφη διάταξη με ωστικό έδρανο στη θέση της γεννήτριας δ) Κατακόρυφη διάταξη με ωστικό έδρανο στο κέλυφος του υδροστροβίλου [Ε3, Σχήμα 6.18]

Οι γεννήτριες για τα μικρά υδροηλεκτρικά είναι κατασκευασμένες έτσι, ώστε να μπορούν να αντέχουν στις υπεταχύνσεις περίπου στο 60% της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής τους. Στην αγορά οι τυποποιημένες γεννήτριες είναι συνήθως στο 25%, για αυτό το λόγο δε θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλες για εξοπλισμό μικρού έργου. Η επιλογή μπορεί να γίνει σύμφωνα με την τάση σε συνάρτηση με την ενεργό ισχύ της γεννήτριας.

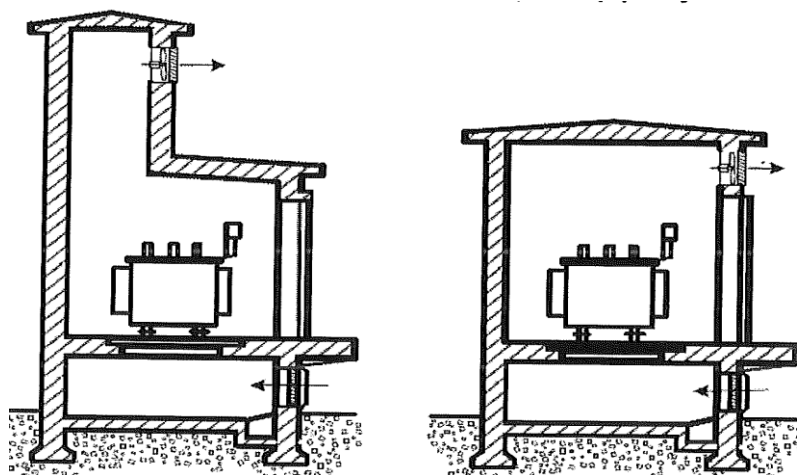
Ισχύς (kVA)	<750	751 – 2.500	2.501 – 5.000	>5.000
Τάση (V)	<415	3.000 -3.300	-6.000	11.000

Πίνακας 6.2 Συνιστώμενες τιμές τάσης σύγχρονης γεννήτριας σε συνάρτηση της φαινόμενης ισχύς. [Ε3, Πίνακας 6.8]

6.3 Μετασχηματιστές ισχύος

Για να μπορέσει να διασφαλιστεί η διασύνδεση ενός υδροηλεκτρικού έργου με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι μετασχηματιστές ισχύος. Μία γεννήτρια για μικρές ισχύες έχει περίπου 400V τάση, και για μεγαλύτερες 3,3 ή 6,6 kV. Η επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας σε ένα έργο γίνεται μετά από οικονομοτεχνική μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη και την παράμετρο του μεγέθους της γεννήτριας, αλλά και της ευστάθειας λειτουργίας της υδροηλεκτρικής μονάδας που παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη βιωσιμότητα του έργου. Μία μικρή γεννήτρια για παράδειγμα έχει μικρή ροπή αδράνειας, επηρεάζοντας σημαντικά την ευστάθεια λειτουργίας της μονάδας, καθώς και την ένταση των μεταβατικών φαινομένων.

Το πλήθος των μετασχηματιστών ισχύος καθορίζεται ύστερα από την εφαρμογή της οικονομοτεχνικής μελέτης. Για παράδειγμα αν μπει ένας μετασχηματιστής για όλες τις μονάδες και δουλεύει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με μερικά φορτία, ενδεχομένως να είναι πιο οικονομική ως λύση από το να ενταχθούν περισσότεροι μετασχηματιστές.



Σχήμα 6.10 Τομή εγκατάστασης μετασχηματιστή ισχύος [Ε3, Σχήμα 6.20]

6.4 Εσωτερικές καταναλώσεις & λοιπά βοηθητικά συστήματα

Σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό υπάρχουν κάποιες εσωτερικές ανάγκες κατανάλωσης, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Αναφορικά είναι ο φωτισμός του σταθμού, ο φωτισμός ασφαλείας, η τροφοδοσία του ρυθμιστή υδροστροβίλου και της γερανογέφυρας, ρευματοδότες, ανιχνευτές, ο φορτιστής των μπαταριών, κλπ. Αυτές οι ανάγκες μπορούν να καλυφθούν είτε με μετασχηματιστή, ο οποίος θα είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο μέσης τάσης, είτε από την έξοδο των γεννητριών. Επιπλέον, η δεξαμενή φόρτισης και η υδροληψία τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα για να καλύπτουν ανάγκες, όπως είναι αυτή του καθαρισμού της εσχάρας, του συστήματος ελέγχου για το θυρόφραγμα, τροφοδοσία μετρητικών οργάνων, κλπ. Οι εσωτερικές καταναλώσεις περίπου αντιστοιχούν ως το 3% της παραγόμενης ενέργειας, ανάλογα με την ονομαστική τιμή ισχύος της μονάδας (όσο πιο μικρή είναι η μονάδα, τόσο πιο μεγάλο θα είναι το ποσοστό κάλυψης)

6.5 Διακοπτικό υλικό πινάκων

Στα υδροηλεκτρικά έργα, απαραίτητη είναι επίσης και η ύπαρξη ηλεκτρικού πίνακα χαμηλής τάσης που θα περιλαμβάνει τους αυτόματους διακόπτες χαμηλής τάσης από τις γεννήτριες προς το μετασχηματιστή. Αυτοί οι διακόπτες πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου των υπερεντάσεων των επιμέρους φάσεων. Επίσης, ο πίνακας περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα μετρητικά όργανα, όπως είναι τα αμπερόμετρα, βαττόμετρο, συνημιτόνομετρο, κλπ. Οι μετασχηματιστές τάσης και έντασης μετρήσεων και προστασίας, επίσης συστεγάζονται μαζί με τον παραπάνω εξοπλισμό, μαζί με τη συστοιχία πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Τέλος στον ηλεκτρικό πίνακα χαμηλής τάσης πρέπει να περιλαμβάνεται και η αναχώρηση για τις εσωτερικές καταναλώσεις του έργου.

6.6 Συστήματα αυτόματου ελέγχου

Για να εξασφαλιστεί και να διατηρηθεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι απαραίτητη η ύπαρξη των συστημάτων αυτόματου ελέγχου, επιτήρησης και ασφάλειας. Ένα από αυτά τα συστήματα αφορούν στη ροή της υδραυλικής ενέργειας και της λειτουργίας των μονάδων. Ουσιαστικά, το σύστημα αποτελείται από τον αυτοματισμό εκκίνησης στη στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων και στην κλίση τους (διπλής ρύθμισης) ή στη μετατόπιση της βελόνης του ακροφυσίου για υδροστρόβιλο δράσης. Το παραπάνω σύστημα προσφέρει προστασία από την ανάπτυξη υδραυλικού πλήγματος και

λειτουργίας του σταθμού με σπηλαίωση. Ένα ακόμα σύστημα αυτόματου ελέγχου αφορά στη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας και πρόκειται για ένα σύστημα συγχρονισμού, ένα σύστημα διέγερσης και τους αυτοματισμούς προστασίας από την αύξηση της θερμοκρασίας εδράνων και τυλιγμάτων. Επιπλέον, για την επιτήρηση και τους αυτοματισμούς όλου του βοηθητικού εξοπλισμού είναι απαραίτητη η φόρτιση των μπαταριών, η πίεση στο κύκλωμα λαδιού του ρυθμιστή στροφών, του συστήματος ανίχνευσης και πυροπροστασίας.

6.7 Διασύνδεση Υδροηλεκτρικού Σταθμού Ηλεκτρικής Ενέργειας με Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

6.7.1 Διασύνδεση Υδροηλεκτρικού σε δίκτυο

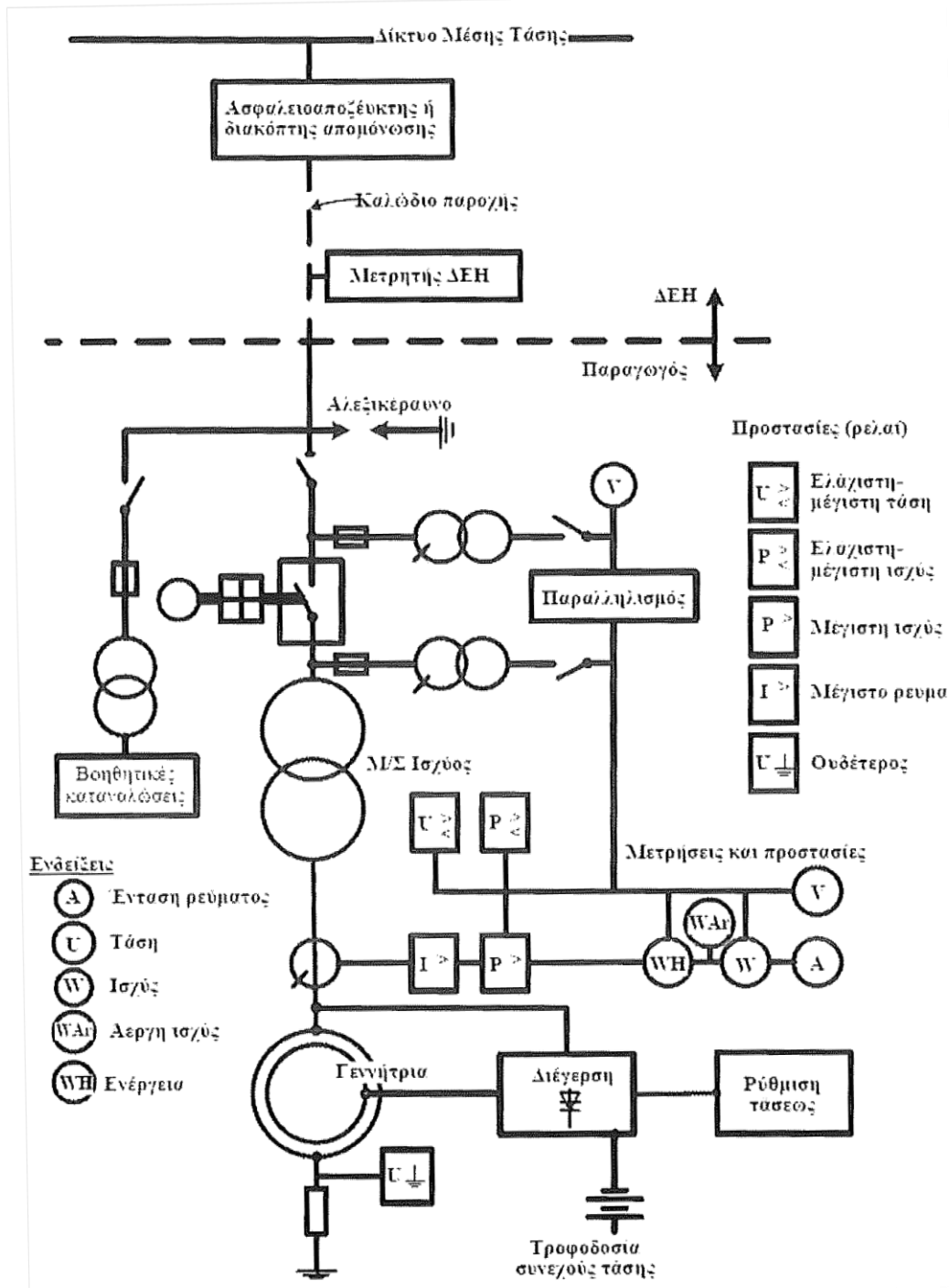
Η διασύνδεση του υδροηλεκτρικού έργου σε δίκτυο του ΑΔΜΗΕ (>8 MVA σε δίκτυο μεταφοράς 150 kV ή 400 kV) ή ΔΕΔΔΗΕ (ως 8 MVA σε δίκτυο μεταφοράς 20 kV) θα πρέπει να γίνεται πάντα σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται από το ΑΔΜΗΕ ή ΔΕΔΔΗΕ. Είναι πολύ σημαντικό να γίνεται με τη χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού για να μπορεί να διασφαλιστεί, τόσο η ασφάλεια του υδροηλεκτρικού συστήματος με το προσωπικό του, όσο και του δικτύου του ΑΔΜΗΕ ή ΔΕΔΔΗΕ. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση της υπέρτασης, υπότασης, υπερσυχνότητας, υποσυχνότητας, τάση ουδέτερου και επηρεάζουν τον αυτόματο διακόπτη διασύνδεσης είναι οι ηλεκτρονόμοι (Ρελαί). Στον παρακάτω πίνακα δίνονται κάποιες προστασίες που απαιτούνται να υπάρχουν για τη διασύνδεση.

Ηλεκτρονόμος	Ρύθμιση	Χρόνος λειτουργίας (ms)	Χρονική καθυστέρηση
Ελάχιστης τάσης	-10% U_N	50 - 150	0,3 s
Μέγιστης τάσης	+6% U_N	50 - 150	0,3 s
Ελάχιστης συχνότητας (Hz)	49	50 - 150	0,3 s
Μέγιστης συχνότητας (Hz)	51	50 - 150	0,3 s
Ομοπολικής τάσης (V)	2 - 20	50 - 150	0,3 s
Υπερέντασης (A)	0,5 - 2	50 - 150	0,5 s

Πίνακας 6.3 Προστασίες σύνδεσης στο δίκτυο [E3, Πίνακας 6.11]

Για τη διασφάλιση του συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι απαραίτητο να εντοπίζεται και να απομονώνεται το συντομότερο δυνατό οποιοδήποτε στοιχείο

του συστήματος μπορεί να έχει υποστεί βλάβη, με στόχο να μειώνει τις πιθανότητες να προκληθεί μεγαλύτερη ζημιά στο σύστημα. Το σύστημα προστασίας επιβάλλεται να είναι αξιόπιστο και ασφαλές, επιλεκτικό και ευσταθές, ώστε να ελαχιστοποιεί του κινδύνους από τις βλάβες και για το προσωπικό. Οι ηλεκτρονόμοι (ρελαί) είναι αυτοί που παρακολουθούν όλες τις παραμέτρους, πραγματοποιώντας μετρήσεις των αντίστοιχων μεγεθών, τάσης και έντασης ρεύματος, μέσω των μετασχηματιστών τάσης ή ρεύματος.



Σχήμα 6.11 Διάγραμμα σύνδεσης ΥΗΣ με διασυνδεδεμένο δίκτυο [Ε3, Σχήμα 6.21α)

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στιγμιαίας λειτουργίας, με λειτουργία μόλις το πλάτος του ρεύματος ξεπεράσει το όριο διέγερσής τους.
2. Χρονικής καθυστέρησης, με λειτουργία με χρονική καθυστέρηση ανεξάρτητη από την ένταση του ρεύματος. Η καθυστέρηση μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το πλάτος της υπερέντασης.

Τα μετρητικά όργανα για τη μέτρηση της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας στο δίκτυο του ΑΔΜΗΕ ή ΔΕΔΔΗΕ είναι ιδιοκτησία της ΑΔΜΗΕ ή ΔΕΔΔΗΕ και ελέγχονται από αυτή.

6.7.2 Αυτόνομη λειτουργία Υδροηλεκτρικού Σταθμού

Υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου ο υδροηλεκτρικός σταθμός τροφοδοτεί ένα αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο. Σκοπός έχει τη διατήρηση της διακύμανσης της συχνότητας και της τάσης του ηλεκτρικού δικτύου μέσα στα επιτρεπόμενα όρια της παροχής και της ισχύς εξόδου, με αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να είναι πάντα ίση με την ισχύ του φορτίου, δηλαδή της ζήτησης των καταναλωτών που τροφοδοτούνται από το αυτόνομο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις η παροχή και η παραγόμενη ισχύς του υδροηλεκτρικού έργου παραμένουν σταθερά, η ζήτηση όμως του φορτίου παρουσιάζει διάφορες διακυμάνσεις, οι οποίες πρέπει να παρακολουθούνται από το ρυθμιστή του υδροστροβίλου. Για να μπορέσει να λειτουργήσει ομαλά το σύστημα θα πρέπει να υπάρχει ευστάθεια του συστήματος. Ως ευστάθεια του συστήματος χαρακτηρίζεται η ικανότητα του ρυθμιστή στροφών να επαναφέρει το σύστημα στις συνθήκες ισορροπίας μετά από κάποια διαταραχή ή μεταβολή της ισχύος εξόδου. Η επιτρεπόμενη τιμή της απόκλισης κάθε φορά εξαρτάται από τη ζήτηση του φορτίου, όσο πιο μικρό είναι το δίκτυο, τόσο μικρότερη είναι και η ζήτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την επίτευξη της ευστάθειας του συστήματος στις περιπτώσεις αυτόνομης λειτουργίας πολλές φορές επιλέγεται παράλληλη σύνδεση ρυθμιζόμενου φορτίου μαζί με το κύριο φορτίο, έτσι ώστε να απορροφάται οποιαδήποτε διακύμανση και οι υδροστροβίλοι να λειτουργούν με σταθερή ισχύ, χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές. Το ρυθμιζόμενο φορτίο ελέγχεται από τον ρυθμιστή στροφών και συνήθως αποτελείται από μία συστοιχία ωμικών αντιστάσεων ή ακόμη και μία ηλεκτρομαγνητική πέδη δινορευμάτων. Το βασικότερο πλεονέκτημα της παραπάνω εφαρμογής είναι η αξιοπιστία που προσφέρεται στο σύστημα, αποτρέποντας την αύξηση υπερπιέσεων στο σύστημα προσαγωγής. Όμως, επειδή η παραπάνω αρχή ουσιαστικά αφορά σε καταστροφή ενέργειας (από ηλεκτρική σε θερμική) έχει εφαρμογή μόνο σε πολύ μικρά υδροηλεκτρικά έργα (< 200kW), όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης και αξιοποίηση της πλεονάζουσας παροχής.

6.8 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας της γεννήτριας, μίας μηχανής σημαντική για έναν υδροηλεκτρικό σταθμό, αφού μέσα από αυτή μετατρέπεται το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως σε όλα τα υπόλοιπα επιμέρους έργα, πολιτικού και μηχανολόγου μηχανικού, έτσι και στα έργα του ηλεκτρολόγου μηχανικού, πρέπει να εφαρμοστεί οικονομοτεχνική μελέτη, μέσα από την οποία θα επιλεγεί ο κατάλληλος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός. Είναι ιδιαίτερη σημαντική η σωστή επιλογή, διότι έτσι εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου, αποφεύγοντας όσο το δυνατό τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν μεγάλη ζημία στο έργο.

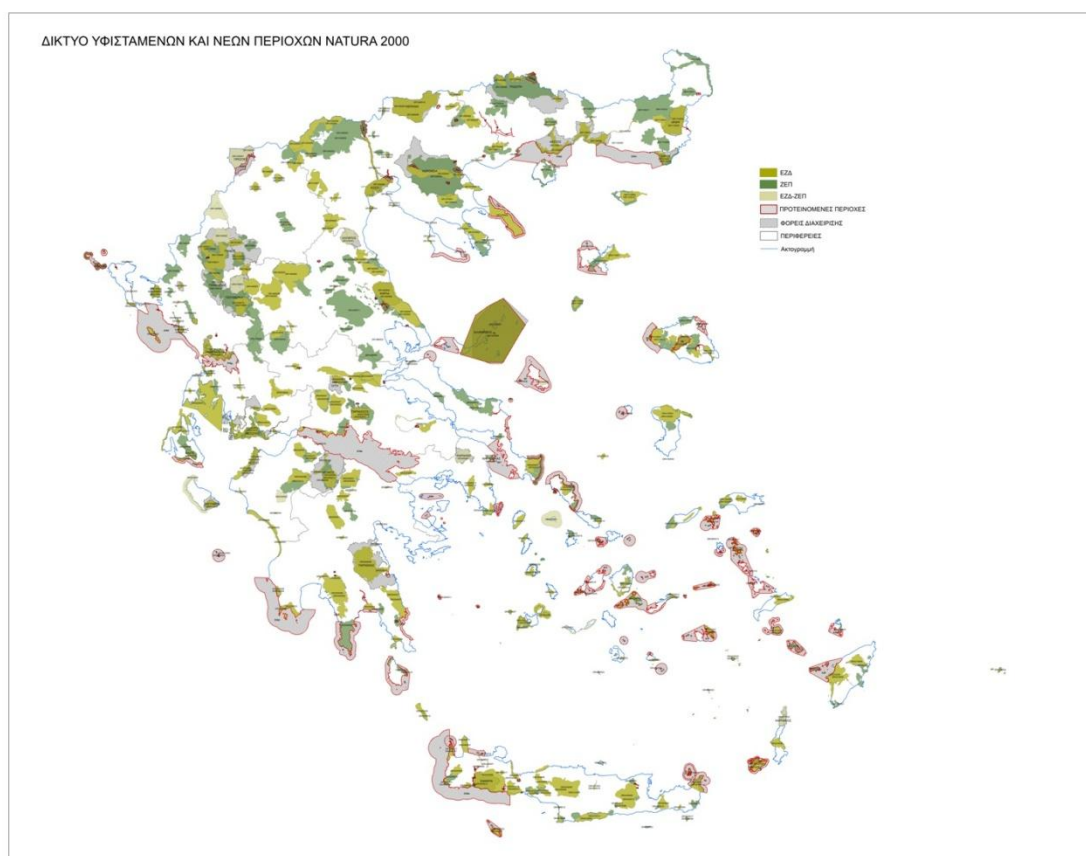
7.1 Εισαγωγή/Natura 2000

Το Natura 2000 (Φύση 2000) αφορά σε ένα πανευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο προστασίας των ειδών και των εδαφών της Ευρωπαϊκής ένωσης. Θεωρείται ένα από τα πιο φιλόδοξα προγράμματα για την προστασία της φύσης στην Ευρώπη και ιδρύθηκε τον Μάιο του 1992 με την εφαρμογή της οδηγίας των οικοτόπων που συνεχίζει την οδηγία για τα πουλιά και μαζί αποτελούν τη νομική βάση του δικτύου. Για την προστασία των άγριων πτηνών δημιουργήθηκαν οι Ζώνες Προστασίας Ειδικής Προστασίας, ΖΕΠ (Special Protection Areas ή SPAs) της ορνιθοπανίδας, ενώ για την οδηγία των οικοτόπων δημιουργήθηκαν οι Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (Special Areas of Conservation – SAC) για όλα τα υπόλοιπα είδη και το περιβάλλον. Αυτές οι δύο ζώνες αποτελούν τις περιοχές δικτύου του Natura 2000. Η δημιουργία του συγκεκριμένου δικτύου είναι αποτέλεσμα πολυετών προσπαθειών τόσο από την πλευρά των κυβερνήσεων των μελών – κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και των πολιτών της. Βασίζεται στις κοινοτικές οδηγίες για τους οικοτόπους (92/43/ΕΟΚ) και για τα πουλιά (79/409/ΕΟΚ).

Κάθε χώρα της ευρωπαϊκής ένωσης είναι υποχρεωμένη να καταρτίσει μία λίστα με τις καλύτερες περιοχές που περιέχουν είδη, τα οποία περιλαμβάνονται στις παραπάνω οδηγίες. Αυτή η λίστα, στη συνέχεια, δίνεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και αξιολογείται για το αν θα ενταχθεί ή όχι στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, για τις περιοχές των υπόλοιπων ειδών και περιβάλλοντος, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία, τα κράτη-μέλη παρέχουν τη λίστα με τις προτεινόμενες θέσεις (proposed Sites of Community Importance ή pSCIs) και μόλις εγκριθούν ως οριστικές, οι Τόποι Κοινοτικής Σημασίας, ΤΚΣ, (Sites of Community Importance ή SCIs) τα κράτη-μέλη θα πρέπει να τις θεσμοθετήσουν το αργότερο ως έξι έτη ως SPAs.

Η Ελλάδα έχει εντάξει έως σήμερα 202 Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) και 241 Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ). Οι δύο παραπάνω λίστες παρουσιάζουν μεταξύ τους επικαλύψεις σε ό,τι αφορά τις εκτάσεις τους. Ο κατάλογος των Ελληνικών Ζωνών Ειδικής Προστασίας δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1495/Β/06.09.2010 ως παράρτημα στη νέα ενσωμάτωση της Οδηγίας 79/409/ΕΟΚ (η οποία κωδικοποιήθηκε με την Οδηγία 2009/147/ΕΚ). Από τους 241 Ελληνικούς ΤΚΣ, οι 239 χαρακτηρίστηκαν ως Ειδικές Ζώνες Διατήρησης με το Ν3937/2011 (ΦΕΚ60/Α/31-3-2011). Μετά την ψήφιση του Νόμου υπ' αριθμ.4519 (20 Φεβρουαρίου 2018), όλες οι περιοχές Natura 2000 υπάγονται σε έναν από τους 36 πλέον Φορείς Διαχείρισης Προστατευόμενων Περιοχών (28 ήδη υφιστάμενοι και 8 νέοι).

Το 2018 όπως αναφέρεται στην 14η ετήσια έκθεση για την εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας του WWF [E18], υπήρξαν άσχημες εξελίξεις: «Η κυβέρνηση διαμόρφωσε ένα αδιαφανές αδειοδοτικό πλαίσιο για τις σεισμικές έρευνες και εξορύξεις πετρελαίου και φυσικού αερίου (υδρογονανθράκων) που θέτει σε άμεσο κίνδυνο πολλές από τις προστατευόμενες περιοχές της Ελλάδας και πιο συγκεκριμένα 85 περιοχές Natura 2000! Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον των περιοχών όπου θα πραγματοποιηθεί σεισμική έρευνα μπορεί να είναι καταστροφικές για το περιβάλλον. Περιλαμβάνουν αποψίλωση βλάστησης, διάβρωση εδάφους, υδρολογικές αλλοιώσεις, ρύπανση από απόβλητα, αλλαγή χρήσεων γης, ρύπανση από την κίνηση οχημάτων, αλλοιώσεις σε οικοσυστήματα από διάνοιξη δρόμων, και εν τέλει κατακερματισμό των οικοσυστημάτων. Στις θαλάσσιες περιοχές (κυρίως το Ιόνιο και την Κρήτη), οι επιπτώσεις των σεισμικών ερευνών στα θαλάσσια θηλαστικά θα είναι δίχως αμφιβολία εξαιρετικά επιβλαβείς. Η χρήση σεισμικών αεροβόλων (seismic airguns) για την πρόκληση ακουστικών πηγών είναι η σοβαρότερη και πλέον αδιαμφισβήτητη επίπτωση στη θαλάσσια βιοποικιλότητα, καθώς μπορεί να προκαλέσει ακουστικά τραύματα ή ακόμα και θάνατο σε φάλαινες, δελφίνια και θαλάσσιες χελώνες.»



Σχήμα 7.1 Δίκτυο υφιστάμενων και νέων περιοχών Natura 2000 [I14]

Τον Οκτώβριο του 2019, 13 Περιβαλλοντικές οργανώσεις στην Ελλάδα, συνυπέγραψαν ένα κοινό κείμενο παρέμβασης για το μέλλον των Φορέων Διαχείρισης [I15], απευθυνόμενες προς το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Τον Νοέμβριο του 2019, 10 από τις Οργανώσεις επανήλθαν με νέα επιστολή και με αναλυτικό κείμενο προτάσεων [I16] για τους Φορείς Διαχείρισης Προστατευμένων Περιοχών (ΦΔΠΠ) προς τον Υπουργό Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Το Φεβρουάριο του 2020, 12 Περιβαλλοντικές Οργανώσεις επανέρχονται με κοινή τοποθέτηση επί του αναμενόμενου νομοσχεδίου για περιβαλλοντικά ζητήματα [I17], ενώ μέσα στον ίδιο μήνα, τρεις από τις οργανώσεις προχώρησαν σε καταγγελία στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα Αιολικά Πάρκα εντός προστατευόμενων περιοχών Natura 2000 [I18]. Στις 30 Μαρτίου 2020, 23 Περιβαλλοντικές Οργανώσεις στέλνουν κοινή επιστολή προς το ΥΠΕΝ για την αναβολή κατάθεσης νομοσχεδίου [I19] «Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας» στη Βουλή, καθώς βλέπουν την κυβέρνηση να προχωράει προς την ψήφιση του νομοσχεδίου χωρίς ουσιαστική διαβούλευση και μέσα σε συνθήκες καραντίνας, λόγω της πανδημίας από τον ιο Covid19. Τον Απρίλιο του 2020, 3 από τις παραπάνω οργανώσεις επανέρχονται με νέα κοινή τοποθέτηση επί του νομοσχεδίου [I20], όμως δυστυχώς, η κυβέρνηση στις 5 Μαΐου 2020 ψηφίζει το νομοσχέδιο που ακυρώνει την προστασία των περιοχών Natura 2000. Τέλος στις 4 Μαρτίου 2021 ψηφίστηκε ο Νόμος υπ' αριθμόν 4782 του Υπουργείου Ανάπτυξης, άρθρο 218 που δεν είναι καθόλου συμφέρι καθόλου το Natura 2000 και συγκέντρωσε 41.000 υπογραφές πολιτών για την απόσυρσή του. Το συγκεκριμένο άρθρο έγινε γνωστό ως «άρθρο 219», αλλά λόγω απόσυρσης ενός άλλου προγενέστερου άρθρου εντός του ίδιου Νόμου, πήρε τον αριθμό 218. Παρακάτω γίνεται η παράθεση του άρθρου:

Άρθρο 218

Καθορισμός υποπεριοχής προστασίας στις περιπτώσεις ήπιων αναπτυξιακών έργων

1. Έως την ολοκλήρωση και έγκριση των Ειδικών Περιβαλλοντικών Μελετών του άρθρου 21 του ν. 1650/1986 (Α' 160) και στις προστατευόμενες περιοχές σύμφωνα με τα άρθρα 18, 19 και 21 του ν. 1650/1986, εξαιρουμένων των ζωνών και περιοχών απολύτου προστασίας, ή στις περιπτώσεις καθορισμένων ζωνών προστασίας από ειδικά διατάγματα χρήσεων γης, δύναται να καθορίζεται με προεδρικό διάταγμα μετά από πρόταση των Υπουργών Ανάπτυξης και Επενδύσεων και Περιβάλλοντος και Ενέργειας υπο-περιοχή προστασίας στις περιπτώσεις ήπιων αναπτυξιακών έργων, διασφαλίζοντας ότι δεν παραβλάπτεται η ακεραιότητα της ευρύτερης περιοχής ως προς τις οικολογικές της λειτουργίες σε σχέση με τους στόχους διατήρησης της περιοχής. Με το ίδιο προεδρικό διάταγμα καθορίζονται, πέραν των άλλων όρων και περιορισμών για την ανάπτυξη της υπό-περιοχής, ειδικοί κανόνες άσκησης δραστηριοτήτων ή και υλοποίησης τεχνικών έργων.

2. Για την έκδοση του προεδρικού διατάγματος της παρ. 1 συμπληρωματικά των σχετικών διατάξεων του ν. 3937/2011 (Α' 60) υποβάλλεται από το φορέα υλοποίησης του προτεινόμενου έργου:

α) Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη (ΕΠΜ), η οποία ακολουθεί τις προδιαγραφές των εν εξελίξει ΕΠΜ του άρθρου 21 του ν. 1650/1986 και εγκρίνεται σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις προς διασφάλιση της ακεραιότητας της ευρύτερης περιοχής και των στόχων διατήρησης. Αν οι ανωτέρω προηγηθούν της ολοκλήρωσης και έγκρισης των εν εξελίξει Ειδικών Περιβαλλοντικών Μελετών του άρθρου 21 του ν. 1650/1986, αυτές λαμβάνονται υποχρεωτικά υπόψη.

β) Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ), η οποία συντάσσεται σύμφωνα με το άρθρο 6 και δημοσιοποιείται σύμφωνα με το άρθρο 7 της υπ' αρ. 107017/2006 κοινής απόφασης των Υπουργών Οικονομίας και Οικονομικών, Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και του Υφυπουργού Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης και Αποκέντρωσης (Β' 1225). Ως αρμόδια αρχή για τις ανάγκες εφαρμογής του παρόντος νοείται η αρμόδια υπηρεσία περιβάλλοντος του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

γ) Γνωμοδότηση του Κεντρικού Συμβουλίου Χωροταξικών Θεμάτων και Αμφισβητήσεων του άρθρου 4 του ν. 4447/2016 (Α' 241).

3. Αν εκπονείται σχέδιο που εντάσσεται στα Ειδικά Πολεοδομικά Σχέδια, αυτό ενσωματώνεται στα προεδρικά διατάγματα που κατά περίπτωση προβλέπονται από την κείμενη νομοθεσία.” [E19]

Τα μέτρα διατήρησης που ανταποκρίνονται στις οικολογικές απαιτήσεις των προστατευόμενων ειδών και οικοτόπων έρχονται σε αντίθεση με το άρθρο 6 παρ. 1 της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ. Ο καθορισμός του προστατευτικού καθεστώτος και των υπο-περιοχών προστασίας, βασισμένος στην υλοποίηση αναπτυξιακών έργων και όχι στα οικολογικά κριτήρια, είναι αντίθετος με την Οδηγία. Σύμφωνα με το άρθρο 219 του νομοσχεδίου, τα επενδυτικά σχέδια και συμφέροντα θα είναι αυτά που θα καθορίζουν το καθεστώς της υπο-περιοχής. Στη συνέχεια, το συγκεκριμένο άρθρο έρχεται πάλι σε αντίθεση με τον ορθολογικό τρόπο σχεδιασμού μιας προστατευόμενης περιοχής, όπου πρέπει να γίνεται μόνο με κριτήριο τη διατήρηση των πολύτιμων, απειλούμενων ή σπάνιων στοιχείων της φύσης. Το άρθρο ακόμα, αγνοεί το γεγονός ότι η Ελλάδα τα τελευταία χρόνια παραβιάζει το άρθρο 6 της οδηγίας 92/43/ΕΟΚ για τους οικοτόπους, κάτι για το οποίο έχει καταδικαστεί ήδη από το δικαστήριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επιπλέον, πραγματοποιείται κατακερματισμός των περιοχών του δικτύου Natura 2000, καθώς και η αποσπασματική προστασία τους, δημιουργώντας επί τούτου καθεστώτα σε υπο-περιοχές, πράγμα που έρχεται σε αντιπαράθεση με τις επιταγές της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ, έτσι όπως είχε ερμηνευτεί από το δικαστήριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προκειμένου η διαμόρφωση των μέτρων για την

τήρηση της βιοποικιλότητας να είναι συστηματική και ολοκληρωμένη. Τέλος, αυξάνει το διοικητικό βάρος, αφού επιβαρύνει τις αρμόδιες υπηρεσίες με μία παράλληλη διαδικασία έγκρισης μελετών.

7.2 Καταγραφή περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Οι επιπτώσεις των υδροηλεκτρικών έργων είναι συνδεδεμένες, τόσο με την τοποθεσία, όσο και με την τεχνολογία τους. Ένα έργο σε βουνό, που βρίσκεται σε μια πολύ ευαίσθητη περιοχή είναι πιο πιθανό να προκαλέσει αντίκτυπο από ένα έργο χαμηλού ύψους σε μια κοιλάδα. Η αναβάθμιση και επέκταση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, που δόθηκε σε προτεραιότητα στην Ευρώπη, δημιουργεί επιπτώσεις που είναι πολύ διαφορετικές από ένα εντελώς νέο έργο. Για παράδειγμα, σε έργα εκτροπής βουνών που χρησιμοποιούν τη μεγάλη αλλαγή στο υψόμετρο ενός ποταμού, το νερό εκτρέπεται από τον κύριο ποταμό και επανέρχεται ξανά στα ύδατα κάτω από τον σταθμό παραγωγής ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση, ολόκληρες περιοχές του κύριου ποταμού μπορεί να παρακαμφθούν από μεγάλο όγκο νερού, όταν η μονάδα λειτουργεί.

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 δίνεται περιγραφή των πιθανών επιπτώσεων, βάσει ευρωπαϊκών μελετών. Ωστόσο, δεν είναι βέβαιο ότι όλη ή το μεγαλύτερο μέρος αυτής της λίστας περιγραφών θα ισχύει για ένα συγκεκριμένο έργο. Στη λίστα αναφέρονται τα άτομα, τα πράγματα ή τα γεγονότα που επηρεάζονται, με αντίκτυπο και προτεραιότητα, τόσο σε τοπικό, όσο και σε εθνικό επίπεδο.

Γεγονότα κατά την κατασκευή	Ομάδα που επηρεάζεται	Επιπτώσεις	Προτεραιότητα
Γεωλογικές έρευνες	Άγρια Φύση	Θόρυβος	Μικρή
Παρέμβαση σε υφιστάμενη βλάστηση	Δασολογία	Τροποποίηση οικοτόπου	Μεσαία
Επέκταση υφιστάμενων δρόμων	Ευρύ κοινό	Δημιουργία ευκαιριών, Τροποποίηση οικοτόπου	Μεσαία
Περιστροφή της Γης	Γεωλογία τοποθεσίας	Σταθερότητα κλίσης (ευσταθεία πρανών)	Μικρή
Εκσκαφή τούνελ	Υδρογεωλογία τοποθεσίας	Τροποποίηση της κυκλοφορίας των υπόγειων ρευμάτων	Μικρή
Γέμισμα πλαγιών με μόνιμο υλικό	Γεωλογία τοποθεσίας	Σταθερότητα κλίσης (ευσταθεία πρανών)	Μικρή
Δημιουργία αναχώματος	Υδροβιότοπος, υδρομορφολογία	Τροποποίηση της υδραυλικής του ποταμού	Μεσαία
Δημιουργία προσωρινής συσσώρευσης αδρανών υλικών	Γεωλογία τοποθεσίας	Σταθερότητα κλίσης (ευσταθεία πρανών)	Μικρή
Προσωρινός εκτοπισμός κατοίκων, δρόμων, ηλεκτρικών γραμμών	Ευρύ κοινό	Αλλαγή καθημερινότητας των κατοίκων για συγκεκριμένο διάστημα	Αμελητέα
Δημιουργία δρόμων και υποστέγων για το εργοτάξιο	Άγρια Φύση, Ευρύ Κοινό	Ενόχληση της άγριας φύσης, οπτική παρεμβολή	Μικρή
Έργα αποστράγγισης νερού	Υδροβιότοπος	Τροποποίηση οικοτόπου	Μεσαία
Προσωρινή εκτροπή ποταμού	Υδροβιότοπος	Τροποποίηση οικοτόπου	Υψηλή
Χρήση εκσκαφών, φορητών, ελικοπτέρων, αυτοκινήτων για το προσωπικό	Άγρια Φύση, Ευρύ Κοινό	Θόρυβος	Υψηλή
Παρουσία ανθρώπων κατά την διεξαγωγή των	Άγρια Φύση, Ευρύ Κοινό	Θόρυβος	Μικρή

Πίνακας 7.1 Επιπτώσεις κατά τη φάση κατασκευής [E1, Table 7.1]

Γεγονότα κατά τη λειτουργία	Ομάδα που επηρεάζεται	Επιπτώσεις	Προτεραιότητα
Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές	Ευρύ κοινό	Μείωση ρύπων	Υψηλή
Φράγμα	Υδροβιότοπος	Τροποποίηση οικοτόπου	Υψηλή
Προσωρινές εργασίες στην κοίτη του ποταμού	Υδροβιότοπος	Τροποποίηση οικοτόπου	Υψηλή
Εκτροπή του υδατορεύματος	Υδροβιότοπος	Τροποποίηση οικοτόπου	Υψηλή
Θυροφράγματα	Άγρια φύση	Οπτική παρεμβολή	Μεσαία
Νέες ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς	Ευρύ κοινό, Άγρια φύση	Οπτική παρεμβολή	Μικρή
Λιθοριπή	Υδροβιότοπος, Ευρύ κοινό	Τροποποίηση οικοτόπου, Οπτική παρεμβολή	Μικρή
Αναχώματα	Υδροβιότοπος, Ευρύ κοινό	Τροποποίηση οικοτόπου, Οπτική παρεμβολή	Μικρή
Τροποποίηση της παροχής	Ψάρια	Τροποποίηση οικοτόπου	Υψηλή
	Φυτά	Τροποποίηση οικοτόπου	Μεσαία
	Ευρύ κοινό	Τροποποίηση ψυχαγωγικών δραστηριοτήτων	Μεσαία
Θόρυβος από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό	Ευρύ κοινό	Τροποποίηση της ποιότητας ζωής	Μικρή
Απομάκρυνση φερτών υλικών	Υδροβιότοπος, Ευρύ κοινό	Εξέλιξη της ποιότητας του νερού	Υψηλή

Πίνακας 7.2 Επιπτώσεις κατά τη φάση λειτουργίας [Ξ1, Table 7.2]

Επιπλέον, στον Πίνακα 7.3 φαίνονται οι επιπτώσεις στο φυσικό, πολιτιστικό και κοινωνικό περιβάλλον αντίστοιχα.

Φυσικό Περιβάλλον	Υδρολογικές	στάθμη, ποσότητα και ποιότητα υπέργειων και υπόγειων υδάτων
	Εδαφικές	διακοπή της συνέχειας της παροχής φερτών υλών, μορφολογία του εδάφους
	Βιολογικές	χλωρίδα και πανίδα της περιοχής
	Ατμοσφαιρικές	ποιότητα του αέρα υγρασία
Πολιτιστικό & Κοινωνικό Περιβάλλον	Κοινωνικές	αλλοίωση φυσικού κάλλου, προστατευόμενης περιοχής, ιστορικών και αρχαιολογικών μνημείων, υγεία και ασφάλεια, θόρυβος
	Οικονομικές	απασχόληση κατά τη διάρκεια της κατασκευής και λειτουργίας, οικιστικές (κατά τη διάρκεια της κατασκευής), οικονομικά οφέλη της τοπικής αρχής (ΟΤΑ)
	Αξία και χρήσεις Γης	δασικές εκτάσεις, αγροτεμάχια οικίες
	Υποδομή	κατασκευή δρόμων, διάθεση υλικών εκσκαφών
	Αναψυχή	αλιεία, τουρισμός, κλπ.

Πίνακας 7.3 Επιπτώσεις στο φυσικό, πολιτιστικό και κοινωνικό περιβάλλον [E3]

7.3 Επιπτώσεις ως προς το περιβάλλον

7.3.1 Στο φυσικό περιβάλλον

Το υδατόρευμα που αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροηλεκτρικών σταθμών αποτελεί το φυσικό περιβάλλον, όπου συντηρεί μεγάλη ποικιλία πανίδας και χλωρίδας και επίσης σε αυτό ζουν μεγάλα άγρια ζώα. Από την εδαφολογική σκοπιά, η κοίτη του ποταμού βρίσκεται σε μία δυναμική ισορροπία, αφού τα φερτά υλικά παρασύρονται συνεχόμενα προς τις

χαμηλότερες στάθμες. Από υδρολογικής πλευράς, η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υδατορεύματος ορίζεται σαν την οριακή συνθήκη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα που τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από αυτόν.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που θα μπορούσε να απασχολήσει το περιβάλλον κατά την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι η κατασκευή του φράγματος ή του υπερχειλιστή, αφού έτσι διαταράσσεται η ισορροπία, τόσο στο εδαφολογικό όσο και στο βιολογικό και υδρολογικό τομέα. Συγκεκριμένα, το φράγμα αποτελεί μία διακοπή της συνέχειας του υδατορεύματος, προκαλώντας διάφορες επιπτώσεις.

Εξαιτίας της διακοπής της παροχής που δημιουργείται λόγω του φράγματος, τα φερτά υλικά αναγκάζονται να εγκλωβιστούν στη λεκάνη ή στον ταμιευτήρα. Για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, τα φερτά υλικά που συσσωρεύονται μέσα στον ταμιευτήρα, αποτελούν σοβαρό πρόβλημα το οποίο απαιτεί συνεχόμενη αντιμετώπιση με σκοπό να γίνεται η λειτουργία του έργου απρόσκοπτη. Αυτό κυρίως συμβαίνει επειδή ο ταμιευτήρας στα μικρά έργα είναι σχετικά μικρής χωρητικότητας. Αυτή διακοπή, όμως, της συνέχειας της ροής των φερτών υλικών προκαλεί σοβαρά εδαφολογικά προβλήματα κατάντη της διατομής απαγωγής μετά την έξοδο από τους υδροστροβίλους, διότι η παροχή εκεί του νερού συναντά εκ νέου τη φυσική κοίτη. Είναι λογικό η ροή να παρασύρει τα φερτά υλικά προς τις χαμηλότερες στάθμες οι οποίες όμως δεν αναπληρώνονται από ανάντη. Λόγω όλων των παραπάνω υπάρχει σοβαρός κίνδυνος διάβρωσης των εδαφών από την κάτω πλευρά του σταθμού. Ο ρυθμός της διάβρωσης εξαρτάται από τη σύσταση των εδαφών και το πρόβλημα αυτό είναι το ίδιο σημαντικό τόσο στα μικρά, όσο και στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα.

Με την κατασκευή του φράγματος ανυψώνεται, επίσης και η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού που έρχεται στο ίδιο επίπεδο με τη στάθμη της υπερχειλίσης. Όλο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τη λεκάνη υδροληψίας. Αυτή η ανύψωση προκαλεί άνωση στα παρακείμενα κτίρια με αποτέλεσμα να υπάρχει φόβος για τη στατικότητα τους. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι πιο έντονο στα υδροηλεκτρικά ροής, όπου κατά κανόνα διαμορφώνονται σε επίπεδες περιοχές μικρής κλίσης, έτσι η ανύψωση της στάθμης γίνεται αισθητή σε μεγάλο βαθμό. Το συγκεκριμένο πρόβλημα ως επί το πλείστον αντιμετωπίζεται με την κατασκευή παράπλευρης συλλεκτήριας διώρυγας παράλληλη προς το υδατόρευμα. Επιπλέον, το νερό δεν υφίσταται κάποια αλλοίωση κατά τη διέλευσή του από τους υδροστροβίλους και έτσι είναι κατάλληλο για την ίδια χρήση, π.χ. για άρδευση ή ύδρευση, όπως ήταν και πριν την προσαγωγή του στον υδροηλεκτρικό σταθμό.

Κάτω από το φράγμα η παροχή στη φυσική κοίτη του ποταμού μπορεί ακόμα και να μηδενιστεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ειδικά αν η λεκάνη υδροληψίας είναι μεγάλης χωρητικότητας. Κάτι τέτοιο θα είχε καταστροφικές συνέπειες, τόσο στη χλωρίδα, όσο και στην πανίδα τουλάχιστον μεταξύ της ζώνης υδροληψίας και υδροηλεκτρικού σταθμού. Έτσι, απαιτείται οπωσδήποτε

η διατήρηση μιας ελάχιστης παροχής στη διάρκεια του έτους η οποία θα διαρρέει τη φυσική κοίτη και ονομάζεται παροχή συντήρησης. Όταν η παροχή συντήρησης έχει υψηλή τιμή σημαίνει ότι θα υπάρξει μείωση της διαθέσιμης παροχής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, άρα θα υπάρχουν και μειωμένα έσοδα στο έργο. Για αυτόν το λόγο η παροχή συντήρησης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση προς την ελάχιστη φυσική παροχή του υδατορεύματος ή ίση προς το 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών ή το 50% του μήνα Σεπτεμβρίου ή τουλάχιστον 30 l/s. Η πιο σημαντική επίπτωση που θα μπορούσε να υπάρξει στο βιολογικό τομέα εξαιτίας του φράγματος, είναι αποτελεί ένα αδιαπέραστο εμπόδιο για τα είδη των ψαριών που διακινούνται κατά μήκος του ποταμού. Συγκεκριμένα, τα ψάρια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Είναι αυτά που ζουν στη θάλασσα, αλλά ανεβαίνουν μέχρι τις πηγές των ποταμών για να γεννήσουν τα αυγά τους και αυτά που ακολουθούν την αντίστροφη πορεία, δηλαδή γεννούν στη θάλασσα και όταν ενηλικιωθούν, ζουν στα νερά των ποταμών.

Για να μπορούν τα ψάρια να παρακάμπτουν το φράγμα ή τον εκχειλιστή θα πρέπει να διαμορφωθεί μία δίοδος με τέτοια μορφή που θα αποτρέπει την επαφή τους στις ζώνες υψηλής τύρβης, όπως είναι η λεκάνη ηρεμίας του εκχειλιστή.



Σχήμα 7.2 Ιχθυόσκαλα [E17]

Τέλος, οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα από έναν υδροηλεκτρικό σταθμό προκαλούνται από την επιφάνεια την οποία καταλαμβάνει ή λεκάνη υδροληψίας πάνω από τη δεξαμενή. Στις περιπτώσεις που ο ταμιευτήρας είναι μεγάλης χωρητικότητας, αυξάνεται η ατμοσφαιρική υγρασία εξαιτίας της εξάτμισης που πραγματοποιείται και μεταβάλλεται το μικροκλίμα της περιοχής. Για τα μικρά υδροηλεκτρικά με μικρής χωρητικότητας λεκάνη υδροληψίας οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα είναι αμελητέες.

7.3.2 Στο κοινωνικό και πολιτιστικό περιβάλλον

Τα υδροηλεκτρικά έργα κατασκευάζονται σε ορεινές περιοχές με πανέμορφα τοπία. Οι οπτικές ενοχλήσεις προκαλούνται εξαιτίας του φράγματος, του έργου υδροληψίας, της διώρυγας προσαγωγής, των οδών προσπέλασης, του αγωγού προσαγωγής, αλλά και του κτιρίου του υδροηλεκτρικού σταθμού μαζί με τις γραμμές μεταφοράς. Μεγαλύτερο πρόβλημα από όλα τα παραπάνω, σε οπτικό επίπεδο, αποτελεί ο αγωγός προσαγωγής, κυρίως εξαιτίας του μεγάλου μήκους του. Η υπόγεια εγκατάσταση ολόκληρου του αγωγού προσαγωγής επιβαρύνει σημαντικά το κόστος του έργου και δεν είναι πάντα εφικτή. Το κτίριο του υδροηλεκτρικού σταθμού, συνήθως, δεν είναι αποτελεί οπτική ενόχληση στο περιβάλλον, αφού γίνονται διάφορες αρχιτεκτονικές επεμβάσεις οι οποίες δεν επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος κατασκευής και μπορούν να ενταχθούν ικανοποιητικά στον περιβάλλοντα χώρο. Για την εξωτερική εμφάνιση του σταθμού ακολουθείται, όσο είναι εφικτό, η συγκεκριμένη τοπική αρχιτεκτονική.

Κατά τη διάρκεια της φάσης κατασκευής του υδροηλεκτρικού έργου η οπτική ενόχληση της περιοχής μπορεί να είναι σημαντική και προέρχεται ως επί το πλείστον από την εγκατάσταση του εργοταξίου, την απόθεση της περίσσειας των εκσκαφών κ.α. Έτσι, στις προδιαγραφές κατασκευής του έργου είναι απαραίτητο να προβλέπεται η αποκατάσταση των χωρών μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Αυτό το κόστος αποκατάσταση του φυσικού περιβάλλοντος είναι της τάξεως 1 με 2% του συνολικού κόστους του έργου.

Η διέλευση των καλωδίων μέσης τάσης σίγουρα αποτελεί μία οπτική υποβάθμιση της περιοχής, αλλά παράλληλα μπορεί να θεωρηθεί και μεγάλη εστία κινδύνου πυρκαγιάς από βραχυκύκλωμα η αστοχία στο δίκτυο μεταφοράς, ιδίως για τα υδροηλεκτρικά έργα που κατασκευάζονται σε ορεινές περιοχές με αυξημένη δασική κάλυψη. Ακόμα, τα εργατικά ατυχήματα κατά τη φάση της κατασκευής, αλλά και κατά τη φάση της λειτουργίας του έργου είναι συνήθως τυχαία περιστατικά, όπου η συχνότητα και η κατηγορία στην οποία εντάσσονται εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους. Τις περισσότερες φορές οι εκτιμήσεις για τέτοιου είδους κινδύνους εργατικών ατυχημάτων γίνονται με βάση στατιστικά στοιχεία από υδροηλεκτρικά που έχουν ήδη κατασκευαστεί.

Ο θόρυβος που δημιουργείται από τη λειτουργία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του υδροηλεκτρικού σταθμού αποτελεί άλλο ένα πρόβλημα. Οι κυριότερες πηγές θορύβου είναι οι υδροστρόβιλοι, οι γεννήτριες, το σύστημα εξαερισμού και ο μετασχηματιστής. Από όλα τα παραπάνω, σημαντικότερη συμμετοχή στην εκπομπή θορύβου έχει το σύστημα εξαερισμού και στροβίλων. Η στάθμη θορύβου στον περιβάλλοντα χώρο είναι εύκολο να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση κατάλληλων ηχομονωτικών υλικών κατά τη φάση της κατασκευής του σταθμού ή ακόμα με την υπόγεια κατασκευή του σταθμού.

Οι οικονομικές επιπτώσεις, τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι, ως επί το πλείστον, θετικές και σχετίζονται με την απασχόληση του εργατικού και

τεχνικού δυναμικού της περιοχής. Αυτές οι επιπτώσεις μειώνονται σημαντικά μετά την ολοκλήρωση των έργων, διότι το μόνιμο προσωπικό που απαιτείται για τη λειτουργία του σταθμού περιορίζεται σε ένα ή δύο το πολύ τεχνικούς. Σημαντικά είναι, επίσης, και τα έσοδα των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης των δήμων, στα όρια των οποίων κατασκευάζεται το υδροηλεκτρικό έργο και μακροπρόθεσμα διοχετεύουν τη βελτίωση της υποδομής και των συνθηκών διαβίωσης των κατοίκων τους.

Η μεταβολής της χρήσης και της αξίας της γης είναι αρκετά περιορισμένες και σε πολλές περιπτώσεις ανύπαρκτες, ειδικά για τα μικρά υδροηλεκτρικά, αφού σχετίζονται κυρίως με το σχηματισμό του ταμιευτήρα. Στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα που ο ταμιευτήρας που καταλαμβάνει μεγάλη έκταση της γης καλλιεργημένης και κατοικημένης, θα πρέπει οι οικισμοί να μεταφερθούν, ενώ η κάλυψη της καλλιεργημένης γης αντιστοιχεί σε μειωμένα έσοδα του ελληνικού πληθυσμού. Τέλος, για τις ανάγκες του ΥΗΕ, συχνά χρειάζεται η διάνοιξη νέων γεφυρών και οδών ή ακόμα και η βελτίωση των υπαρχόντων. Αφού ολοκληρωθεί το έργο, τα παραπάνω μπορούν να εξυπηρετούν τους κατοίκους και τους τουρίστες της περιοχής.

7.4 Επιπτώσεις ως προς τη χρονική περίοδο

7.4.1 Κατά τη φάση της κατασκευής

Οι διάφορες εφαρμογές έργων εκτροπής, οι δεξαμενές πολλαπλών χρήσεων τοποθετημένες σε κανάλια ύδρευσης ή ακόμα ενσωματωμένες σε συστήματα παροχής νερού έχουν πολύ διαφορετικές επιπτώσεις μεταξύ τους, τόσο από ποσοτικής, όσο και από ποιοτικής σκοπιάς. Στα έργα που χρησιμοποιούνται φράγματα πολλαπλών χρήσεων πρακτικά δεν υπάρχουν δυσμενείς επιπτώσεις, διότι κατά τη φάση της κατασκευής του φράγματος είχαν ήδη εφαρμοστεί όλα τα απαραίτητα μέτρα. Στα έργα που ενσωματώνονται σε ένα κανάλι άρδευσης ή σε ένα σύστημα παροχής νερού δύσκολα θα υπάρχουν επιπλέον επιπτώσεις σε σχέση με εκείνες που δημιουργήθηκαν όταν αναπτύχθηκε το κανάλι και το σύστημα των σωληνώσεων για την παροχή του νερού.

Οι επιπτώσεις που δημιουργούνται από την κατασκευή φράγματος και τη δημιουργία του ταμιευτήρα περιλαμβάνουν, εκτός από την απώλεια εδάφους, την κατασκευή και το άνοιγμα κατασκευαστικών δρόμων, εργοστάσια, εκσκαφές, ανατινάξεις και ακόμη - ανάλογα με το μέγεθος του φράγματος - εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος. Άλλες μη αμελητέες επιπτώσεις είναι το φαινόμενο φραγμού και η μεταβολή της. Γενικά οι ταμιευτήρες δεν είναι, συνήθως στην πραγματικότητα επιλέξιμοι για τις μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες. Η πλειοψηφία των μικρών έργων ακολουθούν σχήματα κατά το ρου του ποταμού, χωρίς να έχουν μεγάλες κατασκευές, όπως είναι αυτές των φραγμάτων. Ωστόσο, οι επιπτώσεις που δημιουργούνται από την κατασκευή ενός φράγματος δεν διαφέρουν από εκείνες που προκαλούνται από οποιαδήποτε ανάπτυξη

υποδομής μεγάλης κλίμακας, των οποίων τα αποτελέσματα και τα μέτρα μετριασμού είναι γνωστά.

7.4.2 Κατά τη φάση της λειτουργίας

Τα επιτρεπόμενα όρια θορύβου για κάθε περιοχή εξαρτώνται από τον τοπικό πληθυσμό και τα μεμονωμένα σπίτια που βρίσκονται κοντά στο σταθμό παραγωγής. Ο θόρυβος προέρχεται κυρίως από τους υδροστροβίλους λόγω της ταχύτητάς τους. Κατά τη λειτουργία του σταθμού τα dB δεν αναμένεται να αυξηθούν παραπάνω από την υφιστάμενη στάθμη θορύβου, δεδομένου ότι ο εξοπλισμός που θα επιλεγεί θα βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Η ποιότητα των οπτικών πτυχών είναι σημαντική για το κοινό, το οποίο είναι όλο και πιο απρόθυμο να δεχθεί αλλαγές που συμβαίνουν στο οπτικό τους περιβάλλον. Για παράδειγμα, ένα νέο συγκρότημα κατοικιών σε μία γειτονιά με μια τεχνητή παραλία χτισμένη με άμμο που προέρχεται από μία υποβρύχια εκσκαφή απορρίφθηκε από ένα μέρος του πληθυσμού, παρόλο που, με πολλούς τρόπους, θα βελτίωνε το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του τοπίου. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας σε βουνά ή σε συστήματα που βρίσκονται σε αστική περιοχή. Αυτή η ανησυχία εκδηλώνεται συχνά με τη μορφή δημόσιων σχολίων και μέσω νομικών προκλήσεων σε εκείνους τους προγραμματιστές που επιδιώκουν να αλλάξουν ένα αγαπημένο τοπίο αναπτύσσοντας μια εγκατάσταση υδροηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός, η τοποθεσία και η εμφάνιση οποιουδήποτε χαρακτηριστικού μπορεί να καθορίσει το επίπεδο αποδοχής του κοινού για ολόκληρο το έργο.



Σχήμα 7.3 Σταθμός Παραγωγής Neckar [I21]

Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία, ακόμη και τα μεγαλύτερα, μπορούν να προβληθούν από την προβολή χρησιμοποιώντας τοπία με βλάστηση. Θα

μπορούσε ο σταθμός να είναι βαμμένος σε χρώματα και υφές που δεν έρχονται σε αντίθεση για τη λήψη μη ανακλαστικών επιφανειών, ένα στοιχείο που θα συνδυάζεται ή θα συμπληρώνει το χαρακτηριστικό τοπίο. Η δημιουργική προσπάθεια, συνήθως με μικρή επίδραση στο συνολικό προϋπολογισμό, μπορεί συχνά να οδηγήσει σε ένα έργο αποδεκτό από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη: τοπικές κοινότητες, εθνικές και περιφερειακές υπηρεσίες, οικολόγοι κ.λπ. Για παράδειγμα το εργοστάσιο παραγωγής Neckar που βρίσκεται στο Heidelberg της Γερμανίας εγκρίθηκε υπό την προϋπόθεση να μην εμποδίζει τη θέα του φράγματος που χτίστηκε παλαιότερα για να κάνει τον ποταμό πλωτό.

Επιπλέον, οι γραμμές μεταφοράς πάνω από το έδαφος και οι διάδρομοι γραμμών μεταφοράς μπορούν να έχουν αρνητικό αντίκτυπο σε ένα τοπίο. Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν να μετριαστούν με την προσαρμογή της γραμμής στο τοπίο, ή σε ακραίες περιπτώσεις να το «θάβουν». Η βέλτιστη τεχνική και οικονομική λύση για τη δρομολόγηση της γραμμής μεταφοράς μπορεί συχνά να δημιουργεί τις πιο αρνητικές αισθητικές επιπτώσεις. Για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόσταση από το έδαφος, οι πυλώνες τοποθετούνται στην κορυφή των λόφων, αποτελώντας ένα εμφανές έντονα αισθητικά στοιχείο του τοπίου. Οι ελάχιστες στροφές στη διαδρομή θα μειώσει τον αριθμό των γωνιών και των συνηθισμένων πυλώνων, άρα επομένως θα μειώσει το κόστος του. Αισθητικά δεν προτιμάται ούτε η υψηλή συχνότητα στροφών, ούτε οι ευθείες διαδρομές που γίνονται χωρίς να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες του εδάφους και του τοπίου. Σε ευαίσθητες ορεινές περιοχές όπου αναπτύσσονται έργα, οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να κυριαρχήσουν στο τοπίο και επομένως να επηρεάσουν την ομορφιά του τοπίου. Οι γραμμές μεταφοράς όμως, μπορεί να υπάρχουν ακόμη και χωρίς την ύπαρξη συστημάτων υδροηλεκτρικής ενέργειας. Τα χωριά, ακόμη και αν είναι ψηλά στο βουνό, χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα για να κάνουν τη ζωή βιώσιμη και ο ηλεκτρισμός, εκτός εάν παράγεται από φωτοβολταϊκά συστήματα, απαιτεί γραμμές μεταφοράς.

Τέλος, εκτός από την οπτική διείδυση, μερικοί άνθρωποι μπορεί να μην τους αρέσει να περπατούν κάτω από τις γραμμές μεταφοράς λόγω των αντιληπτών κινδύνων των επιπτώσεων στην υγεία από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Εκτός από το γεγονός ότι αυτός ο κίνδυνος γίνεται αντιληπτός μόνο σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, και ποτέ δεν συμβαίνει σε μία μικρή μονάδα υδροηλεκτρικής ενέργειας, μετά από αρκετά χρόνια αντιφατικών αναφορών, δεν υπάρχει ακόμη τελικό αποτέλεσμα.

7.5 Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια ένας τεράστιος αριθμός ανεπτυγμένων περιοχών αποδεικνύει ότι ακόμη και υπό εξαιρετικά περιοριστικές περιβαλλοντικές συνθήκες είναι δυνατή η ειρηνική και βιώσιμη συνύπαρξη μικρής υδροηλεκτρικής ενέργειας και του περιβάλλοντος. Τα μικρά έργα είναι πολύ πιο εύκολο να ανταποκριθούν στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις παρά ο τομέας της μεγάλης υδροηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι περιβαλλοντικές ανησυχίες είναι μάλλον λιγότερο ευέλικτες. Παρόλο που το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος των μικρών υδροηλεκτρικών δεν είναι εντελώς απαλλαγμένο από περιβαλλοντικά προβλήματα, το ευρύ φάσμα αποτελεσματικών μέτρων μετριασμού των αρνητικών συνεπειών προσφέρει πολλές αξιόλογες προσεγγίσεις για έναν έμπειρο σχεδιαστή. Σίγουρα, κατά τη δημιουργία ενός υδροηλεκτρικού έργου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλα τα μέτρα που συμμορφώνονται με τις νομοθεσίες της χώρας σχετικά με τις επιπτώσεις του έργου στο περιβάλλον. Είναι γεγονός πως συγκεκριμένα τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα έχουν μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, αφού δεν απαιτούνται ιδιαίτερες παρεμβατικές εργασίες, όπως για παράδειγμα η κατασκευή ενός φράγματος. Παρόλα αυτά όμως, θα πρέπει να τηρούνται όλες οι οδηγίες που προδιαγράφονται μέσα στις νομοθεσίες, προκειμένου να μην υπάρχουν κυρώσεις που θα μπορούσαν να επιφέρουν πλήγμα στα έσοδα του σταθμού.

Οικονομοτεχνική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων

8.1 Εισαγωγή

Ο κυριότερος σκοπός της οικονομοτεχνικής ανάλυσης είναι ο έλεγχος της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου. Για τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα το κριτήριο της οικονομικής βιωσιμότητας, ως επί το πλείστον, εξαρτάται από το αν το υδροηλεκτρικό έργο τροφοδοτεί ένα αυτόνομο ή ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν το μικρό υδροηλεκτρικό τροφοδοτήσει ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο, τότε θα πρόκειται για μία επένδυση που πρέπει να είναι αποδοτική σε σχέση με μία άλλη εναλλακτική τοποθέτηση των χρημάτων της ίδιας κλίμακας. Όταν η ανάλυση αφορά σε ένα έργο το οποίο συνδυάζεται και με άλλες χρήσεις και διευθετήσεις, όπως είναι η άρδευση, η τουριστική αξιοποίηση, η ύδρευση, τότε γίνεται ακόμα πιο περίπλοκη. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η έντονη διακύμανση της φυσικής απορροής μέσα στη διάρκεια του έτους, καθώς και από έτος σε έτος, κάτι το οποίο έρχεται αντιμέτωπο με τη βέλτιστη σχεδίαση του έργου και τις επιλογές του πλήθους και των μεγεθών των υδροστρόβιλων με στόχο τη μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης.

Αν το μικρό υδροηλεκτρικό πρόκειται να καλύψει μέρος ή και το σύνολο ενός αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου, θα πρέπει η οικονομική απόδοση να συγκριθεί με άλλους εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα με μονάδα Diesel. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μονάδα παραγωγής διαστασιολογείται, έτσι ώστε να μπορεί να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου, τόσο σήμερα, όσο και μετά από μερικά χρόνια.

Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί πως η αξιοποίηση του διαθέσιμου δυναμικού μικρής και μεγάλης κλίμακας έχει σημαντικό όφελος τόσο σε εθνικό, όσο σε παγκόσμιο επίπεδο, αφού πρόκειται για μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Για αυτό το λόγο διάφορες κυβερνήσεις δίνουν επιδοτήσεις και κίνητρα για την κατασκευή ή ακόμα την ανακατασκευή και ανανέωση εξοπλισμού μικρών υδροηλεκτρικών έργων ή επιδοτούν το τιμολόγιο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Η οικονομοτεχνική ανάλυση χρειάζεται επίσης για την εύρεση της κατάλληλης θέσης κατασκευής των μικρών υδροηλεκτρικών, αλλά και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάταξης του σε ένα δεδομένο υδατόρευμα. Μόλις ολοκληρωθούν οι βελτιστοποιήσεις, συμπληρώνεται η χρηματική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο χρηματοδότησης του έργου και από την ανάλυση προκύπτει η αναμενόμενη χρηματορροή, η δυνατότητα κάλυψης των λειτουργικών εξόδων και εξόδων συντήρησης, καθώς και η αποπληρωμή του δανείου σε περίπτωση που υπάρχει.

8.2 Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης

Ένα από τα βασικότερα συστατικά της οικονομικής ανάλυσης είναι η χρονική διάρκεια ζωής του έργου. Στα μικρά υδροηλεκτρικά η χρονική διάρκεια ζωής είναι της τάξεως των 15 με 30 χρόνων, με τη διάρκεια ζωής των έργων του πολιτικού μηχανικού να είναι τουλάχιστον 50 έτη. Όταν πλησιάζει το τέλος διάρκειας ζωής ενός έργου, ανάλογα τις υφιστάμενες συνθήκες πρέπει να αποφασιστεί αν θα γίνει ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ή αν θα γίνει η πλήρης ανακατασκευή του. Η οικονομική ανάλυση πρέπει να εξετάζεται για ένα χρονικό ορίζοντα τουλάχιστον 20 ετών και σίγουρα στην οικονομική βιωσιμότητα του μικρού υδροηλεκτρικού πολύ σημαντικό ρόλο έχει και η διάρκεια κατασκευής του, η περίοδος κατά την οποία τα έξοδα είναι πολλά και τα έσοδα μηδενικά. Συνήθως ως έναρξη της οικονομικής ανάλυσης θεωρείται συνήθως η αρχή κατασκευής του έργου και όχι η έναρξη των διαδικασιών και των μελετών.

Επίσης, σημαντικό στοιχείο της οικονομικής ανάλυσης είναι το επιτόκιο δανεισμού. Εκφράζει την ποσοστιαία προσαύξηση που θα κατατεθεί στο δανειολήπτη, δηλαδή στην τράπεζα για τις περισσότερες περιπτώσεις. Το επιτόκιο δανεισμού αφορά ένα μακροοικονομικό μέγεθος και εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση και την οικονομική πολιτική του κράτους. Ακόμα ένα μακροοικονομικό μέγεθος είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο που λαμβάνει υπόψη τον υπολογισμό της σημερινής αξίας ενός χρηματικού ποσού το οποίο θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί στο μέλλον. Τι περισσότερες φορές λαμβάνεται μεγαλύτερο από το επιτόκιο δανεισμού για να συμπεριληφθούν οι αβεβαιότητες τόσο σε οικονομικό, όσο και σε παραγωγικό επίπεδο κατά τη διάρκεια ζωής της λειτουργίας του έργου.

Πληθωρισμός είναι το φαινόμενο της αύξησης (θετικός) ή της μείωσης (αρνητικός) των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών κατά τη διάρκεια του χρόνου, χωρίς να υπάρχει ομοιομορφία για καθένα από αυτά. Είναι και αυτό μακροοικονομικό μέγεθος και εξαρτάται, τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας, όσο και από τις διεθνείς εξελίξεις. Στα υδροηλεκτρικά έργα είναι αρκετά δύσκολο να προβλεφθεί ο πληθωρισμός, αφού έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

Γενικά, επειδή η διάρκεια ζωής του μικρού υδροηλεκτρικού έργου είναι πολύ σημαντική για να μπορούν να είναι συγκρίσιμα τα ποσά που θα εισπραχθούν και θα δαπανηθούν μετά από n χρόνια, θα πρέπει να αναχθούν σε σημερινές τιμές, δηλαδή στην παρούσα αξία τους. Για να είναι εφικτή η εφαρμογή της οικονομικής ανάλυσης σε ένα μικρό έργο, θα πρέπει να είναι γνωστά η εγκατεστημένη ισχύς, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό ύψος επένδυσης, το τιμολόγιο πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, το επιτόκιο δανεισμού και καταθέσεως, ο πληθωρισμός, η χρονική περίοδος οικονομικής

διαχείρισης, η διάρκεια κατασκευής του έργου και τα ετήσια λειτουργικά έξοδα στα οποία περιλαμβάνονται η συντήρηση, η ασφάλεια, οι μισθοί, κ.α.

Η αμοιβή για τη χρήση ενός ποσού χρημάτων (κεφαλαίου) εκφράζεται ως ποσοστό του ποσού του δανείου - επένδυσης και καταβάλλεται με τη μορφή τόκων ή μερισμάτων. Το κόστος χρήματος σε ετήσια βάση και ως ποσοστό των χρημάτων που έλαβε ο δανειζόμενος εκφράζεται με το επιτόκιο. Το επιτόκιο είναι η τιμή με την οποία μπορεί να δανειστεί ή να δανείσει κάποιος κεφάλαια και το ύψος του διαμορφώνεται στην αγορά από τη ζήτηση και την προσφορά κεφαλαίων και αντανακλά στους παρακάτω παράγοντες: το ρυθμό πληθωρισμού και το κόστος του χρήματος μέσα στο οποίο περιλαμβάνεται και το κόστος από τον ενδεχόμενο κίνδυνο που έχει ο συγκεκριμένος δανεισμός. Αν για οποιοδήποτε λόγο κατά τη μελέτη των σχετικών προβλημάτων δε ληφθεί υπόψη συνιστώσα του πληθωρισμού για τον καθορισμό του επιτοκίου, θα πρέπει και τα χρηματικά ποσά που έγινε δανεισμός να εκφραστούν σε ευρώ αγοραστικής δύναμης συγκεκριμένου έτους, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό.

Όταν ο δανειστής εισπράττει κάθε χρόνο τον τόκο, το τοκοφόρο κεφάλαιο για τον επόμενο χρόνο είναι κάθε φορά το αρχικό και αυτό θα συμβαίνει μέχρι της συνολικής απόδοσης του δανειστή. Αυτός ο τόκος κάθε χρόνος θα είναι ίδιος και το δάνειο έγινε με απλό τόκο. Στην περίπτωση που ο δανειστής δεν εισπράττει τον τόκο κάθε χρόνο, τότε κεφαλαιοποιείται και ως τοκοφόρο κεφάλαιο για τον επόμενο χρόνο θεωρείται το αρχικό κεφάλαιο συμπεριλαμβανομένου του τόκου. Κάθε χρόνο όμως, ο τόκος αυξάνεται σταδιακά, γιατί το κόστος αυξάνεται κατά τους τόκους που αποφέρουν οι μη εισπρακτέοι τόκοι από το δανειστή. Σε αυτή την περίπτωση το δάνειο έγινε με σύνθετο τόκο ή με ανατοκισμό. Στην περίπτωση που υπάρχει ένα αρχικό κεφάλαιο ίσο με P με επιτόκιο r (%), τότε ο αντίστοιχος πίνακας για τα n έτη διαμορφώνεται ως εξής:

Έτος	Ποσό χρημάτων στα χέρια του δανειζόμενου στην αρχή του έτους	Τόκος	Ποσό χρημάτων στα χέρια του δανειζόμενου στο τέλος του έτους
1	P	$P \cdot r$	$P \cdot (1+r)$
2	$P \cdot (1+r)$	$P \cdot (1+r) \cdot r$	$P \cdot (1+r)^2$
3	$P \cdot (1+r)^2$	$P \cdot (1+r)^2 \cdot r$	$P \cdot (1+r)^3$
...
n	$P \cdot (1+r)^{n-1}$	$P \cdot (1+r)^{n-1} \cdot r$	$P \cdot (1+r)^n$

Πίνακας 8.1 Συσχέτιση κεφαλαίου και επιτοκίου

Ως τελική αξία ενός αρχικού κεφαλαίου μετά από n έτη και προς το επιτόκιο r θεωρείται το αρχικό κεφάλαιο μαζί με τους τόκους. Ο υπολογισμός της τελικής αξίας με απλό ή σύνθετο τόκο ονομάζεται απλή ή σύνθετη κεφαλαιοποίηση.

Η απλή κεφαλαιοποίηση δίνεται από τη σχέση:

$$S = P \cdot (1 + n \cdot r) \quad (8.1)$$

Στην περίπτωση της σύνθετης κεφαλαιοποίησης η τελική αξία S ενός αρχικού κεφαλαίου P μετά n έτη προς επιτόκιο r είναι ίση με:

$$S = P \cdot (1 + r)^n \quad (8.2)$$

Οι δύο τρόποι κεφαλαιοποίησης δίνουν:

την ίδια τελική αξία όταν $n=1$,

για $n < 1$ η απλή κεφαλαιοποίηση δίνει μεγαλύτερη,

για $n > 1$ η σύνθετη κεφαλαιοποίηση.

Η απλή κεφαλαιοποίηση χρησιμοποιείται στις βραχυπρόθεσμες οικονομικές πράξεις, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός του τόκου σε τραπεζικές καταθέσεις ταμειωτηρίου για χρονικό διάστημα μικρότερο του εξαμήνου ή η προεξόφληση γραμματίου. Αντίθετα, στις μακροπρόθεσμες οικονομικές πράξεις, όπως είναι οι ασφάλειες και τα δάνεια χρησιμοποιείται η σύνθετη κεφαλαιοποίηση.

Υπάρχουν περιπτώσεις οικονομικών συναλλαγών κατά τις οποίες δεν προβλέπεται κεφαλαιοποίηση των τόκων κάθε χρόνο, αλλά m φορές μέσα στον ίδιο χρόνο. Συνηθισμένες τιμές του m είναι το 2, το 4 και το 12, δηλαδή κεφαλαιοποίηση ανά εξάμηνο, τρίμηνο ή ακόμα και μήνα. Αντίστοιχα, το επιτόκιο για κάθε περίοδο καθορίζεται ως κλάσμα $1/m$ του ετήσιου επιτοκίου το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση καλή το ονομαστικό επιτόκιο και συμβολίζεται με j_m . Σε μια τέτοια περίπτωση η τελική αξία S ενός αρχικού κεφαλαίου P μετά από n έτη ή $m \cdot n$ περιόδους προς επιτόκιο j_m/m προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$S = P \cdot \left[\left(1 + \frac{j_m}{m} \right)^m \right]^n = P \cdot \left(1 + \frac{j_m}{m} \right)^{m \cdot n} \quad (8.3)$$

Η ίδια τελική αξία θα προέκυπτε, αν η κεφαλαιοποίηση των τόκων γινόταν σε ετήσια βάση με επιτόκιο r , το οποίο ονομάζεται πραγματικό ή ετήσιο ισοδύναμο επιτόκιο και το οποίο είναι ίσο με τη σχέση (8.4):

$$S = P \cdot (1 + r)^n = P \cdot \left(1 + \frac{j_m}{m}\right)^{m \cdot n} \rightarrow 1 + r = \left(1 + \frac{j_m}{m}\right)^m \rightarrow r = \left(1 + \frac{j_m}{m}\right)^m - 1 \quad (8.4)$$

Οπότε το ονομαστικό επιτόκιο προκύπτει από το πραγματικό επιτόκιο μέσω της σχέσης:

$$j_m = m \cdot \left(\sqrt[m]{1 + r} - 1\right) \quad (8.5)$$

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην περίπτωση της σύνθετης κεφαλαιοποίησης με βάση τη σχέση 6.2 η τελική αξία S ενός αρχικού κεφαλαίου P μετά n έτη προς επιτόκιο r είναι ίση με $S = P \cdot (1 + r)^n$.

Εναλλακτικά, το αρχικό κεφάλαιο P συνδέεται με την τελική αξία S μετά n έτη προς επιτόκιο r με βάση τη σχέση της χρηματοοικονομικής ισοδυναμίας:

$$S = P \cdot (1 + r)^n \leftrightarrow P = \frac{S}{(1+r)^n} \quad (8.6)$$

Έστω ότι P είναι το αρχικό κεφάλαιο με S την τελική αξία του κεφαλαίου στο τέλος κάθε έτους n με ανατοκισμό προς επιτόκιο r . Στο τέλος του 1^{ου} έτους το ποσό που μαζί με τον τόκο στην περίπτωση της σύνθετης κεφαλαιοποίησης θα είναι:

$$S_1 = P \cdot (1 + r)$$

Στο τέλος του 2^{ου} έτους το ποσόν του κεφαλαίου μαζί με τον τόκο θα είναι:

$$S_2 = P \cdot (1 + r)^2$$

Γενικεύοντας, στο τέλος του n -ου έτους το ποσόν του κεφαλαίου μαζί με τον τόκο θα είναι :

$$S_n = P \cdot (1 + r)^n$$

Η έκφραση $(1 + r)^n$ είναι η τελική αξία μιας νομισματικής μονάδας με σύνθετη κεφαλαιοποίηση (ανατοκισμό) προς επιτόκιο i και για χρονική περίοδο n ετών, που καλείται αλλιώς CAF, δηλαδή «Compound Amount Factor for a single payment». Η τιμή της μπορεί να δοθεί από πίνακες για διάφορες τιμές των r και n .

Ως παρούσα αξία ενός ποσού χρημάτων S το οποίο μπορεί να είναι μία πληρωμή ή ένα έσοδο που πραγματοποιείται στο τέλος του έτους n , ορίζεται το αρχικό κεφάλαιο P που ανατοκιζόμενο προς επιτόκιο r και για n έτη θα ισούται με το παραπάνω ποσό χρημάτων S .

Εάν S είναι η μελλοντική πληρωμή και P το αρχικό κεφάλαιο, τότε:

$$S = P \cdot (1 + r)^n$$

Επομένως με βάση την 6.6, $P = \frac{S}{(1+r)^n}$.

Η διαδικασία υπολογισμού της παρούσας αξίας λέγεται και προεξόφληση. Ο συντελεστής $\frac{1}{(1+r)^n}$ καλείται παρούσα αξία μιας νομισματικής μονάδας, η οποία προεξοφλείται προς επιτόκιο r και n έτη προ της λήξης της, που καλείται αλλιώς RWF, δηλαδή «Present Worth Factor of a payment». Η τιμή αυτή μπορεί να δοθεί από πίνακες για διάφορες τιμές των r και n .

Έστω ότι στο τέλος κάθε χρόνου αποδίδεται ένα ποσό R .

- Η τελική αξία της πρώτης πληρωμής R στο τέλος του n -ου έτους είναι:
 $S_1 = R \cdot (1 + r)^{n-1}$
- Η τελική αξία της δεύτερης πληρωμής R στο τέλος του n -ου έτους είναι:
 $S_2 = R \cdot (1 + r)^{n-2}$
- Η τελική αξία της $k-1$ πληρωμής R στο τέλος του n -ου έτους είναι: $S_k = R \cdot (1 + r)^{n-k}$
- Η τελική αξία της $n-1$ πληρωμής R στο τέλος του n -ου έτους είναι:
 $S_{n-1} = R \cdot (1 + r)$
- Ενώ η τελική αξία της τελευταίας πληρωμής είναι ίση: $S_n = R$

Οπότε η τελική αξία της σειράς πληρωμών S είναι ίση με:

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_{n-1} + S_n = R \cdot (1 + r)^{n-1} + R \cdot (1 + r)^{n-2} + \dots + R \cdot (1 + r) + R$$

Αν εφαρμοστεί η σχέση του αθροίσματος της γεωμετρικής προόδου, όπου ο πρώτος όρος είναι $a_1=R$, ο λόγος λ είναι ίσος με $(1+r)$ και το πλήθος των όρων είναι n , τότε προκύπτει με βάση τη σχέση αθροίσματος $S = a_1 \frac{\lambda^n - 1}{\lambda - 1}$ ότι:

$$S = R \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r) - 1} \rightarrow S = R \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (8.7)$$

Η έκφραση $\frac{(1+r)^n - 1}{r}$ είναι η τελική αξία μοναδιαίας και ληξιπρόθεσμης ράντας και καλείται «Compound amount factor for a series of annual payment made at the

end of the year». Η τιμή της μπορεί να δοθεί από πίνακες για διάφορες τιμές των r και n . Ο όρος μοναδιαία χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι οι πληρωμές είναι ίσες με τη μονάδα.

Με αντίστοιχη λογική προκύπτει η παρούσα αξία της ράντας (annuity) και δίνεται από τη σχέση 6.8.

$$P = \frac{R}{(1+r)} \cdot \frac{\frac{1}{(1+r)^n} - 1}{\frac{1}{(1+r)} - 1} \rightarrow P = \frac{R}{(1+r)} \cdot \frac{1 - (1+r)^n}{\frac{1 - (1+r)}{(1+r)}} \rightarrow P = R \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (8.8)$$

Η έκφραση $\frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n}$ είναι η παρούσα αξία μοναδιαίας και ληξιπρόθεσμης ράντας και καλείται «Present worth for a series of annual payment made at the end of the year». Η τιμή της μπορεί να δοθεί από πίνακες για διάφορες τιμές των r και n . Ο όρος μοναδιαία χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι οι πληρωμές είναι ίσες με τη μονάδα.

Ο συντελεστής $\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$ καλείται συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου ή τοκοχρεωλύσιο και είναι ο αντίστροφος του συντελεστή της παρούσας αξίας μοναδιαίας και ληξιπρόθεσμης ράντας και καλείται «Capital Recovery Factor» ή CRF. Με τη χρησιμοποίηση αυτού του συντελεστή ένα ποσό P που καταβάλλεται στην αρχή του πρώτου έτους, μετατρέπεται σε μία ισοδύναμη ληξιπρόθεσμη ράντα διάρκειας n ετών. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ετήσιας δόσης για την εξόφληση δανείου αρχικού ποσού P . Η ετήσια δόση είναι ίση με R . Αυτός ο τρόπος εξόφλησης δανείου λέγεται εξόφληση με ίσα τοκοχρεωλύσια ή τοκοχρεωλυτική μέθοδος εξοφλήσεως. Επισημαίνεται ότι ο συντελεστής ανάκτησης του κεφαλαίου είναι ίσος με το άθροισμα του επιτοκίου r και του χρεωλυσίου, όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση:

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = r + \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (8.9)$$

Τα δάνεια ανάλογα με το χρόνο αποπληρωμής τους διακρίνονται σε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, με τα πρώτα συνήθως να έχουν διάρκεια μικρότερη του έτους. Ως επί το πλείστον τα ιδιωτικά βραχυπρόθεσμα δάνεια υφίστανται με γραμμάτια ή με συναλλαγματικές, ενώ τα δημόσια βραχυπρόθεσμα με έντοκα γραμμάτια. Ένα δάνειο το οποίο θεωρείται μακροπρόθεσμο είναι μία σύμβαση μεταξύ δανειστή και δανειζομένου. Τα ποσά της βαθμιαίας εξόφλησης ονομάζονται χρεωλύσια και μαζί με τους συμφωνημένους τόκους σχηματίζουν τα τοκοχρεωλύσια που αποτελούν τις δόσεις εξόφλησης του δανείου.

8.3 Τεχνικές και κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας

Η έναρξη λειτουργίας μιας νέας παραγωγικής μονάδας ή η επέκταση μιας υφιστάμενης μονάδας για την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών σηματοδοτεί την ολοκλήρωση ενός σχεδίου επένδυσης. Αρκετές φορές αντί του όρου “σχέδιο επένδυσης” χρησιμοποιείται ο όρος “επένδυση”. Το “επενδυτικό πρόγραμμα” είναι πιο γενικός σαν όρος και περιλαμβάνει τον προγραμματισμό των συνολικών επενδύσεων μιας επιχείρησης σε μακροπρόθεσμη βάση. Ειδικότερα το σχέδιο επένδυσης στο χώρο των ενεργειακών συστημάτων μπορεί να είναι η κατασκευή ενός νέου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η επέκταση ενός υφιστάμενου με προσθήκη μιας νέας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, ο εκσυγχρονισμός ενός υπάρχοντος σταθμού με την εγκατάσταση εξοπλισμού αποθείωσης ή απονίτρωσης, η ανακατασκευή υφιστάμενης θερμοηλεκτρικής μονάδας ή ακόμα και η δημιουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με παράλληλη χρήση για ύδρευση ή άρδευση περιοχών. Το κόστος και τα οφέλη ενός σχεδίου επένδυσης, ουσιαστικά αποτελούν την βάση για την αξιολόγηση του. Τα επενδυτικά σχέδια διακρίνονται ανάλογα με κάποια κριτήρια, όπως είναι το μέγεθος τους, αν είναι δηλαδή μικρά ή μεγάλα, το χαρακτήρα των ωφελιών, δηλαδή την αύξηση εσόδων, τη μείωση του κόστους ή τη μείωση του κινδύνου. Επιπλέον, διάκριση πραγματοποιείται και ως προς το βαθμό της οικονομικής εξάρτησης. Συγκεκριμένα χωρίζονται σε αποκλειόμενα αμοιβαία, όταν η κατασκευή του ενός αποκλείει την κατασκευή του άλλου, σε ανεξάρτητα, όταν η κατασκευή του ενός δεν επηρεάζει την κατασκευή του άλλου, και σε συμπληρωματικά ή αποκαταστασίμα, όταν η κατασκευή του ενός επηρεάζει θετικά ή αντίστοιχα αρνητικά και την κατασκευή του άλλου.

Η διάρκεια ζωής της επένδυσης προσδιορίζεται από τη φυσική φθορά της, από τις μεταβολές στο οικονομικό περιβάλλον, από τις μεταβολές στις προτιμήσεις των καταναλωτών, καθώς και την τεχνική πρόοδο και τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά μιας μεταγενέστερης σχετικής επένδυσης. Πόροι που δεσμεύονται για την κατασκευή και τη λειτουργία της επένδυσης εκφράζονται σε χρήματα και περιλαμβάνουν τις πληρωμές για την αγορά και την κατασκευή της παραγωγικής μονάδας, καθώς και τις πληρωμές για μισθούς, πρώτες ύλες, υλικά συντήρησης, δηλαδή δαπάνες εκμετάλλευσης κατά τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Επιπλέον η ροή των ωφελιών από την παραγωγή αγαθών ή των υπηρεσιών εκφράζονται επίσης σε χρήματα και περιλαμβάνουν τα έσοδα από την πώληση των αγαθών και των υπηρεσιών. Τέλος, χαρακτηριστικό της επένδυσης είναι και η ημερομηνία κατασκευής ή πραγματοποίησής της, η οποία αποτελεί αντικείμενο επιλογής που εξαρτάται από διάφορα οικονομικά κριτήρια. Συγκεκριμένα, κατά το στάδιο της κατασκευής της επένδυσης οι ροές περιλαμβάνουν μόνο τα στοιχεία κόστους της επένδυσης K_0 , ενώ κατά το

στάδιο λειτουργίας οι ροές των εσόδων και των δαπανών εκμετάλλευσης συνθέτουν τις λεγόμενες καθαρές ταμειακές ροές KTP , δηλαδή τις καθαρές ωφέλειες.

Αρχικά, ορίζονται τα ακόλουθα σύμβολα:

- E : τα έσοδα από πωλήσεις
- $\Lambda\Delta$: τις πληρωμές για τους συντελεστές παραγωγής και τη διάθεση των προϊόντων, δηλαδή τις λειτουργικές δαπάνες.
- A : τις προβλεπόμενες αποσβέσεις για την επένδυση
- $\Phi\Sigma$: ο φορολογικός συντελεστής για τον υπολογισμό του φόρου εισοδήματος.
- Φ : η φορολογία εισοδήματος.
- T : οι τόκοι που πληρώνει η επιχείρηση για τα δάνεια που έχει πραγματοποιήσει.

Ακολούθως ορίζονται τα εξής οικονομικά μεγέθη:

- Το ακαθάριστο λειτουργικό κέρδος $A\Lambda K$ ως τη διαφορά μεταξύ εσόδων και λειτουργικών δαπανών:

$$A\Lambda K = E - \Lambda\Delta \quad (8.10)$$

- Το καθαρό λειτουργικό κέρδος $K\Lambda K$ ως τη διαφορά μεταξύ ακαθάριστου λειτουργικού κέρδους και των αποσβέσεων:

$$K\Lambda K = A\Lambda K - A = E - \Lambda\Delta - A \quad (8.11)$$

- Το καθαρό κέρδος προ φόρων $KK\Pi\Phi$ ως τη διαφορά μεταξύ καθαρού λειτουργικού κέρδους και των τόκων που πληρώνει η επιχείρηση για δάνεια που έχει πραγματοποιήσει:

$$KK\Pi\Phi = K\Lambda K - T \quad (8.12)$$

- Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν τόκοι, δηλαδή η επένδυση έγινε εξ ολοκλήρου με ίδια κεφάλαια του επενδυτή, το καθαρό κέρδος προ φόρων ταυτίζεται με το καθαρό λειτουργικό κέρδος, δηλαδή:

$$KK\Pi\Phi = K\Lambda K \quad (8.13)$$

- Το καθαρό κέρδος μετά από φόρους $KKM\Phi$ ως τη διαφορά μεταξύ καθαρού κέρδους προ φόρων και της φορολογίας εισοδήματος:

$$KKM\Phi = KK\Pi\Phi - \Phi = KK\Pi\Phi \cdot (1-\Phi\Sigma) \quad (8.14)$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς οι καθαρές ταμειακές ροές ορίζονται ως εξής:

- Στην περίπτωση που η επένδυση γίνεται με εξ ολοκλήρου με ίδια κεφάλαια:

$$KTP = KKM\Phi + A = KK\Pi\Phi \cdot (1-\Phi\Sigma) + A = K\Lambda K \cdot (1-\Phi\Sigma) + A = (E-\Lambda\Delta-A) \cdot (1-\Phi\Sigma) + A \quad (8.15)$$

- Στην περίπτωση που η επένδυση έχει γίνει και με δανειακά κεφάλαια, τότε:

$$KTP = (E-\Lambda\Delta-A-T) \cdot (1-\Phi\Sigma) + A + T \quad (8.16)$$

- Στην περίπτωση που δεν υπάρχει φορολογία ($\Phi\Sigma=0$) προκύπτει η ίδια σχέση ανεξάρτητα ύπαρξης ή μη δανειακών κεφαλαίων:
Με ίδια κεφάλαια:

$$KTP = E-\Lambda\Delta-A + A = E-\Lambda\Delta = A\Lambda K \quad (8.17)$$

Με δανειακά κεφάλαια:

$$KTP = E-\Lambda\Delta-A -T + A + T = E-\Lambda\Delta = A\Lambda K \quad (8.18)$$

Το κριτήριο του λόγου οφέλους – κόστους μιας επένδυσης (που καλείται και «Benefit Cost Ratio») ορίζεται ως ο λόγος του οφέλους (αθροίσματος των καθαρών ταμειακών ροών ανηγμένων σε παρούσα αξία) προς το κόστος (επένδυση επίσης ανηγμένο στην παρούσα αξία). Προσδιορίζεται από τη σχέση 6.17:

$$BCR = \Lambda = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{KTP_t}{(1+k)^t}}{K_0} \quad (8.19)$$

Όπου K_0 το κόστος της επένδυσης, KTP_t οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t εκφρασμένες σε τιμές συγκεκριμένης περιόδου, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό, k η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται, χωρίς πληθωρισμό και σε περιβάλλον χωρίς κίνδυνο, n η διάρκεια ζωής της επένδυσης.

300

Για να είναι οικονομικά βιώσιμη μία επένδυση θα πρέπει ο λόγος εσόδων/εξόδων να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, αυτός ο δείκτης πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, αφού μία επένδυση με υψηλότερο BCR (A) δεν αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο όφελος δεδομένου ότι δεν αποδίδει την τάξη μεγεθών. Γενικά αν:

- ο λόγος A είναι μεγαλύτερος της μονάδας, επιτρέπεται η επιλογή του επενδυτικού σχεδίου,
- ο λόγος A είναι μικρότερος της μονάδας, απορρίπτεται το επενδυτικό σχέδιο,
- ο λόγος A είναι ίσος με τη μονάδα, υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή απόρριψη (οριακή κατάσταση).

Η καθαρή παρούσα αξία ($KΠΑ$) μιας επένδυσης (που καλείται και «Net Present Value» ή « NPV ») στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής λειτουργίας ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPV = KΠΑ = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{KTP_t}{(1+k)^t} \quad (8.20)$$

Όπου K_0 το κόστος της επένδυσης, KTP_t οι καθαρές ταμειακές ροές του έτους t εκφρασμένες σε τιμές συγκεκριμένης περιόδου, δηλαδή χωρίς πληθωρισμό, k η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται, χωρίς πληθωρισμό και σε περιβάλλον χωρίς κίνδυνο, n η διάρκεια ζωής της επένδυσης. Για να είναι βιώσιμη η επένδυση, θα πρέπει η $KΠΑ$ να είναι θετική και τα έργα με αρνητικές τιμές να απορρίπτονται.

Ένα ακόμα κριτήριο οικονομικής βιωσιμότητας είναι η διάρκεια αποπληρωμής που εκφράζει το πλήθος των ετών που χρειάζονται, ώστε τα αναμενόμενα καθαρά έσοδα να αποπληρώσουν το ποσό της επένδυσης. Συνήθως, υπολογίζεται χωρίς την αναγωγή των διαφόρων ποσών στην παρούσα αξία και η διάρκεια αποπληρωμής ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου θα πρέπει να κυμαίνεται από 5 έως 10 έτη για να μπορεί να κριθεί ως οικονομικά βιώσιμο. Το συγκεκριμένο κριτήριο δεν επιτρέπει την κατάταξη διαφόρων μικρών υδροηλεκτρικών έργων κατά σειρά οικονομικής απόδοσης, αφού δε λαμβάνει υπόψη την απόδοση της επένδυσης καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

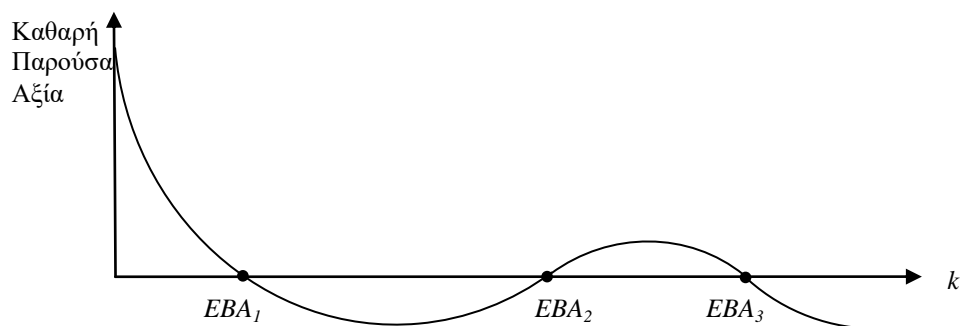
Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (EBA) μιας επένδυσης (που καλείται και «Internal Rate of Return» ή « IRR ») ορίζεται ως το επιτόκιο αναγωγής $k=EBA$, το οποίο μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία $KΠΑ$. Προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{KTP_t}{(1+EBA)^t} = 0 \quad (8.21)$$

Το κριτήριο επιλογής βασίζεται στο ότι η καθαρή παρούσα αξία είναι μονότονα φθίνουσα συνάρτηση του επιτοκίου αναγωγής και έτσι υπάρχει μόνο ένας εσωτερικός βαθμός απόδοσης EBA . Ειδικότερα, αν ισχύει η συνθήκη $KTPt \geq 0$ (όπως συνήθως), εξασφαλίζεται ότι υπάρχει μόνο ένας εσωτερικός βαθμός απόδοσης και τα δύο κριτήρια της καθαρής παρούσας αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα (επιλογή ή απόρριψη), όταν αξιολογείται μόνο ένα συγκεκριμένο επενδυτικό σχέδιο. Αξιολόγηση ενός επενδυτικού σχεδίου:

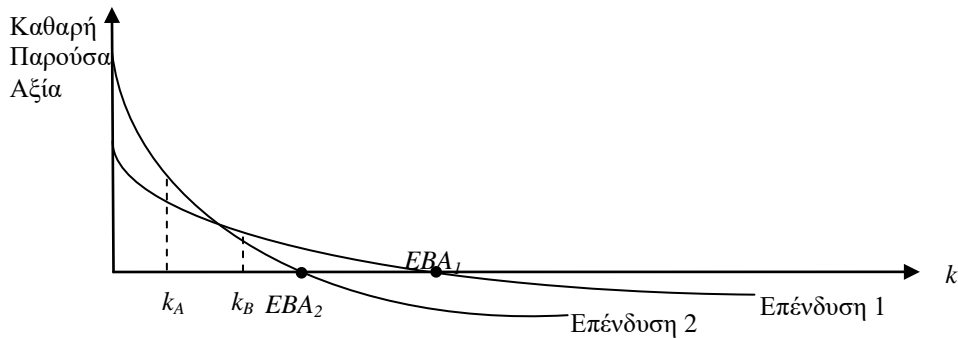
- Αν η ελάχιστη απόδοση k είναι μικρότερη του EBA , επιτρέπεται η επιλογή του επενδυτικού σχεδίου.
- Αν η ελάχιστη απόδοση k είναι μεγαλύτερη του EBA , απορρίπτεται το επενδυτικό σχέδιο.
- Αν η ελάχιστη απόδοση k είναι ίση με το EBA , υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή απόρριψη (οριακή κατάσταση).

Η ύπαρξη και αρνητικών καθαρών ταμειακών ροών ενδέχεται να οδηγήσει σε περισσότερους από έναν εσωτερικούς βαθμούς απόδοσης για το ίδιο σχέδιο επένδυσης, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα με τις τιμές EBA_1, EBA_2, EBA_3 . Σε αυτήν την περίπτωση η καθαρή παρούσα αξία είναι αρνητικές και για τιμές ελάχιστης απόδοσης μικρότερες από το μεγαλύτερο εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης, όπως συμβαίνει στην περιοχή μεταξύ του EBA_1 και EBA_2 . Άρα η επιλογή βάσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης είναι λάθος, χωρίς να εξετασθεί η καθαρή παρούσα αξία.



Σχήμα 8.1 Καθαρή παρούσα αξία συναρτήσει με την ελάχιστη απόδοση επένδυσης με ύπαρξη αρνητικών καθαρών ταμειακών ροών

Για την αξιολόγηση σχεδίων που αποκλείονται αμοιβαία, δηλαδή για αυτά που η επιλογή του ενός αποκλείει την επιλογή του άλλου, επιλέγεται επενδυτικό σχέδιο που έχει το μεγαλύτερο εσωτερικό βαθμό απόδοσης. Είναι σημαντικό ότι και τα δύο κριτήρια της καθαρής παρούσας αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης δεν οδηγούν πάντα στις ίδιες επιλογές και για αυτό το λόγο το συγκεκριμένο κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας υπερτερεί του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 8.2 Καθαρή παρούσα αξία συναρτήσει με την ελάχιστη απόδοση επένδυσης με ύπαρξη αρνητικών καθαρών ταμειακών ροών

Σύμφωνα με το κριτήριο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης θα επιλεγεί το επενδυτικό σχέδιο 1, γιατί $EBA_1 > EBA_2$. Όμως με το κριτήριο της *KΠΑ* και ανάλογα με την τιμή της ελάχιστης απόδοσης k , που χαρακτηρίζει κάθε επενδυτή, θα έπρεπε ο επενδυτής A με ελάχιστη απόδοση k_A να επιλέξει το σχέδιο επένδυσης 2, ενώ ο επενδυτής με ελάχιστη απόδοση k_B να επιλέξει το σχέδιο επένδυσης 1.

8.4 Υπολογισμός συνιστώσων κόστους κατασκευής μικρών μονάδων

8.4.1 Εισαγωγή

Η διαμόρφωση του συνολικού κόστους ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιαιτερότητές του έργου και τις συνθήκες της περιοχής, όπως είναι οι υποδομές, οι απαλλοτριώσεις, η στάθμη πλημμυρικής παροχής, κλπ. Αν αυτές οι συνιστώσες κόστους εξαιρεθούν, το υπόλοιπο κόστος κατασκευής του έργου μπορεί να εκτιμηθεί από συσχετίσεις που έχουν προκύψει από την επεξεργασία δεδομένων υδροηλεκτρικών έργων που έχουν ήδη κατασκευαστεί. Συγκεκριμένα το κόστος κατασκευής ενός υδροηλεκτρικού έργου διακρίνεται σε τρεις μεγάλες ενότητες, χωρίς να περιλαμβάνονται οι παραπάνω συνιστώσες που αφορούν τις υποδομές και εξαρτώνται των από τοποθεσία του έργου. Είναι το κόστος των έργων του πολιτικού μηχανικού, το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τέλος το κόστος μελετών επίβλεψης και αδειοδοτήσεων. Όλα τα παραπάνω κόστη μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος του υδροηλεκτρικού έργου που πρόκειται να κατασκευαστεί, αν είναι δηλαδή μικρό ή μεγάλο. Για παράδειγμα στο μικρό έργο υπάρχει πάντα διαθέσιμη παροχή και ο βασικός στόχος του μεγάλου είναι συνήθως η κάλυψη των αναγκών του δικτύου μέσω της αποθήκευσης του νερού στον ταμιευτήρα, για να

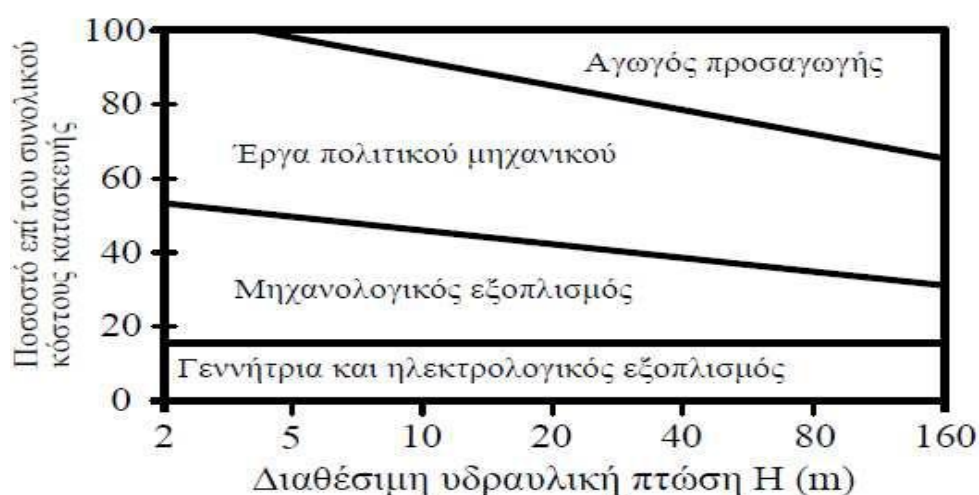
αποσυνδέεται η παραγωγή ενέργειας από την ποσότητα των φυσικών εισροών.

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η μέση ποσοστιαία συμμετοχή των τριών συνιστωσών κόστους στο συνολικό κόστος κατασκευής. Η συμμετοχή των έργων πολιτικού μηχανικού αυξάνεται όσο μεγαλώνει η υδραυλική πτώση Η με αντίστοιχη μείωση του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Για τις χαμηλά τιμές της υδραυλικής πτώσης η συμμετοχή των έργων του πολιτικού μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι της ίδιας τάξης δηλαδή στο 45%, ενώ για μεγάλες υδραυλικές πτώσεις (150m) μπορεί να θεωρηθεί ότι τα έργα του πολιτικού μηχανικού αντιστοιχούν στο 55% του συνολικού κόστους και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στο 30% του συνολικού κόστους.

Συνιστώσα κόστους	Μικρό ΥΗΕ	Μεγάλο ΥΗΕ
Έργα πολιτικού μηχανικού	45-55	55-60
Η/Μ εξοπλισμός	45-30	25-35
Μελέτες, επίβλεψη	10	15
ΣΥΝΟΛΟ	100	100

Πίνακας 8.2 Ποσοστιαία συμμετοχή των συνιστωσών κόστους κατασκευής ΥΗΕ [E21, Πίνακας 9.3]

Επιπλέον, παρακάτω φαίνεται η μεταβολή της κατανομής του κόστους των κύριων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου σε συνάρτηση με την τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης.



Σχήμα 8.3 Μεταβολή της κατανομής του κόστους των κύριων συνιστωσών. [E21, Σχήμα 9.3α]

8.4.2 Προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους

α) Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού (H/M) εξοπλισμού

Με τον όρο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός εννοούνται οι υδροστρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι ρυθμιστές στροφών, ο μετασχηματιστής, οι ηλεκτρικοί πίνακες και όλος ο υπόλοιπος βοηθητικός εξοπλισμός. Στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται συσχετίσεις από τις οποίες προκύπτει το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ανάλογα με τον τύπο του υδροστρόβιλου συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος N (kW) και της υδραυλικής πτώσης H (mΣΥ) και το ειδικό κόστος (€/kW) δίνεται από τη σχέση:

$$C_{EM} = a \cdot N^b \cdot H^c \quad (622)$$

Αυτές οι συσχετίσεις θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο κατά τη φάση της προμελέτης και για την εξέταση των εναλλακτικών επιλογών αφού παρουσιάζουν σημαντικό σφάλμα, της τάξεως του $\pm 30\%$. Επιπλέον, δε λαμβάνουν υπόψη παραμέτρους, όπως είναι η κλίση του άξονα, η ταχύτητα περιστροφής, αν η γεννήτρια είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη, ενώ το κόστος εξαρτάται από την ποιότητα και την αξιοπιστία της κατασκευής.

Τύπος υδροστροβίλου	Ειδικό κόστος σε €/kW με N_1 σε kW και H σε ΜΣΥ
Francis	$C_{EM1}=10.513 \cdot N_1^{-0,287} \cdot H^{-0,134}$
Αξονικής ροής διπλής ρύθμισης	$C_{EM1}=11.839 \cdot N_1^{-0,137} \cdot H^{-0,646}$
Αξονικής ροής μονής ρύθμισης	$C_{EM1}=15.311 \cdot N_1^{-0,125} \cdot H^{-0,9506}$
Pelton ή Turgo	$C_{EM1}=21.597 \cdot N_1^{-0,364} \cdot H^{-0,10}$

Πίνακας 6.3 Ειδικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε € (τιμές 2012) [E21, Πίνακας 9.3]

Στα παραπάνω κόστη θα πρέπει να προβλεφθεί μία προσαύξηση της τάξεως του 10 – 15% για την εγκατάσταση και θέση σε λειτουργία του αντίστοιχου εξοπλισμού. Στην περίπτωση που θα εγκατασταθούν παραπάνω από ένας στρόβιλοι στον ίδιο ΥΗΣ, τότε το κόστος θα είναι ίσο με:

$$C_{EM} = 1,15 \cdot C_{EM1} \cdot N_1 \cdot z^{0,95} \quad (8.23)$$

όπου z : το πλήθος των ταυτόσημων μονάδων.

Ο συντελεστής 1,15 εκφράζει την προσαύξηση 15% για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.

β) Εκτίμηση του συνολικού κόστους της επένδυσης

Οι τιμές του συνολικού κόστους επένδυσης C για μικρά υδροηλεκτρικά που δεν παρουσιάζουν πολλές ιδιομορφίες μπορεί να γίνει μέσω ενός συντελεστή θέσεως S που ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού κόστους C σε προς το κόστος των μονάδων παραγωγής, όπου με z συμβολίζεται ο πλήθος των στροβίλων.

$$C = S \cdot z \cdot C_{EM} \quad (8.24)$$

Ο συντελεστής S λαμβάνει υπόψη, όσο είναι εφικτό τις ιδιαιτερότητες ενός έργου, τις δυσκολίες ως προς την κατασκευή του και είναι της τάξεως του 2,5 έως 4.

Οι δύο παραπάνω σχέσεις δίνουν απλά μία τάξη μεγέθους του συνολικού κόστους και μπορούν να είναι χρήσιμες στη φάση της διαστασιολόγησης του μικρού υδροηλεκτρικού έργου. Στο κόστος κατασκευής πρέπει οπωσδήποτε να συνυπολογιστεί και το κόστος γραμμής μέσης τάσης, το οποίο θα καταβληθεί στη ΔΕΗ. Το κόστος αυτό θα εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ και την απόσταση του ηλεκτρικού από την πλησιέστερη γραμμή μεταφοράς. Έτσι, αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του κάθε έργου, το οποίο όμως σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ιδίως όταν υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ του σταθμού και του δικτύου.

8.4.3 Συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους κάθε συνιστώσας του έργου

α) Κόστος του φράγματος ή του εκχειλιστή από σκυρόδεμα

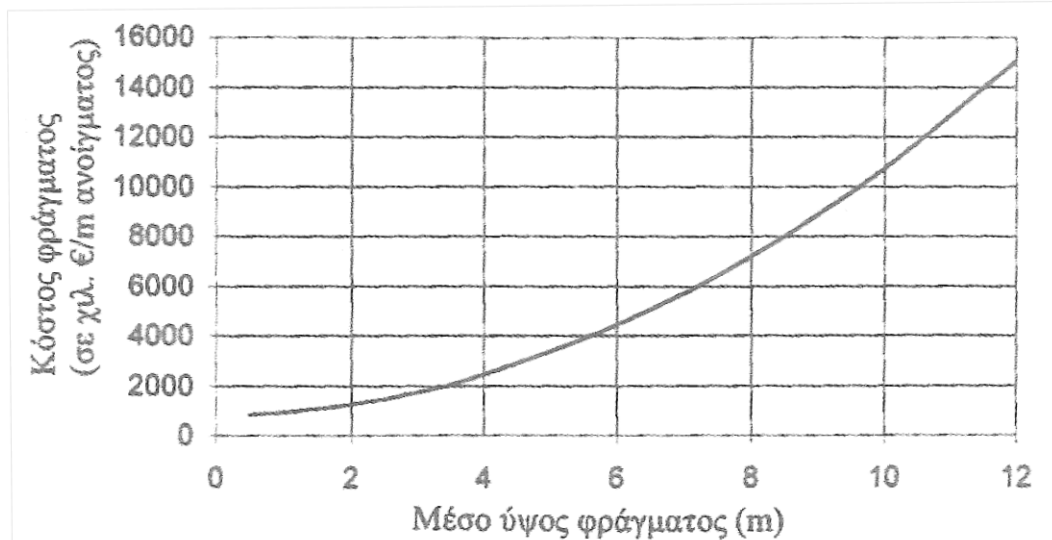
Το κόστος C (€) του φράγματος ή του εκχειλιστή από σκυρόδεμα σχετίζεται με το μέσο ύψος h του φράγματος (ή του εκχειλιστή). Δίνεται από τη σχέση:

$$C = 97,632 \cdot h^2 + 14,3 \cdot h + 821,75 \quad (8.25) \text{ ανά μονάδα μήκους}$$

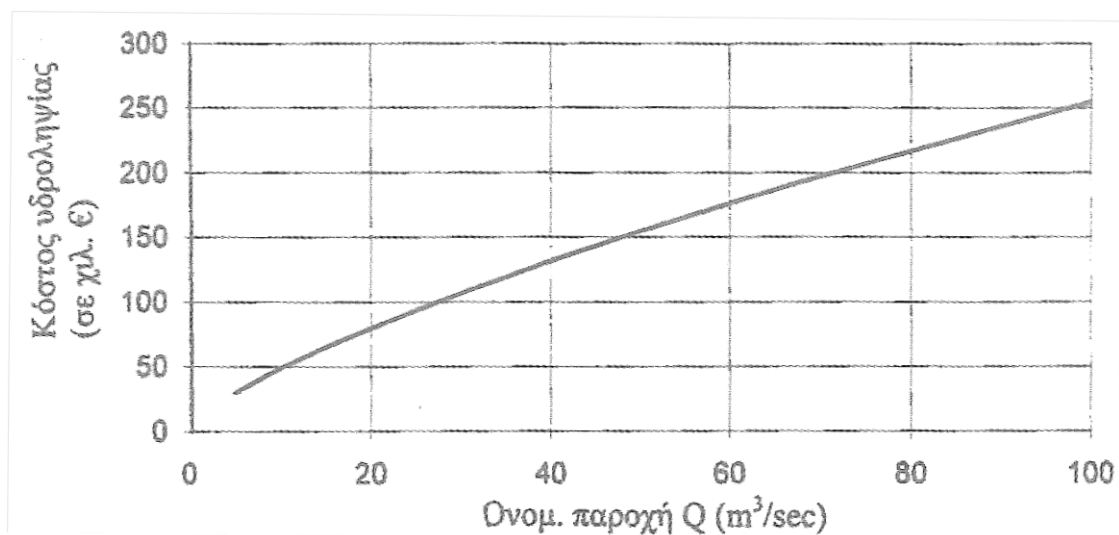
β) Κόστος του έργου υδροληψίας

Το έργο υδροληψίας περιλαμβάνει το θυρόφραγμα και η εσχάρα καθαρισμού. Το κόστος C του έργου υδροληψίας συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (m^3/sec) του μικρού υδροηλεκτρικού και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = 9,236 \cdot Q^2 \quad (8.26)$$



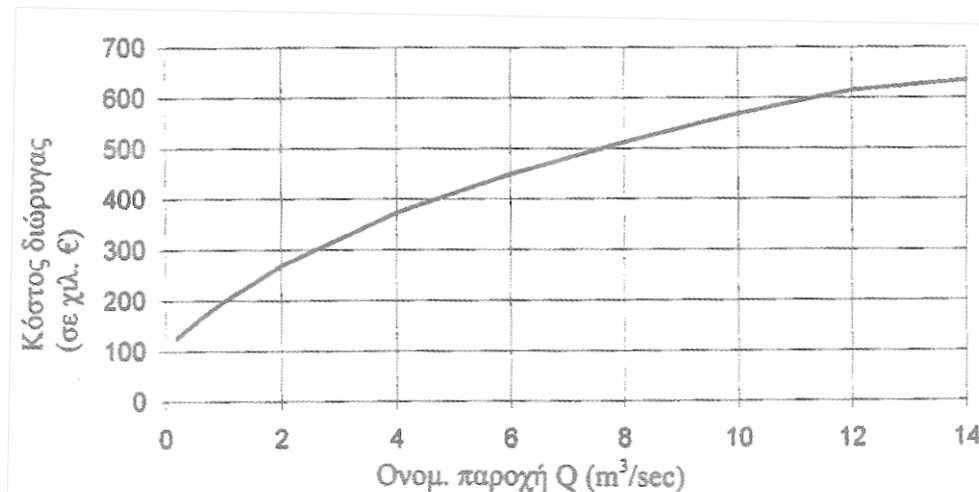
Σχήμα 8.4 Κόστος φράγματος σκυροδέματος ανά μέτρο ανοίγματος συναρτήσει του μέσου ύψους του φράγματος. [Ε3, Σχήμα 9.4]



Σχήμα 8.5 Κόστος έργου υδροληψίας συναρτήσει της ονομαστικής παροχής. [Ε3, Σχήμα 9.5]

γ) Κόστος της διώρυγας προσαγωγής

Το κόστος C της διώρυγας προσαγωγής σχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (m^3/sec) του μικρού υδροηλεκτρικού έργου. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, σε αυτή που η κατασκευή της διώρυγας γίνεται σε βραχώδες έδαφος και σε αυτή που η κατασκευή της γίνεται σε χώμα. Και στις δύο περιπτώσεις ισχύει το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 8.6 Κόστος διώρυγας προσαγωγής ανά μέτρο μήκους σε συνάρτηση με την ον. παροχή. [Ε3, Σχήμα 9.5]

Εκσκαφή σε βραχώδες έδαφος:

$$C = -0,0286 \cdot Q^4 + 0,935 \cdot Q^3 - 12,081 \cdot Q^2 + 17,677 \cdot Q + 105,71 \quad (8.27)$$

Εκσκαφή σε χώμα:

$$C = -0,1782 \cdot Q^2 + 17,677 \cdot Q + 104,71 \quad (8.28)$$

δ) Κόστος της δεξαμενής φόρτισης

Το κόστος C της δεξαμενής φόρτισης συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή Q (m^3/sec) του μικρού υδροηλεκτρικού έργου.

$$C = 9,05 \cdot Q + 4,14 \quad (8.29)$$

ε) Κόστος του αγωγού πτώσεως

Θεωρείται πως ο αγωγός πτώσης είναι κατασκευασμένος από χαλυβοσωλήνα μεταβλητού πάχους ανάλογα με την πίεση που υφίσταται κάθε τμήμα. Το κόστος του αγωγού C είναι σχετιζόμενο με την υδραυλική πτώση h (m) και την ονομαστική παροχή Q (m^3/sec) του μικρού υδροηλεκτρικού και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

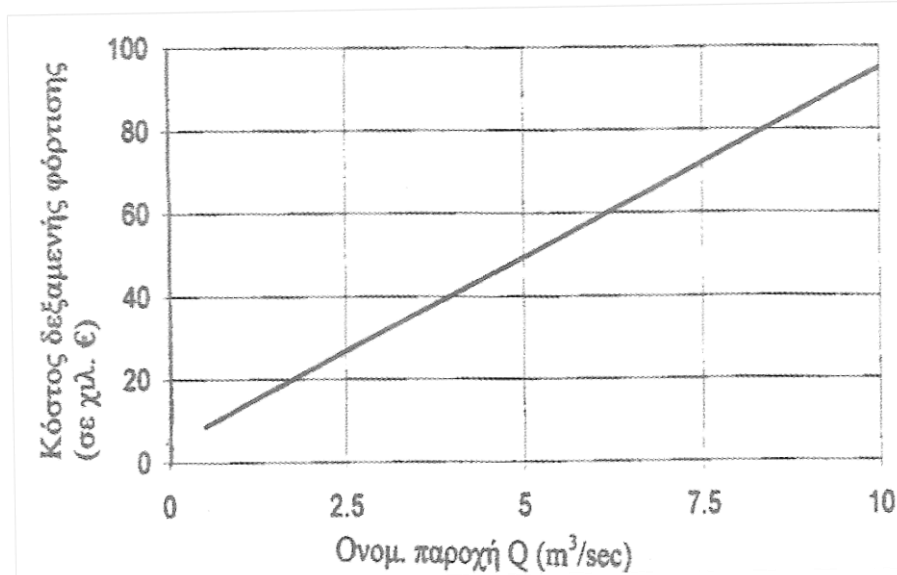
$$C = (64 + 1,61h) \cdot D^2 + 243 \cdot D \quad (8.30)$$

όπου:

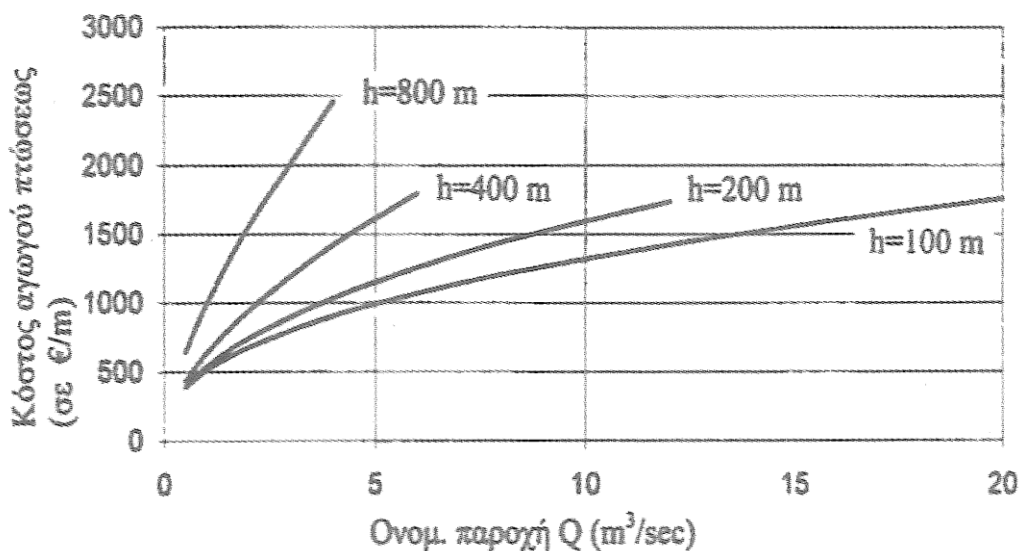
$$a = 0,0007 \cdot h^2 + 0,0662 \cdot h + 497,6 \quad \text{και}$$

$$n = -6 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 + 0,0009 \cdot h + 0,316, \quad \text{με ελάχιστη τιμή } h = 100m.$$

(Επηρεάζεται και από το υλικό κατασκευής)



Σχήμα 8.7 Κόστος δεξαμενής φόρτισης συναρτήσει με την ον. παροχή. [Ε3, Σχήμα 9.7]



Σχήμα 8.8 Κόστος αγωγού πτώσεως συναρτήσει με την ον. παροχή και με παράμετρο την υδραυλική πτώση h . [Ε3, Σχήμα 9.8]

στ) Κόστος του κτηρίου ΥΗΣ

Στο κόστος του κτηρίου του υδροηλεκτρικού σταθμού σίγουρα σημαντική είναι η ονομαστική παροχή Q (m³/sec) του υδροηλεκτρικού έργου, ενώ μικρότερη επίδραση έχει η τιμή της υδραυλικής πτώσεως h , αφού από αυτήν εξαρτώνται οι διάφορες δυνάμεις που αναπτύσσονται στους υδροστροβίλους και το άκρο του αγωγού πτώσεως.

$$C = a \cdot Q^n \quad (8.31)$$

Η τιμή της παραμέτρου a και n εξαρτάται κυρίως από την υδραυλική πτώση h και την ονομαστική παροχή Q .

η) Κόστος της διόδου ψαριών

Το κόστος της διόδου ψαριών σχετίζεται με την υψομετρική διαφορά ανάντη και κατάντη της στάθμης του νερού και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 4.000 και 20.000 €/m ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

θ) Κόστος οδού προσπέλασης

Το κόστος της οδού προσπέλασης στα έργα αυτά κυμαίνεται από 20.000 έως 50.000 €/km ανάλογα με το έδαφος και τις απαραίτητες διασταυρώσεις με το υδατόρευμα στις περιπτώσεις που απαιτείται η κατασκευή των γεφυρών.

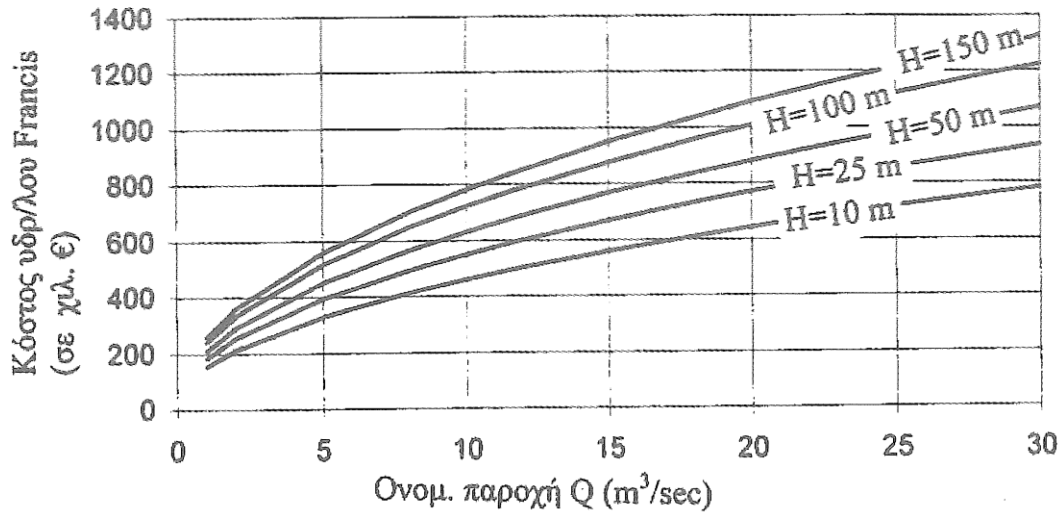
ι) Κόστος του υδροστροβίλου

Το κόστος του υδροστροβίλου έχει άμεση σχέση με την παροχή Q (m³/s) και την υδραυλική πτώση h (m) ή την ονομαστική ισχύ N (kW) και τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση H (m), θεωρώντας μία μέση τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου ίσο με $\eta = 0,92$.

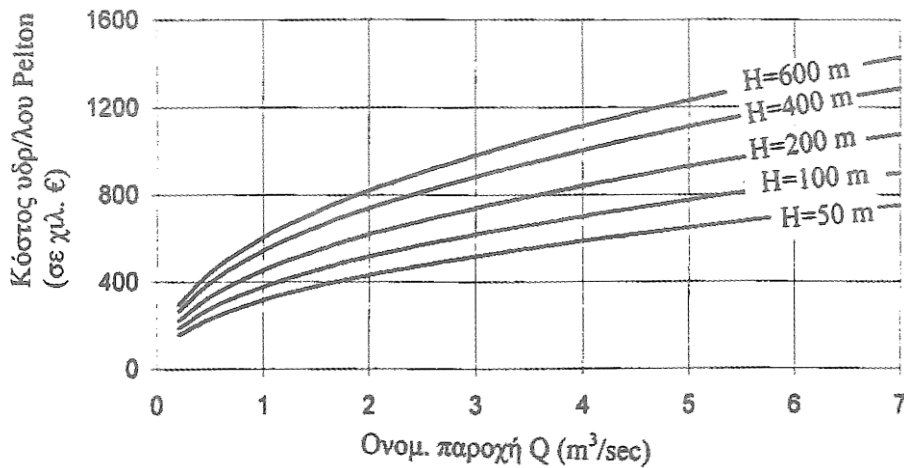
$$C = a \cdot Q^n \cdot H^m \quad \text{ή} \quad C = b \cdot N^n \cdot H^k \quad (6.82)$$

Υδροστροβίλος	a	n	m	b	k
Αξονικής ροής	87,336	0,41	0,2	35,446	-0,21
Francis	96,998	0,481	0,1953	33,676	-0,2858
Pelton	115,42	0,444	0,2582	43,465	-0,1858

Πίνακας 8.4 Τιμές των συντελεστών και εκθετών a , n , m , b , k για τρεις τύπους υδροστροβίλων. [E3]



Σχήμα 8.9 Κόστος υδροστρόβιλου Francis. [E3, Σχήμα 9.11]



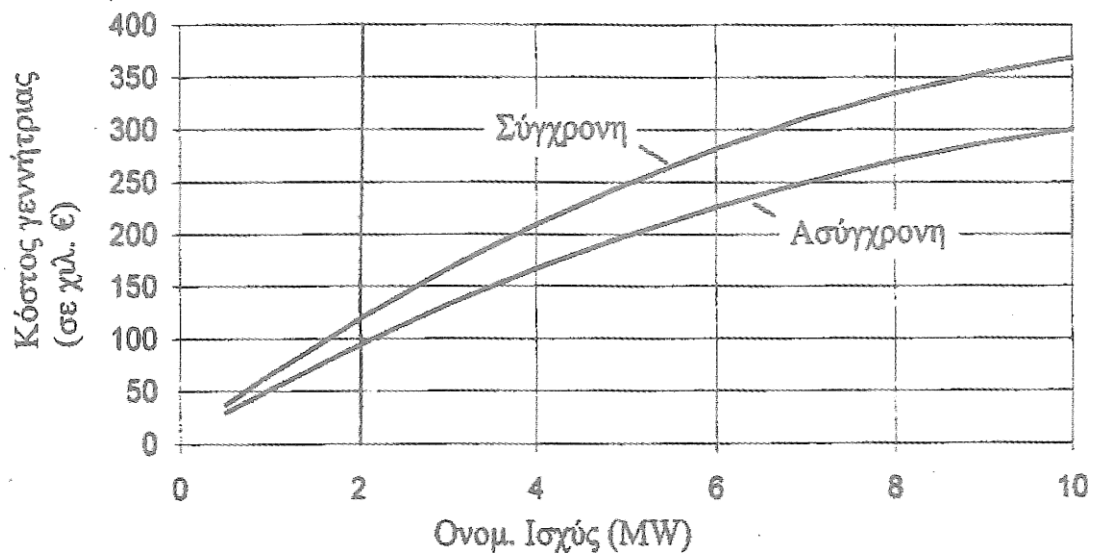
Σχήμα 8.10 Κόστος υδροστρόβιλου Pelton. [E3, Σχήμα 9.12]

κ) Κόστος της γεννήτριας

Το κόστος της γεννήτριας συσχετίζεται με την ονομαστική ισχύ N (MW) και τον τύπο της, αν είναι δηλαδή σύγχρονη ή ασύγχρονη.

$$\text{Σύγχρονη γεννήτρια: } C = -2,934 \cdot N^2 + 60 \cdot N + 7,865 \quad (8.33\alpha)$$

$$\text{Ασύγχρονη γεννήτρια: } C = -1,811 \cdot N^2 + 47,5 \cdot N + 5,931 \quad (8.33\beta)$$

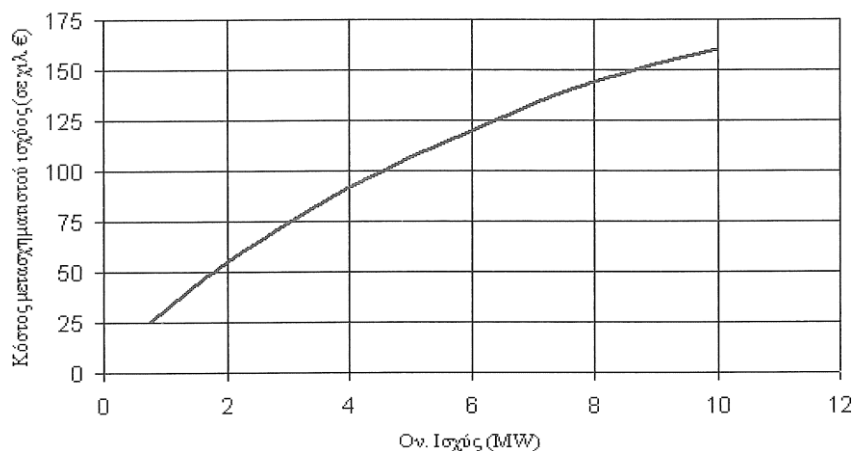


Σχήμα 8.11 Κόστος σύγχρονης και ασύγχρονης γεννήτριας. [Ε3, Σχήμα 9.14]

λ) Κόστος του μετασχηματιστή

Το κόστος του 3Φ μετασχηματιστή του ρεύματος ισχύος από τη χαμηλή τάση έως την υψηλή τάση των 20 kV συσχετίζεται με την ονομαστική ισχύ N σε kW.

$$C = -1,03 \cdot N^2 + 25,2 \cdot N + 6,11 \quad (8.34)$$



Σχήμα 8.12 Κόστος μετασχηματιστή [Ε3, Σχήμα 9.15]

μ) Κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων

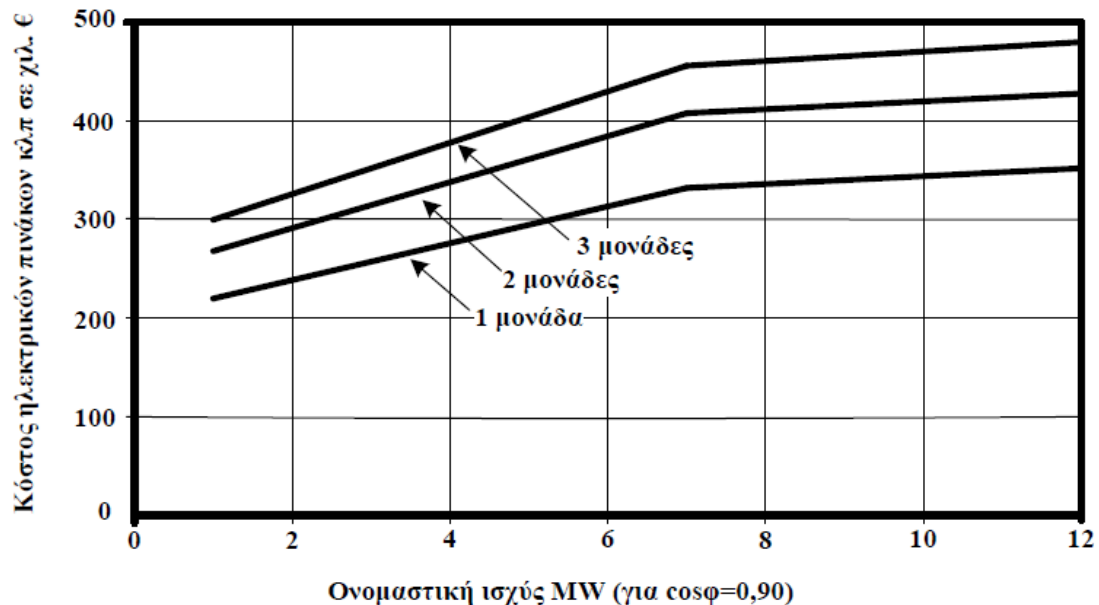
Το κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ N (MW) του υδροηλεκτρικού έργου, αλλά και το πλήθος των μονάδων παραγωγής (γεννήτριες – υδροστρόβιλοι).

$$\text{Για } 0 < N < 7 \text{ MW: } C = a_1 \cdot N + b_1 \quad (8.35\alpha)$$

$$\text{Για } 7 < N < 10 \text{ MW: } C = a_2 \cdot N^2 + b_2 \cdot N + c_2 \quad (8.35\beta)$$

Πλήθος μονάδων	0<N<7 MW		7<N<10 MW		
	a ₁	b ₁	a ₂	b ₂	c ₂
1 μονάδα	19,471	201,840	-2,361	47,180	122,520
2 μονάδες	23,910	242,000	-3,273	62,150	132,220
3 μονάδες	26,248	275,000	3,381	65,740	162,270

Πίνακας 8.5 Τιμές συντελεστών a₁, b₁, a₂, b₂, c₂. [E3]



Σχήμα 8.13 Κόστος ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων αυτοματισμού για 1, 2 και 3 μονάδες παραγωγής υδροηλεκτρικού έργου [E21, Σχήμα 9.16]

ξ) Κόστος ηλεκτρικής γραμμής μεταφοράς

Το κόστος των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος μέχρι το δίκτυο Μέσης Τάσης σχετίζεται με την τάση της γραμμής μεταφοράς (15, 20, 44 kV), το κατά πόσο δύσκολη είναι η κατασκευή, το μήκος της γραμμής, καθώς και την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ.

ν) Κόστος μελετών, αδειοδοτήσεων και επίβλεψης

Το συνολικό κόστος την πραγματοποίηση των μελετών, την έκδοση των αδειών και την επίβλεψη του έργου, συνολικά ανέρχεται στο 10 – 15% του συνολικού κόστους του έργου. Το κόστος της επίβλεψης κατά την κατασκευή της εγκατάστασης, αλλά και κατά τη λειτουργία του σταθμού ανέρχεται στο 15% της συνολικής τους αξίας. Τέλος, το κόστος εκπαίδευσης για το τεχνικό προσωπικό που θα είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία και τη συντήρηση του έργου από την έναρξη της λειτουργίας του και μετά, αντιστοιχεί σε 5 – 100 ανθρωπο-ημέρες ενός τεχνικού. Η συνολική δαπάνη ανά ανθρωπό-ημέρα κυμαίνεται από 500 έως 800 €.

Επί μέρους μελέτη	Ποσοστιαία συμμετοχή % στο συνολικό κόστος του έργου
Αναγνώριση περιοχής	0,90
Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων	1,00
Συγκέντρωση και αξιολόγηση υδρολογικών δεδομένων	0,30
Αναγνωριστική μελέτη (περιλαμβάνει εκτίμηση κόστους και τη σύνταξη σχετικής έκθεσης)	0,80
Αδειοδοτήσεις	0,50
Εδαφολογική μελέτη	0,40
Μελέτη χρηματοδότησης του έργου	1,50
Δημιουργία της εταιρείας διαχείρισης και λογιστική παρακολούθηση	0,90

Πίνακας 8.6 Συμμετοχή % κάθε συνιστώσας μελετών και επίβλεψης στο συνολικό κόστος του έργου [Ε3, Πίνακας 9.6]

8.5 Εκτίμηση λειτουργικού κόστους

Το λειτουργικό κόστος ενός μικρού υδροηλεκτρικού περιλαμβάνει το κόστος κεφαλαίου, δηλαδή τα τοκοχρεολύσια, τις αμοιβές του προσωπικού, τα διοικητικά έξοδα της επιχείρησης, τα λειτουργικά έξοδα και τα έξοδα συντήρησης, την ασφάλιση του εξοπλισμού, τους φόρους και τα δικαιώματα χρήσης του νερού, όταν αυτά υπάρχουν. Συγκεκριμένα, για το κόστος του κεφαλαίου έχει γίνει αναλυτική περιγραφή σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως έχει αναφερθεί επίσης, για την επιτήρηση και την λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού συνήθως αρκεί η απασχόληση ενός και μόνο τεχνίτη. Ακόμα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ετήσιες αμοιβές για τη μερική απασχόληση ενός λογιστή της επιχείρησης και του επιβλέποντος μηχανικού. Έτσι, το ετήσιο κόστος αμοιβών προσωπικού μαζί με τις εργοδοτικές εισφορές μπορεί να υπολογιστεί άνετα. Επιπλέον, στα λειτουργικά έξοδα της επιχείρησης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δαπάνες ταχυδρομικές, αναλωσίμων πρώτων υλών, τηλεπικοινωνιών και λοιπά. Σε γενικές γραμμές η ετήσια δαπάνη για τα έξοδα συντήρησης και τα λειτουργικά έξοδα ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου ανέρχεται περίπου στο 2,5% της συνολικής επένδυσης. Τα ασφάλιστρα υπολογίζονται σε 0,65% επί του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και 0,35% επί της αξίας των κτιριακών. Τέλος στις ετήσιες δαπάνες προϋπολογίζεται ετησίως ποσό 15% επί των γενικών βιομηχανικών δαπανών ως απρόβλεπτες δαπάνες.

8.6 Οικονομικά κίνητρα και τιμολόγηση

Η οικονομική ανάλυση ενός ηλεκτρικού σταθμού παραγωγής θα ήταν αρκετά πιο απλοϊκή αν τα τιμολόγια της ενέργειας παρέμεναν σταθερά. Κάτι τέτοιο όμως, δύσκολο μπορεί να πραγματοποιηθεί, αφού οι αγορές ποικίλουν μεταξύ τους και επιπλέον τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη κινητοποίηση στην ελεύθερη αγορά του ανταγωνισμού προωθώντας αρκετά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα συμφωνημένα τιμολόγια σαφώς διαφέρουν από χώρα σε χώρα σύμφωνα πάντα με τα νομοθετικά πλαίσια που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Στον πίνακα (6.7) δίνονται οι τιμές αναφοράς βάσει των οποίων υπολογίζεται μηνιαίως η λειτουργική ενίσχυση, υπό τη μορφή της διαφορικής προσαύξησης ή της σταθερής τιμής αποζημίωσης, της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.

8.7 Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων

Τα έσοδα ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου υπολογίζονται από το γινόμενο της καθαρής παραγόμενης ενέργειας με το εκάστοτε ισχύον τιμολόγιο της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον ΑΔΜΗΕ, όπως αυτό έχει προκύψει ύστερα από υπουργική απόφαση. Από αυτά τα ακαθάριστα έξοδα κρατείται ένα ποσοστό ίσο με 3% σύμφωνα με το ν. 3851/2010 και αποδίδεται στους ΟΤΑ και τους οικιακούς καταναλωτές της περιοχής. Επιπλέον, εκτός από την ενέργεια τιμολογείται και η παραγόμενη ισχύς και χρεώνεται η απορρόφηση της άεργους ισχύος από το δίκτυο για την περίπτωση εγκατάστασης ασύγχρονης γεννήτριας. Όσα έργα λειτουργούν με σύγχρονες γεννήτριες δεν έχουν χρέωση, ούτε αγορά άεργους ισχύος.

Υπάρχουν μερικές περιπτώσεις κάποιων χωρών που το τιμολόγιο αγοράς της παραγόμενης ενέργειας από την ηλεκτρική εταιρεία δεν είναι ενιαίο και χωρίζεται σε χειμερινό και θερινό, ενώ εξαρτάται από τις ώρες της μέρας μέσα στις οποίες προσφέρεται η ενέργεια, δηλαδή τις ώρες αιχμής και τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Σε αυτήν την περίπτωση τα έσοδα του μικρού υδροηλεκτρικού είναι δυνατό να αυξηθούν με τη διαμόρφωση ανάντη ταμιευτήρα με μικρές δυνατότητες ρύθμισης, π.χ. εξάωρης ή ημερήσιας.

Στον υπολογισμό των καθαρών εσόδων θα πρέπει πλέον να υπολογιστεί και ο φόρος εισοδήματος επί των αποτελεσμάτων χρήσης για την περίπτωση κατά την οποία η επιχείρηση που διαχειρίζεται το έργο είναι ανώνυμη εταιρεία. Μία καθαρά κοινοτική επιχείρηση δεν επιβαρύνεται με φόρο εισοδήματος.

8.8 Οικονομική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών έργων

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα κύρια οικονομοτεχνικά στοιχεία πέντε μικρών υδροηλεκτρικών έργων που έχουν κατασκευαστεί σε διάφορες χώρες της Ευρώπης. Η οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, έχει λάβει υπόψη προεξοφλητικό επιτόκιο ίσο με 8% και διάρκεια ζωής του έργου ίσα με 35 χρόνια. Από τα στοιχεία που έχουν προκύψει φαίνεται πως υπάρχει μία σημαντική διαφορά των οικονομικών μεγεθών, κάτι το οποίο επιβεβαιώνει την δυσκολία διατύπωσης μίας συσχέτισης για την εκτίμηση του κόστους.

Οικονομοτεχνικά Στοιχεία					
Χώρα	Γερμανία	Γαλλία	Ιρλανδία	Πορτογαλία	Ισπανία
Ον. παροχή (m ³ /sec)	0,30	0,60	15,00	2,00	1,10
Υδρ. πτώση (m)	47,00	400,00	3,50	117,00	567,00
Τύπος υδρ/λου	Francis	Pelton	Axial	Francis	Pelton
Εγκ. ισχύς (kW)	110,00	1.900,00	430,00	1.620,00	5.000,00
Κόστος επένδυσης (€ 10 ³)	486,50	2.598,85	541,00	1.148,00	4.277,00
Παραγωγή ενέργειας (MWh)	903,00	7.800,00	2.200,00	6.500,00	18.500,00
Μέση αξία παρ. ενέργειας/MWh	76,13	53,65	38,15	53,54	103,95
Ετήσια έσοδα (€)	68.742,00	418.470,00	83.927,00	348.000,00	1.023.077,00
Ετήσια λειτ. έξοδα (€)	19.850,00	51.984,00	25.167,00	22.960,00	106.923,00
Καθαρά ετήσια έσοδα (€)	48.892,00	366.552,00	58.731,00	325.040,00	1.816.154,00
Οικονομική Ανάλυση					
Κόστος ανά εγκατεστημένο kW (€)	4.422,70	1.367,00	1.259,00	709,00	855,00
Κόστος επένδυσης ανά MWh/year (€)	539,00	333,00	246,00	117,00	231,00
Διάρκεια αποπληρωμής	9,95	7,09	9,21	3,35	2,35
Εσωτ. Απόδοση επένδυσης IRR (%)	9,65	13,97	10,25	28,31	42,46
Λόγος εσόδων προς έξοδα BCR	1,30	1,83	1,41	3,67	5,50

Πίνακας 6.8 Συγκριτικά οικονομοτεχνικά στοιχεία μικρών υδροηλεκτρικών έργων. [Ε3, Πίνακας 9.7]

Κατηγορία σταθμών	T.A. (€/MWh)
Αιολική Ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις	98
Αιολική Ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά	98
Υδραυλική Ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 3 MWe	100
Υδραυλική Ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ από 3 MWe έως και 15 MWe	97
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, πυρόλυση) εκτός αεριοποίησης, από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 1 MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	184
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω διεργασίας αεριοποίησης από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 1 MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	193
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση), από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ από 1 MW έως και ≤ 5 MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	162
Βιομάζα (ή βιορευστά) που αξιοποιείται μέσω θερμικών διεργασιών (καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση), από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ > 5 MW (εξαιρουμένου του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων)	140
Αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και βιοαέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αποβλήτων και την οργανική ιλύ/λάσπη βιολογικών καθαρισμών και αξιοποιούνται από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 2 MW	129
Αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής και εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και βιοαέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αποβλήτων και την οργανική ιλύ/λάσπη βιολογικών καθαρισμών και αξιοποιούνται από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ > 2 MW	106
Βιοαέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση βιομάζας (ενεργειακών καλλιεργειών, ενσιρωμάτων χλωρής νομής γεωργικών καλλιεργειών, κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών οργανικών υπολειμμάτων και αποβλήτων, αποβλήτων βρώσιμων ελαίων και λιπών, ληγμένων τροφίμων) και αξιοποιείται από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 3 MW	225
Βιοαέριο που προέρχεται από την αναερόβια χώνευση βιομάζας (ενεργειακών καλλιεργειών, ενσιρωμάτων χλωρής νομής γεωργικών καλλιεργειών, κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών οργανικών υπολειμμάτων και αποβλήτων, αποβλήτων βρώσιμων ελαίων και λιπών, ληγμένων τροφίμων) και αξιοποιείται από σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ > 3 MW	204
Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται με ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς σύστημα αποθήκευσης	257
Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται με ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα αποθήκευσης, το οποίο εξασφαλίζει τουλάχιστον 2 ώρες λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο	278
Γεωθερμική ενέργεια που αξιοποιείται με σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 5 Mwe	139
Γεωθερμική ενέργεια που αξιοποιείται με σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ > 5 MWe	108
Λοιπές Α.Π.Ε. (συμπεριλαμβανομένων και των σταθμών ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων μη εντασσόμενων σε άλλη κατηγορία του πίνακα, που πληρούν τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας όπως εκάστοτε αυτές ισχύουν)	90

Πίνακας 8.8 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών πώλησης ενέργειας από ΑΠΕ (2016) [E22]

8.9 Συμπεράσματα

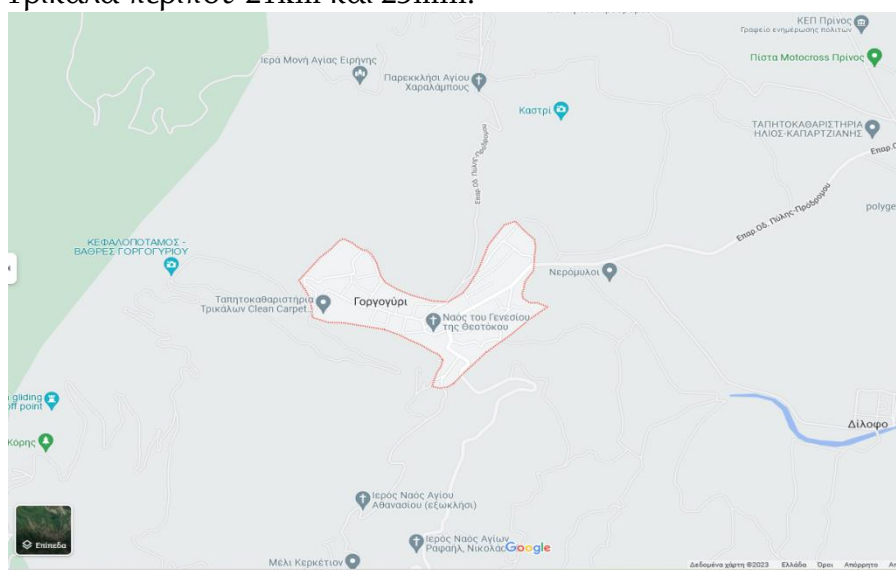
Η οικονομική ανάλυση ενός υδροηλεκτρικού έργου είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού μέσα από αυτήν διακρίνεται η οικονομική βιωσιμότητα του. Είναι πολύ σημαντικό να εξετάζονται όλες οι οικονομικοί παράμετροι, προκειμένου να γίνεται έλεγχος για το αν ένα έργο πρόκειται να είναι οικονομικά βιώσιμο ή όχι. Όπως διάφορα άλλα επιχειρηματικά πλάνα έτσι και η δημιουργία και κατασκευή ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού έχει ένα ρίσκο για τον επενδυτή, αφού στις περισσότερες των περιπτώσεων προχωράει την επένδυση του με τη χρήση δανείου. Έτσι πρέπει να ελεγχθούν όλα τα οικονομικά χαρακτηριστικά στα οποία βασίζεται η αποπληρωμή αυτού, αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επίτευξη του κέρδους Στο τέλος της ημέρας αυτό που απασχολεί περισσότερο τον επενδυτή είναι τα καθαρά του κέρδη. Αν αυτά είναι λιγότερα από τα χρήματα επένδυσης, τότε δεν αξίζει να προχωρήσει κανείς σε ένα τέτοιο έργο.

9^ο Κεφάλαιο

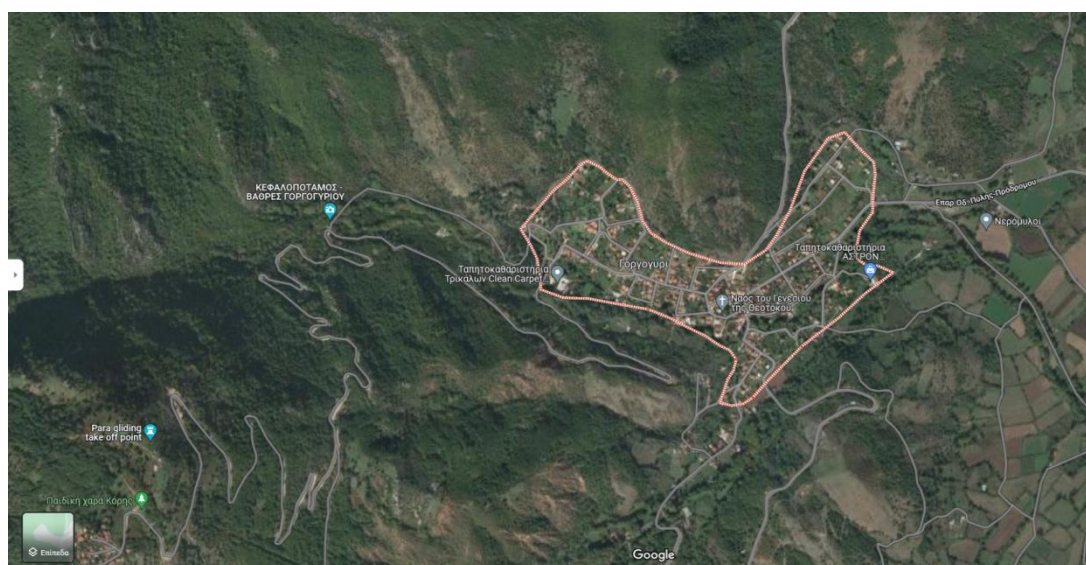
Βελτιστοποίηση μικρού υδροηλεκτρικού σε παρόμοια περιοχή με το Γοργογύρι Τρικάλων

9.1 Εισαγωγή

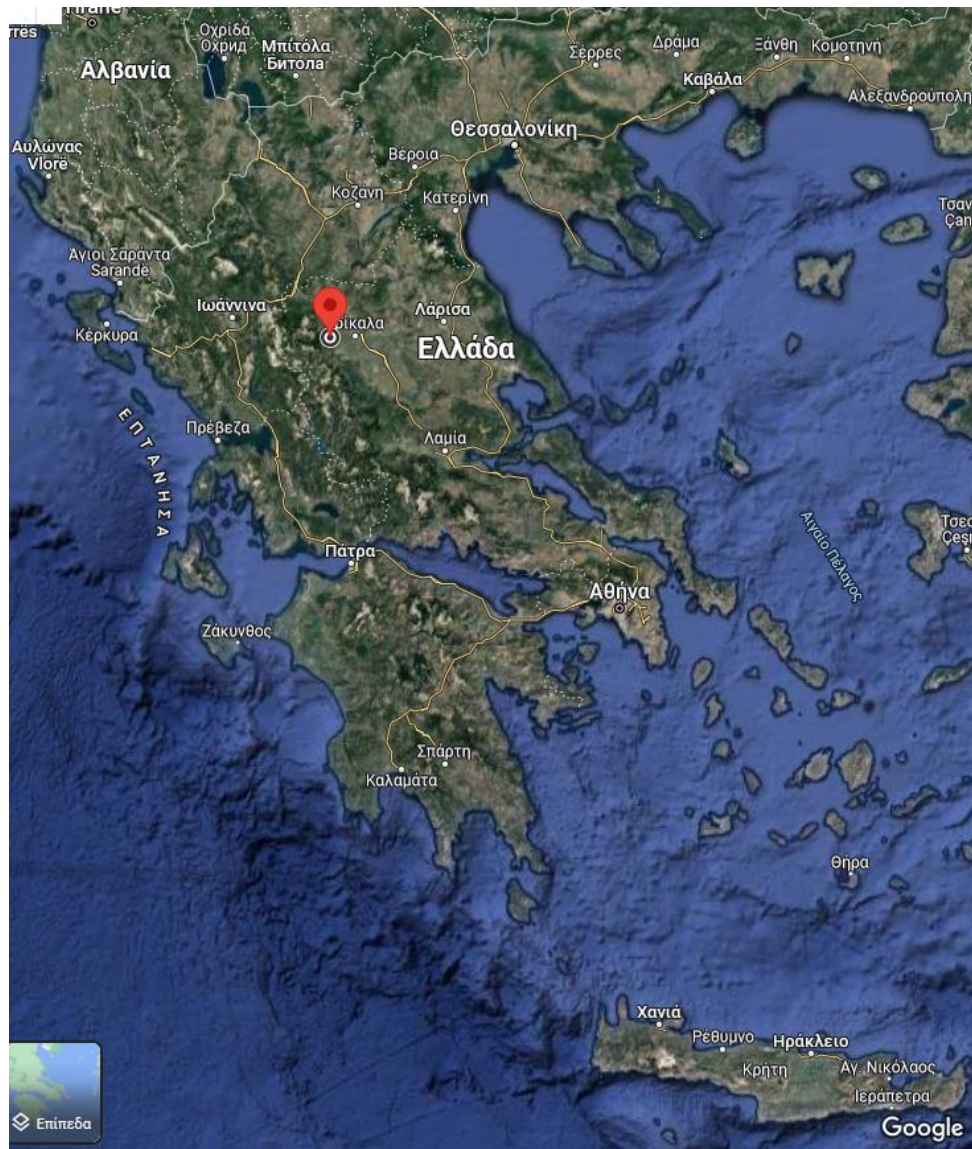
Το Γοργογύρι βρίσκεται στο νομό Τρικάλων και αποτελεί ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χωριά του νομού, αφού έχει πολλές ομορφιές, μέρος των οποίων οφείλεται στον Κεφαλοπόταμο, από τον οποίο διαρρέεται. Βρίσκεται σε ύψος 206 μέτρα, στα ριζά του Κερκέτιου όρους (1.901m υψόμετρο) και απέχει από τα Τρίκαλα περίπου 21km και 25min.



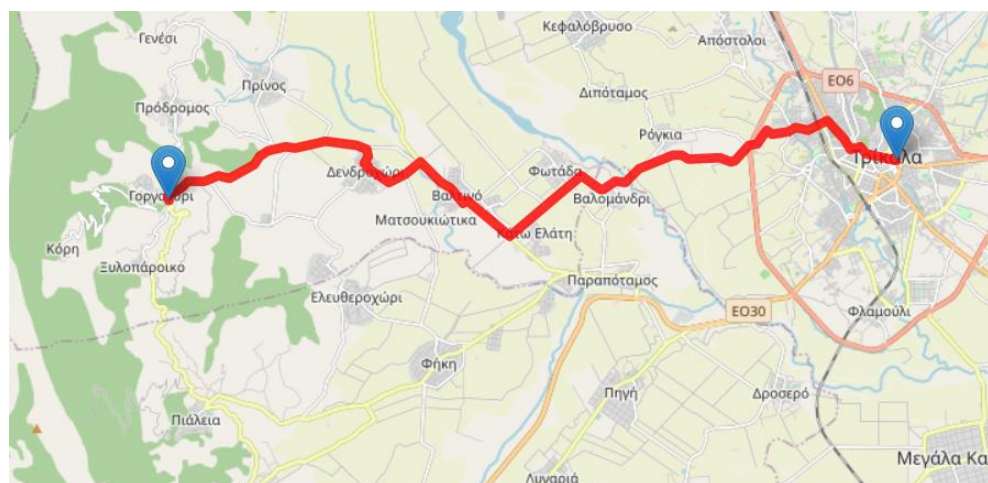
Σχήμα 9.1 Γοργογύρι Τρικάλων_Επίπεδα[Google Maps]



Σχήμα 9.2 Γοργογύρι Τρικάλων_ Δορυφόρος [Google Maps]



Σχήμα 9.3 Pin Γοργούρι Τρικάλων [Google Maps]



Σχήμα 9.4 Απόσταση Γοργούρι – Τρίκαλα [Google Maps]

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο Κεφαλοπόταμος διασχίζει κατά μήκος όλο το Γοργούρι και λόγω αυτού θεωρείται ένα μαγευτικό μέρος έξω από τα Τρίκαλα Θεσσαλίας. Έχει άφθονα, γάργαρα και κρύα νέρα με πλούσια πανίδα και κατεβαίνει ορμητικά από τις κορυφές του Κόζιακα (Κερκέτιο Όρος).

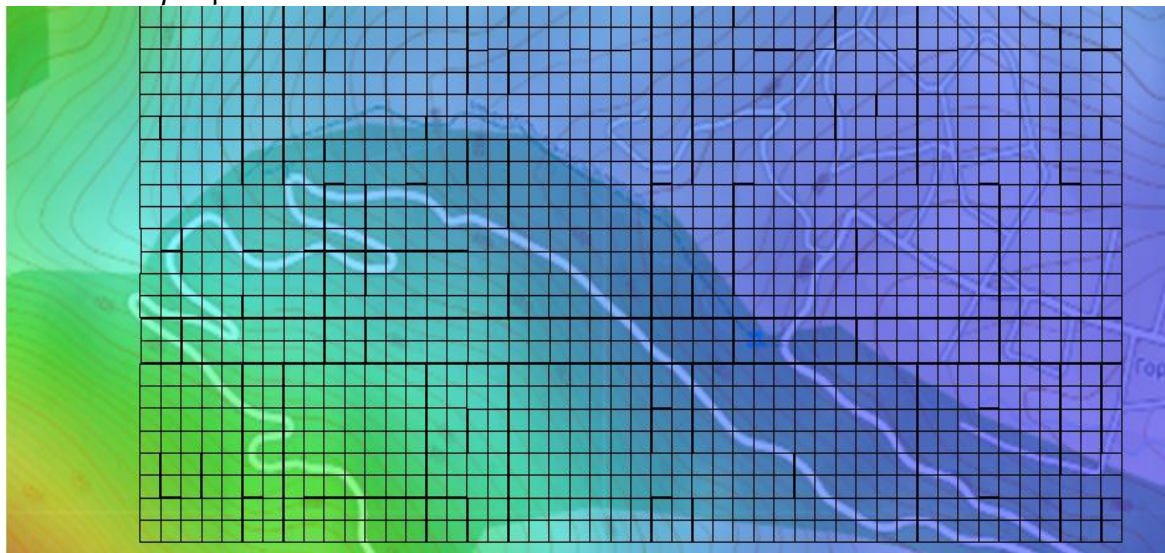


Σχήμα 9.5(α),(β) Γοργούρι – Τρικάλων [126]

9.2 Αρχές Σχεδίασης & Προσομοίωση Υδροηλεκτρικού

9.2.1 Τοπογραφική χάραξη διαδρομής

Ο σκοπός είναι να φτιαχτεί ένα κάναβο της μορφής για μία φανταστική περιοχή που μοιάζει με το Γοργογύρι Τρικάλων, για την ακρίβεια για μία περιοχή με πιο έντονο ανάγλυφο.



Σχήμα 9.6α Ενδεικτικός τοπογραφικός κάναβος

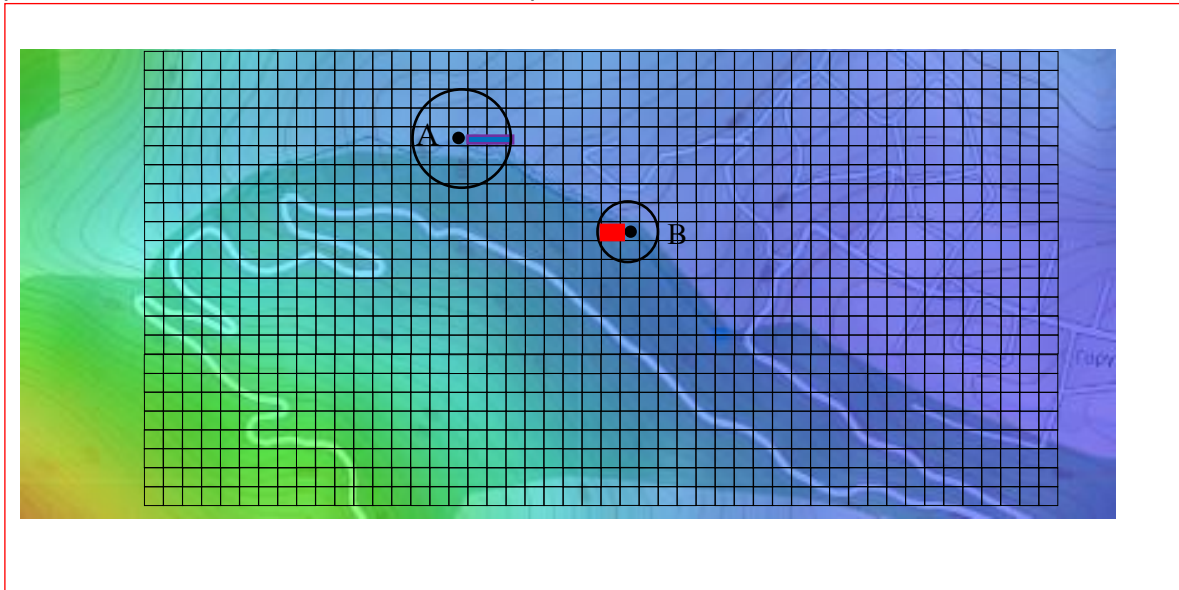
Κάθε στοιχείο / τετράγωνο είναι (x,y) , έχει συγκεκριμένο υψόμετρο μέσω υψούψών και έχει συγκεκριμένο χαρακτηρισμό:

- 0 «ΠΟΤΑΜΙ»,
- 1 «ΚΥΡΙΟΣ ΕΠΑΡΧΙΑΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ»,
- 2 «ΔΕΥΤΕΡΕΥΩΝ ΕΠΑΡΧΙΑΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ»,
- 3 «ΧΩΜΑΤΟΔΡΟΜΟΣ»,
- 4 «ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ»,
- 5 «ΚΤΗΜΑ»,
- 6 «ΑΡΑΙΟ ΔΑΣΟΣ»,
- 7 «ΑΠΟΤΟΜΑ ΠΡΑΝΗ»,
- 8 «ΠΥΚΝΟ ΔΑΣΟΣ»,
- 9 «ΦΥΤΕΜΕΝΗ / ΑΔΙΑΦΟΡΗ ΕΚΤΑΣΗ»,
- 10 «ΒΙΟΤΕΧΝΙΑ»,
- 11 «ΣΠΑΝΙΟ ΔΑΣΟΣ / ΚΑΤΑΡΡΑΚΤΕΣ»,
- 12 «ΓΕΦΥΡΑ»,
- 13 «ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ»

Έστω ότι η θέση υδροληψίας είναι $A (x_0,y_0)$ και $B (x_n,y_n)$ το σημείο απόληξης αγωγού φύγης, με μπλε η δεξαμενή καθίζησης και με κόκκινο ο υδροηλεκτρικός σταθμο. Με την προϋπόθεση ότι A και B απέχουν σημαντικά, πραγματοποιείται αρχικά, η χάραξη του ευθύγραμμου τμήματος AB και η επαναχάραξη του

322

πλέγματος με κατάλληλη στροφή, προκειμένου ο νέος άξονας Ax' να ταυτίζεται με το AB κάνοντας αρχική στροφή ο ημιάξονας Ax κατά θ .



Σχήμα 9.6β Παράδειγμα υδροληψιάς – σημείου απόληξης

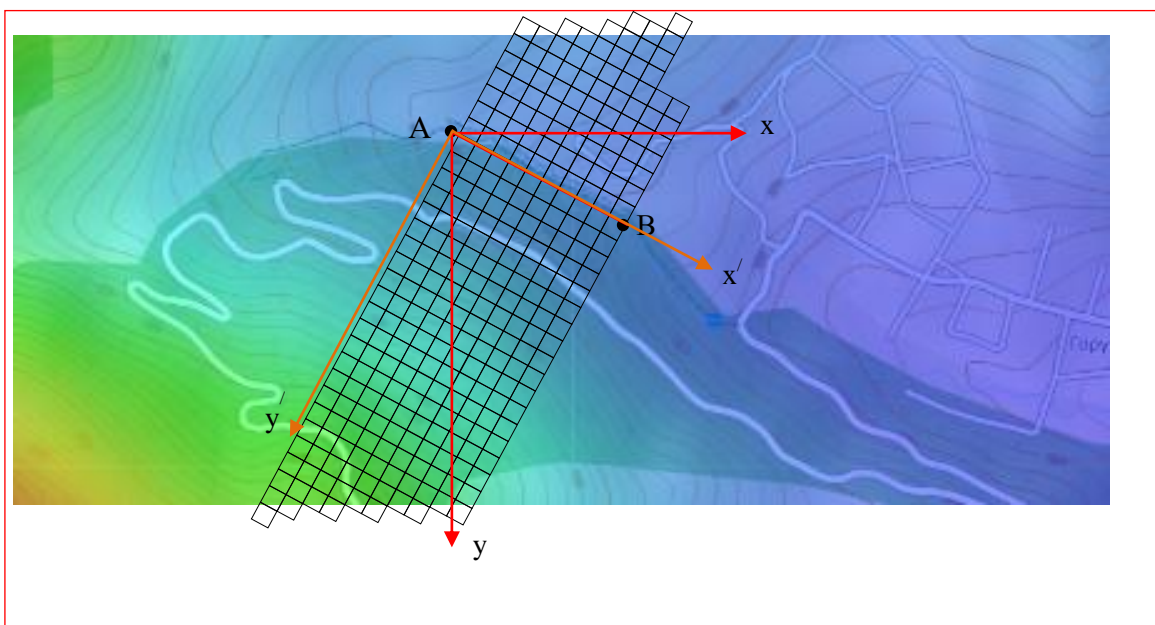
Οι αντίστοιχες συντεταγμένες συνδέονται μέσω των σχέσεων:

$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \quad (9.1)$$

$$y' = -x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta \quad (9.2)$$

$$x = x' \cdot \cos\theta - y' \cdot \sin\theta \quad (9.3)$$

$$y = x' \cdot \sin\theta + y' \cdot \cos\theta \quad (9.4)$$



Σχήμα 9.6γ Παράδειγμα υδροληψιάς – σημείου απόληξης με μετατόπιση.

Έστω από το σημείο A κατά τον άξονα x μέσω δυναμικού προγραμματισμού (βλ. Παράρτημα του [E25]) εξετάζονται καθ' όλο τον άξονα των y , οι αντίστοιχες

δυνατές συνδέσεις των σημείων A_k με τα σημεία $A_{(k+1)}$, υπολογίζοντας ισοδύναμα μήκη με έναν επιπλέον συντελεστή βάρους (Weight cost):

Περιοχή	Συντελεστής βάρους
Αδιάφορη έκταση	1
Αραιό δάσος	1,2
Κτήμα	1,3
Πυκνό δάσος	2
Χωματόδρομος	3
Απλός δρόμος	4
Επαρχιακός δρόμος	6
Διαστράυρωση	7
Ποταμός	10
Γέφυρα	12
Βιοτεχνία	30
Απότομα πρανή / Επικίνδυνο μέρος	50
Κατοικημένη περιοχή	100
Σπάνιο δάσος / Καταρράκτες	1000

Πίνακας 9.1 Συντελεστής βάρους ανά εξεταζόμενη περιοχή

Επιπλέον ως κλειστός αγωγός θα πρέπει να έχει να έχει μικρότερο ή ίσο ύψος με σημείο A_1 . Η αναδρομική σχέση του προς τα εμπρός δυναμικού προγραμματισμού είναι:

$$V(x_k, y_e) = \min_{y \in Y_{k+1}} \{V(x_{k-1}, y) + c(x_{k-1}, y; x_k, y_e)\} \quad (9.5)$$

Όπου, αρχική συνθήκη είναι είτε το σημείο υδροληψίας A $V(x_0, y_0) = 0$, είτε το σημείο τέλους A_1 της δεξαμενής καθίζησης & δεξαμενής φόρτισης $V(x_1, y_1) = 0$ ή άλλη τιμή ανάλογα με τη θεώρηση. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, προτιμάται η πρώτη περίπτωση

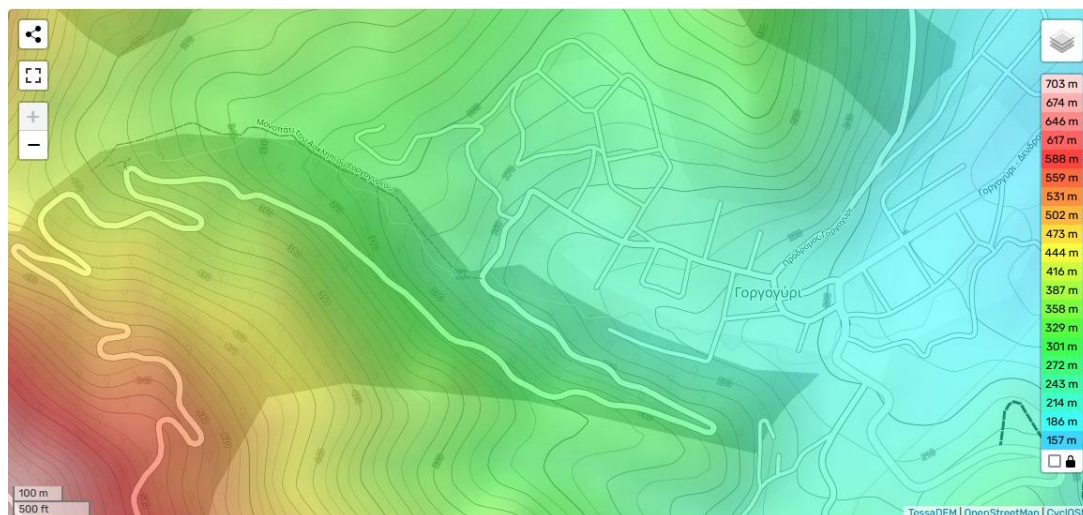
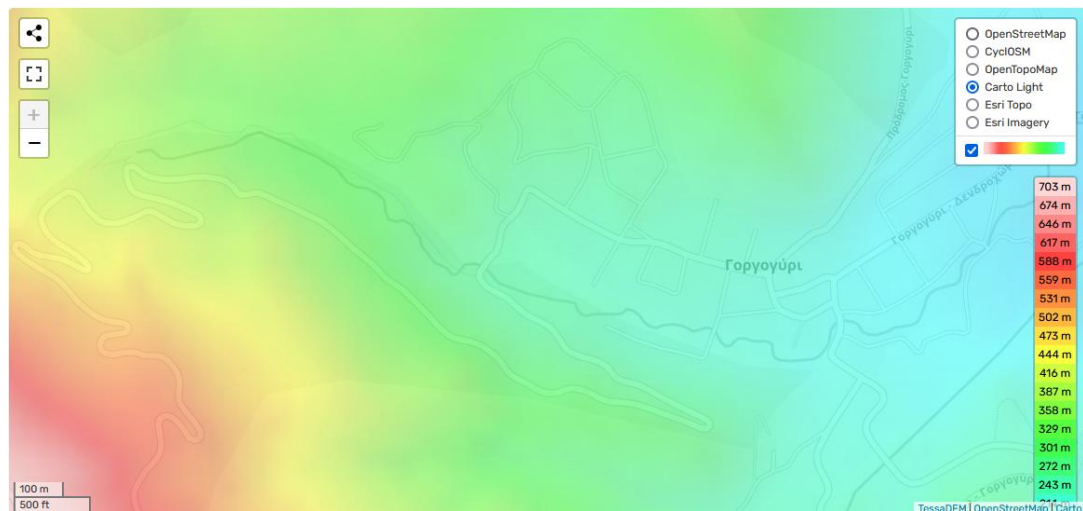
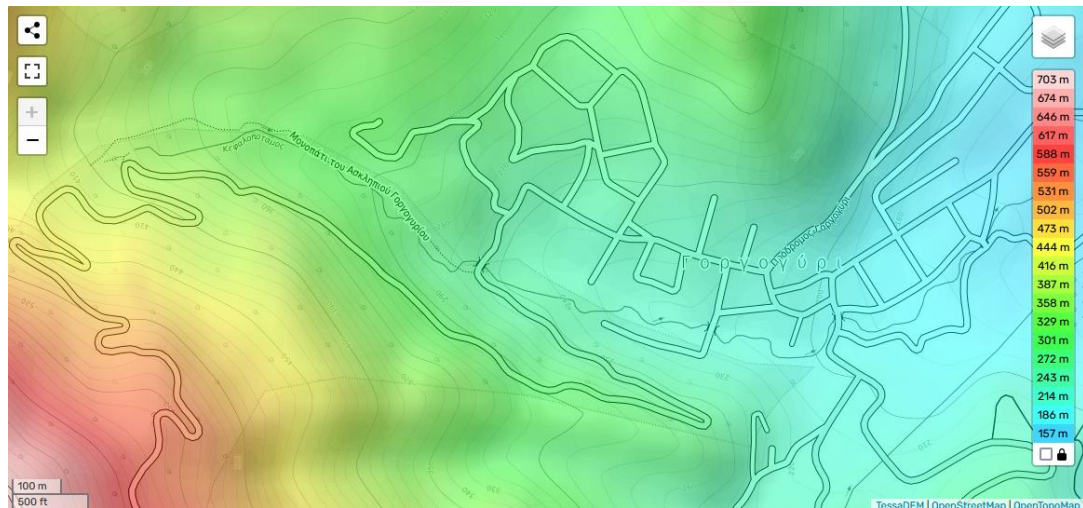
Η τελική συνθήκη είναι, είτε σε σημείο απόληξης αγωγού φυγής με συντεταγμένες $B_n (x_B, y_B)$, είτε τα πιθανά σημεία τέρματος αγωγού πτώσης στον σταθμό $B_{n-1} (x_{n-1}, y_{n-1})$. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή λαμβάνεται το σημείο απόληξης του αγωγού φυγής.

Ο όρος $c(x_{k-1}, y; x_k, y_e)$ αφορά στο κόστος μετάβασης από την κατάσταση / θέση άξονα y του σταδίου / θέση άξονα x_{k-1} στην κατάσταση / θέση άξονα y_e του σταδίου/θέση άξονα x_k :

$$c(x_{k-1}, y; x_k, y_e) = \text{βάρους(χαρακτηρισμός εδάφους/συνθήκη ύψους)} \cdot \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_e - y)^2 + (h(x_k, y_e) - h(x_{k-1}, y))^2} \quad (9.6)$$

Αρχικά, βρέθηκαν 989 ύψη [I27], για τις παρακάτω συνθήκες :

$$0 \leq x \leq 2.1 \text{ km} \ \& \ 0 \leq y \leq 1.1 \text{ km} \ \text{με βήμα } 50\text{m}.$$



Σχήμα 9.7 Πραγματική απεικόνιση Γοργογυριου – Κεφαλοποτάμου
 (α) Open Topo Map (β) Carto Light, (γ) CycloSM [I27]



Σχήμα 9.8 Πραγματική απεικόνιση Γοργογυριού – Κεφαλοποτάμου
 (α) Esri Imagery, (β) Esri Topo, (γ) Open Street Map [I27]

Στη συνέχεια, μέσω τριπλής γραμμικής παρεμβολής γίνεται η επέκταση του τοπογραφικού για τις παραπάνω συνθήκες με βήμα 5m. Συγκεκριμένα:

$$x = x_a + v_1 d_x \quad (9.7\alpha)$$

$$y = y_a + v_2 d_y \quad (9.7\beta)$$

Όπου,

$$d_x = 5 \text{ m}$$

$$d_y = 5 \text{ m}$$

$$v_1 = 0, 1, 2, \dots, 10$$

$$v_2 = 0, 1, 2, \dots, 10$$

Μέσω τριπλής γραμμικής παρεμβολής, όπου τέσσερις κορυφές του νοητού ορθογωνίου παραλληλόγραμμου, που σχηματίζεται με διαστάσεις dx επί dy έχουν συντεταγμένες (x_a, y_a, h_a) , (x_b, y_a, h_b) , (x_a, y_b, h_c) , (x_b, y_b, h_d) αντίστοιχα:

$$h_I = h_a + \frac{h_b - h_a}{x_b - x_a} (x - x_a) \quad (9.8\alpha)$$

$$h_{II} = h_I + \frac{h_d - h_c}{x_b - x_a} (x - x_a) \quad (9.8\beta)$$

$$h = h_I + \frac{h_{II} - h_I}{y_b - y_a} (y - y_a) \quad (9.8\gamma)$$

Με αυτόν τον τρόπο, έγινε και ο χαρακτηρισμός της περιοχής, ειδικά αν αφορά σε δάσος, σπάνιο δάσος, καταρράκτες, κλπ. . Για την συγκεκριμένη εφαρμογή, προστέθηκε, επιπλέον και μία φανταστική βουνοκορφή, για να υπάρχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην εκτέλεση της βελτιστοποίησης. Σε περίπτωση που μεσολαβεί δρόμος ή ποταμός, η συγκεκριμένη μέθοδος εντοπίζει ποιο είναι το επόμενο σημείο (οριζόντιο, διαγώνιο ή κάθετο) και λαμβάνει τα αντίστοιχα τετράγωνα του τοπογραφικού κάρναβου ως « ευθύγραμμο» τμήμα με κατάλληλο εύρος και ελάχιστο τα 5m. Για παράδειγμα, αν είναι ποταμός ή χωματόδρομος το πλάτος είναι 5m, αν είναι απλός δρόμος 10m και αν είναι επαρχιακός, ειδικός δρόμος τα 15m. Με την εφαρμογή της μεθόδου επέκτασης σχηματίστηκε ένα πλέγμα από 93.041 σημεία, βοηθώντας στην αναλυτικότερη και ποιοτικότερη μελέτη χάραξης της διαδρομής. (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – επέκταση τοπογραφικού)

Ακολούθως εφαρμόστηκε το πρόγραμμα χάραξης της βέλτιστης διαδρομής επί του τοπογραφικού χάρτη (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – χάραξη διαδρομής), το οποίο στηρίζεται στον επιπρόσθιο δυναμικό προγραμματισμό. Ειδικότερα, κατά το μήκος του ποταμού υλοποιήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των σημείων υδροληψίας – απόληξης του αγωγού φυγής με διακριτό βήμα μεταξύ όλων των σημείων υπό εξέταση, 5m, και ελάχιστη απόσταση μεταξύ υδροληψίας –

απόληξης τα 100m. Με την εφαρμογή της μεθόδου της βέλτιστης χάραξης, βρέθηκαν 69.406 επιτυχείς πιθανές διαδρομές, δηλαδή από το σημείο υδροληψίας Α ως το σημείο απόληξης νερού Β. Επίσης, σημειώνεται πως μέσα από τον συγκεκριμένο έλεγχο, προέκυψαν , επίσης και 6.000 ανεπιτυχείς διαδρομές, οι οποίες δεν εξετάστηκαν στην πορεία.

9.2.2 Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για υδροστροβίλους σε μικρό υδροηλεκτρικό

Για να μπορέσει να ενταχθεί στο κύριο πρόγραμμα του υδροηλεκτρικού, πραγματοποιήθηκε η ετοιμασία του αρχείου στροβίλων με διαμόρφωση τριγώνων σε διάγραμμα Q-H, έτσι ώστε να εντοπίζεται η καταλληλότητα ή όχι του κάθε εξεταζόμενου στροβίλου. Αναλυτικά, με τη βοήθεια του Πίνακα 5.4 δημιουργήθηκε ο Πίνακας 9.2 για **364** στροβίλους.

Όνομα Υδροστροβίλου
A/A
Τύπος Υδροστροβίλου
Ονομαστικό Ύψος H_{nom} [m]
Ονομαστική Παροχή Q_{nom} [m^3/s]
H_{min_oper}
H_{max_oper}
Q_{min_oper}
Q_{max_oper}
Ονομαστική ειδική ταχύτητα, n_s [RPM]
Όνομαστική ταχύτητα περιστροφής, n [RPM]
Πλήθος κορυφών κυρτού πολυγώνου οριοθέτησης της περιοχής H-Q
Το 1 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomA} [m]
Το 1 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomA} [m^3/s]
Το 2 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomB} [m]
Το 2 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomB} [m^3/s]
Το 3 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomC} [m]
Το 3 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomC} [m^3/s]
Το 4 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomD} [m]
Το 4 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomD} [m^3/s]
Το 5 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomE} [m]
Το 5 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomE} [m^3/s]
Το 6 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου H_{nomF} [m]
Το 6 ^ο σημείο ύψους-παροχής πολυγώνου Q_{nomF} [m^3/s]
Ονομαστική απόδοση [-]

Πίνακας 9.2 Δεδομένα (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3) για ανάλυση υδροστροβίλων.

Όπου:

- H_{min_oper} : Έλάχιστο επιτρεπτό ύψος λειτουργίας ως λόγος ως προς το ονομαστικό ύψος,
- H_{max_oper} : Μέγιστο επιτρεπτό ύψος λειτουργίας ως λόγος ως προς το ονομαστικό ύψος,
- Q_{min_oper} : Ελάχιστη επιτρεπτή παροχή λειτουργίας ως λόγος ως προς την ονομαστική παροχή,
- Q_{max_oper} : Μέγιστη επιτρεπτή παροχή λειτουργίας ως λόγος ως προς την ονομαστική παροχή.

Στο αρχείο εξόδου καταγράφονται οι αντίστοιχοι υδροστροβίλοι με κατάλληλο αύξοντα αριθμό, όπου το πολύγωνο H-Q διασπάται σε κατάλληλο πλήθος τριγώνων, ενώ ταυτόχρονα καταχωρείται τόσο η καμπύλη απόδοσης του υδροστροβίλου από 0% ως 120% με βήμα 5%, όσο και το κόστος του υδροστροβίλου.

Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.00$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.05$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.10$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.15$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.20$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.25$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.30$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.35$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.40$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.45$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.50$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.55$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.60$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.65$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.70$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.75$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.80$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.85$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.90$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=0.95$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=1.00$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=1.05$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=1.10$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=1.15$
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για $Q/Q_{nom}=1.20$
Κόστος εγκατάστασης

Πίνακας 9.3 Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης του υδροστροβίλου και του κόστους εγκατάστασης.

Για τα τρίγωνα ABC και το εξεταζόμενο σημείο p ισχύει:

$$E\mu\beta_{ABC} = \begin{bmatrix} H_A & Q_A & 1 \\ H_B & Q_B & 1 \\ H_C & Q_C & 1 \end{bmatrix} \quad (9.9\alpha)$$

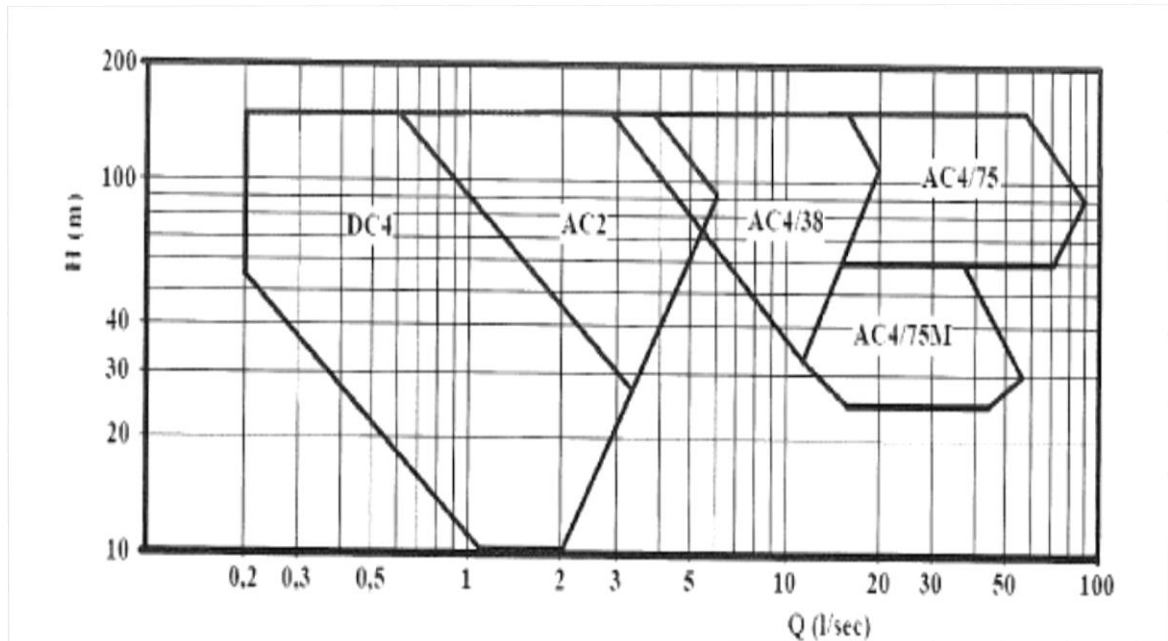
$$\text{Διαφορά εμβαδού} = \frac{|E\mu\beta_{ABC}| + |E\mu\beta_{ApC}| + |E\mu\beta_{ApB}| - |E\mu\beta_{ABC}|}{2} \quad (9.9\beta)$$

Αν η παραπάνω διαφορά είναι 0, τότε το σημείο p είναι εντός του τριγώνου ABC.

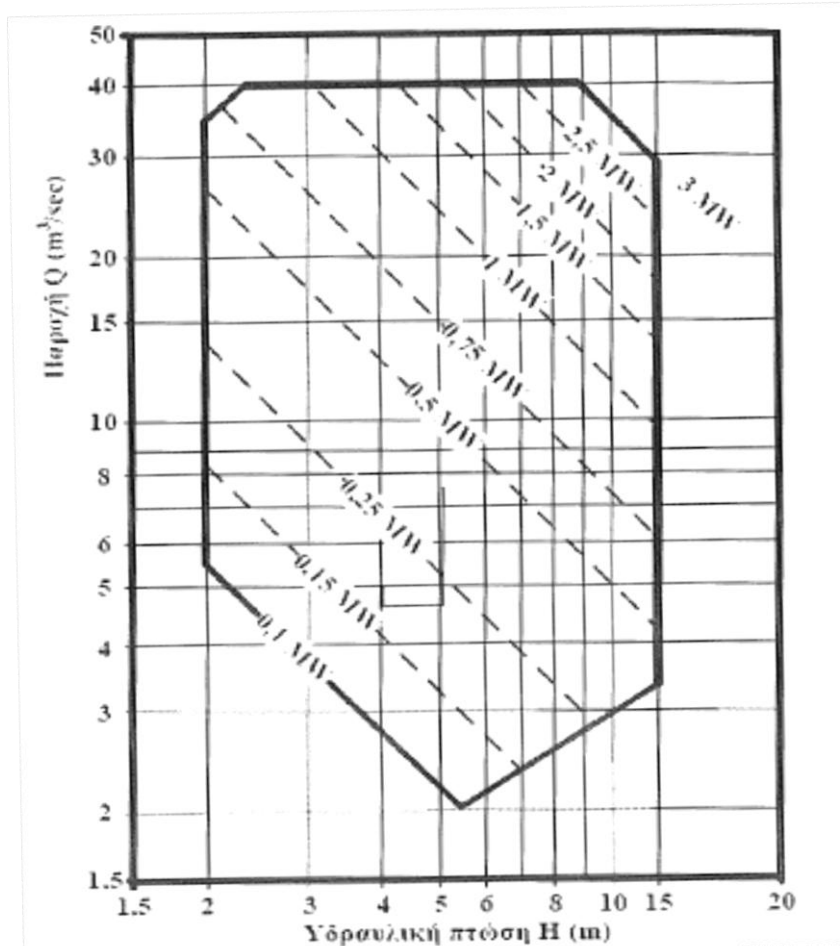
Ως προς τα κόστη χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι 8.32 και τα δεδομένα του Πίνακα 8.4.

Ως προς τους υδροστροβίλους καταγράφηκαν:

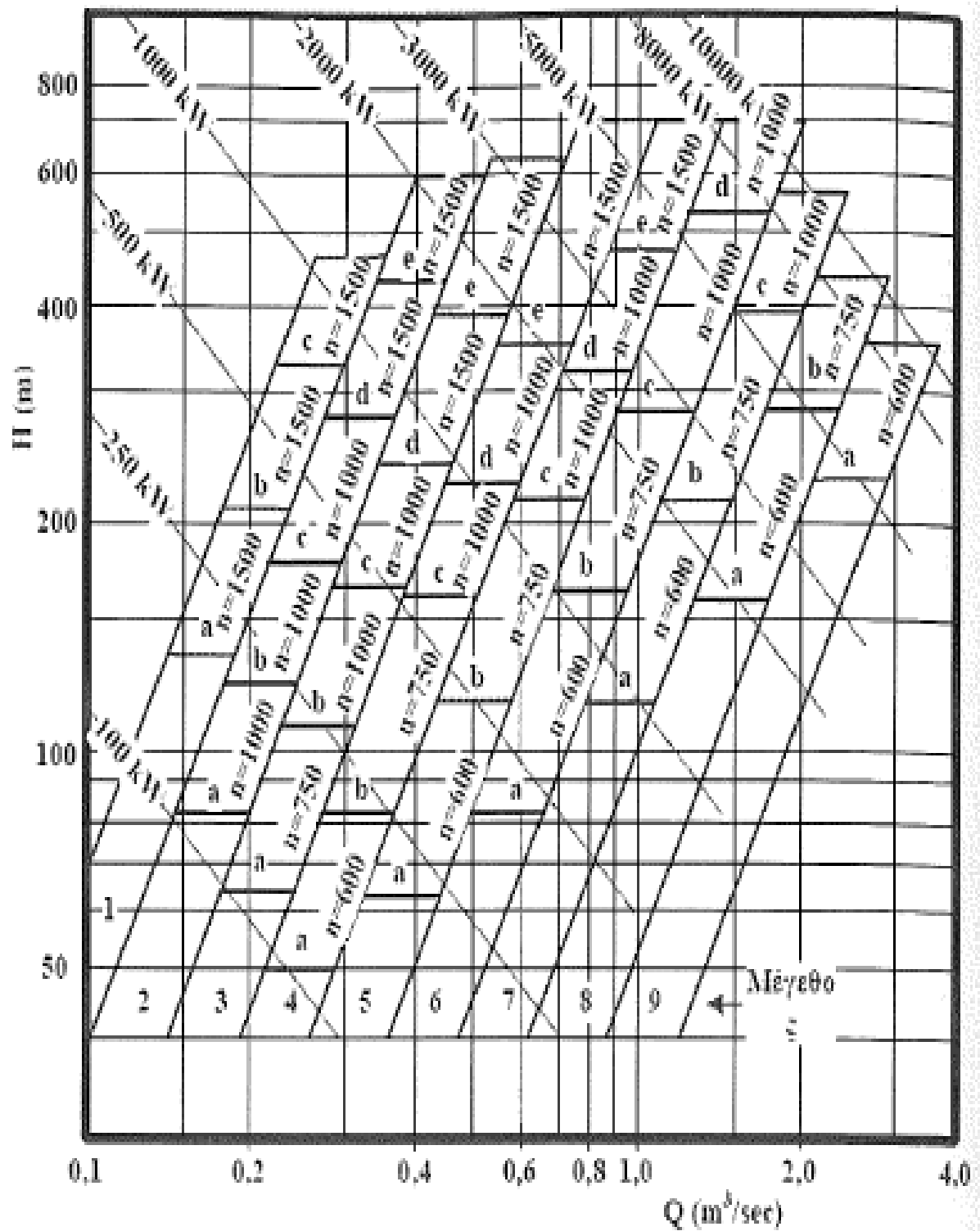
- **180** υδροστροβίλοι Francis της TOSHIBA (Σχήμα 5.23),
- **5** υδροστροβίλοι Pelton της IREM (Σχήμα 9.8 για λόγους διαμόρφωσης αρχείου έχουν τοποθετηθεί 6),
- **9** υδροστροβίλοι Kaplan της Escher-Wyss (Σχήμα 9.9),
- **101** υδροστροβίλοι Pelton της Voith (Σχήμα 5.32 & 9.10) με χαρακτηρισμό για ακροφύσιο 1 «12», για δύο «122», για τέσσερα «124»,
- **20** υδροστροβίλοι Pelton της Bouvier (Σχήμα 9.11). Για λόγους διαμόρφωσης του αρχείου τοποθετήθηκαν **24**, με χαρακτηρισμό για ακροφύσιο 1 «12», για δύο «122», για τρία «123», για τέσσερα «124»,
- **8** υδροστροβίλους οριζόντιου άξονα Francis κλειστού θαλάμου της Sorumsand (Σχήμα 9.12). Για λόγους διαμόρφωσης τοποθετήθηκαν **25**, με χαρακτηρισμό «101» ως ανοικτού θαλάμου οριζόντιου άξονα, με κόστος 95% του τυπικού Francis, και απόδοση μειωμένη κατά 2.5%,
- **19** υδροστροβίλους οριζόντιου άξονα Francis ανοικτού θαλάμου της Voith (σχήμα 5.35α σελ. 287, με χαρακτηρισμό «3») με κόστος 95% του τυπικού Francis, και απόδοση μειωμένη κατά 3% λόγω υποχρεωτικής χρήσης πολλαπλασιαστή στροφών και επίτευξης μίας ταχύτητας 1000 RPM τυπικά.



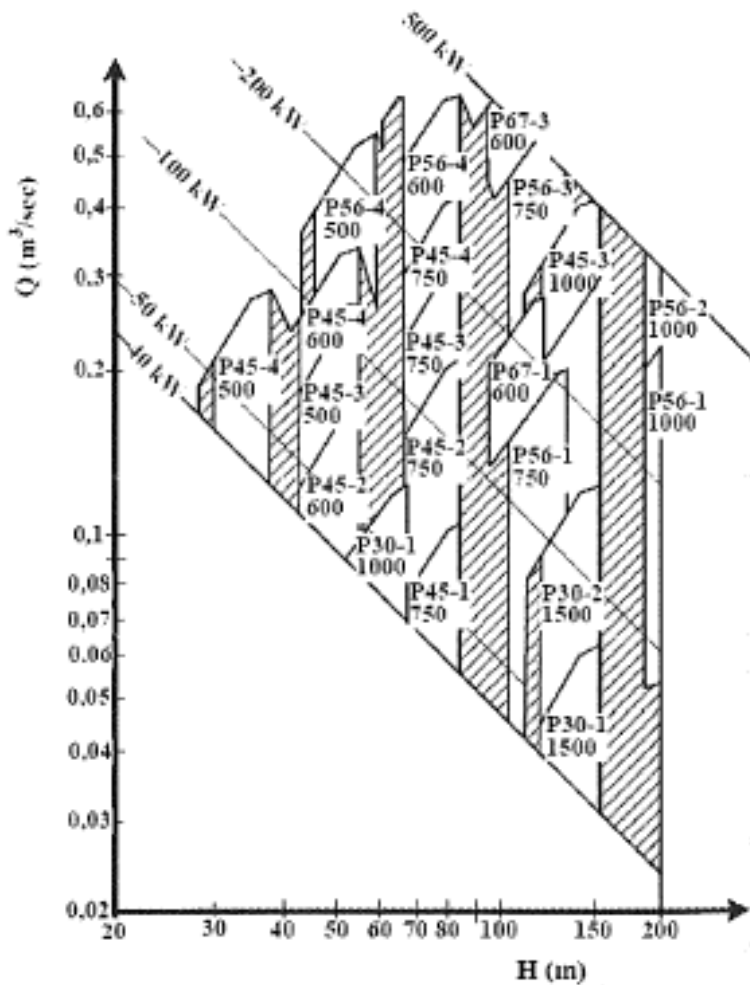
Σχήμα 9.9 Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδροστροβίλων Pelton, πολύ μικρής ισχύος της εταιρείας IREM (Ιταλία) [E21, Σχήμα 5.53]



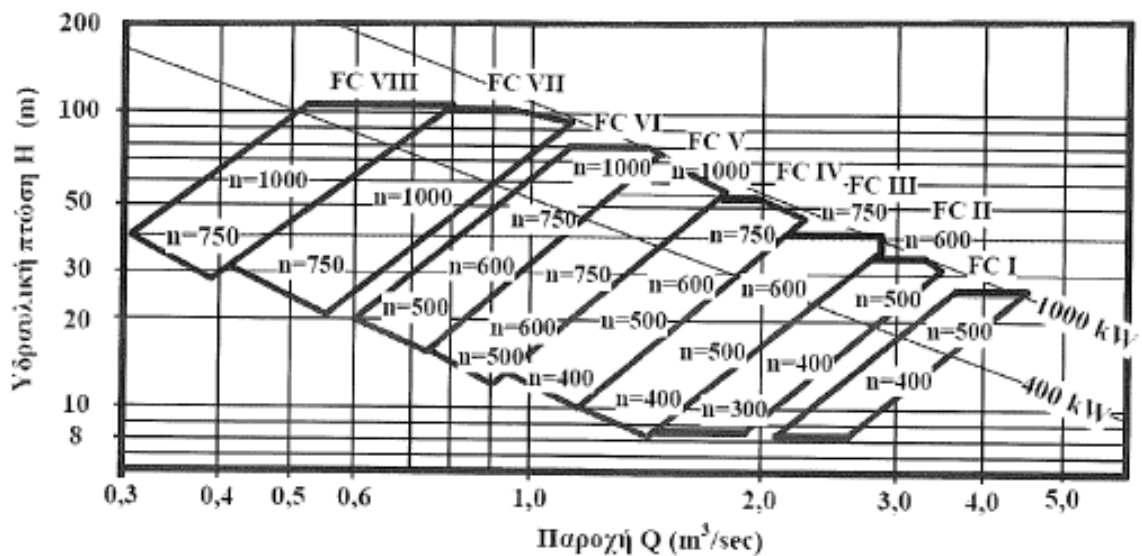
Σχήμα 9.10 Περιοχή τυποποιημένων υδροστροβίλων Kaplan της Escher-Wyss [E21, Σχήμα 5.37α]



Σχήμα 9.11 Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Pelton της εταιρείας Voith με 4 ακροφύσια (κατακόρυφος άξονας), [E21, Σχήμα 5.57γ]

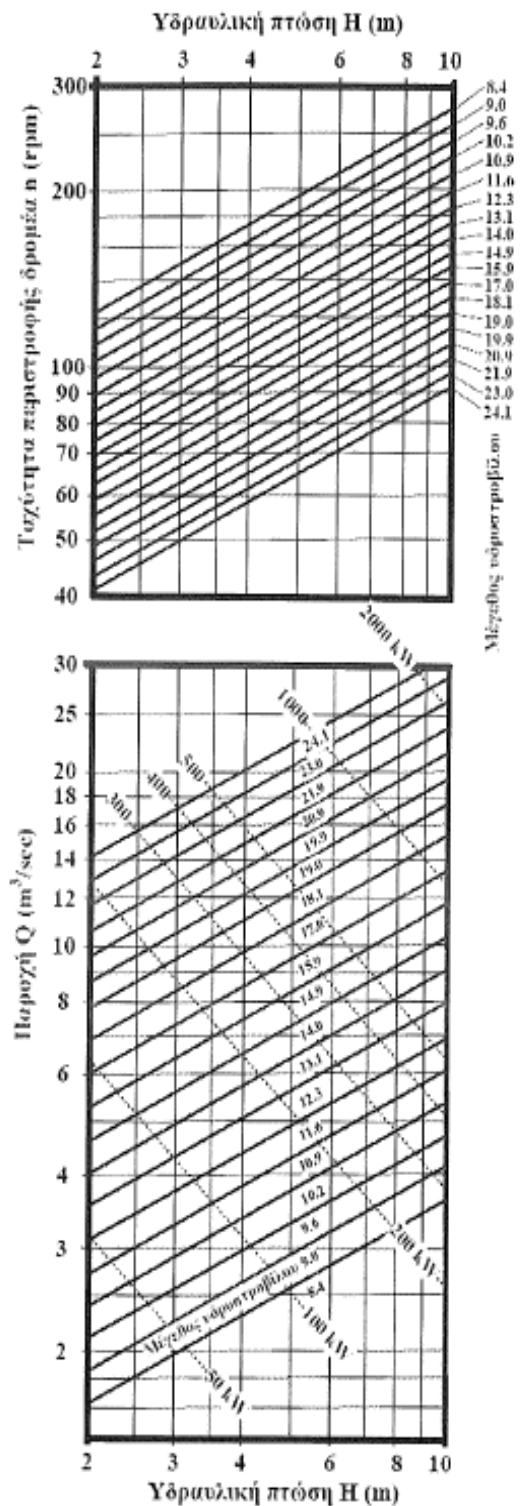


Σχήμα 9.12 Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Pelton της εταιρείας Bouvier (Γαλλία), [E21, Σχήμα 5,55α]



Σχήμα 9.13 Διάγραμμα επιλογής τυποποιημένων υδ/λων Francis, κλειστού θαλάμου της εταιρείας Sorumsand (Νορβηγία), [E21, Σχήμα 5,34α]

M	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	F (m)
8,4	0,85	2,50	1,80	1,30	0,47	1,50
9,0	0,90	2,60	1,80	1,40	0,51	1,58
9,6	0,95	2,75	1,80	1,50	0,53	1,65
10,2	1,00	2,90	1,80	1,60	0,55	1,73
10,9	1,10	3,05	1,80	1,70	0,58	1,80
11,6	1,15	3,20	1,80	1,80	0,60	1,90
12,3	1,25	3,40	1,90	1,95	0,66	2,01
13,1	1,35	3,60	1,90	2,10	0,69	2,13
14,0	1,40	3,85	2,00	2,20	0,73	2,25
14,9	1,50	4,05	2,00	2,35	0,79	2,33
15,9	1,60	4,30	2,00	2,50	0,83	2,46
17,0	1,70	4,50	2,10	2,70	0,87	2,55
18,1	1,80	4,80	2,10	2,85	0,93	2,70
19,0	1,90	5,00	2,20	3,00	0,97	2,82
19,9	2,00	5,20	2,20	3,15	1,02	2,93
20,9	2,10	5,50	2,30	3,30	1,07	3,06
21,9	2,20	5,70	2,30	3,45	1,12	3,20
23,0	2,30	6,00	2,40	3,60	1,17	3,36
24,1	2,40	6,30	2,40	3,80	1,21	3,53



Σχήμα 9.14 Διάγραμμα επιλογής και διαστάσεις τυποποιημένων υδροστροβίλων Francis ανοικτού θαλάμου της εταιρείας Voith [E21, Σχήμα 5.35α]

9.2.3 Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για γεννήτριες σε μικρό υδροηλεκτρικό

Όπως με τους υδροστροβίλους, έτσι και με τις γεννήτριες πραγματοποιήθηκε κατάλληλη διαμόρφωση του αρχείου με τα απαραίτητα δεδομένα, ώστε να μπορέσει να ενταχθεί στο κύριο πρόγραμμα της βελτιστοποίησης του υδροηλεκτρικού. Χρησιμοποιήθηκαν **317** γεννήτριες:

- 172 σύγχρονες (8 γενικής μορφής, 164 της εταιρείας Marelli),
- 145 ασύγχρονες (24 γενικής μορφής, 121 της εταιρείας Marelli)

A/A
Τυπος Γεννήτριας
Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς [kVA]
Ζεύγη Πόλων
Ταχύτητα περιστροφής [RPM]
Ονομαστική Τάση [V]
Ονομαστικός Συντελεστής Φορτίου $\cos\varphi$ [-]
Ονομαστική απόδοση [-]

Πίνακας 9.4 Δεδομένα προγραμματισμού (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4) για ανάλυση γεννητριών

Όπου, για το είδος της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω ενδείξεις:

- 1: Σύγχρονη
- 2: Ασύγχρονη
- 3: DC

Το κόστος της γεννήτριας σχετίζεται άμεσα με την ονομαστική της ισχύς για $\cos\varphi = 0.9$, σε MW και περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα.

$$\text{Για } N < 1,3 \text{ MW} \quad C = 26N^2 + 76,6N + 33,6 \text{ σε kEUR (9.10)}$$

$$\text{Για } 1,3 \text{ MW} < N < 13 \text{ MW} \quad C = -2N^2 + 126N + 116 \text{ σε kEUR (9.11)}$$

Επιπλέον, το κόστος της ασύγχρονης γεννήτριας λαμβάνεται μικρότερο από αυτό της σύγχρονης κατά 5%.

Για όλες τις παραπάνω, προέκυψαν τόσο η καμπύλη απόδοσης του γεννήτριας από 0% ως 120% με βήμα 5%, όσο και το κόστος της γεννήτριας.

Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.00
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.05
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.10
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.15
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.20
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.25
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.30
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.35
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.40
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.45
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.50
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.55
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.60
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.65
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.70
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.75
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.80
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.85
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.90
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.95
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.00
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.05
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.10
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.15
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.20
Κόστος εγκατάστασης

Πίνακας 9.5 Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης της γεννήτριας και του κόστους εγκατάστασης.

9.2.4 Διαμόρφωση αρχείου εισόδου για μετασχηματιστές σε μικρό υδροηλεκτρικό

Όπως με τους υδροστροβίλους και τις γεννήτριες, έτσι και με τους μετασχηματιστές πραγματοποιήθηκε κατάλληλη διαμόρφωση του αρχείου με τα απαραίτητα δεδομένα, ώστε να μπορέσει να ενταχθεί στο κύριο πρόγραμμα της βελτιστοποίησης του υδροηλεκτρικού. Για μετασχηματιστές διαφορετικών επιπέδων εισόδου τάσης δεν μεταβάλλεται, γιατί από τη μια μειώνεται η χρήση

χαλκού ως προς διατομή, σπείρες, ανεβαίνει κόστος μόνωσης / μονωτήρων και της μη συνηθισμένης παραγωγής. Εδώ θεωρήθηκαν όλοι ελαίου.

Χρησιμοποιήθηκαν **43** μετασχηματιστές γενικής μορφής:

- 16 των 400 V / 20 kV,
- 9 των 690 V / 20 kV,
- 9 των 3000 V / 20 kV,
- 9 των 6600 V / 20 kV

A/A
Τυπος Μετασχηματιστή
Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς [kVA]
V_{nom1} [V]
V_{nom2} [V]
Ονομαστική απόδοση [-]

Πίνακας 9.6 Δεδομένα προγραμματισμού (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5) για ανάλυση μετασχηματιστών

Το κόστος C του τριφασικού μετασχηματιστή ισχύος από τη χαμηλή τάση (XT) της γεννήτριας στη μέση τάση (MT) των 20 kV, σχετίζεται με την ισχύ N σε MW και δίνεται από την παρακάτω σχέση διορθωμένη σε kVA .

$$C = 0,0135N^2 + 14,25N + 33,375 \text{ σε kEUR} \quad (9.12)$$

Για όλες τις παραπάνω, προέκυψαν τόσο η καμπύλη απόδοσης του μετασχηματιστή από 0% ως 120% με βήμα 5%, όσο και το κόστος του.

Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.00$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.05$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.10$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.15$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.20$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.25$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.30$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.35$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.40$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.45$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.50$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.55$
Ποσοστό απόδοσης n_{factor_nom} για $S/S_{nom}=0.60$

Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.65
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.70
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.75
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.80
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.85
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.90
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=0.95
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.00
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.05
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.10
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.15
Ποσοστό απόδοσης n_factor_nom για S/Snom=1.20
Κόστος εγκατάστασης

Πίνακας 9.7 Αποτελέσματα της καμπύλης απόδοσης του μετασχηματιστή και του κόστους εγκατάστασης.

9.2.5 Κύρια Μελέτη Εφαρμογής για μικρό υδροηλεκτρικό

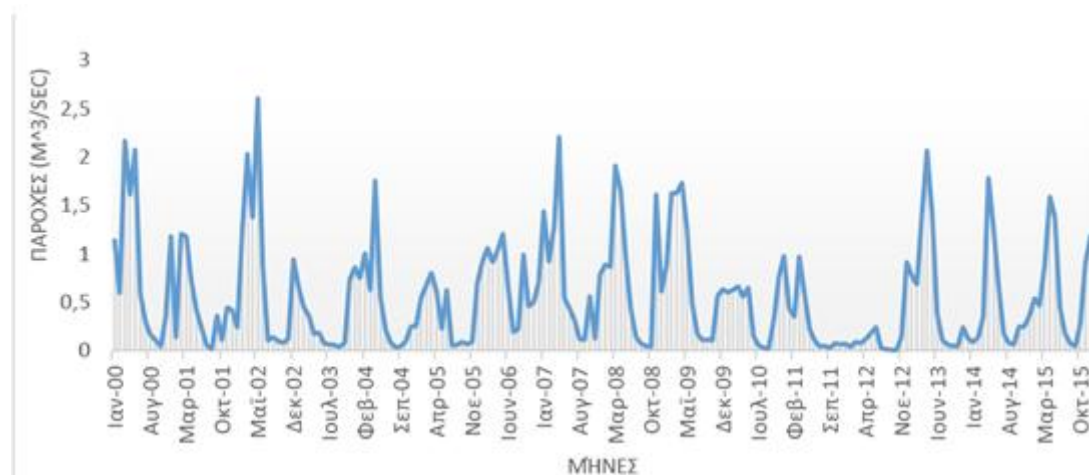
Για την εφαρμογή του κυρίου προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα:

1. Αποτελέσματα Χάραξης (επιτυχή)
2. Στρόβιλοι
3. Γεννήτριες
4. Μετασχηματιστές
5. Σωλήνες
6. Χρονολογική καμπύλη μέσης μηνιαίας παροχής

Συγκεκριμένα, για την χρονολογική καμπύλη παροχής χρησιμοποιήθηκαν υδρολογικά δεδομένα 15 ετών, από το 2000 έως το 2015 για όλους του μήνες κάθε έτους. Οι μετρήσεις της φυσικής παροχής πραγματοποιήθηκαν σε μηνιαία βάση από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Το σταθμήμετρο ήταν εγκατεστημένο σε συγκεκριμένο σημείο, με γεωγραφικό μήκος 21° 34' και γεωγραφικό πλάτος 39° 52', με υψόμετρο 300m.

Έτος / Μήνας	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2000	0,044	0,349	1,180	1,140	0,601	2,167	1,616	2,073	0,595	0,300	0,169	0,112
2001	0,112	0,448	0,421	0,142	1,208	1,180	0,731	0,418	0,235	0,059	0,020	0,366
2002	0,082	0,125	0,942	0,240	1,275	2,031	1,380	2,608	0,868	0,108	0,142	0,103
2003	0,083	0,734	0,865	0,650	0,453	0,363	0,173	0,191	0,076	0,066	0,059	0,040
2004	0,100	0,254	0,255	0,752	1,011	0,631	1,755	0,550	0,219	0,087	0,034	0,048
2005	0,070	0,092	0,705	0,552	0,679	0,805	0,609	0,233	0,624	0,055	0,062	0,091
2006	0,461	0,503	0,715	0,926	1,062	0,916	1,048	1,210	0,654	0,194	0,225	0,992
2007	0,561	0,130	0,784	1,438	0,928	1,281	2,207	0,546	0,437	0,316	0,119	0,117
2008	0,042	1,612	0,614	0,891	0,864	1,910	1,665	0,956	0,439	0,147	0,072	0,049
2009	0,108	0,564	0,638	0,884	1,630	1,628	1,736	1,262	0,495	0,179	0,110	0,118
2010	0,318	0,770	0,980	0,602	0,628	0,665	0,559	0,654	0,153	0,056	0,031	0,021
2011	0,080	0,066	0,072	0,438	0,352	0,973	0,589	0,218	0,107	0,043	0,050	0,032
2012	0,006	0,143	0,916	0,041	0,092	0,079	0,125	0,181	0,245	0,033	0,015	0,011
2013	0,048	0,244	0,129	0,782	0,687	1,432	2,067	1,398	0,382	0,112	0,063	0,050
2014	0,255	0,249	0,358	0,090	0,144	0,350	1,783	1,249	0,664	0,175	0,084	0,650
2015	0,279	0,908	1,185	0,543	0,467	0,880	1,594	1,386	0,440	0,182	0,078	0,047

Πίνακας 9.8 Συνολικές μέσες μηνιαίες παροχές του Κεφαλοποτάμου 2000 – 2015 [E16, Πίνακας 12]



Σχήμα 9.15 Υδρογράφημα μέσω μηνιαίων παροχών [E16, Σχήμα 5]

Τα σταθερά στοιχεία στην ένταξη προγράμματος θεωρούνται τα παρακάτω:

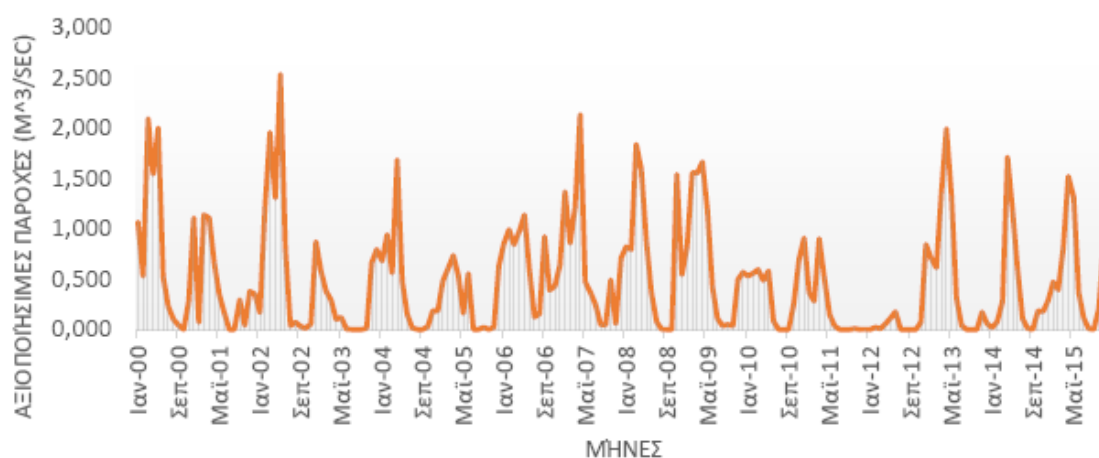
- Τα ποσοστά της *οικολογικής παροχής* που αναφέρονται και στο κεφάλαιο 3.4, σύμφωνα με τον Ν. 49828/2008 (ΦΕΚ 2464 Β/2008) είναι τα εξής:
 - ✓ 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου (0,063 m³/s, βάσει πίνακα 9.8), ή το
 - ✓ 50% της μέσης παροχής του μηνός Σεπτεμβρίου, (0,071 m³/s βάσει πίνακα 9.8) ή το

- ✓ 30 lt/sec, δηλ. 0,030 m³/s σε κάθε περίπτωση (σύμφωνα με υπουργική απόφαση).

Από όλα τα παραπάνω, επιλέγεται η περίπτωση που δίνει το μεγαλύτερο αποτέλεσμα, δηλαδή ως οικολογική παροχή ορίζεται το 0,71 m³/s. Έτσι, προκύπτει ο Πίνακας 9.9 και το Σχήμα 9.15.

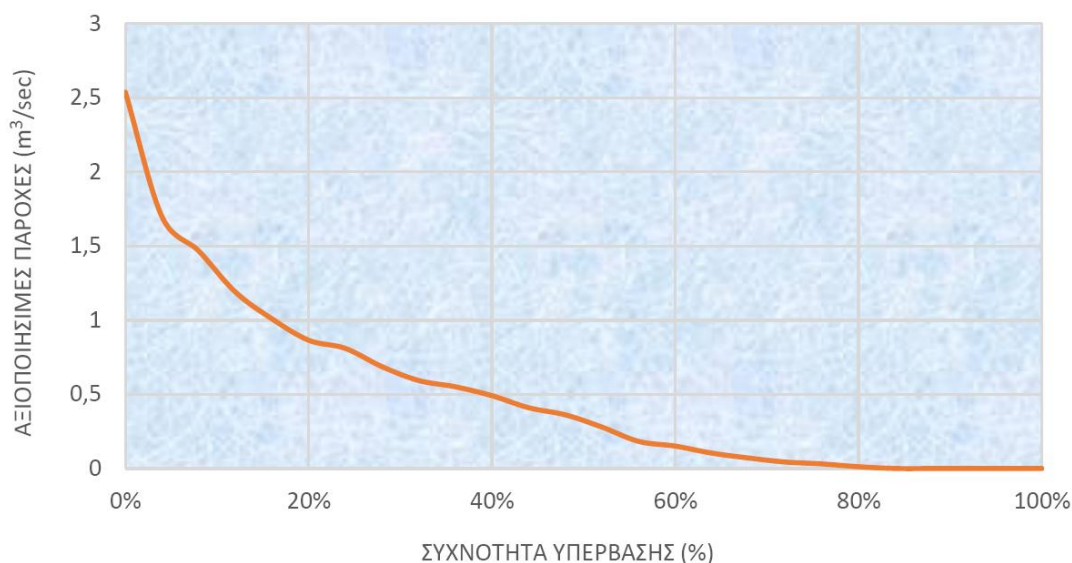
Έτος / Μήνας	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2000	0,000	0,278	1,109	1,069	0,530	2,096	1,545	2,002	0,524	0,229	0,098	0,041
2001	0,041	0,377	0,350	0,071	1,137	1,109	0,660	0,347	0,164	0,000	0,000	0,295
2002	0,011	0,054	0,871	0,169	1,204	1,960	1,309	2,537	0,797	0,037	0,071	0,032
2003	0,012	0,663	0,794	0,579	0,382	0,292	0,102	0,120	0,005	0,000	0,000	0,000
2004	0,029	0,183	0,184	0,681	0,940	0,560	1,684	0,479	0,148	0,016	0,000	0,000
2005	0,000	0,021	0,634	0,481	0,608	0,734	0,538	0,162	0,553	0,000	0,000	0,020
2006	0,390	0,432	0,644	0,855	0,991	0,845	0,977	1,139	0,583	0,123	0,154	0,921
2007	0,490	0,059	0,713	1,367	0,857	1,210	2,136	0,475	0,366	0,245	0,048	0,046
2008	0,000	1,541	0,543	0,820	0,793	1,839	1,594	0,885	0,368	0,076	0,001	0,000
2009	0,037	0,493	0,567	0,813	1,559	1,557	1,665	1,191	0,424	0,108	0,039	0,047
2010	0,247	0,699	0,909	0,531	0,557	0,594	0,488	0,583	0,082	0,000	0,000	0,000
2011	0,009	0,000	0,001	0,367	0,281	0,902	0,518	0,147	0,036	0,000	0,000	0,000
2012	0,000	0,072	0,845	0,000	0,021	0,008	0,054	0,110	0,174	0,000	0,000	0,000
2013	0,000	0,173	0,058	0,711	0,616	1,361	1,996	1,327	0,311	0,041	0,000	0,000
2014	0,184	0,178	0,287	0,019	0,073	0,279	1,712	1,178	0,593	0,104	0,013	0,579
2015	0,208	0,837	1,114	0,472	0,396	0,809	1,523	1,315	0,369	0,111	0,007	0,000
Μ.Ο.	0,104	0,379	0,601	0,563	0,684	1,010	1,156	0,875	0,344	0,068	0,027	0,124
Ελάχιστες	0,000	0,000	0,001	0,000	0,021	0,008	0,054	0,110	0,005	0,000	0,000	0,000
Μέγιστες	0,490	1,541	1,114	1,367	1,559	2,096	2,136	2,537	0,797	0,245	0,154	0,921

Πίνακας 9.9 Αξιοποιήσιμες μέσες μηνιαίες παροχές του Κεφαλοποτάμου 2000 – 2015 [E16, Πίνακας 13]



Σχήμα 9.16 Υδρογράφημα αξιοποιήσιμων μηνιαίων παροχών [E16, Σχήμα 6]

Από τη συχνότητα εμφάνισης των τιμών των παροχών για τα 15 συναπτά έτη του πίνακα 9.9, προκύπτει μέσω bubblesort η καμπύλη διάρκειας παροχής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.16.



Σχήμα 9.17 Καμπύλη διάρκειας αξιοποιήσιμης παροχής [E16, Σχήμα 7]

Με την παραπάνω καμπύλη, κάνοντας ρύθμιση του κανονικού σημείου λειτουργίας της παροχής με βήμα 0,01, βρίσκονται όλα τα σημεία, εκείνα που αντιστοιχούν στην καμπύλη διάρκειας παροχής και βρίσκονται ενδιάμεσα της αρχικής και τελικής παροχής.

- Ρύθμιση κανονικού σημείου λειτουργίας: Ο λόγος είναι ο ανηγμένος χρόνος της καμπύλης διάρκειας παροχής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ονομαστικής παροχής. (Ανεξαρτήτου χρόνου, η αξιοποιήσιμη παροχή είναι ίση ή μεγαλύτερη της ονομαστικής παροχής.)
 - ✓ Λόγος αρχικής παροχής: 0,05 [-]
 - ✓ Λόγος τελικής παροχής: 0,50 [-]
 - ✓ Βήμα: 0,01 [-]
- Τα γεωμετρικά στοιχεία:
 - ✓ Μήκος φράγματος: 12 [m], για $p = 15\%$, δηλαδή για ονομαστική παροχή που αντιστοιχεί στο 15% του χρόνου της καμπύλης διάρκειας παροχής.
 - ✓ Ύψος φράγματος: 2,45 [m]
 - ✓ Μήκος δεξαμενής καθίζησης υπό μορφή καναλιού: 28 [m]
 - ✓ Μήκος δρόμου: 2 [km]
 - ✓ Μήκος γραμμής δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος: 5 [km]

- Τα *οικονομικά στοιχεία*:
 - ✓ Ενεργειακό κόστος: 0,08785 [€/kWh]
 - ✓ Επιτόκιο: 5%
 - ✓ Έτη κατασκευής: 2 [yr]
 - ✓ Έτη μελέτης: 25 [yr]
 - ✓ Ποσοστό κόστους λειτουργίας: 15%

Για τις 69.406 πιθανές διαδρομές «Υδροληψίας – Απόληξης Αγωγού Φυγής», δίνεται το μήκος, το ύψος, ο τρόπος διαδρομής, το μήκος της κοίτης και η υψομετρική διαφορά. Στη συνέχεια, για κάθε ένα σενάριο με το μήκος, το ύψος και την παροχή ανά εύρος, μέσω του κύριου προγράμματος βρίσκεται ο κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δηλαδή σωλήνας - στρόβιλος – γεννήτρια – μετασχηματιστής και στην πορεία υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς και μέσα από οικονομική ανάλυση εντοπίζεται η βέλτιστη λύση.

Λόγω του τεράστιου όγκου των επιτυχών αποτελεσμάτων χάραξης (69.406 πιθανές διαδρομές), αποφασίστηκε να ενταχθούν στο κύριο πρόγραμμα με βάση κάποια κριτήρια, ώστε να πραγματοποιηθούν γρηγορότερα οι δοκιμές. Θεωρητικά, αν κάποιος ήθελε να τις ελέγξει όλες με έναν υπολογιστή θα χρειαζόταν αρκετούς μήνες, έως και έτος.

Το πρώτο κριτήριο που τέθηκε, ώστε να συντομευτεί η διαδικασία είναι η επιλογή των 1000 πρώτων λύσεων με το μεγαλύτερο λόγο ύψους προς μήκος σωλήνα από το σύνολο των χαράξεων. Δυστυχώς όμως, απέτυχε, γιατί δεν βρέθηκε καμία οικονομικά βιώσιμη λύση. Το δεύτερο κριτήριο που επιλέχθηκε αφορά στις 1000 λύσεις με το μεγαλύτερο ύψος, με τη λογική της εκμετάλλευσης της μέγιστης υψομετρικής διαφοράς, το οποίο και έδωσε θετικά αποτελέσματα.

Η τελική μορφή των αποτελεσμάτων δίνει τα παρακάτω δεδομένα

1. A/A σεναρίου χάραξης υπό εξέταση,
2. Μήκος κοίτης,
3. Μήκος σωλήνα,
4. Μεικτή υψομετρική διαφορά,
5. Τύπος στροβίλου,
6. Ονομαστική ισχύς στροβίλου
7. Τύπος γεννήτριας,
8. Ονομαστική φαινόμενη ισχύς γεννήτριας,
9. Τύπος μετασχηματιστή,
10. Ονομαστική φαινόμενη ισχύς μετασχηματιστή,
11. Τύπος σωλήνα
12. Ονομαστική διάμετρος σωλήνα

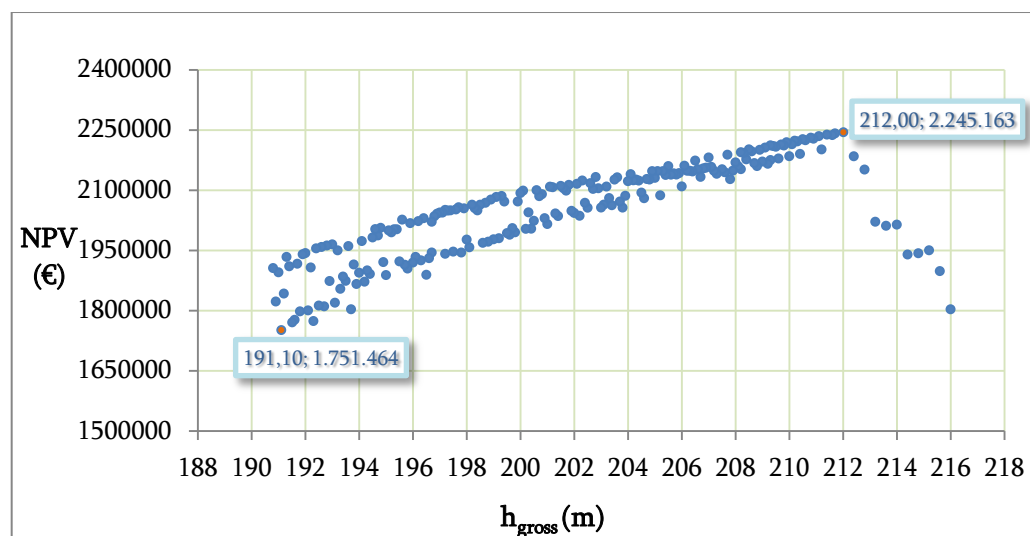
13. Ετήσια ενέργεια (kWh)
14. Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης Ναξιοποίησιμο/Νδιαθέσιμο
15. Λόγος χρόνου λειτουργίας στο έτος
16. Συνολικό κόστος εγκατάστασης
17. Καθαρή παρούσα αξία NPV
18. Λόγος οφέλους – κόστους BCR
19. Περίοδος αποπληρωμής
20. Αποπληθωρισμένο επιτόκιο ανάκτησης κεφαλαίου IRR

9.3 Αποτελέσματα

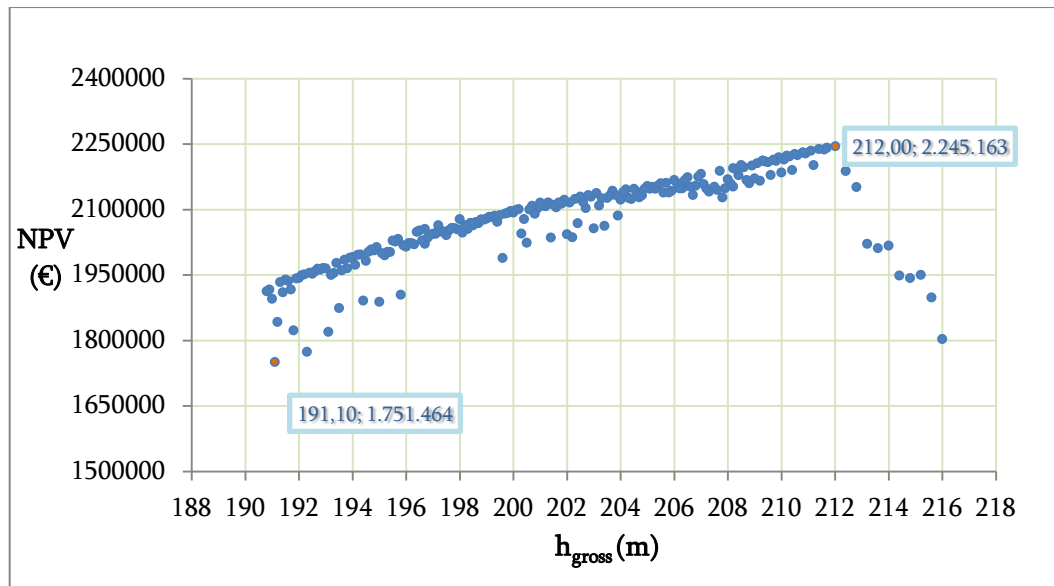
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις τέσσερις οικονομικές μεταβλητές που εξετάστηκαν, καθώς και του βαθμού ενεργειακής απόδοσης. Για τις οικονομικές μεταβλητές εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις:

- Χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης (no_eed)
- Συνυπολογίζοντας τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης (eed)

Καθαρή παρούσα αξία NPV



Σχήμα 9.18 Καθαρή παρούσα αξία (NPV) σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.



Σχήμα 9.19 Καθαρή παρούσα αξία (NPV) σε σχέση με το μεικτό ύψος λαμβάνοντας υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.

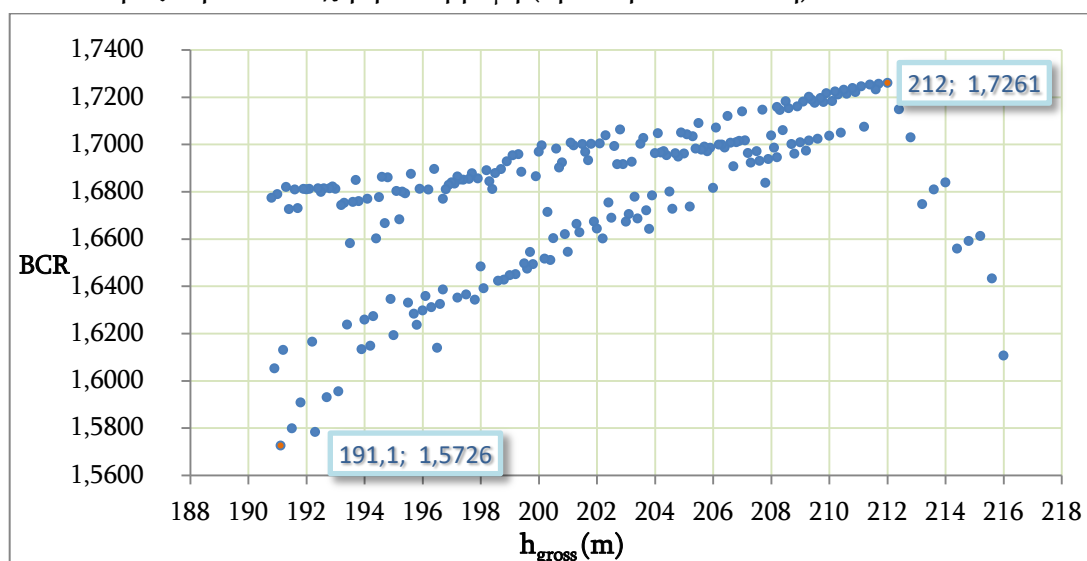
- ❖ Βέλτιστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 212 \text{ [m]} / \text{NPV} = 2.245.163 \text{ [€]}$
- ❖ Χείριστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 191,1 \text{ [m]} / \text{NPV} = 1.751.464 \text{ [€]}$

Για να είναι βιώσιμη η επένδυση θα πρέπει η NPV να είναι θετική και τα έργα με αρνητικές τιμές να απορρίπτονται. Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται πως είτε λαμβάνοντας, είτε όχι, υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης, η βέλτιστη, αλλά και η χείριστη λύση μεταξύ των 1000 περιπτώσεων που εξετάστηκαν είναι η ίδια. Ακόμα, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους, φαίνεται η διαφορά της διασποράς των τιμών λόγω της ενεργειακής αξιοποίησης. Δηλαδή, φαίνεται πως υπάρχουν τιμές που απορρίφθηκαν, λόγω της μη ενεργειακής αξιοποίησης. Επιπλέον, μία παρατήρηση που μπορεί να γίνει για τις τιμές στα δεξιά των διαγραμμάτων, είναι ότι οι λύσεις που εμφανίζονται παρουσιάζουν μικρότερο NPV, κάτι που οφείλεται στην επιλογή της μικρότερης διαμέτρου του σωλήνα, εξαιτίας του μεγαλύτερου ύψους με την ίδια εξεταζόμενη ονομαστική παροχή από την καμπύλη διάρκειας φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται το κόστος του σωλήνα, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων πίεσης. Όταν η διάμετρος είναι μικρότερη οι τριβές αυξάνουν, καθώς επίσης μικραίνει και ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης, αφού περιορίζεται η ωφέλιμη ενέργεια.

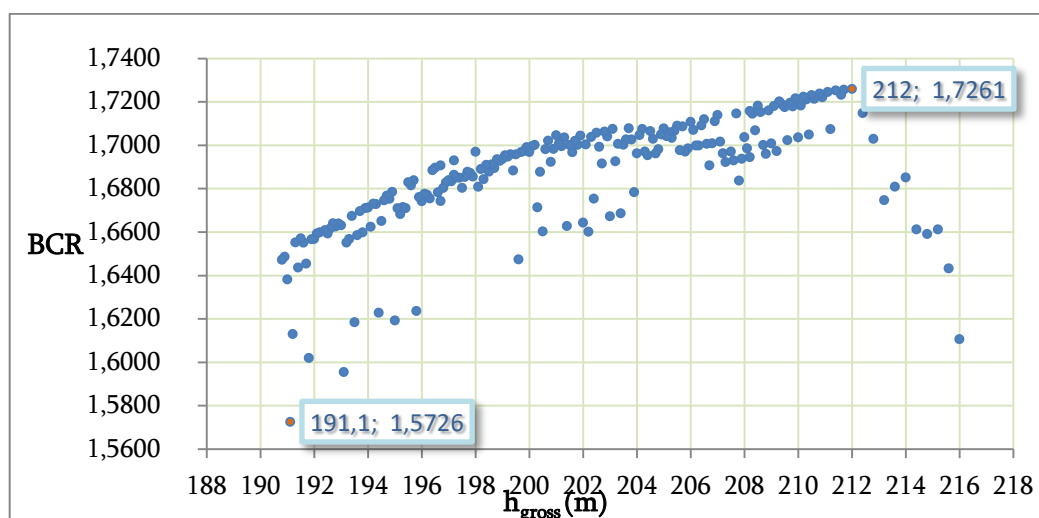
Κριτήριο οφέλους – κόστους επένδυσης (BCR)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εικόνα για το κριτήριο οφέλους - κόστους της επένδυσης (BCR), για τον οποίο, όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο με την οικονομική ανάλυση, ισχύουν τα παρακάτω:

- Αν ο BCR είναι μεγαλύτερος της μονάδας, επιτρέπεται η επιλογή του επενδυτικού σχεδίου,
- Αν ο BCR είναι μικρότερος της μονάδας, απορρίπτεται το επενδυτικό σχέδιο,
- Αν ο BCR είναι ίσος με τη μονάδα, υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή απόρριψη (οριακή κατάσταση).



Σχήμα 9.20 Λόγος Οφέλους - Κόστους (BCR) σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.



Σχήμα 9.21 Λόγος Οφέλους - Κόστους (BCR) σε σχέση με το μεικτό ύψος λαμβάνοντας υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.

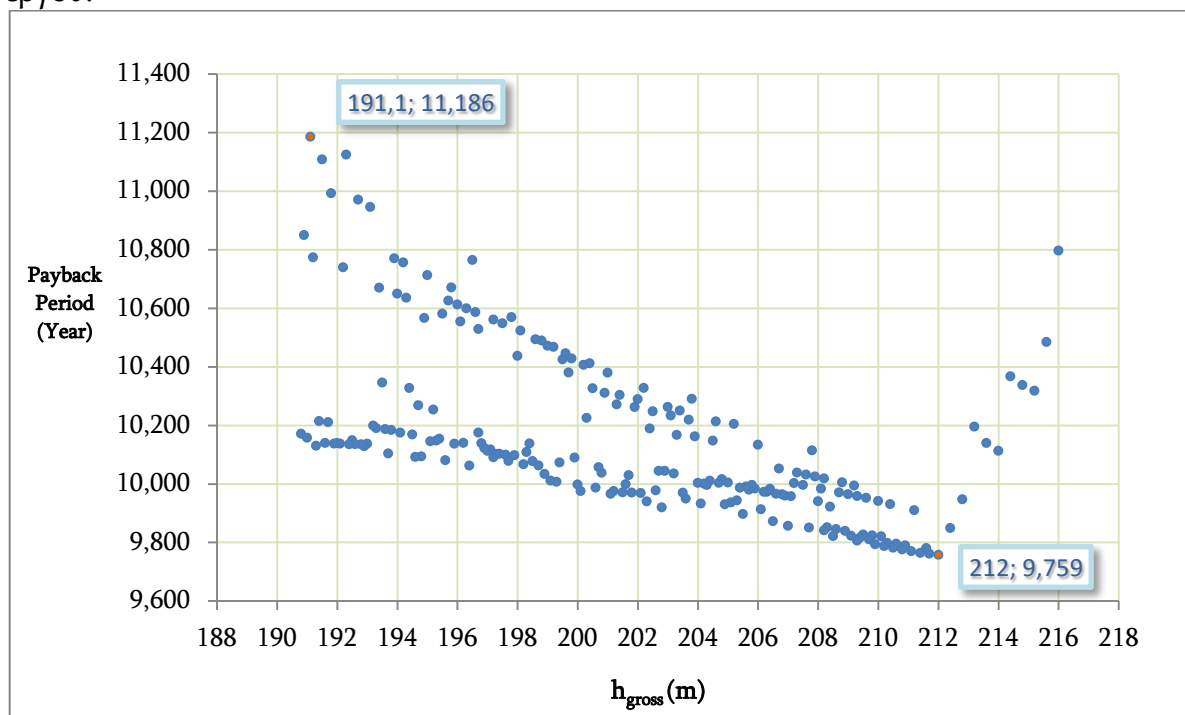
Και σε αυτό το οικονομικό κριτήριο, στον λόγο οφέλους – κόστους, φαίνεται πως είτε λαμβάνοντας υπόψη, είτε όχι, τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης, η βέλτιστη, αλλά και η χειρίστη λύση μεταξύ των 1000 περιπτώσεων που εξετάστηκαν είναι η ίδια.

- ❖ Βέλτιστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 212 \text{ [m]} / \text{BCR} = 1,7261 \text{ [-]}$
- ❖ Χειρίστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 191,1 \text{ [m]} / \text{BCR} = 1,5726 \text{ [-]}$

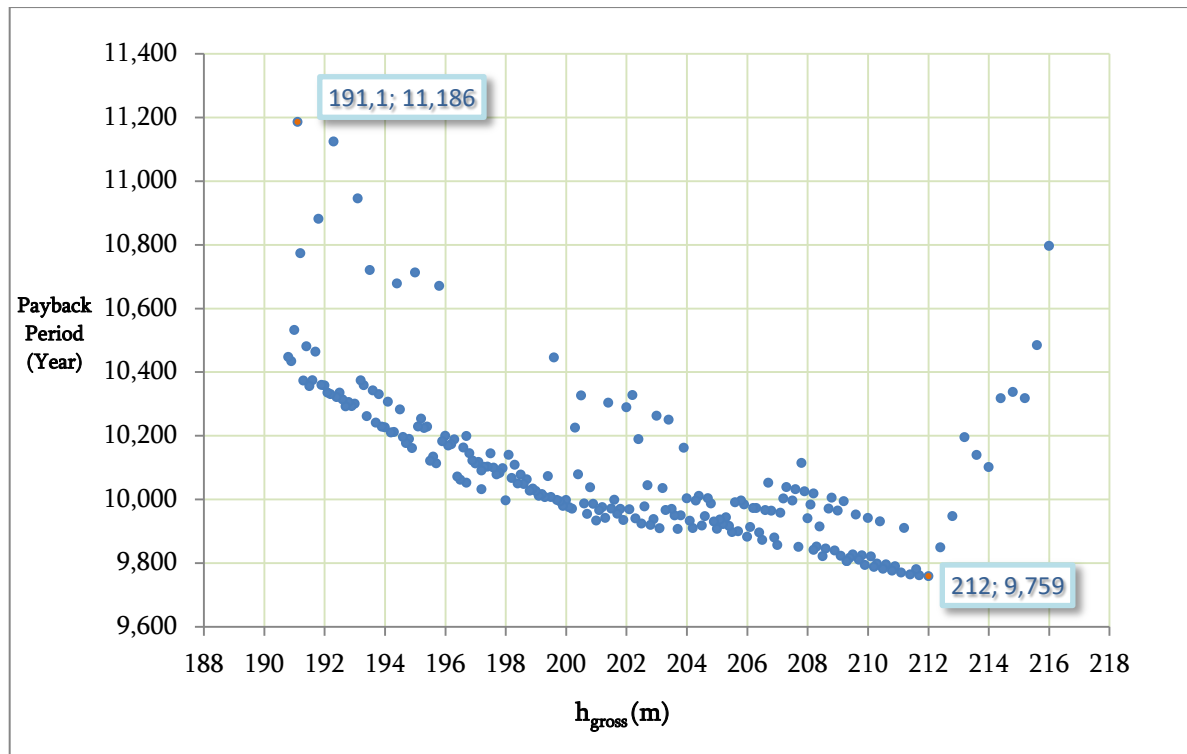
Ομοίως, με το προηγούμενο οικονομικό μέγεθος η χρήση του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης περιορίζει τις αποδεκτές λύσεις και συνήθως οδηγεί σε πιο βιώσιμες λύσεις. Αντίστοιχα, και εδώ στο δεξί κομμάτι των διαγραμμάτων επιλέγεται μικρότερη διάμετρος σωλήνωσης για τις συγκεκριμένες διαδρομές, λόγω μεγαλύτερου ύψους, και έτσι δημιουργούνται μεγαλύτερες τριβές. Αυτό οδηγεί στο να αξιοποιείται λιγότερη παροχή από την διαθέσιμη, άρα να χάνεται φορτίο και να μην δίνει βιώσιμες λύσεις.

Χρόνος αποπληρωμής

Το επόμενο οικονομικό κριτήριο που αναλύεται είναι ο χρόνος αποπληρωμής του έργου, δηλαδή το πλήθος των ετών που απαιτείται, προκειμένου τα καθαρά έσοδα του έργου να μπορέσουν να καλύψουν το συνολικό ποσό της επένδυσης. Για να μπορέσει να είναι βιώσιμη μία τέτοια λύση ο χρόνος αποπληρωμής, δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 5 με 10 έτη λειτουργίας του μικρού υδροηλεκτρικού έργου.



Σχήμα 9.22 Χρόνος αποπληρωμής σε σχέση με το μεικτό ύψος χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης (συμπερ. τα 2 έτη κατασκευής)



Σχήμα 9.23 Χρόνος αποπληρωμής σε σχέση με το μεικτό, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης (συμπ. τα 2 έτη κατασκευής)

Όπως και στα 2 προηγούμενα οικονομικά μεγέθη, έτσι και σε αυτό φαίνεται πως είτε λαμβάνοντας υπόψη, είτε όχι, τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης, η βέλτιστη, αλλά και η χειρίστη λύση μεταξύ των 1000 περιπτώσεων που εξετάστηκαν είναι η ίδια.

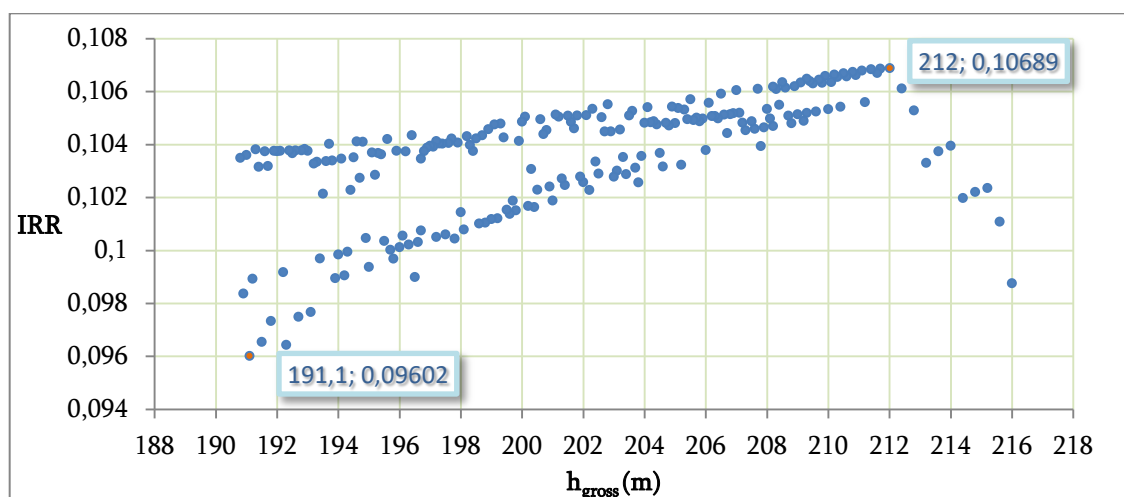
- ❖ Βέλτιστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 212 \text{ [m]} / \text{Payback period} = 9,759 - 2 = 7,759[-]$
- ❖ Χειρίστη Λύση: $h_{\text{gross}} = 191,1 \text{ [m]} / \text{Payback period} = 11,186 - 2 = 9,186[-]$

Όπου, το 2 αντιστοιχεί στα έτη κατασκευής.

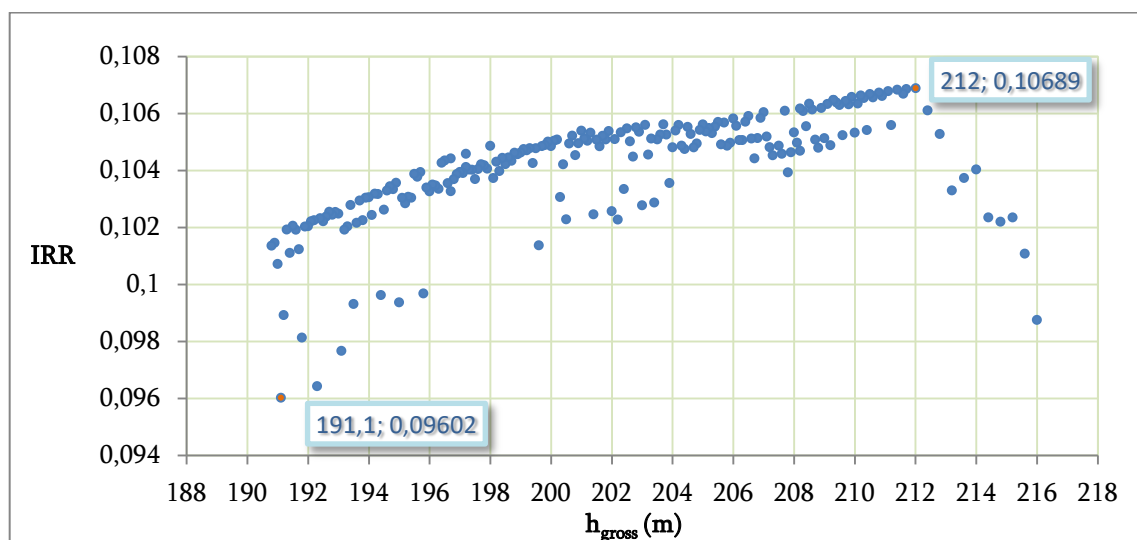
Επιπλέον, είναι εμφανές πως στη δεύτερη περίπτωση, Σχήμα 9.23, περισσότερες λύσεις είναι αυτές που παρουσιάζουν μικρότερο χρόνο αποπληρωμής, αφού στη υπάρχει ο περιορισμός της ενεργειακής αξιοποίησης να είναι άνω των 75%, για την ακρίβεια για τις συγκεκριμένες λύσεις ξεκινάει από το 81,9% και φτάνει ως το 90,9%. Στην 1η περίπτωση, όπου δε λαμβάνεται ο συγκεκριμένος περιορισμός υπόψη, ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης ξεκινάει από 67,5% και φτάνει στο 90,9%.

Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)

Το τελευταίο οικονομικό κριτήριο που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης που ορίζεται ως το επιτόκιο αναγωγής που μηδενίζει την καθαρή παρούσα αξία (NPV). Κατά την αξιολόγηση ενός επενδυτικού σχεδίου, για να κριθεί βιώσιμο, θα πρέπει να έχει $IRR > 5\%$, που αφορά στο ενδεικτικό αποπληθωρισμένο επιτόκιο της συγκεκριμένης επένδυσης.



Σχήμα 9.24 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με το μεικτό ύψος, χωρίς να ληφθεί υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.



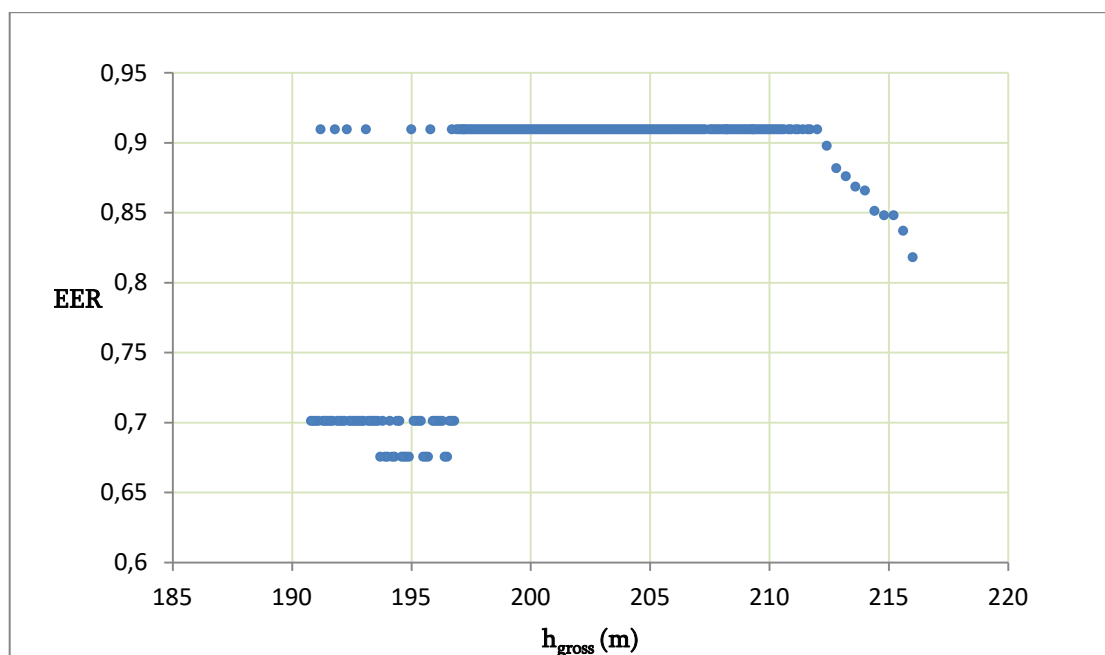
Σχήμα 9.25 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με το μεικτό ύψος, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης.

- ❖ Βέλτιστη Λύση: $h_{gross} = 212$ [m] / $IRR = 10,68\%$
- ❖ Χείριστη Λύση: $h_{gross} = 191,1$ [m] / $IRR = 9,6\%$

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης, παρουσιάζεται μεγαλύτερο IRR κατά την αύξηση του μεικτού ύψους.

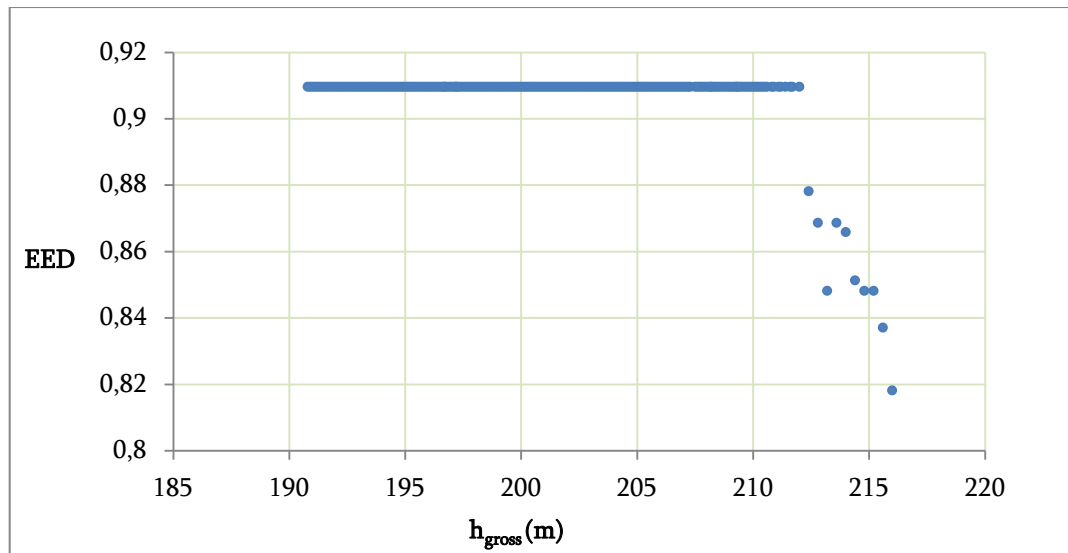
Σε όλα τα παραπάνω εξεταζόμενα οικονομικά μεγέθη, παρατηρείται πως όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό της ενεργειακής αξιοποίησης, αλλάζει η επιλογή της διαμέτρου της σωλήνωσης. Ταυτόχρονα, όλες οι εξεταζόμενες λύσεις δίνουν το βέλτιστο αποτέλεσμα για την κάθε διαδρομή χάραξης. Επιλέγοντας στις συγκεκριμένες λύσεις μικρότερης διατομής σωλήνωση, δημιουργούνται μεγαλύτερες απώλειες και υπάρχει μικρότερη παραγωγή ενέργειας, αφού αξιοποιείται μικρότερο κομμάτι της διαθέσιμης παροχής. Αυτό δείχνει πως σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλο ύψος, χρειάζεται σωλήνας αυξημένων απαιτήσεων πίεσης, που οδηγεί στην αύξηση του κόστους του και κατ' επέκταση γίνονται συνολικά πιο οικονομικές οι λύσεις με μικρότερες διατομές.

Κάτι ακόμα που παρουσιάζει ενδιαφέρον βάσει των αποτελεσμάτων είναι ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης. Χωρίς τον περιορισμό της τιμής προκύπτει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 9.26 Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης για τις 1000 βέλτιστες λύσεις χωρίς περιορισμό αξιοποίησης πτώσης ύδατος.

Με την προσθήκη του περιορισμού ($e_{ed} > 0,75$) υπολογίζεται, για τη συνθήκη $190,8 \leq h_{gross} \leq 212$ είναι σταθερός στο 0,91 (91%), ενώ για $212,1 \leq h_{gross} \leq 216$ ξεκινάει να μειώνεται, ώσπου φτάνει στο 0,82 (82%).



Σχήμα 9.27 Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης για τις 1000 βέλτιστες λύσεις με περιορισμό αξιοποίησης πτώσης ύδατος.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης λύσης που προέκυψε από τον εφαρμοσμένο προγραμματισμό.

Όνομα Υδροστροβίλου	Pelton τύπος 7a με 4 ακροφύσια της εταιρείας Voith
α/α	291
Τύπος Υδροστροβίλου	Pelton με 4 ακροφύσια
Ονομαστικό Ύψος H_{nom} [m]	168
Ονομαστική Παροχή Q_{nom} [m ³ /s]	1,135
Λόγος Ελάχιστου επιτρεπτού ύψους λειτουργίας H_{min}/H_K	0,85
Λόγος Μέγιστου επιτρεπτού ύψους λειτουργίας H_{max}/H_K	1,25
Λόγος Ελάχιστης επιτρεπτής παροχής λειτουργίας Q_{min}/Q_K	0,0375
Λόγος Μέγιστης επιτρεπτής παροχής λειτουργίας Q_{max}/Q_K	1,15
Ονομαστική ειδική ταχύτητα n_s (RPM)	50
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής n (RPM)	600

Πίνακας 9.10 Χαρακτηριστικά Βέλτιστου υδροστροβίλου

Τυπος Γεννήτριας	Σύγχρονη
Ονομαστική Ισχύς [kVA]	2000
Ζεύγη Πόλων	5
Ταχύτητα περιστροφής [RPM]	600
Ονομαστική Τάση [V]	400
cosf [-]	0,9
Ονομαστική Απόδοση [-]	0,9702

Πίνακας 9.11 Χαρακτηριστικά Βέλτιστης γεννήτριας

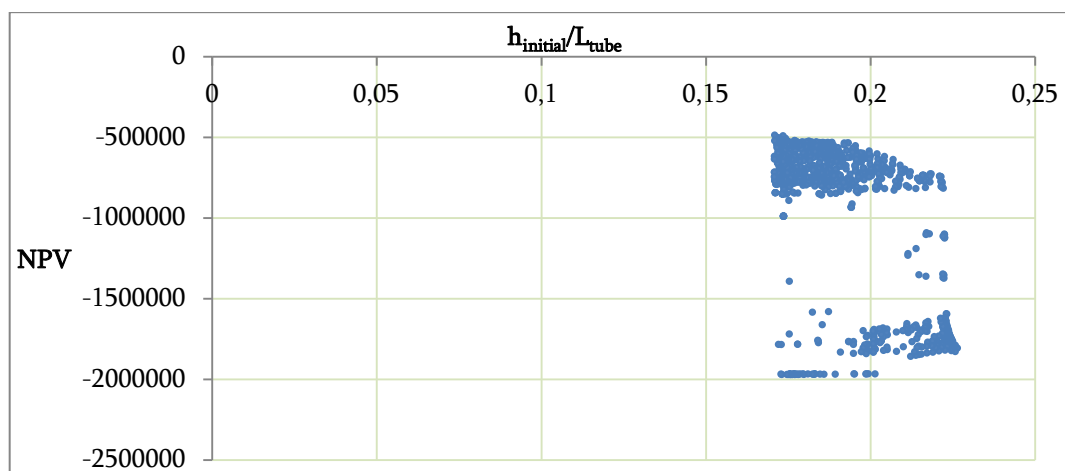
Τυπος Μετασχηματιστή	Ελαίου
Ονομαστική Φαινόμενη Ισχύς [kVA]	2000
V_{nom1} [V]	400
V_{nom2} [V]	20000
Ονομαστική απόδοση [-]	0,9899

Πίνακας 9.12 Χαρακτηριστικά Βέλτιστου μετασχηματιστή

A/A	360
Μήκος κοίτης [m]	2245,562371
Μήκος σωλήνα [m]	1934,479171
Μεικτή υψομετρική διαφορά h_{gross} [m]	212
Τύπος Στροβίλου [-]	Pelton τύπος 7a με 4 ακροφύσι της εταιρείας Voith
Ονομαστική ισχύς [kW]	1646,102304
Τύπος Γεννήτριας [-]	Σύγχρονη
Ονομαστική ισχύς [kVA]	2000
Τύπος Μετασχηματιστή [-]	Έλαιου
Ονομαστική ισχύς [kVA]	2000
Τύπος Σωλήνα [-]	Χαλυβοσωλήνας
Φ Σωλήνα [mm]	700
Ετήσιο φορτίο [kWh]	5591303,63
Βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης eed [-]	0,909661607
Χρόνος λειτουργίας μονάδας ανά έτος	0,690753425
Συνολικό κόστος κατασκευής [€]	3245856,611
Καθαρή παρούσα αξία NPV [€]	2245163,248
Λόγο οφέλους – κόστους BCR [-]	1,7261
Χρόνος αποπληρωμής [year]	9,76 (συμπεριλαμβάνοντας τα 2 έτη κατασκευής, δηλαδή 7,76 από την ώρα λειτουργίας)
Επιτόκιο ανάκτησης κεφαλαίου IRR [%]	10,7%

Πίνακας 9.13 Χαρακτηριστικά Βέλτιστης λύσης

Τέλος, παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα καθαρής παρούσας αξίας (NPV) που προέκυψε κατά την πρώτη προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο των 1000 πρώτων λύσεων με κριτήριο το μεγαλύτερο λόγο ύψους προς μήκος σωλήνα από το σύνολο των χαράξεων. Όπως φαίνεται και σχηματικά, σε κάθε εξεταζόμενο σημείο υπάρχει αρνητική NPV, γεγονός που οδήγησε στην απόρριψη της μεθόδου.



Σχήμα 9.28 NPV με το κριτήριο βάσει λόγου ύψους προς μήκος σωλήνα

9.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εφαρμογή, η χρήση των χιλίων λύσεων με το μεγαλύτερο ύψος έδωσε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη βιωσιμότητα του μικρού υδροηλεκτρικού. Αντίστοιχα, οι λύσεις με τη χρήση του κριτηρίου του λόγου ύψους σωλήνωσης, παρατηρήθηκαν πολύ χαμηλής ενεργειακής αξιοποίησης και βιωσιμότητας του έργου. Γι' αυτόν τον λόγο, στην πορεία τέθηκε το ζήτημα της προσθήκης ενός δεύτερου υδροστροβίλου και της ανάπτυξης του τρόπου λειτουργίας του.

10^ο Κεφάλαιο

Βελτιστοποιημένη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με χρήση δύο υδροστροβίλων

10.1 Εισαγωγή

Από τη μέλετη των προτεινόμενων λύσεων ένα μεγάλο μέρος απορρίφθηκε λόγω του μη ικανοποιητικού βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης, ο οποίος αρκετές φορές οδηγεί συγχρόνως και σε μη οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Προκειμένου, να βελτιωθεί ο αντίστοιχος βαθμός, μπορεί να γίνει η τοποθέτηση ενός δεύτερου υδροστροβίλου, ο οποίος θα αξιοποιεί επί της αρχής την υπόλοιπη διαθέσιμη παροχή. Από την στιγμή, όμως, ύπαρξης δύο υδροστροβίλων, τίθεται το ζήτημα της καταλληλότερης ρύθμισης της λειτουργίας τους.

Η λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους διαφορετικού τύπου, διαφορετικής ισχύος γίνεται συνήθως με έναν ιεραρχικό τρόπο (hierarchical rule), ο οποίος δεν είναι αναγκαία και ο πιο αποδοτικός. Εναλλακτικά, έχουν προταθεί και άλλοι συνεργατικοί κανόνες (synergetic) που βελτιώνουν την αποδιδόμενη ενέργεια. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η ανάπτυξη μεθόδου βελτιστοποίησης λειτουργίας των δύο στροβίλων, με εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών λειτουργίας των στροβίλων, ανάλογα με το επίπεδο παροχής, την κατανομή της παροχής στην περίπτωση λειτουργίας και των δύο υδροστροβίλων κατά το βέλτιστο ενεργειακό τρόπο, επιτυγχάνοντας τη διαμόρφωση ενός κατάλληλου πίνακα αναφοράς τρόπου λειτουργίας. Η υλοποίηση της μεθόδου επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση καμπύλης απόδοσης-παροχής δευτεροβάθμιας εξίσωσης. Με αυτόν τον τρόπο βελτιστοποιείται η απόδοση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού δύο υδροστροβίλων.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας των οποίων η στοχαστική συμπεριφορά τους καθορίζεται από την παροχή του ύδατος στο σημείο υδροληψίας [62], καθώς στη συντριπτική τους πλειοψηφία είναι ροής, χωρίς ταμιευτήρα [63]. Από το 1990 υπάρχει μία εκτεταμένη ερευνητική δραστηριότητα γύρω από το βέλτιστο σχεδιασμό, τη λειτουργία και την απόδοση αυτών των έργων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε ζητήματα, όπως το βέλτιστο μέγεθος ισχύος της υδροηλεκτρικής μονάδας [64, 65], την ανάπτυξη δεικτών οικονομικής και ενεργειακής αξιολόγησης [65, 66], το βέλτιστο συνολικό σχεδιασμό της μονάδας [65, 67], τη σχεδίαση, τη λειτουργία και τη βελτίωση απόδοσης των υδροστροβίλων [65, 68, 69, 70], την επίδραση των υδάτινων παροχών και της γενικότερης υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής στην απόδοση της υδροηλεκτρικής μονάδας [71, 72]. Την τελευταία πενταετία η έρευνα συνδυάζεται με την αξιοποίηση στοιχείων από άλλες επιστήμες, π.χ. χρήση γεωπληροφοριακών συστημάτων και κλιματικών δεδομένων [73], μην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την

απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπως βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ισχύος με στοχαστικά μοντέλα με χρήση προηγούμενης ισχύος και κατακρημνισμάτων (βροχόπτωση και χιονόπτωση) [74] ή / και παροχών [75], τη μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη ισχύος με βάση τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής [76] κα.

Ωστόσο, υπάρχει μια σειρά προβλήματων που χρήζουν βελτίωσης, όπως η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροστροβίλους. Ειδικότερα ο κλασικός τρόπος λειτουργίας είναι ο «ιεραρχικός», στον οποίο λειτουργεί ο κύριος υδροστρόβιλος (συνήθως μεγαλύτερης ισχύος) και συμπληρωματικά ο δεύτερος υδροστρόβιλος (συνήθως μικρότερης ισχύος) με το νερό που δεν αξιοποιεί ο πρώτος [77, 78]. Εναλλακτικά, έχει προταθεί ο «συνεργατικός» τρόπος, όπου διαισθητικά προτείνεται να επεκτείνει τη λειτουργία ο δεύτερος υδροστρόβιλος σε ορισμένα εύρη παροχών εις βάρος του κύριου υδροστροβίλου, ο οποίος όμως για τις ίδιες διακυμάνσεις παροχής παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση απόδοσης, ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύς. Έτσι, προτείνεται μία μέθοδος βέλτιστης λειτουργίας των δύο στροβίλων με εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών λειτουργίας των στροβίλων ανάλογα με το επίπεδο παροχής. Στην περίπτωση που είναι δυνατή η λειτουργία και των δύο στροβίλων γίνεται η κατανομή της παροχής κατά το βέλτιστο ενεργειακό τρόπο με χρήση εύρεσης με μηδενισμό πρώτης παραγώγου και επιλέγεται ο τρόπος παραγωγής ισχύος με τη μέγιστη τιμή. Αυτό έχει ως συνέπεια τη διαμόρφωση ενός κατάλληλου πίνακα αναφοράς τρόπου λειτουργίας, με τον οποίο προκαταβολικά μπορεί να ρυθμιστεί η υδροηλεκτρική μονάδα παράγοντας τη μέγιστη υδροηλεκτρική ισχύ σε κάθε περίπτωση. Η μοναδική προϋπόθεση για την επίτευξη εύκολης μαθηματικής λύσης είναι η χρήση καμπύλης απόδοσης-παροχής δευτεροβάθμιας εξίσωσης για τον στρόβιλο. Στις παρακάτω παραγράφους θα αναλυθούν οι δύο παλαιότερες μέθοδοι και η προτεινόμενη, καθώς θα δοθεί και το αναγκαίο μαθηματικό υπόβαθρο για τη βέλτιστη λειτουργία δύο υδροστροβίλων, εφόσον είναι επιτρεπτή η λειτουργία τους από πλευράς διαθέσιμης παροχής, υπό την προϋπόθεση δευτεροβάθμιας εξίσωσης καμπύλης απόδοσης-παροχής υδροστροβίλου. Τέλος, θα εφαρμοστεί η προτεινόμενη μέθοδος και θα συγκριθεί με τις παλαιότερες για διάφορες περιπτώσεις (π.χ. υδροστρόβιλοι Francis διαφορετικής ή ίδιας ονομαστικής παροχής, συνδυασμός Francis Pelton διαφορετικής ονομαστικής ισχύος), αποδεικνύοντας σε όλες τις περιπτώσεις ότι βελτιώνεται η παραγόμενη ισχύς από την πλευρά του υδροηλεκτρικού σταθμού.

10.2 Μέθοδοι λειτουργίας υδροηλεκτρικής μονάδας δύο υδροστροβίλων

Δίνεται ένας υδροηλεκτρικός σταθμός που απαρτίζεται από δύο υδροστροβίλους, τον κύριο “I” και τον δευτερεύοντα “II”, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τον ίδιο αγωγό πτώσης (penstock) με σταθερό διαθέσιμο ύψος. Οι παραγόμενες ηλεκτρικές ισχύες από τους υδροστροβίλους “I” P_I και “II” P_{II} δίνονται αντίστοιχα:

$$P_I(q_I) = \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_I(q_I) \cdot \rho \cdot g \cdot q_I \cdot H(q_I + q_{II}) \quad (10.1)$$

$$P_{II}(q_{II}) = \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{II}(q_{II}) \cdot \rho \cdot g \cdot q_{II} \cdot H(q_I + q_{II}) \quad (10.2)$$

Όπου:

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

ρ η πυκνότητα του νερού ($=999.7\text{ kg/m}^3$),

η_{gen} , η_{tr} οι βαθμοί απόδοσης της γεννήτριας και του μετασχηματιστή αντίστοιχα, οι οποίοι, πρακτικά θεωρούνται ότι έχουν σταθερές τιμές μπροστά στις μεταβολές των βαθμών απόδοσης των υδροστροβίλων,

q_I , q_{II} οι παροχές που αξιοποιούνται από τους αντίστοιχους υδροστροβίλους,

H το διαθέσιμο καθαρό ύψος ή το διαθέσιμο αρχικό ή μεικτό ύψος

H_{gross} μειωμένο κατά τις υδραυλικές απώλειες h_{loss} ,

η_I , η_{II} οι βαθμοί απόδοσης εκφρασμένοι ως δευτεροβάθμιες εξισώσεις στην περιοχή λειτουργίας παροχών των υδροστροβίλων:

$$\eta_I(q_I) = \begin{cases} a_I \cdot \left(\frac{q_I}{q_{nom-I}} \right)^2 + b_I \cdot \frac{q_I}{q_{nom-I}} + c_I & q_{min-I} \leq q_I \leq q_{max-I} \\ & \text{or } q_{max-I} > q_I \text{ no flood} \\ 0 & q_I := q_{max-I} \\ & q_I < q_{min-I} \text{ or flood} \end{cases} \quad (10.3)$$

$$\eta_{II}(q_{II}) = \begin{cases} a_{II} \cdot \left(\frac{q_{II}}{q_{nom-II}} \right)^2 + b_{II} \cdot \frac{q_{II}}{q_{nom-II}} + c_{II} & q_{min-II} \leq q_{II} \leq q_{max-II} \\ & \text{or } q_{max-II} > q_{II} \text{ no flood} \\ 0 & q_{II} := q_{max-II} \\ & q_{II} > q_{max-II} \text{ or flood} \end{cases} \quad (10.4)$$

Όπου:

q_{min-I} είναι η ελάχιστη επιτρεπτή παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου “I” (π.χ. 15% για Pelton, 50% για Francis),

q_{max-I} η μέγιστη επιτρεπτή παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου “I” (π.χ. 115% για Pelton ή Francis),

q_{nom-I} η ονομαστική παροχή λειτουργίας του υδροστροβίλου “I”, a_I , b_I , c_I οι

αντίστοιχοι συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης, ενώ ορίζονται και οι αντίστοιχες παράμετροι q_{min-II} , q_{max-II} , q_{nom-II} , a_{II} , b_{II} , c_{II} του υδροστροβίλου “II” ομοίως.

Από τον ποταμό υπάρχει μία διαθέσιμη παροχή q_{in} (έχοντας αφαιρέσει από τη συνολική παροχή την οικολογική παροχή) που ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας αξιοποιείται η q_d , η οποία είναι ίση με:

$$q_d = q_I + q_{II} \quad (10.5)$$

Η παροχή q_d εισέρχεται στο υδραυλικό σύστημα και προκαλεί υδραυλικές απώλειες που υπολογίζονται από το άθροισμα των γραμμικών απωλειών κατά Darcy-Weisbach και τοπικών απωλειών:

$$h_{loss}(u_d) = f \cdot \frac{L}{d_m} \cdot \frac{u_d^2}{2 \cdot g} + z_{tot} \cdot \frac{u_d^2}{2 \cdot g} \quad (10.6)$$

Όπου:

$$u_d = \frac{4 \cdot q_d}{\pi \cdot d_m^2} \quad (10.7)$$

$$Re = \frac{u_d \cdot d_m}{\nu} \quad (10.8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e}{3.71 \cdot d_m} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (10.9)$$

Όπου u_d η ταχύτητα σε αγωγό υπό πίεση κυκλικής διατομής ακτίνας d_m , τραχύτητας e , Re ο αριθμός Reynolds, ν το κινηματικό ιώδες του νερού ($=1.14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), f ο συντελεστής τριβής κατά Colebrook-White, που προσδιορίζεται επαναληπτικά, z_{tot} ο συντελεστής τοπικών απωλειών συνολικά, που δίνεται από τεχνικά εγχειρίδια [77]. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος κατανομής της παροχής σε δύο υδροστροβίλους.

10.2.1 Ιεραρχική Μέθοδος

Κατά την ιεραρχική μέθοδο η διαθέσιμη παροχή q_{in} κατανέμεται πρώτα σε κύριο υδροστρόβιλο “I” και η υπόλοιπη διατίθεται στον υδροστρόβιλο “II”. Χωρίς βλάβη της γενικότητας ισχύει ότι: $q_{min-I} \geq q_{min-II}$, $q_{max-I} \geq q_{max-II}$, $q_{nom-I} \geq q_{nom-II}$.

Οπότε ο τυπικός τρόπος λειτουργίας της κατά το [77, 78] είναι:

- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μικρότερη από την ελάχιστη παροχή λειτουργίας $\min\{q_{min-I}, q_{min-II}\}=q_{min-II}$, τότε δε λειτουργεί κανένας υδροστρόβιλος και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι 0.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{min-II} και της q_{min-I} , τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “II” και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} .
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{min-I} και της q_{max-I} , τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “I” και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} .
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{max-I} και της $q_{max-I}+q_{min-II}$, τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “I” στη μέγιστη παροχή του q_{max-I} , ο υδροστρόβιλος “II” δε λειτουργεί λόγω μη επαρκούς παροχής, η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{max-I} και μένει αναξιοποίητη παροχή ίση με $q_{in} - q_{max-I}$.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της $q_{max-I}+q_{min-II}$ και της $q_{max-I}+q_{max-II}$, τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “I” στη μέγιστη παροχή του q_{max-I} , ο υδροστρόβιλος “II” λειτουργεί με την υπολειπόμενη παροχή ίση με $q_{in} - q_{max-I}$, η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} .
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της $q_{max-I}+q_{max-II}$ και μικρότερη τιμών που αντιστοιχούν σε πλημμυρικά φαινόμενα, τότε λειτουργούν τόσο ο υδροστρόβιλος “I”, όσο και ο υδροστρόβιλος “II” στις μέγιστες παροχές q_{max-I} και q_{max-II} αντίστοιχα, η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με $q_{max-I} + q_{max-II}$ και η μη αξιοποιήσιμη παροχή ίση με $q_{in} - q_{max-I} - q_{max-II}$.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί σε πλημμυρική παροχή, τότε δε λειτουργεί κανένας υδροστρόβιλος και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι 0.

Σ’ αυτήν τη μέθοδο δεν γίνεται κανένας επιμέρους υπολογισμός από πλευράς ενεργειακής απόδοσης, απλώς ουσιαστικά προηγείται ο κύριος υδροστρόβιλος “I” στην κάλυψή του με το σκεπτικό ότι ο μεγαλύτερος υδροστρόβιλος δίνει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας.

10.2.2 Συνεργατική Μέθοδος

Κατά τη συνεργατική μέθοδο γίνεται η προσπάθεια καλύτερης αξιοποίησης της διαθέσιμης παροχής σε συγκεκριμένα εύρη, δοκιμάζοντας την αλλαγή προτεραιότητας λειτουργίας μεταξύ των δύο υδροστροβίλων, προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος στην εκάστοτε διαθέσιμη παροχή

q_{in} . Χωρίς βλάβη της γενικότητας ισχύει ότι: $q_{min-I} \geq q_{min-II}$, $q_{max-I} \geq q_{max-II}$, $q_{nom-I} \geq q_{nom-II}$, Οπότε ο τυπικός τρόπος λειτουργίας της κατά το [63, 65, 78] είναι:

- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μικρότερη από την ελάχιστη παροχή λειτουργίας $\min\{q_{min-I}, q_{min-II}\} = q_{min-II}$, τότε δε λειτουργεί κανένας υδροστρόβιλος και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι 0.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{min-II} και της q_{min-I} , τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “II” και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} .
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{min-I} και της q_{max-II} , τότε επιλέγεται ποιος από τους δύο υδροστρόβιλους παράγει μεγαλύτερη ισχύ κατά τις σχέσεις (10.1) και (10.2) και λειτουργεί μόνο εκείνος. Η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} . Σε αυτό το σημείο διαφοροποιείται με την ιεραρχική μέθοδο επιτυγχάνοντας καλύτερη ή ίση ενεργειακή απόδοση.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{max-II} και της q_{max-I} , τότε λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “I” και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} .
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της q_{max-I} και της $q_{max-I} + q_{min-II}$, τότε λειτουργούν και οι δύο υδροστρόβιλοι κατά το βέλτιστο τρόπο. Κατά το [78] ο βέλτιστος τρόπος σημαίνει ότι ο υδροστρόβιλος “II” λειτουργεί στη μέγιστη απόδοσή του (εννοώντας σε παροχή q_{max-II} από το εύρος λειτουργίας των παροχών), ενώ ο υδροστρόβιλος “I” λειτουργεί με την υπολειπόμενη παροχή $q_{in} - q_{max-I}$ υπό την προϋπόθεση ότι είναι μεγαλύτερη της q_{min-I} . Η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} . Σε αυτό το σημείο διαφοροποιείται με την ιεραρχική μέθοδο, καθώς γίνεται μεγαλύτερη αξιοποίηση ύδατος και επιπλέον ο μικρότερος υδροστρόβιλος “II” λειτουργεί με πολύ υψηλή απόδοση, ενώ ο μεγαλύτερος υδροστρόβιλος “I” λειτουργεί με μεταβλητή απόδοση, η οποία αλλάζει όμως περιορισμένα, καθώς η ισχύς μεταβάλλεται μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος παροχής από $(q_{max-I} - q_{max-II})$ ως $(q_{max-I} + q_{min-II} - q_{max-II})$. Στα [63, 65] δεν ξεκαθαρίζεται ο όρος «λειτουργία με το βέλτιστο τρόπο».
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της $q_{max-I} + q_{min-II}$ και της $q_{max-I} + q_{max-II}$, τότε λειτουργούν και οι δύο υδροστρόβιλοι κατά το βέλτιστο τρόπο, όπως αναλύθηκε προηγουμένως κατά το [68], δηλαδή ο υδροστρόβιλος “II” λειτουργεί στη μέγιστη απόδοσή του και ο υδροστρόβιλος “I” λειτουργεί με την υπολειπόμενη παροχή $q_{in} - q_{max-I}$ υπό την προϋπόθεση ότι είναι μεγαλύτερη της q_{min-I} . Η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} . Σε αυτό το σημείο διαφοροποιείται με την ιεραρχική μέθοδο, καθώς ο μικρότερος υδροστρόβιλος “II” λειτουργεί με πολύ υψηλή απόδοση, ενώ ο μεγαλύτερος υδροστρόβιλος “I”

λειτουργεί με μεταβλητή απόδοση, η οποία αλλάζει όμως περιορισμένα μέσα στο εύρος παροχής από $(q_{max-I} + q_{min-II} - q_{max-II})$ ως q_{max-I} .

- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεταξύ της $q_{max-I} + q_{max-II}$ και μικρότερη τιμών που αντιστοιχούν σε πλημμυρικά φαινόμενα, τότε λειτουργούν τόσο ο υδροστρόβιλος “I” , όσο και ο υδροστρόβιλος “II” στις μέγιστες παροχές q_{max-I} και q_{max-II} αντίστοιχα, η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με $q_{max-I} + q_{max-II}$ και η μη αξιοποιήσιμη παροχή ίση με $q_{in} - q_{max-I} - q_{max-II}$.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί σε πλημμυρική παροχή, τότε δε λειτουργεί κανένας υδροστρόβιλος και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι 0.

Σ’ αυτήν τη μέθοδο γίνονται επιμέρους υπολογισμοί από πλευράς ενεργειακής απόδοσης αυξάνοντας την παραγόμενη ποσότητα ενέργειας διαισθητικά, έχοντας καταλάβει ως μηχανικοί τον τρόπο συνεργατικής λειτουργίας των δύο υδροστροβίλων.

10.2.3 Προτεινόμενη – Βελτιστοποιημένη μέθοδος

Σε αυτήν τη μέθοδο γίνεται η εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών λειτουργίας για κάθε διαθέσιμη παροχή q_{in} και επιλέγεται εκείνη με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Ειδικότερα για την περίπτωση λειτουργίας δύο υδροστροβίλων υπάρχουν $2^2=4$ δυνατότητες:

- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μικρότερη από τη ελάχιστη παροχή λειτουργίας $\min\{q_{min-I}, q_{min-II}\}$ ή συμβαίνει πλημμυρικό φαινόμενο, τότε δε λειτουργεί κανένας υδροστρόβιλος και η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι 0.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη της q_{min-II} και μικρότερη πλημμυρικού φαινομένου, τότε μπορεί να λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “II” μόνο. Σ’ αυτήν την περίπτωση, αν η διαθέσιμη παροχή είναι μικρότερη ή ίση της q_{max-II} , τότε η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} , διαφορετικά είναι ίση με q_{max-II} . Επιπλέον η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με την παροχή του υδροστροβίλου “II” q_{II} και υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς από τη σχέση (10.2), έστω $P_{II}(q_{in})$ έχοντας ότι η αξιοποιήσιμη παροχή του υδροστροβίλου “I” q_I είναι ίση με το 0.
- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη της q_{min-I} και μικρότερη πλημμυρικού φαινομένου, τότε μπορεί να λειτουργεί ο υδροστρόβιλος “I” μόνο.

Σ' αυτήν την περίπτωση, αν η διαθέσιμη παροχή είναι μικρότερη ή ίση της q_{max-I} , τότε η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} , διαφορετικά είναι ίση με q_{max-I} . Επιπλέον η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με την παροχή του υδροστροβίλου "I" q_I και υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς από τη σχέση (10.1), έστω $P_I(q_{in})$ έχοντας ότι η αξιοποιήσιμη παροχή του υδροστροβίλου "II" q_{II} είναι ίση με το 0.

- Αν η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη της $(q_{min-I}+q_{min-II})$ και μικρότερη πλημμυρικού φαινομένου, τότε μπορούν να λειτουργούν και οι δύο υδροστροβίλοι. Σ' αυτήν την περίπτωση, αν η διαθέσιμη παροχή είναι μικρότερη ή ίση της $(q_{max-I}+q_{max-II})$, τότε η αξιοποιήσιμη παροχή q_d είναι ίση με q_{in} και η βέλτιστη κατανομή παροχής θα γίνει επιλύοντας το πρόβλημα:

$$\max(P_I(q_I)+P_{II}(q_{II})) \text{ υπό την προϋπόθεση } q_{in} = q_I + q_{II} \quad (10.10)$$

Το πρόβλημα μεγιστοποίησης αναλύεται στην επομένη παράγραφο. Διαφορετικά, αν η διαθέσιμη παροχή είναι μεγαλύτερη της $(q_{max-I}+q_{max-II})$, η αξιοποιήσιμη παροχή είναι ίση με $(q_{max-I}+q_{max-II})$ και ο κάθε υδροστροβίλος φορτίζεται με τη μέγιστη παροχή του. Από αυτόν το συνδυασμό κατανομής παροχών υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού, έστω $P_{I+II}(q_{in})$.

Από τους ανωτέρω συνδυασμούς για κάθε διαθέσιμη παροχή q_{in} επιλέγεται εκείνος που έχει τη μεγαλύτερη ισχύ μεταξύ των $P_I(q_{in})$, $P_{II}(q_{in})$, $P_{I+II}(q_{in})$, εφόσον είναι επιτρεπτή η αντίστοιχη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένας πίνακας αναφοράς τρόπου λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού, μεγιστοποιώντας σε κάθε περίπτωση την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

10.3 Βέλτιστη κατανομή παροχή σε δύο υδροστροβίλους προς μεγιστοποίηση παραγόμενης ισχύος

Το πρόβλημα που τέθηκε στη (10.10) αναδιατυπώνεται προς επίλυση αντικαθιστώντας την παροχή του υδροστροβίλου "II" q_{II} από $q_{in}-q_I$ ως εξής:

$$\max(P_{I+II}(q_I)) = \max(P_I(q_I) + P_{II}(q_{in} - q_I)) \quad (10.11)$$

Από την αντικατάσταση των (10.1) και (10.2) στη (10.11) προκύπτει για τη συνάρτηση συνολικής παραγόμενης ισχύος $P_{I+II}(q_I)$ ότι:

$$P_{I+II}(q_I) = \begin{cases} \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_I(q_I) \cdot \rho \cdot g \cdot q_I \cdot H(q_{in}) + \\ \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{II}(q_{in} - q_I) \cdot \rho \cdot g \cdot (q_{in} - q_I) \cdot H(q_{in}) \end{cases} \quad (10.12)$$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση του καθαρού ύψους.

Για παράδειγμα κοινός σωλήνας προσαγωγής και μη ύπαρξη διαφοράς σε ύψος εξόδου νερού σε αγωγό φυγής. Για να μεγιστοποιηθεί η συνολική παραγόμενη ισχύς $P_{I+II}(q_I)$, πρέπει να ισχύουν ότι:

$$\left. \frac{dP_{I+II}(q_I)}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} = 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} & \left. \frac{d\eta_I(q_I)}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \rho \cdot g \cdot q_{Iopt} \cdot H(q_{in}) \right. \\ & + \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_I(q_{Iopt}) \cdot \rho \cdot g \cdot H(q_{in}) + \\ & \left. \left. \frac{d\eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt})}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \rho \cdot g \cdot (q_{in}-q_{Iopt}) \cdot H(q_{in}) + \right. \\ & \left. - \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt}) \cdot \rho \cdot g \cdot H(q_{in}) \right\} = 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} & \left. \frac{d\eta_I(q_I)}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot q_{Iopt} + \eta_I(q_{Iopt}) + \\ & \left. \frac{d\eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt})}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot (q_{in}-q_{Iopt}) - \eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt}) \right\} = 0 \quad (10.13)$$

υπό την προϋπόθεση:

$$\left. \frac{d^2 P_{I+II}(q_I)}{d^2 q_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} < 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} & \left. \frac{d^2 \eta_I(q_I)}{d^2 q_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \rho \cdot g \cdot q_{Iopt} \cdot H(q_{in}) + \\ & 2 \cdot \left. \frac{d\eta_I(q_I)}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \rho \cdot g \cdot H(q_{in}) + \\ & \left. \frac{d^2 \eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt})}{d^2 q_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \cdot \rho \cdot g \cdot (q_{in}-q_{Iopt}) \cdot H(q_{in}) \right\} < 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} & \left. \frac{d^2 \eta_I(q_I)}{d^2 q_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot q_{Iopt} + 2 \cdot \left. \frac{d\eta_I(q_I)}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} + \\ & \left. \frac{d^2 \eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt})}{d^2 q_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \cdot (q_{in}-q_{Iopt}) \right\} < 0 \quad (10.14)$$

$$\left. -2 \cdot \left. \frac{d\eta_{II}(q_{in}-q_{Iopt})}{dq_I} \right|_{q_I=q_{Iopt}} \right\}$$

Στην περίπτωση δευτεροβάθμιας καμπύλης απόδοσης-παροχής από τις σχέσεις (10.3) και (10.4) προκύπτουν οι ακόλουθες παράγωγοι για τις μη μηδενικές περιοχές:

$$\frac{d\eta_I(q_I)}{dq_I} = \frac{2 \cdot a_I}{q_{nom-I}^2} \cdot q_I + \frac{b_I}{q_{nom-I}} \quad (10.15)$$

$$\frac{d^2\eta_I(q_I)}{d^2q_I} = \frac{2 \cdot a_I}{q_{nom-I}^2} \quad (10.16)$$

$$\eta_{II}(q_I) = a_{II} \cdot \left(\frac{q_{in} - q_I}{q_{nom-II}} \right)^2 + b_{II} \cdot \frac{q_{in} - q_I}{q_{nom-II}} + c_{II} \quad (10.17)$$

$$\frac{d\eta_{II}(q_I)}{dq_I} = \frac{2 \cdot a_{II}}{q_{nom-II}^2} \cdot q_I - \frac{b_{II}}{q_{nom-II}} - \frac{2 \cdot a_{II} \cdot q_{in}}{q_{nom-II}^2} \quad (10.18)$$

$$\frac{d^2\eta_{II}(q_I)}{d^2q_I} = \frac{2 \cdot a_{II}}{q_{nom-II}^2} \quad (10.19)$$

Από την αντικατάσταση των (10.3), (10.15), (10.17), (10.18) σε (10.13) προκύπτει η ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$A \cdot q_I^2 + B \cdot q_I + C = 0 \quad (10.20)$$

Όπου:

$$A = 3 \cdot \left(\frac{a_I}{q_{nom-I}^2} - \frac{a_{II}}{q_{nom-II}^2} \right) \quad (10.21)$$

$$B = 2 \cdot \left(\frac{b_I}{q_{nom-I}} + \frac{b_{II}}{q_{nom-II}} + \frac{3 \cdot a_{II}}{q_{nom-II}^2} \cdot q_{in} \right) \quad (10.22)$$

$$C = c_I - c_{II} - \frac{2 \cdot b_{II}}{q_{nom-II}} - \frac{3 \cdot a_{II}}{q_{nom-II}^2} \cdot q_{in}^2 \quad (10.23)$$

Από την αντίστοιχη επίλυση της (9.29) προκύπτει δύο πιθανές λύσεις:

$$q_{I-opt-1} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (10.24)$$

$$q_{I-opt-2} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (10.25)$$

Υπό τις προϋποθέσεις:

$$B^2 - 4 \cdot A \cdot C \geq 0, \quad A \neq 0 \quad q_{\min-I} \leq q_{I-opt-1}, q_{I-opt-2} \leq q_{\max-I} \quad (10.26)$$

Από τις δύο λύσεις ελέγχεται ποια ικανοποιεί τη (10.14) σε συνδυασμό με τις (10.15), (10.16), (10.18), (10.19). Εναλλακτικά πιο απλά υπολογίζεται η συνολική ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού μέσω της (10.12) και επιλέγεται εκείνη με τη μεγαλύτερη ισχύ.

Σε ειδικές περιπτώσεις λύνονται επιμέρους εξισώσεις, όπως:

$$\text{Av } A=0 \Rightarrow q_{I-opt} = -\frac{C}{B} \quad (10.27)$$

$$\text{Av } B^2 - 4 \cdot A \cdot C < 0 \Rightarrow q_{I-opt} \approx -\frac{B}{A} \quad (10.28)$$

$$\text{Av } q_{\min-I} > q_{I-opt-1} \Rightarrow q_{I-opt-1} = q_{\min-I} \quad (10.29)$$

$$\text{Av } q_{\max-I} < q_{I-opt-1} \Rightarrow q_{I-opt-1} = q_{\max-I} \quad (10.30)$$

$$\text{Av } q_{\min-I} > q_{I-opt-2} \Rightarrow q_{I-opt-2} = q_{\min-I} \quad (10.31)$$

$$\text{Av } q_{\max-I} < q_{I-opt-2} \Rightarrow q_{I-opt-2} = q_{\max-I} \quad (10.32)$$

Ακολούθως, αφού υπολογιστεί η παροχή του υδροστροβίλου “I” q_I , υπολογίζεται η παροχή του υδροστροβίλου “II” q_{II} ως $q_{in} - q_I$ ικανοποιώντας συγχρόνως τα αντίστοιχα όρια παροχής του (μεταξύ των τιμών $q_{\min-II}$ και $q_{\max-II}$), καθώς εξαρχής η διαθέσιμη παροχή q_{in} είναι μεγαλύτερη της ($q_{\min-I} + q_{\min-II}$) και μικρότερη ή ίση της ($q_{\max-I} + q_{\max-II}$).

10.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας

10.4.1 Γενικά

Για την εφαρμογή της οποιαδήποτε μεθόδου λειτουργίας αρχικά γίνεται η προσέγγιση της καμπύλης απόδοσης του εκάστοτε στροβίλου (που δίνεται από τα δεδομένα κατασκευαστών [77]) υπό τη μορφή δευτεροβάθμιας συνάρτησης παροχής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Francis προκύπτει η ακόλουθη καμπύλη με συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) R^2 ίσο με 0.9874 για παροχή q από 50% ως 115% της αντίστοιχης ονομαστικής παροχής q_{nom} :

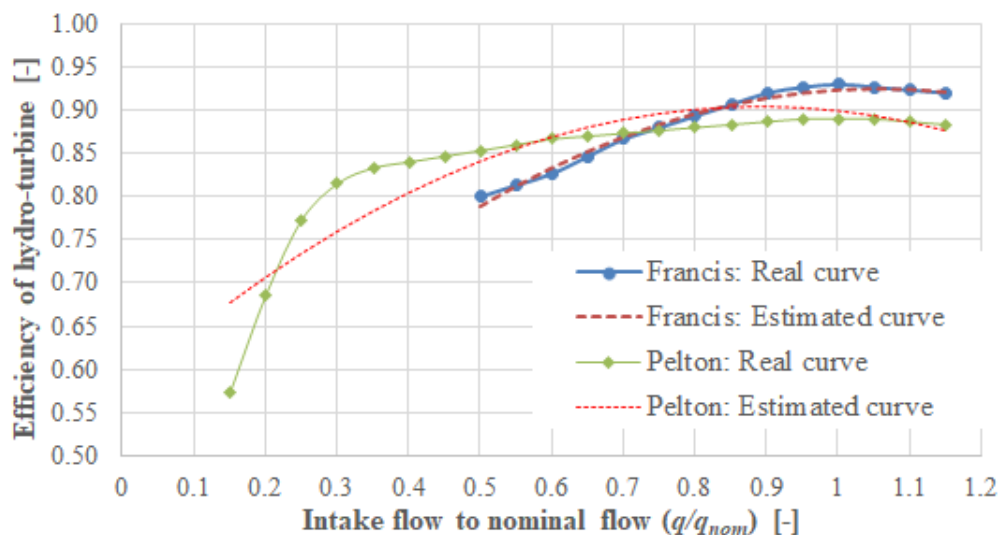
$$\eta_{Francis}(q) = -0.4403 \cdot \left(\frac{q}{q_{nom}}\right)^2 + 0.9302 \cdot \frac{q}{q_{nom}} + 0.4339 \quad (10.33)$$

Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton προκύπτει η ακόλουθη καμπύλη με συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) R^2 ίσο με 0.8137 για παροχή q από 15% ως 115% της αντίστοιχης ονομαστικής παροχής q_{nom} :

$$\eta_{Pelton}(q) = -0.4147 \cdot \left(\frac{q}{q_{nom}}\right)^2 + 0.7395 \cdot \frac{q}{q_{nom}} + 0.5751 \quad (10.34)$$

Τα ανωτέρω στοιχεία συνοψίζονται στο σχήμα 10.1 Τα τυπικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού σταθμού που μελετάται είναι τα ακόλουθα:

- το διαθέσιμο αρχικό μεικτό ύψος H_{gross} είναι ίσο με 150 m,
- η εσωτερική κυκλική διατομή d_{in} μεταλλικού αγωγού προσαγωγής, ονομαστικής διαμέτρου D1400 είναι ίση με 1404.92 mm με τραχύτητα e ίση με 0.1mm,
- ο συντελεστής τοπικών απωλειών Z_{tot} (που περιλαμβάνει στροφές, βάννες, συστολές / διαστολές κ.α.) είναι ίσο με 4.
- η_{gen} , η_{tr} οι βαθμοί απόδοσης της γεννήτριας και του μετασχηματιστή αντίστοιχα είναι ίσοι με 96.5% και 99% αντίστοιχα.



Σχήμα 10.1 Απόδοση στροβίλων Francis και Pelton σε συνάρτηση με παροχή: πραγματική καμπύλη (Δεδομένα κατασκευαστή), εκτιμώμενη καμπύλη (δευτεροβάθμια εξίσωση με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων).

Εξετάζονται ενδεικτικά τα ακόλουθα σενάρια υδροστροβίλων και καταγράφονται στον πίνακα 10.1.

Scenario	Turbine I		Turbine II	
	<i>Kind of turbine</i>	q_{nom-I} [m ³ /s]	<i>Kind of turbine</i>	q_{nom-II} [m ³ /s]
A	<i>Francis</i>	4.552	<i>Francis</i>	0.616
B	<i>Francis</i>	2.584	<i>Francis</i>	2.584
C	<i>Francis</i>	4.552	<i>Pelton</i>	0.616

Πίνακας 10.1 Βασικά σενάρια διαμόρφωσης υδροηλεκτρικού σταθμού με δύο υδροτροβίλους

Στη συνέχεια για κάθε σενάριο εξετάζονται η ιεραρχική, η συνεργατική και η προτεινόμενη μέθοδος, όπου γίνεται η σύγκριση των μεθόδων για διαφορετικές διαθέσιμες παροχές από $Q_{min}=0$ ως $Q_{max}=6.60$ m³/s με βήμα $dQ=0.01$ m³/s. Το όφελος της χρήσης της μεθόδου «α» έναντι της μεθόδου «β» ποσοτικοποιείται μέσω της διαφοράς ισχύος P_a-P_b και συγκεντρωτικά μέσω της μέσης διαφοράς ισχύος, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{a-b} = \frac{1}{n_{pop}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{pop}} (P_{a,i} - P_{b,i}) \quad (10.35)$$

Όπου το συνολικό πλήθος των όρων είναι ίσο με:

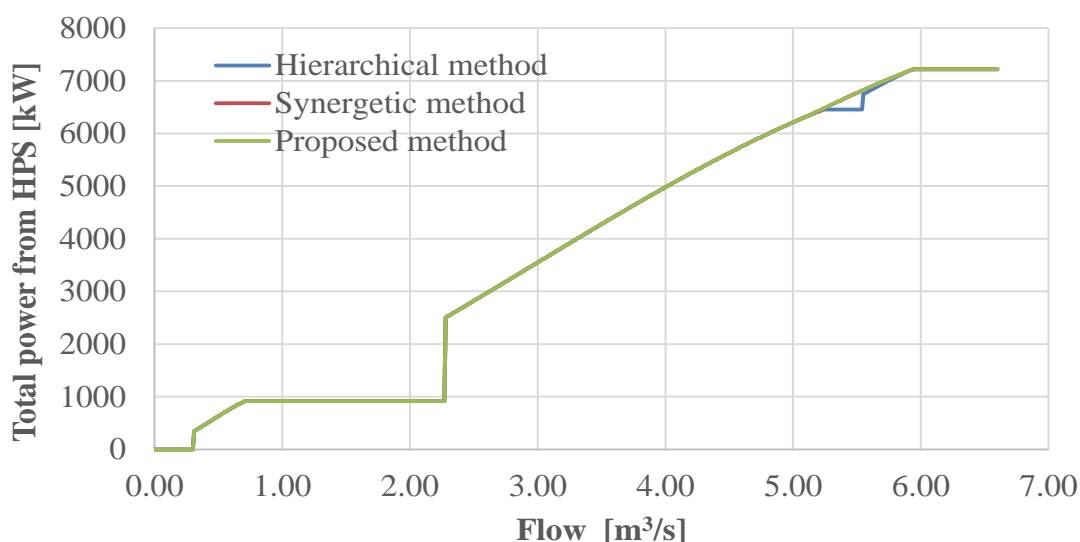
$$n_{pop} = \left\lceil \frac{Q_{max} - Q_{min}}{dQ} \right\rceil + 1 \quad (10.36)$$

Όπου ο 1^{ος} όρος αντιστοιχεί στην παροχή Q_{min} και ο n_{pop} ^{ος} όρος στη Q_{max} . Ουσιαστικά αυτή θα ήταν η βελτίωση της μέσης παραγόμενης ισχύος, αν η καμπύλη διάρκειας παροχής είχε ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας μεταξύ Q_{min} και Q_{max} . Στην παρούσα περίπτωση προσδιορίζονται οι εξής διαφορές ισχύος:

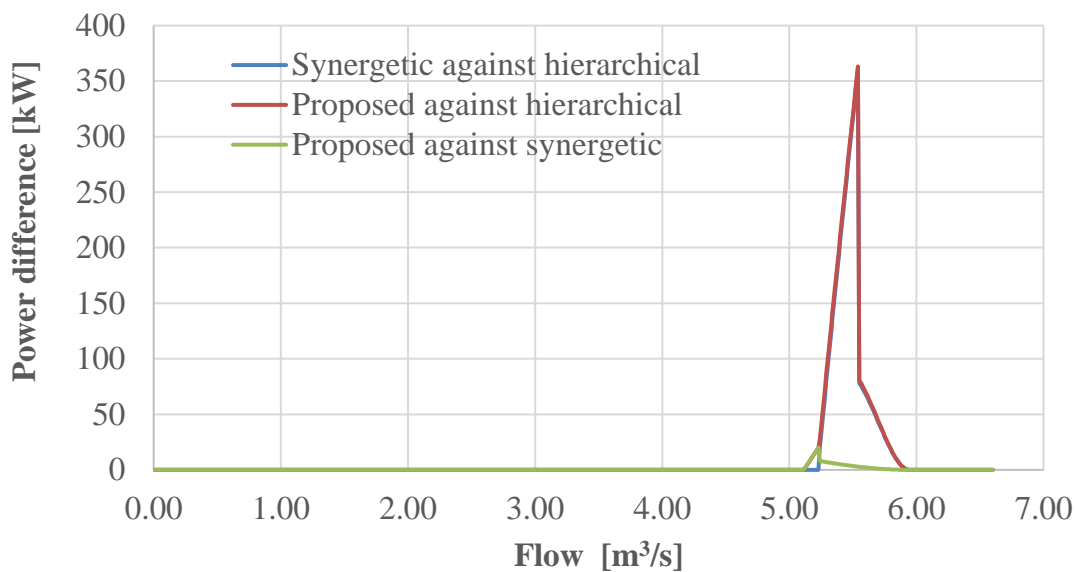
- διαφορά παραγόμενης ισχύος της συνεργατικής μεθόδου ως προς την ιεραρχική $P_{syn-hier}$,
- διαφορά παραγόμενης ισχύος της προτεινόμενης μεθόδου ως προς την ιεραρχική $P_{prop-hier}$,
- διαφορά παραγόμενης ισχύος της προτεινόμενης μεθόδου ως προς τη συνεργατική $P_{prop-syn}$.

10.4.2 Σενάριο “Α”

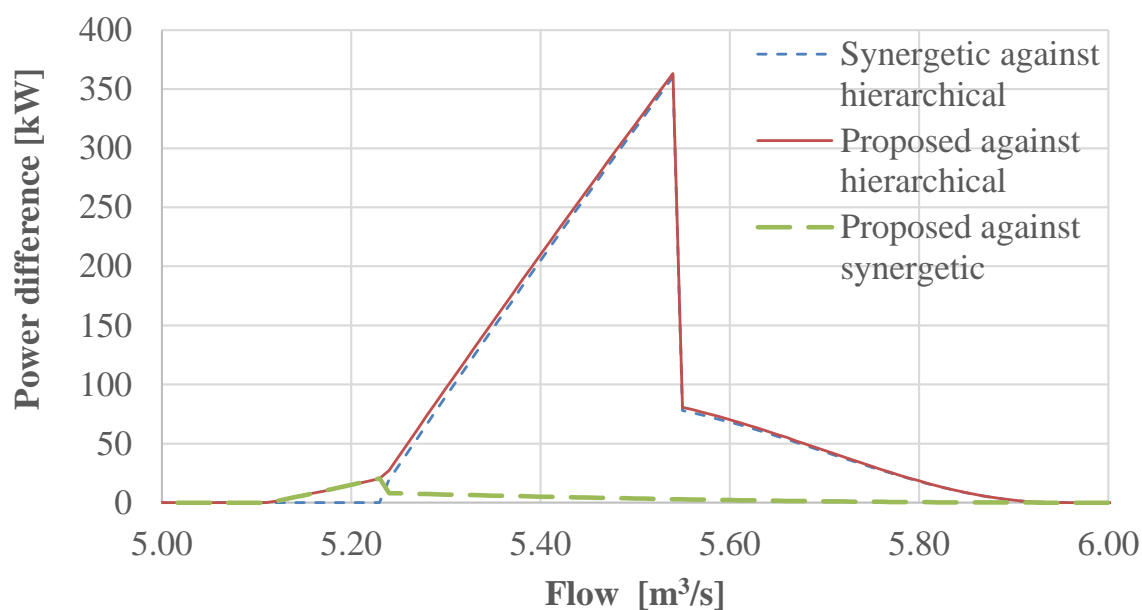
Στην παρούσα περίπτωση διαπιστώνεται ότι η συνεργατική μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ιεραρχική στην περιοχή παροχής [5.24, 5.94] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική κατανομή παροχής (και κατ' επέκταση και κατανομής παραγόμενης ισχύος) μεταξύ των δύο υδροστροβίλων σε λειτουργία. Αντίστοιχα η προτεινόμενη μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ιεραρχική και τη συνεργατική μέθοδο στην περιοχή παροχής [5.12, 5.94] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά. Ειδικά στην περιοχή παροχής [5.12, 5.23] σε m^3/s ρυθμίζεται βέλτιστα η λειτουργία των δύο υδροστροβίλων κατά την προτεινόμενη μέθοδο, ενώ οι άλλες δύο χρησιμοποιούν μόνο τον υδροστρόβιλο Ι. Στην περιοχή παροχής [5.24, 5.94] σε m^3/s οι διαφορές μεταξύ συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου είναι μικρότερες, διότι λειτουργούν και τους δύο υδροστροβίλους, όπου η συνεργατική δίνει κοντινές ρυθμίσεις παροχής με εκείνες της προτεινόμενης μεθόδου. Τα προαναφερθέντα γίνονται φανερά στο Σχήμα 10.2 που καταγράφεται η παραγόμενη ισχύς με την εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου και στο Σχήμα 10.3, όπου καταγράφονται οι διαφορές παραγόμενων ισχύων. Συγκεντρωτικά οι αντίστοιχες μέσες διαφορές ισχύων καταγράφονται στον Πίνακα 10.2, όπου η βελτίωση είτε της συνεργατικής, είτε της προτεινόμενης μεθόδου έναντι της ιεραρχικής είναι πιο σημαντική με 11.1 και 11.6 kW αντίστοιχα. Αντίθετα η βελτίωση της προτεινόμενης μεθόδου έναντι της συνεργατικής είναι μικρή (μόλις 0.5 kW).



Σχήμα 10.2 Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Α” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.



(a)



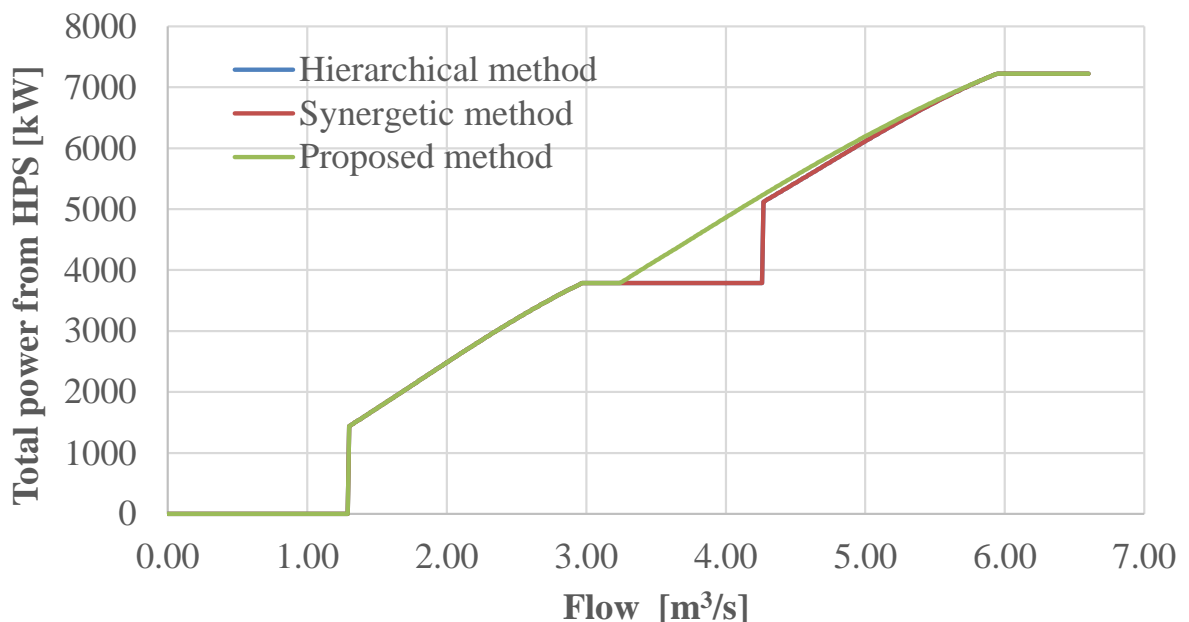
(b)

Σχήμα 10.3 Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “Α” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενη με ιεραρχική, προτεινόμενη με συνεργατική: (a) πλήρης μορφή, (b) μεγέθυνση μη μηδενικών τιμών διαφοράς παραγόμενης ισχύος.

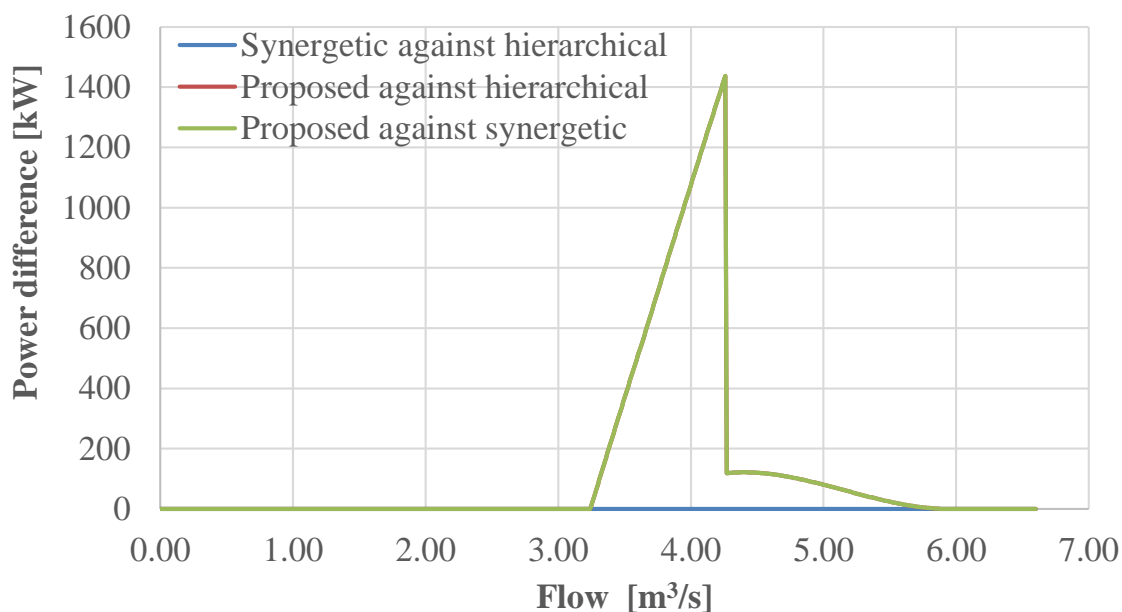
10.4.3 Σενάριο “B”

Στην παρούσα περίπτωση δύο όμοιων υδροστροβίλων διαπιστώνεται ότι η συνεργατική μέθοδος δίνει ίδια αποτελέσματα με την ιεραρχική, καθώς είτε χρησιμοποιηθεί ο υδροστρόβιλος “I”, είτε ο “II” στις περιοχές παροχής που διαφοροποιούνται οι δύο μέθοδοι, τα ίδια αποτελέσματα θα δώσουν. Αντίθετα η προτεινόμενη μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ιεραρχική και τη συνεργατική μέθοδο στην περιοχή παροχής [3.25, 5.94] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά. Ειδικά στην περιοχή παροχής [3.25, 4.26] σε m^3/s ρυθμίζεται βέλτιστα η λειτουργία των δύο υδροστροβίλων κατά την προτεινόμενη μέθοδο με ισομοιρασμό των παροχών, ενώ οι άλλες δύο χρησιμοποιούν μόνο τον ένα υδροστρόβιλο σε κατάσταση παραγωγής μεγάλης ισχύος. Στην περιοχή παροχής [4.27, 5.94] σε m^3/s οι διαφορές περιορίζονται, καθώς σε όλες τις μεθόδους προτείνεται η λειτουργία και των δύο υδροστροβίλων (αν και με διαφορετική κατανομή παροχής).

Τα προαναφερθέντα γίνονται φανερά στο Σχήμα 10.4 που καταγράφεται η παραγόμενη ισχύς με την εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου και στο Σχήμα 10.5 όπου καταγράφονται οι διαφορές παραγόμενων ισχύων. Συγκεντρωτικά οι αντίστοιχες μέσες διαφορές ισχύων καταγράφονται στον Πίνακα 10.2, όπου η βελτίωση της προτεινόμενης μεθόδου έναντι της ιεραρχικής (ή της συνεργατικής) είναι αρκετά σημαντική φθάνοντας τα 128.9 kW.



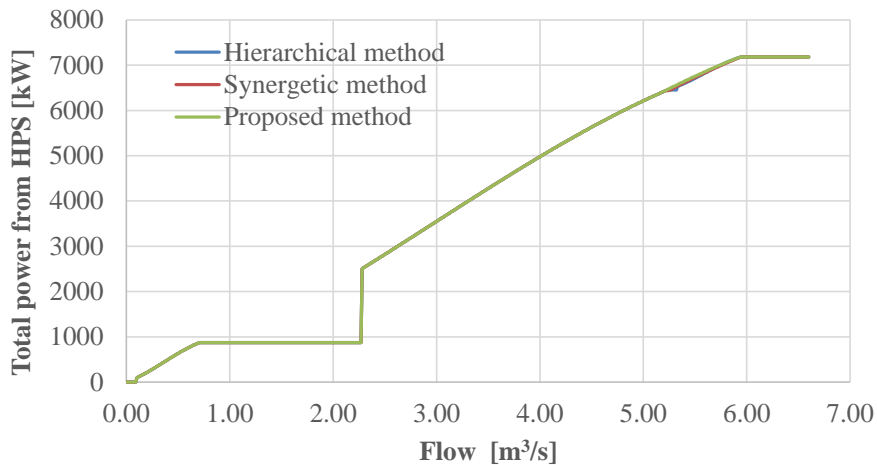
Σχήμα 10.4 Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “B” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.



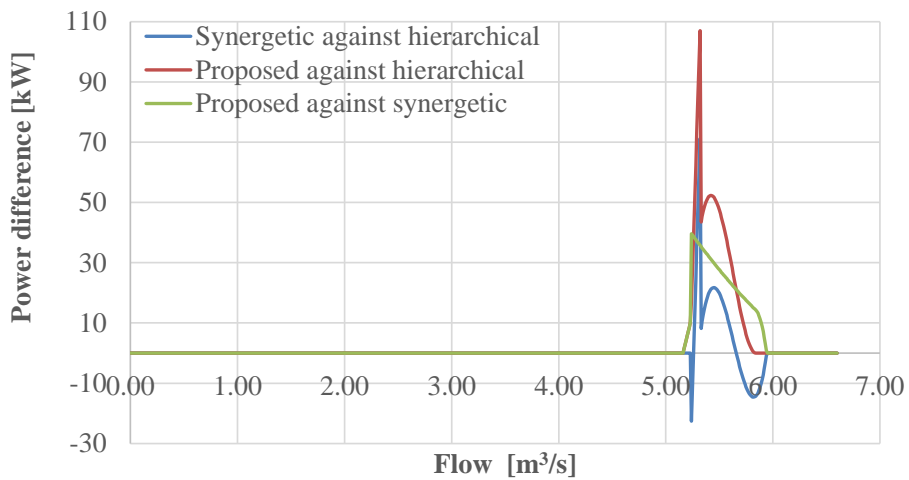
Σχήμα 10.5 Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “B” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης με ιεραρχική, προτεινόμενης με συνεργατικής.

10.4.4 Σενάριο “C”

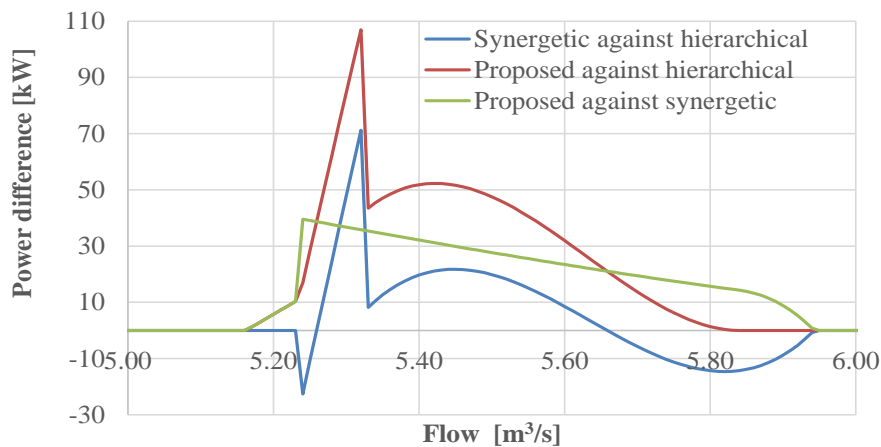
Στην παρούσα περίπτωση διαπιστώνεται ότι η συνεργατική μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ιεραρχική στην περιοχή παροχής [5.26, 5.65] σε m^3/s , χειρότερα στις περιοχές παροχής [5.24, 5.25] και [5.66, 5.94] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική κατανομή παροχής (και κατ’ επέκταση και κατανομής παραγόμενης ισχύος) μεταξύ των δύο υδροστροβίλων σε λειτουργία. Αντίστοιχα η προτεινόμενη μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την ιεραρχική στην περιοχή παροχής [5.17, 5.84] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά, καθώς και από τη συνεργατική στην περιοχή παροχής [5.17, 5.94] σε m^3/s , ενώ στις υπόλοιπες περιοχές δεν έχουν διαφορά. Ειδικά στην περιοχή παροχής [5.17, 5.23] σε m^3/s ρυθμίζεται βέλτιστα η λειτουργία των δύο υδροστροβίλων κατά την προτεινόμενη μέθοδο, ενώ οι άλλες δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μόνο τον υδροστρόβιλο I. Στην περιοχή παροχής [5.24, 5.84] σε m^3/s οι διαφορές μεταξύ ιεραρχικής και προτεινόμενης μεθόδου κυμαίνονται έντονα μεταξύ 0 ως 109 kW, καθώς λειτουργούν και τους δύο υδροστροβίλους, όπου η ιεραρχική σταθεροποιεί την παροχή σε υδροστρόβιλο “I” έναντι της προτεινόμενης μεθόδου, που βελτιστοποιεί την κατανομή μεταξύ των δύο.



Σχήμα 10.6 Παραγόμενη ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “C” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη χρήση ιεραρχικής, συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου.



(a)



(b)

Σχήμα 10.7 Διαφορά παραγόμενης ισχύς υδροστροβίλων σεναρίου “C” σε συνάρτηση με παροχή κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης με ιεραρχική, προτεινόμενης με συnerγατική: (a) πλήρης μορφή, (b) μεγέθυνση μη μηδενικών τιμών διαφοράς παραγόμενης ισχύος.

Στην περιοχή παροχής [5.24, 5.94] σε m³/s οι διαφορές μεταξύ συνεργατικής και προτεινόμενης μεθόδου ξεκινούν από τα 40 kW και ακολούθως αμβλύνονται όσον αυξάνονται οι παροχές, διότι λειτουργούν και τους δύο υδροστροβίλους, όπου η συνεργατική σταθεροποιεί την παροχή σε υδροστρόβιλο “II” και δίνει κοντινές ρυθμίσεις παροχής με εκείνες της προτεινόμενης μεθόδου (αλλά όχι τις βέλτιστες). Τα προαναφερθέντα γίνονται φανερά στο Σχήμα 10.6 που καταγράφεται η παραγόμενη ισχύς με την εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου και στο Σχήμα 10.7, όπου καταγράφονται οι διαφορές παραγόμενων ισχύων. Συγκεντρωτικά οι αντίστοιχες μέσες διαφορές ισχύων καταγράφονται στον Πίνακα 10.2, όπου η βελτίωση της συνεργατικής έναντι της ιεραρχικής είναι πολύ μικρή (μόλις 0.66 kW), ενώ αντίστοιχα της προτεινόμενης έναντι της συνεργατικής και της ιεραρχικής περιορίζεται στα 3.28 και 2.62 kW αντίστοιχα.

10.4.5 Σύγκριση Σεναρίων

Από τη σύγκριση των μεθόδων φαίνεται καθαρά ότι στα τρία σενάρια που εξετάστηκαν η προτεινόμενη μέθοδος πλεονεκτεί συστηματικά, όπως άλλωστε φαίνεται και στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Πίνακα 10.2 και στα σχήματα 10.3, 10.5 και 10.7. Ειδικά στην περίπτωση όμοιων υδροστροβίλων (σενάριο “B”) η βελτίωση είναι σημαντική. Στα υπόλοιπα σενάρια υπάρχουν συγκεκριμένες περιοχές παροχής μεγάλων τιμών που μπορούν να λειτουργήσουν και οι δύο υδροστροβίλοι, όπου η προτεινόμενη μέθοδος βελτιώνει τη συνολική παραγόμενη ισχύς του υδροηλεκτρικού σταθμού ελαφρώς.

Scenario	$P_{syn-hier}$ [kW]	$P_{prop-hier}$ [kW]	$P_{prop-syn}$ [kW]
A	11.066	11.567	0.501
B	0.000	128.874	128.874
C	0.664	3.282	2.618

Πίνακας 10.2 Μέση διαφορά παραγόμενης ισχύος σεναρίων «A», «B», «C», κατά τη σύγκριση συνεργατικής μεθόδου με ιεραρχική, προτεινόμενης μεθόδου με ιεραρχική και προτεινόμενης μεθόδου με συνεργατική

10.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο προτάθηκε η μέθοδος βέλτιστης λειτουργίας των δύο στροβίλων με εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών λειτουργίας των στροβίλων ανάλογα με το επίπεδο παροχής. Στην περίπτωση που είναι δυνατή η λειτουργία και των δύο στροβίλων γίνεται η κατανομή της παροχής κατά το βέλτιστο ενεργειακό τρόπο με κατάλληλη χρήση παραγωγού (έχοντας εκφράσει την καμπύλη απόδοσης ως δευτεροβαθμια εξίσωση της παροχής) και από όλους τους συνδυασμούς επιλέγεται ο τρόπος παραγωγής ισχύος με τη μέγιστη τιμή. Αυτό έχει ως συνέπεια τη διαμόρφωση ενός κατάλληλου πίνακα αναφοράς τρόπου λειτουργίας, με τον οποίο προκαταβολικά μπορεί να ρυθμιστεί η υδροηλεκτρική μονάδα, παράγοντας τη μέγιστη υδροηλεκτρική ισχύ σε κάθε περίπτωση. Η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίνεται με την ιεραρχική και τη συνεργατική μέθοδο που έχουν ήδη αναπτυχθεί βιβλιογραφικά. Βέβαια, δελύνεται το πρόβλημα της ορθής διαστασιολόγησης των υδροστροβίλων (είδος στροβίλου, ονομαστική ισχύς) με βάση τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, αλλά μόνο της βέλτιστης λειτουργίας τους, έχοντας δεδομένη τη διαμόρφωση του υδροηλεκτρικού σταθμού. Για τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη μέθοδος βελτιώνει ή διατηρεί σταθερή την παραγόμενη ισχύ από την πλευρά του υδροηλεκτρικού σταθμού σε σχέση με τις δύο προϋπάρχουσες μεθόδους, ειδικά στην περίπτωση χρήσης δύο όμοιων υδροστροβίλων.

11.1 Συμπεράσματα

Αρχικά, στο 1ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκε η σημασία την ενεργειακής αξιοποίησης μέσω ανανεώσιμων πηγών τόσο σε εγχώριο, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική αναφορά για τη συνεισφορά των υδροηλεκτρικών έργων στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο. Παρουσίασε μεγάλο ενδιαφέρον και φάνηκε πως με τη σωστή μελέτη εφαρμογής για τα δυνητικά αξιοποιήσιμα σημεία θα παρουσίαζε τεράστια αύξηση, ειδικά για τα μικρά υδροηλεκτρικά κατά το ρού του ποταμού. Για τη μελέτη ενός τέτοιου έργου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζονται να πραγματοποιηθούν πολλές διαφορετικές μελέτες, για το κάθε επιμέρους τμήμα που το απαρτίζει ξεχωριστά.

Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η υδρολογική ανάλυση του υδατορεύματος, το οποίο πρόκειται να τον τροφοδοτήσει. Ουσιαστικά, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του υδρολογικού κύκλου, όπως περιγράφεται στο 2ο Κεφάλαιο. Τα φαινόμενα που απαρτίζουν τον υδρολογικό κύκλο είναι τα κατακρημνίσματα (δηλαδή η βροχή και το χιόνι), η εξατμισοδιαπνοή, η κατακράτηση και διήθηση. Ακόμα, η μελέτη της επιφανειακής απορροής, η σχεδίαση υδατογραφημάτων και η εξέταση της λεκάνης απορροής είναι απαραίτητες για την ολοκληρωμένη ανάλυση του υδρολογικού κύκλου. Τέλος, η μέτρηση της παροχής κατά την υδρολογική μελέτη, συμπεριλαμβανόμενης και της πλημμυρικής παροχής, ανά συγκεκριμένους μήνες και χρόνια, βοηθούν στη σχεδίαση της καμπύλης διάρκειας παροχής.

Στη συνέχεια, στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η αρχή της αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας και η περιγραφή των κυριότερων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού, όπως είναι, για παράδειγμα, η βέλτιστη θέση για την κατασκευή του σταθμού. Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες που πρέπει να ακολουθήσει κάποιος για την κατασκευή ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, γιατί η διαμόρφωσή του επηρεάζεται από πολυδιάστατους παράγοντες που συμβάλλουν στη μελέτη της κατασκευής, όπως για παράδειγμα είναι ο τύπος και το μέγεθος του στροβίλου ή της γεννήτριας που πρέπει να επιλεγεί για τη βέλτιστη απόδοση του σταθμού ή ακόμα και διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη, για να πραγματοποιηθεί η βέλτιστη κατασκευή του σταθμού.

Ιδιαίτερα μεγάλη σημασία στα υδροηλεκτρικά έργα έχει και η μελέτη του πολιτικού μηχανικού, που αναπτύχθηκε στο 4ο κεφάλαιο, που αφορά σε όλα τα έργα εκείνα που χρειάζονται από την πλευρά του, προκειμένου να ολοκληρωθεί με επιτυχία ένα υδροηλεκτρικό έργο. Κάποια από αυτά τα έργα είναι το φράγμα, ο ταμιευτήρας (στα μικρά, μπορεί να μην υπάρχει), ο υπερχειλιστής, αλλά κυρίως

η μελέτη της υδροληψίας (αγωγού προσαγωγής), αφού χωρίς υδροληψία, δεν υπάρχει έργο. Ακόμα, η δεξαμενή καθίζησης, η διώρυγα και διάφορα όργανα διακοπής ροής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης είναι αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού, καθώς είναι υπεύθυνος και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χλωρίδας και πανίδας της εξεταζόμενης περιοχής.

Ένα μεγάλο κομμάτι μελέτης που διεξάχθηκε και στην πράξη στην παρούσα εργασία, είναι η σωστή επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Με την εφαρμογή της σωστής τεχνοοικονομικής μελέτης μπορεί κάποιος να ελέγξει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για τη βιωσιμότητα του έργου. Σημειώνεται δε, πως για τα μικρά υδροηλεκτρικά συνήθως προτείνεται τυποποιημένος εξοπλισμός, αφού οι περισσότερες εταιρείες της αγοράς παράγουν λύσεις που μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Αυτό φυσικά, δε σημαίνει ότι δεν απαιτείται η απαραίτητη προσοχή, αφού μία λάθος επιλογή, μπορεί να οδηγήσει το έργο σε αποτυχία και να θέσει σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα του. Σε θεωρητικό επίπεδο αναλύθηκαν τα παραπάνω στο 5ο και 6ο κεφάλαιο αντίστοιχα της παρούσας εργασίας.

Κατά το 7ο κεφάλαιο φαίνεται πως για τα μικρά έργα είναι πολύ πιο εύκολο να ανταποκριθούν σε όλες τις οικολογικές απαιτήσεις, αφού υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να μετριαστούν οι αρνητικές συνέπειες, εφαρμόζοντας την κατάλληλη μελέτη. Σίγουρα σε κάθε μελέτη θα πρέπει να συνεκτιμώνται όλες οι νομοθεσίες της κάθε χώρας που αφορούν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπροσθέτως, όπως περιγράφεται στο 8ο κεφάλαιο αυτό που χρειάζεται εκτενή έρευνα και μελέτη εφαρμογής, δεν είναι άλλο από τα οικονομικά χαρακτηριστικά του κάθε έργου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εφαρμόζεται η εξέταση όλων των οικονομικών μεγεθών, προκειμένου να αποφασιστεί αν κάτι είναι ή όχι βιώσιμο τελικά.

Στο 9ο και 10ο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση υδροηλεκτρικού σταθμού σε μία φανταστική περιοχή που μοιάζει με το Γοργούρι Τρικάλων, για την ακρίβεια, λαμβάνοντας την αντίστοιχη περιοχή, αλλά με πιο έντονο ανάγλυφο. Χρησιμοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες παραμέτροι που αναλύθηκαν στα παραπάνω θεωρητικά κεφάλαια, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης. Τέλος, στο 11ο δίνονται αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τον προγραμματισμό και τη λογική βελτιστοποίησης.

Ειδικότερα, για τη μελέτη εφαρμογής ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- **Τοπογραφική χάραξη διαδρομής:** Διαμορφώθηκε κάβναβος 93.041 σημείων με την αντίστοιχη περιγραφή τους (π.χ. δρόμος, δάσος, κατοικημένη περιοχή, κοκ). Αρχικά, βρέθηκαν ένα ένα 989 “πραγματικά” ύψη για τις συνθήκες $0 \leq x \leq 2.1 \text{ km}$ & $0 \leq y \leq 1.1 \text{ km}$. Στην συνέχεια, μέσω γραμμικής παρεμβολής βρέθηκαν 93.041 με τις αντίστοιχες συντεταγμένες των σημείων. Μόλις βρέθηκαν τα παραπάνω σημεία, μέσω επιπρόσθιου δυναμικού προγραμματισμού, προέκυψαν όλες οι πιθανές

διαδρομές χάραξης με το απαραίτητο μήκος του σωλήνα (θεωρείται παντού κλειστός αγωγός). Ειδικότερα, κατά το μήκος του ποταμού υλοποιήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των σημείων υδροληψίας – απόληξης του αγωγού φυγής με διακριτό βήμα μεταξύ όλων των σημείων υπό εξέταση, 5m, και ελάχιστη απόσταση μεταξύ υδροληψίας – απόληξης τα 100m. Με την εφαρμογή της μεθόδου της βέλτιστης χάραξης, βρέθηκαν 69.406 επιτυχείς πιθανές διαδρομές, δηλαδή από το σημείο υδροληψίας Α ως το σημείο απόληξης νερού Β. Επίσης, σημειώνεται πως μέσα από τον συγκεκριμένο έλεγχο, προέκυψαν, και 6.000 ανεπιτυχείς διαδρομές, οι οποίες δεν εξετάστηκαν στην πορεία.

- **Διαμόρφωση αρχείων εισόδου για υδροστροβίλους, γεννήτριες, μετασχηματιστές και χαλβωσολήνες στο μικρό υδροηλεκτρικό:** Πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη τροποποίηση των παραπάνω αρχείων, έτσι ώστε να μπορέσουν να προστεθούν στο κύριο πρόγραμμα βελτιστοποίησης.
- **Εύρεση της καμπύλης διάρκειας παροχής:** Χρησιμοποιήθηκε πίνακας δεδομένων παροχών για 15 έτη, από το 2000 έως το 2015. Μετά την αφαίρεση της οικολογικής παροχής, δημιουργήθηκε η καμπύλη διάρκειας παροχής και πραγματοποιήθηκε η αρχικοποίηση του σημείου λειτουργίας. Η ανάλυση πραγματοποιείται εντός του κύριου προγραμματισμού.
- **Εύρεση βέλτιστης λύσης μέσω του κύριου προγραμματισμού:** Αρχικά, εισάγονται τα σταθερά δεδομένα, όπως είναι τα ποσοστά συντήρησης, δηλαδή της οικολογικής παροχής, για την εύρεση της καμπύλης διάρκειας φορτίου. Στη συνέχεια, εισάγονται τα γεωμετρικά σταθερά στοιχεία, όπως είναι το ύψος και το μήκος του φράγματος, το μήκος της δεξαμενής καθίζησης υπό μορφή καναλιού, το μήκος του δρόμου, καθώς και το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Ακόμα, εισάγεται το σταθερό ενεργειακό κόστος, το αποπληθωρισμένο επιτόκιο, ο χρόνος κατασκευής και μελέτης και το ποσοστό του κόστους λειτουργίας. Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω σαν σταθερά δεδομένα, στην πορεία, εισάγονται όλα αυτά που έχουν μεταβαλλόμενες τιμές, για τις οποίες πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση ως προς όλα τα εξεταζόμενα οικονομικά κριτήρια που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία. Εισάγεται ο αριθμός ταυτοποίησης της χάραξης της κάθε εξεταζόμενης διαδρομής, το μήκος της κοίτης που προέκυψε από την τοπογραφική ανάλυση και τη μελέτη χάραξης, το μήκος εκτροπής της κοίτης, το μήκος του σωλήνα που προέκυψε από τη μελέτη χάραξης και το μεικτός ύψος, h_{gross} , το οποίο προκύπτει και αυτό από τη χάραξη. Στην πορεία, εισάγονται τα δεδομένα υδροστροβίλων, γεννητριών, μετασχηματιστών, όπως αυτά προέκυψαν από τη

διαμόρφωση των αρχείων τους, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο κύριο πρόγραμμα. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η διαμόρφωση της καμπύλης διάρκειας φορτίου και η επιλογή του κανονικού σημείου λειτουργίας του υδροηλεκτρικού, δηλαδή μίας παροχής που αντιστοιχεί σε ανηγμένο χρόνο υπέρβασης της καμπύλης διάρκειας παροχής και χρησιμοποιείται ως ονομαστική. Ακόμα, εισάγονται τα δεδομένα των σωληνώσεων, χωρίς να υπάρχει κάποιος κατασκευαστικός περιορισμός. Τα δεδομένα είναι η ονομαστική διάμετρος, η εξωτερική διάμετρος, το πάχος και υπολογίζονται οι αντίστοιχες τριβές, η διατομή και οι υδραυλικές απώλειες για κάθε περίπτωση. Με δεδομένο τον σωλήνα και την ονομαστική παροχή, υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες, το καθαρό ύψος και προσδιορίζονται οι επιτρεπτοί υδροστρόβιλοι, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Για τον κάθε υπό εξέταση υδροστρόβιλο το πρόγραμμα εντοπίζει τις κατάλληλες γεννήτριες και μετασχηματιστές με ονομαστικές ισχύες κατάλληλες ως προς τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ο υδροστρόβιλος. Επιπλέον για την εύρεση του μετασχηματιστή υπάρχει περιορισμός στην ισχύ του, ώστε να είναι μεγαλύτερη ή ίση με αυτή της γεννήτριας, αλλιώς δε θα μπορούσε να λειτουργήσει σωστά το σύστημα. Κάθε ένας από τους παραπάνω συνδυασμούς (κανονική παροχή – σωλήνας – υδροστρόβιλος – γεννήτρια – μετασχηματιστής) της εκάστοτε υπό μελέτη χάραξης, εξετάζονται ενεργειακά και οικονομικά, εκλέγοντας τελικά τη βέλτιστη οικονομικά λύση. Επισημαίνεται δε, πως ο εκάστατε εξεταζόμενος συνδυασμός είναι τεχνικά εφικτός.

Ειδικότερα, μέσα από όλα τα παραπάνω βήματα, για κάθε εξεταζόμενη ονομαστική παροχή από την καμπύλη διάρκειας φορτίου και για την εκάστοτε εξεταζόμενη επιτυχή διαδρομή από τη χάραξη διαδρομών, προκύπτει η ονομαστική διάμετρος του σωλήνα, το διαθέσιμο ύψος, δηλαδή το ύψος χωρίς τις υδραυλικές απώλειες του σωλήνα, το κατάλληλο σύνολο υδροστρόβιλου – γεννήτριας – μετασχηματιστή με τις αντίστοιχες ονομαστικές ισχύες, έχοντας ελέγξει να βρίσκονται εντός των απαραίτητων ορίων λειτουργίας που δίνονται από τους κατασκευαστές. Στη συνέχεια, υπολογίζεται όλο ο συνολικός ετήσιος όγκος και ο πραγματικά αξιοποιήσιμος μέσα σε έναν χρόνο, ώστε να μπορέσει να βρεθεί ο πραγματικός βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης.

Ακόμα υπολογίζεται το κόστος της εγκατάστασης, ο οποίος αποτελείται από όλα αυτά που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Το κόστος φράγματος, της υδροληψίας, της διώρυγας προσαγωγής, το κόστος του θυροφράγματος, της δεξαμενής φόρτισης και του αγωγού πτώσης. Επιπρόσθετα, στο συνολικό κόστος εγκατάστασης συνυπολογίζονται αναλυτικά τα κόστη βάνας πεταλούδας, το κόστος κτιρίου, το κόστος ιχθυόσκαλας, το κόστος του δρόμου και το κόστος του ηλεκτρολογικού πίνακα. Ακόμα, υπολογίστηκε το κόστος των διακοπών ισχύος και της γραμμής ηλεκτρικής τροφοδοσίας, καθώς και το

απαραίτητο κόστος που απαιτείται για την εκπαίδευση των ανθρώπων (750 € η ανθρωποημέρα) μέσα σε 30 ημέρες. Από το συνολικό κόστος που προέκυψε, αφαιρέθηκε το 12,5% (δίνεται ως τυπική τιμή) που αντιστοιχεί στο κόστος της μελέτης.

Έχοντας υπολογίσει, επιπλέον την ετήσια παράγωγη ενέργειας, τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης, το συνολικό κόστος εγκατάστασης και το ποσοστό του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού επί του συγκεκριμένου κόστους, και ο λόγος λειτουργίας χρόνου, πραγματοποιείται ο έλεγχος όλων των απαραίτητων οικονομικών παραμέτρων για κάθε λύση που έχει προκύψει. Αυτά τα οικονομικά κριτήρια είναι η καθαρή παρούσα αξία, ο λόγος οφέλους κόστους, η περίοδος αποπληρωμής και το αποπληρωρισμένο επιτόκιο ανάκτησης κεφαλαίου.

Λόγω του τεραστίου όγκου των αποτελεσμάτων χάραξης, για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτες χίλιες περιπτώσεις με το μεγαλύτερο μεικτό ύψος και οι πρώτες χίλιες με τον μεγαλύτερο λόγο μεικτού ύψους προς το μήκος του σωλήνα για τις δύο παρακάτω συνθήκες:

- Λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης,
- Μη λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης.

Στην περίπτωση του λόγου μεικτού ύψους προς το μήκος του σωλήνα δε βρέθηκε καμία βιώσιμη λύση. Η βέλτιστη λύση προέκυψε από τον έλεγχο των χιλίων διαδρομών με το μεγαλύτερο ύψος. Αυτή αναλύθηκε στο 9ο κεφάλαιο και φάνηκε πως και για τις δύο παραπάνω συνθήκες, λαμβάνοντας ή όχι το ποσοστό της ενεργειακής αξιοποίησης τελικά είναι η ίδια. Στις περιπτώσεις που δε συνυπολογίζεται ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης επιλέγεται μικρότερη διάμετρος σωλήνωσης για τις συγκεκριμένες διαδρομές, λόγω μεγαλύτερου ύψους, και έτσι δημιουργούνται μεγαλύτερες τριβές. Αυτό οδηγεί στο να αξιοποιείται λιγότερη παροχή από τη διαθέσιμη (μικρότερη ενεργειακή αξιοποίηση), άρα να παράγεται λιγότερη ενέργεια και τελικά να μην δίνονται βιώσιμες λύσεις.

Για την καλύτερη ενεργειακή αξιοποίηση, στη συνέχεια, στο 10ο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η μέθοδος βέλτιστης λειτουργίας δύο στροβίλων με εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών λειτουργίας των στροβίλων ανάλογα με το επίπεδο παροχής. Πραγματοποιείται η κατανομή της παροχής κατά το βέλτιστο ενεργειακό τρόπο με κατάλληλη χρήση, με αποτέλεσμα να επιλέγεται ο τρόπος παραγωγής ισχύος με τη μέγιστη τιμή. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις δύο υπάρχουσες μεθόδους λειτουργίας δύο υδροστροβίλων, την ιεραρχική και την συνεργατική και σημειώθηκε πως και κάθε εξεταζόμενο σενάριο η προτεινόμενη μέθοδος υπερσχύει των άλλων δύο.

11.2 Προτάσεις

- Βέλτιστη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού κατά το ρου του ποταμού με περισσότερους από δύο υδροστροβίλους.
- Βέλτιστη λειτουργία μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού κατά το ρου του ποταμού, όπου η καμπύλη απόδοσης δεν εκφράζεται μόνο ως δευτεροβάθμια εξίσωση.
- Βέλτιστη τοπογραφική σχεδίαση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού κατά το ρου του ποταμού με χρήση ανοικτού καναλιού
- Βέλτιστος σχεδιασμός και λειτουργία ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού με μικρή δεξαμενή ή άλλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας
- Μελέτη απόδοσης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (γεννήτρια-μετασχηματιστής) για μικρό υδροηλεκτρικό σταθμό.
- Βέλτιστος σχεδιασμός γεννητριών για μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Π.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Επέκταση τοπογραφικού διαγράμματος

```

clear; % katharismos 'workspace'
clc; % katharismos 'command window'
% ANAGNWSH DEDOMENWN - topografika dedomena
bima_x=5.0; % m
bima_y=5.0; % m
platos_0=1; % pollaplasio bimatos kata x /y - potamos
platos_1=3; % pollaplasio bimatos kata x /y - megalos dromos
platos_2=2; % pollaplasio bimatos kata x /y - aplos dromos
platos_3=1; % pollaplasio bimatos kata x /y - xwmatodromos

orio_proseggisis=0.1; % gia euresi "koinwn simeiwv"

array_proxeiro=xlsread('topografikover001','Sheet1');
array_proxeiro1=xlsread('topografikover001','Sheet2');

Nx=length(array_proxeiro(1,:))-1;
Ny=length(array_proxeiro(:,1))-1;
for i_metritis_x=1:Nx
    x_mikos(i_metritis_x)=array_proxeiro(1,(i_metritis_x+1));
end;
for i_metritis_y=1:Ny
    y_mikos(i_metritis_y)=array_proxeiro((i_metritis_y+1),1);
end;

for i_metritis_x=1:Nx
    for i_metritis_y=1:Ny
        h_initial(i_metritis_y,i_metritis_x)=array_proxeiro((i_metritis_y+1),(i_metritis_x+1));
    end;
end;

char_initial(i_metritis_y,i_metritis_x)=array_proxeiro1((i_metritis_y+1),(i_metritis_x+1));
end;

% kataskeui neou arxeiou topografikwn dedomenwn
% ajonas x
Nx_new=ceil((x_mikos(Nx)-x_mikos(1)+0.0001)/bima_x);
for i_metritis_x=1:Nx_new
    x_mikos_new(i_metritis_x)=x_mikos(1)+bima_x*(i_metritis_x-1);
end;
% ajonas y
Ny_new=ceil((y_mikos(Ny)-y_mikos(1)+0.0001)/bima_y);
for i_metritis_y=1:Ny_new
    y_mikos_new(i_metritis_y)=y_mikos(1)+bima_y*(i_metritis_y-1);
end;

% topothetisi neou yfous
for i_metritis_x=1:Nx_new
% euresi thesis kata x
    iflag_x=0;
    i_met_x=1;
    while ((i_met_x<Nx)&(iflag_x==0))
        i_met_x=i_met_x+1;
        if (x_mikos_new(i_metritis_x)<=x_mikos(i_met_x))
            iflag_x=1;
        end;
    end;
    for i_metritis_y=1:Ny_new
% euresi thesis kata y
        iflag_y=0;
        i_met_y=1;
        while ((i_met_y<Ny)&(iflag_y==0))
            i_met_y=i_met_y+1;
            if (y_mikos_new(i_metritis_y)<=y_mikos(i_met_y))
                iflag_y=1;
            end;
        end;
    end;
% euresi thesis tessarwn korifwn
    i_met_x_1=i_met_x-1;
    i_met_y_1=i_met_y-1;
    hprox_a=h_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)+(h_initial(i_met_y_1,i_met_x)-
h_initial(i_met_y_1,i_met_x_1))*(x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x_1))/(x_mikos(i_met_x)-
x_mikos(i_met_x_1));
    hprox_b=h_initial(i_met_y,i_met_x_1)+(h_initial(i_met_y,i_met_x)-

```

```

h_initial(i_met_y,i_met_x_1))*(x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x_1))/(x_mikos(i_met_x)-
x_mikos(i_met_x_1));
    height_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=hprox_a+(hprox_b-
hprox_a)*(y_mikos_new(i_metritis_y)-y_mikos(i_met_y_1))/(y_mikos(i_met_y)-y_mikos(i_met_y_1));
% arxikopoiisi
    char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=-1;
end;
end;
% topothetisisi mi grammikwn stoixeiwn
for i_metritis_x=1:Nx_new
    for i_metritis_y=1:Ny_new
        % euresi kontinoterou arxikou simeiou pou den einai 0,1,2,3
        distance_new=10^8;
        for i_met_x=1:Nx
            for i_met_y=1:Ny
                distance_proxeiro=((y_mikos_new(i_metritis_y)-
y_mikos(i_met_y))^2)+((x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x))^2)^0.5;
                if (distance_proxeiro<=distance_new)
                    if (char_initial(i_met_y,i_met_x)>3)
                        distance_new=distance_proxeiro;
                        char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=char_initial(i_met_y,i_met_x);
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;

% xaraji grammikwn stoixeiwn - stoixeio "0" potamos
arxi_metritis_platous_0=floor((platos_0+0.001)/2);
for i_met_x=1:Nx
    for i_met_y=1:Ny
        if (char_initial(i_met_y,i_met_x)==0)
% bres se poia thesi antistoixei se neo topografiko sxedio
            flag_euresi=0;
            for i_metritis_x=1:Nx_new
                for i_metritis_y=1:Ny_new
                    distance_proxeiro=((y_mikos_new(i_metritis_y)-
y_mikos(i_met_y))^2)+((x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x))^2)^0.5;
                    if (orio_proseggisis>distance_proxeiro)
                        flag_euresi=1;
                        thesi_kata_x=i_metritis_x;
                        thesi_kata_y=i_metritis_y;
                        char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=0; % bale potami
                    end;
                end;
            end;
            if (flag_euresi==0)
                disp(['alarm for x: ', num2str(i_met_x), ' for y: ', num2str(i_met_y)]);
            end;
% pame gia euresi geitonikwn stoixeiwn
% panw dejia
            if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y>1)) % den prepei na einai se telos xarti anw- dejia
                i_met_x_1=i_met_x+1;
                i_met_y_1=i_met_y-1; % gia na paei panw !!!
                if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==0) % einai koino stoixeio
                    % oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
                    thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
                    thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
                    if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoietai logw i_met_x
                        thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
                    end;
                    if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoietai logw i_met_x
                        thesi_kata_x_telos=Nx_new;
                    end;
                    i_met_diagwnia=-1;
                    hprox_a=h_initial(i_met_y,i_met_x);
                    hprox_b=h_initial(i_met_y_1,i_met_x_1);
                    distance_proxeiro_gia_hab=((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x))^2)+((y_mikos(i_met_y_1)-y_mikos(i_met_y))^2)^0.5;
                    for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                        i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
                        thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metritis_platous_0-i_met_diagwnia; % edw
einai platos
                        thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_0-1; % edw einai platos
                        if (thesi_kata_y_arxi<1)
                            thesi_kata_y_arxi=1;
                        end;
                        if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoietai
                            thesi_kata_y_telos=Ny_new;
                        end;
                        for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                            char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=0; % potamos
% diorthwsi koitis potamou se olo to platos
                            distance_proxeiro_height=((x_mikos_new(i_met_thesi_kata_x)-

```

```

x_mikos(i_met_x)^2)+((y_mikos_new(i_met_thesi_kata_y)-y_mikos(i_met_y))^2))^0.5;
height_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=hprox_a+(hprox_b-
hprox_a)*distance_proxeiro_height/distance_proxeiro_gia_hab;
end;
end;
end;

%horizontia
if (i_met_x<Nx) % den prepei na einai se telos xarti dejia
i_met_x_1=i_met_x+1;
if (char_initial(i_met_y,i_met_x_1)==0) % einai koino stoixeio
% oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_0; % edw einai platos
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platous_0-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_y_arxi<1)
thesi_kata_y_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
hprox_a=h_initial(i_met_y,i_met_x);
hprox_b=h_initial(i_met_y,i_met_x_1);
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=0; % potamos
% diorthwsi koitis potamou se olo to platos
height_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=hprox_a+(hprox_b-
hprox_a)*(x_mikos_new(i_met_thesi_kata_x)-x_mikos(i_met_x))/(x_mikos(i_met_x_1)-x_mikos(i_met_x));
end;
end;
end;
end;
%katw dejia
if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y<Ny)) % den prepei na einai se telos xarti katw- dejia
i_met_x_1=i_met_x+1;
i_met_y_1=i_met_y+1;
if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==0) % einai koino stoixeio
% oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
i_met_diagwnia=-1;
hprox_a=h_initial(i_met_y,i_met_x);
hprox_b=h_initial(i_met_y_1,i_met_x_1);
distance_proxeiro_gia_hab=((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x))^2)+((y_mikos(i_met_y_1)-y_mikos(i_met_y))^2))^0.5;
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_0+i_met_diagwnia; % edw
einai platos
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platous_0-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_y_arxi<1)
thesi_kata_y_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=0; % potamos
% diorthwsi koitis potamou se olo to platos
distance_proxeiro_height=((x_mikos_new(i_met_thesi_kata_x)-
x_mikos(i_met_x))^2)+((y_mikos_new(i_met_thesi_kata_y)-y_mikos(i_met_y))^2))^0.5;
height_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=hprox_a+(hprox_b-
hprox_a)*distance_proxeiro_height/distance_proxeiro_gia_hab;
end;
end;
end;
end;
%katw katakorifa
if (i_met_y<Ny) % den prepei na einai se telos xarti katw

```

```

i_met_y_1=i_met_y+1;
if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x)==0) % einai koino stoixeio
% oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y;
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y+floor((y_mikos(i_met_y_1)-
y_mikos(i_met_y)+0.0001)/bima_y);
if (thesi_kata_y_arxi>Ny_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_y_arxi=Ny_new;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x-arxi_metrisis_platous_0; % edw einai platos
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x_arxi+platos_0-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_x_arxi<1)
thesi_kata_x_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new)
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
hprox_a=h_initial(i_met_y,i_met_x);
hprox_b=h_initial(i_met_y_1,i_met_x);
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=0; % potamos
% diorthwsi koitis potamou se olo to platos
height_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=hprox_a+(hprox_b-
hprox_a)*(y_mikos_new(i_met_thesi_kata_y)-y_mikos(i_met_y))/(y_mikos(i_met_y_1)-y_mikos(i_met_y));
end;
end;
end;
end;
end;
end;
%----- potamos

% ----////////////////////// megalos dromos
% xaraji grammikwn stoixeiwn - stoixeio "1" megalos dromos
arxi_metrisis_platous_1=floor((platos_1+0.001)/2);
for i_met_x=1:Nx
for i_met_y=1:Ny
if (char_initial(i_met_y,i_met_x)==1)
% bres se poia thesi antistoixei se neo topografiko sxedio
flag_euresi=0;
for i_metritis_x=1:Nx_new
for i_metritis_y=1:Ny_new
distance_proxeiro=((y_mikos_new(i_metritis_y)-
y_mikos(i_met_y))^2)+((x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x))^2)^0.5;
if (orio_proseggisis>distance_proxeiro)
flag_euresi=1;
thesi_kata_x=i_metritis_x;
thesi_kata_y=i_metritis_y;
if (char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)~=0)
char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=1; % megalos dromos
else
char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=12; % gefira
end;
end;
end;
end;
if (flag_euresi==0)
disp(['gia "1" alarm for x: ', num2str(i_met_x), ' for y: ', num2str(i_met_y)]);
end;
% pame gia euresi geitonikwn stoixeiwn
% panw dejia
if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y>1)) % den prepei na einai se telos xarti anw- dejia
i_met_x_1=i_met_x+1;
i_met_y_1=i_met_y-1; % gia na paei panw !!!
if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==1) % einai koino stoixeio / megalos dromos
% oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
i_met_diagwnia=-1;
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_1-i_met_diagwnia; % edw
einai platos
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_1-1; % edw einai platos

```

```

        if (thesi_kata_y_arxi<1)
            thesi_kata_y_arxi=1;
        end;
        if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoeitai
            thesi_kata_y_telos=Ny_new;
        end;
        for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
            if (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)
                char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=1; % megalos dromos
            else
                char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
            end;
        end;
    end;
end;
end;

%horizontia
    if (i_met_x<Nx) % den prepei na einai se telos xarti dejia
        i_met_x_1=i_met_x+1;
        if (char_initial(i_met_y,i_met_x_1)==1) % einai koino stoixeio /megalos dromos
            % oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi+metrisis_platous_1; % edw einai platos
            thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_1-1; % edw einai platos
            if (thesi_kata_y_arxi<1)
                thesi_kata_y_arxi=1;
            end;
            if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
                thesi_kata_y_telos=Ny_new;
            end;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                    if (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=1; % megalos dromos
                    else
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

%katw dejia
    if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y<Ny)) % den prepei na einai se telos xarti katw- dejia
        i_met_x_1=i_met_x+1;
        i_met_y_1=i_met_y+1;
        if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==1) % einai koino stoixeio/megalos dromos
            % oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            i_met_diagwnia=-1;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
                thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi+metrisis_platous_1+i_met_diagwnia; % edw
einai platos
                thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_1-1; % edw einai platos
                if (thesi_kata_y_arxi<1)
                    thesi_kata_y_arxi=1;
                end;
                if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
                    thesi_kata_y_telos=Ny_new;
                end;
                for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                    if (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=1; % megalos dromos
                    else
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;

```

```

end;
%katw katakorifa
if (i_met_y<Ny) % den prepei na einai se telos xarti katw
i_met_y_1=i_met_y+1;
if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x)==1) % einai koino stoixeio / megalos dromos
% oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y;
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y+floor((y_mikos(i_met_y_1)-
y_mikos(i_met_y)+0.0001)/bima_y);
if (thesi_kata_y_arxi>Ny_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_y_arxi=Ny_new;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x-arxi_metrisis_platous_1; % edw einai platos
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x_arxi+platos_1-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_x_arxi<1)
thesi_kata_x_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new)
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
if (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=1; % megalos dromos
else
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;
%-----//////// megalos dromos

% ----\////////// dromos
% xaraji grammikwn stoixeiwn - stoixeio "2" aplos dromos
arxi_metrisis_platous_2=floor((platos_2+0.001)/2);
for i_met_x=1:Nx
for i_met_y=1:Ny
if (char_initial(i_met_y,i_met_x)==2)
% bres se poia thesi antistoixei se neo topografiko sxedio
flag_euresi=0;
for i_metritis_x=1:Nx_new
for i_metritis_y=1:Ny_new
distance_proxeiro=((y_mikos_new(i_metritis_y)-
y_mikos(i_met_y))^2)+((x_mikos_new(i_metritis_x)-x_mikos(i_met_x))^2)^0.5;
if (orio_proseggisis>distance_proxeiro)
flag_euresi=1;
thesi_kata_x=i_metritis_x;
thesi_kata_y=i_metritis_y;
if
((char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)~=0)&(char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)~=1))
char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=2; % dromos
elseif (char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)==0)
char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=12; % gefira
else
char_new(i_metritis_y,i_metritis_x)=13; % diastaurwsi
end;
end;
end;
end;
if (flag_euresi==0)
disp(['gia "2" alarm for x: ', num2str(i_met_x),' for y: ', num2str(i_met_y)]);
end;
% pame gia euresi geitonikwn stoixeiwn
% panw dejia
if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y>1)) % den prepei na einai se telos xarti anw- dejia
i_met_x_1=i_met_x+1;
i_met_y_1=i_met_y-1; % gia na paei panw !!!
if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==2) % einai koino stoixeio / aplos dromos
% oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
i_met_diagwnia=-1;

```



```

        for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
            i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
            thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_2-i_met_diagwnia; % edw
einai platos
            thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_2-1; % edw einai platos
            if (thesi_kata_y_arxi<1)
                thesi_kata_y_arxi=1;
            end;
            if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoeitai
                thesi_kata_y_telos=Ny_new;
            end;
            for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1))
                    char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=2; % dromos
                elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
                    char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                else
                    char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

%horizontia
    if (i_met_x<Nx) % den prepei na einai se telos xarti dejia
        i_met_x_1=i_met_x+1;
        if (char_initial(i_met_y,i_met_x_1)==2) % einai koino stoixeio / aplos dromos
            % oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_2; % edw einai platos
            thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_2-1; % edw einai platos
            if (thesi_kata_y_arxi<1)
                thesi_kata_y_arxi=1;
            end;
            if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
                thesi_kata_y_telos=Ny_new;
            end;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                    if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1))
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=2; % dromos
                    elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                    else
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

%katw dejia
    if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y<Ny)) % den prepei na einai se telos xarti katw- dejia
        i_met_x_1=i_met_x+1;
        i_met_y_1=i_met_y+1;
        if (char_initial(i_met_y_1,i_met_x_1)==2) % einai koino stoixeio/ aplos dromos
            % oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_1)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            i_met_diagwnia=-1;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
                thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrisis_platous_2+i_met_diagwnia; % edw
einai platos
                thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_2-1; % edw einai platos
                if (thesi_kata_y_arxi<1)
                    thesi_kata_y_arxi=1;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```



```

        end;
    end;
    end;
    if (flag_euresi==0)
        disp(['gia "3" alarm for x: ', num2str(i_met_x),' for y: ', num2str(i_met_y)]);
    end;
% pame gia euresi geitonikwn stoixeiwn
% panw dejia
    if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y>1)) % den prepei na einai se telos xarti anw- dejia
        i_met_x_l=i_met_x+1;
        i_met_y_l=i_met_y-1; % gia na paei panw !!!
        if (char_initial(i_met_y_l,i_met_x_l)==3) % einai koino stoixeio / xwmatodromos
            % oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_l)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            i_met_diagwnia=-1;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
                thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y_arxi_metrasis_platous_3-i_met_diagwnia; % edw
einai platos

                thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_3-1; % edw einai platos
                if (thesi_kata_y_arxi<1)
                    thesi_kata_y_arxi=1;
                end;
                if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoeitai
                    thesi_kata_y_telos=Ny_new;
                end;
                for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                    if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=2))
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=3; % xwmatodromos
                    elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                    else
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi me
megalo h aplo dromo

                end;
            end;
        end;
    end;
end;

%orizontia
    if (i_met_x<Nx) % den prepei na einai se telos xarti dejia
        i_met_x_l=i_met_x+1;
        if (char_initial(i_met_y,i_met_x_l)==3) % einai koino stoixeio / xwmatodromos
            % oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
            thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
            thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_l)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
            if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
            end;
            if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoeitai logw i_met_x
                thesi_kata_x_telos=Nx_new;
            end;
            thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y_arxi_metrasis_platous_3; % edw einai platos
            thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_3-1; % edw einai platos
            if (thesi_kata_y_arxi<1)
                thesi_kata_y_arxi=1;
            end;
            if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
                thesi_kata_y_telos=Ny_new;
            end;
            for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
                for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
                    if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=2))
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=3; % xwmatodromos
                    elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
                    else
                        char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi me
megalo h aplo dromo

                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

end;
end;
%katw dejia
if ((i_met_x<Nx)&(i_met_y<Ny)) % den prepei na einai se telos xarti katw- dejia
i_met_x_l=i_met_x+1;
i_met_y_l=i_met_y+1;
if (char_initial(i_met_y_l,i_met_x_l)==3) % einai koino stoixeio/ xwmatodromos
% oli i metaji tous diagwnia katw dejia grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x;
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x+floor((x_mikos(i_met_x_l)-
x_mikos(i_met_x)+0.0001)/bima_x);
if (thesi_kata_x_arxi>Nx_new) % kanonika den energopoieitai logw i_met_x
thesi_kata_x_arxi=Nx_new;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new) % kanonika den energopoieitai logw i_met_x
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
i_met_diagwnia=-1;
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
i_met_diagwnia=i_met_diagwnia+1; % posa bimata exoume kanei
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y-arxi_metrasis_platous_3+i_met_diagwnia; % edw
einai platos
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y_arxi+platos_3-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_y_arxi<1)
thesi_kata_y_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new)
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=2))
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=3; % xwmatodromos
elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
else
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi me
megalo h aplo dromo
end;
end;
end;
end;
%katw katakorifa
if (i_met_y<Ny) % den prepei na einai se telos xarti katw
i_met_y_l=i_met_y+1;
if (char_initial(i_met_y_l,i_met_x)~=3) % einai koino stoixeio / xwmatodromos
% oli i metaji tous grammi prepei na ginei to idio !!!
thesi_kata_y_arxi=thesi_kata_y;
thesi_kata_y_telos=thesi_kata_y+floor((y_mikos(i_met_y_l)-
y_mikos(i_met_y)+0.0001)/bima_y);
if (thesi_kata_y_arxi>Ny_new) % kanonika den energopoieitai logw i_met_x
thesi_kata_y_arxi=Ny_new;
end;
if (thesi_kata_y_telos>Ny_new) % kanonika den energopoieitai logw i_met_x
thesi_kata_y_telos=Ny_new;
end;
thesi_kata_x_arxi=thesi_kata_x-arxi_metrasis_platous_3; % edw einai platos
thesi_kata_x_telos=thesi_kata_x_arxi+platos_3-1; % edw einai platos
if (thesi_kata_x_arxi<1)
thesi_kata_x_arxi=1;
end;
if (thesi_kata_x_telos>Nx_new)
thesi_kata_x_telos=Nx_new;
end;
for i_met_thesi_kata_x=thesi_kata_x_arxi:thesi_kata_x_telos
for i_met_thesi_kata_y=thesi_kata_y_arxi:thesi_kata_y_telos
if
((char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=0)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kat
a_x)~=1)&(char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)~=2))
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=3; % xwmatodromos
elseif (char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)==0)
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=12; % gefira
else
char_new(i_met_thesi_kata_y,i_met_thesi_kata_x)=13; % diastaurwsi me
megalo h aplo dromo
end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;
%-----***** xwmatodromos
filename1='Total_topografiko.xlsx';

```

```

xlswrite(filename1,x_mikos_new,1);
xlswrite(filename1,y_mikos_new',2);
xlswrite(filename1,height_new,3);
xlswrite(filename1,char_new,4);
% gia anaparastasti arxikou
%for i_met_y=1:Ny
%   i_met_y2=Ny-i_met_y+1;
%   y_mikos_graph(i_met_y)=y_mikos(i_met_y2);
%end;
%surf(x_mikos,y_mikos_graph,char_initial) anaparastasi me katakorifo
%antistrofa topothetimeno wste optika na einai swsto...

% surf(x_mikos,y_mikos,char_initial)
% surf(x_mikos_new,y_mikos_new,char_new)

```

Π.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Χάραξη βέλτιστης διαδρομής κλειστού αγωγού προσαγωγής υπό πίεση μεταξύ διαφορετικών σημείων υδροληψίας και επιστροφής αγωγού φυγής σε κοίτη ποταμού

```

clear; % katharismos 'workspace'
clc; % katharismos 'command window'
% dedomena
orio_proseggisis=0.1;
bima_x=5.0; % m
bima_y=5.0; % m
miki_ydrolifias_stathmou=100.0;

% analogika kosti /poini ktl
weight_cost= [10.0; % kostos na perasw swlina apo potamo "0"
6.0; % kostos na perasw swlina apo kyrio eparxiako dromo "1"
4.0; % kostos na perasw swlina apo aplo dromo "2"
2.0; % kostos na perasw swlina apo xwmatodromo "3"
100.0; % kostos na perasw swlina apo katoikies "4" / apotreptiko
1.3; % kostos na perasw swlina apo ktima "5"
1.2; % kostos na perasw swlina apo araiο dasos "6"
50.0; % kostos na perasw swlina apo apotoma prani/epikindino meros "7"
2.0; % kostos na perasw swlina apo pikno dasos "8"
1.0; % kostos na perasw swlina apo adiafori ektasi "9"
30.0; % kostos na perasw swlina apo biotexnia "10"
1000.0; % kostos na perasw swlina apo spanio dasos/katarraktes "11"
10.0; % kostos na perasw swlina apo gefira "12"
7.0]; % kostos na perasw swlina apo diastaurwsi "13"
weight_flag= [ 0; % simaia gia potamo "0"
1; % simaia gia kyrio eparxiako dromo "1"
2; % simaia gia aplo dromo "2"
3; % simaia gia xwmatodromo "3"
4; % simaia gia katoikies "4" / apotreptiko
5; % simaia gia ktima "5"
6; % simaia gia araiο dasos "6"
7; % simaia gia apotoma prani/epikindino meros "7"
8; % simaia gia pikno dasos "8"
9; % simaia gia adiafori ektasi "9"
10; % simaia gia biotexnia "10"
11; % simaia gia spanio dasos/katarraktes "11"
12; % simaia gia gefira "12"
13]; % simaia gia diastaurwsi "13"
N_weight_flag=length(weight_flag);
radius_epidraisis=max([bima_x bima_y]);

% ANAGNWSH DEDOMENWN - topografika dedomena
vector_x_proxeiro=xlsread('Total_topografiko','Sheet1');
vector_y_proxeiro=xlsread('Total_topografiko','Sheet2');
array_height_proxeiro=xlsread('Total_topografiko','Sheet3');
array_char_proxeiro=xlsread('Total_topografiko','Sheet4');

Nx=length(vector_x_proxeiro(1,:));
Ny=length(vector_y_proxeiro(:,1));
for i_metritis_x=1:Nx
x_mikos(i_metritis_x,1)=vector_x_proxeiro(1,i_metritis_x);
end;
for i_metritis_y=1:Ny
y_mikos(i_metritis_y,1)=vector_y_proxeiro(i_metritis_y,1);
end;

for i_metritis_x=1:Nx
for i_metritis_y=1:Ny

```

```

height(i_metritis_y,i_metritis_x)=array_height_proxeiro(i_metritis_y,i_metritis_x);
char(i_metritis_y,i_metritis_x)=array_char_proxeiro(i_metritis_y,i_metritis_x);
end;
end;

% euresi simeiw'n potamou-elegxos ENAS POTAMOS / KLADOS ktl....
simeia_potamou=0;
for i_metritis_x=1:Nx
    for i_metritis_y=1:Ny
        if ((char(i_metritis_y,i_metritis_x)==0)|(char(i_metritis_y,i_metritis_x)==12))
            simeia_potamou=simeia_potamou+1;
            simeia_potamou_kata_x(simeia_potamou)=x_mikos(i_metritis_x,1);
            simeia_potamou_kata_y(simeia_potamou)=y_mikos(i_metritis_y,1);
            simeia_potamou_kata_h(simeia_potamou)=height(i_metritis_y,i_metritis_x);
        end;
    end;
end;

% katataji me f'ninonta tropo
for i_met_potamos_1=1:simeia_potamou
    for i_met_potamos_2=(i_met_potamos_1+1):simeia_potamou
        if (simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_1)<simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_2))
            proxeiro_h=simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_2);
            proxeiro_x=simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_2);
            proxeiro_y=simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_2);
            simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_2)=simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_1);
            simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_2)=simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_1);
            simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_2)=simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_1);
            simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_1)=proxeiro_h;
            simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_1)=proxeiro_x;
            simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_1)=proxeiro_y;
        end;
    end;
end;

% elegxos gia ena potamos me enan klado ktl
orio_apostasis=max(bima_x,bima_y);
orio_apostasis=1.42*orio_apostasis;
for i_met_potamos_1=1:(simeia_potamou-1)
    i_met_potamos_2=i_met_potamos_1+1;
    distance_proxeiro=(((simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_1)-
simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_2))^2)+(simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_1)-
simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_2))^2))^0.5;
    if (distance_proxeiro>orio_apostasis)
        disp(['alarm gia ta simeia ', num2str(i_met_potamos_1), ' : x1 ',
num2str(simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_1)), ' y1:
',num2str(simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_1)), ' and x2 ',
num2str(simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_2)), ' y2:
',num2str(simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_2))]);
    end;
end;

%euresi mikous potamou
distance_koiti_arxi(1)=0.0;
for i_met_potamos_2=2:simeia_potamou
    i_met_potamos_1=i_met_potamos_2-1;
    distance_koiti_arxi(i_met_potamos_2)=distance_koiti_arxi(i_met_potamos_1)+((
simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_1)-
simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_2))^2)+(simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_1)-
simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_2))^2)+(simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_1)-
simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_2))^2))^0.5;
end;

%----- metrises id
katallilo_zeugos_A_B=0;
akatallilo_zeugos_A_B=0;

for i_met_potamos_ydrolifia=1:(simeia_potamou-1)
% for i_met_potamos_ydrolifia=1:1
    simeio_ydrolifias_h=simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_ydrolifia); % simeio A
    simeio_ydrolifias_x=simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_ydrolifia);
    simeio_ydrolifias_y=simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_ydrolifia);
% simeio apolijis agwgou figis
    for i_met_potamos_apoliji=(i_met_potamos_ydrolifia+1):simeia_potamou
% for i_met_potamos_apoliji=(simeia_potamou):simeia_potamou
        simeio_apoliji_h=simeia_potamou_kata_h(i_met_potamos_apoliji);
        simeio_apoliji_x=simeia_potamou_kata_x(i_met_potamos_apoliji);
        simeio_apoliji_y=simeia_potamou_kata_y(i_met_potamos_apoliji);
        distance_koiti_ydrolifia_apoliji=distance_koiti_arxi(i_met_potamos_apoliji)-
distance_koiti_arxi(i_met_potamos_ydrolifia);
        distance_ydrolifia_apoliji=((simeio_ydrolifias_x-
simeio_apoliji_x)^2)+(simeio_ydrolifias_y-simeio_apoliji_y)^2))^0.5;
        if (distance_ydrolifia_apoliji>miki_ydrolifias_stathmou)
% katallilo simeio apolijis agwgou figis - simeio B
            katallilo_zeugos_A_B=katallilo_zeugos_A_B+1;
            disp(['Katallilo zeugos A kai B aujwn arithmos: ',num2str(katallilo_zeugos_A_B)])
            Nx_new=floor((distance_ydrolifia_apoliji-0.001)/bima_x);
            Ny_new=2*floor(max([ x_mikos(Nx,1)-x_mikos(1,1) (y_mikos(Ny,1)-
y_mikos(1,1)) ])/(2*bima_y))+1;

```

```

Ny_new_mean=floor(Ny_new/2);
% euresi gwnias gia allagi plegmatos
if ((simeio_apoliji_x-simeio_ydrolifias_x)>0.0001)
    gwnia_thita_AB=atan((simeio_apoliji_y-simeio_ydrolifias_y)/(simeio_apoliji_x-
simeio_ydrolifias_x));
elseif ((simeio_apoliji_x-simeio_ydrolifias_x)<-0.0001)
    gwnia_thita_AB=atan((simeio_apoliji_y-simeio_ydrolifias_y)/(simeio_apoliji_x-
simeio_ydrolifias_x))+pi;
elseif ((simeio_apoliji_y-simeio_ydrolifias_y)>0) %
simeio_apoliji_x==simeio_ydrolifias_x
    gwnia_thita_AB=pi/2;
else
    gwnia_thita_AB=-pi/2;
end;
% korifes plegmatos

simeio_ydrolifias_x_new=simeio_ydrolifias_x*cos(gwnia_thita_AB)+simeio_ydrolifias_y*sin(gwnia_thit
a_AB);
simeio_ydrolifias_y_new=-
simeio_ydrolifias_x*sin(gwnia_thita_AB)+simeio_ydrolifias_y*cos(gwnia_thita_AB);
simeio_ydrolifias_h_new=simeio_ydrolifias_h;

simeio_apoliji_x_new=simeio_apoliji_x*cos(gwnia_thita_AB)+simeio_apoliji_y*sin(gwnia_thita_AB);
simeio_apoliji_y_new=-
simeio_apoliji_x*sin(gwnia_thita_AB)+simeio_apoliji_y*cos(gwnia_thita_AB);
simeio_apoliji_h_new=simeio_apoliji_h;
% kataskeui plegmatos
for i_met_x_new=1:Nx_new
    x_mikos_new(i_met_x_new,1)=simeio_ydrolifias_x_new+bima_x*i_met_x_new;
    for i_met_y_new=1:Ny_new
        y_mikos_new(i_met_y_new,1)=simeio_ydrolifias_y_new+bima_y*(i_met_y_new-1-
Ny_new_mean);
        x_mikos_old_pro=x_mikos_new(i_met_x_new,1)*cos(gwnia_thita_AB)-
y_mikos_new(i_met_y_new,1)*sin(gwnia_thita_AB);
        y_mikos_old_pro=x_mikos_new(i_met_x_new,1)*sin(gwnia_thita_AB)+y_mikos_new(i_met_y_new,1)*cos(gwni
a_thita_AB);
        i_flag_energou(i_met_y_new,i_met_x_new)=0;
        height_new(i_met_y_new,i_met_x_new)=0.0;
        char_new(i_met_y_new,i_met_x_new)=0.0;
        % euresi mikroteris apostasis apo kontinotero simeio
        i_metritis_x_min=round((x_mikos_old_pro-x_mikos(1,1))/bima_x)+1;
        i_metritis_y_min=round((y_mikos_old_pro-y_mikos(1,1))/bima_y)+1;
        distance_minimum_proxeiro=10^10;
        if (
(i_metritis_x_min>=1)&(i_metritis_x_min<=Nx)&(i_metritis_y_min>=1)&(i_metritis_y_min<=Ny))
            distance_proxeiro=((x_mikos(i_metritis_x_min,1)-
x_mikos_old_pro)^2)+((y_mikos(i_metritis_y_min,1)-y_mikos_old_pro)^2)^0.5;
            if (distance_proxeiro<=radius_epidrasis)
                i_flag_energou(i_met_y_new,i_met_x_new)=1; % einai energo simeio
height_new(i_met_y_new,i_met_x_new)=height(i_metritis_y_min,i_metritis_x_min); %topothetisi yfous
char_new(i_met_y_new,i_met_x_new)=char(i_metritis_y_min,i_metritis_x_min); % topothetisi
charaktirismou
                end; % elegxos gia apostasi
            end; % elegxos i_metritis_x_min, i_metritis_y_min
        end;
end;
% ----- dynamikos programmatismos
% ----- arxikopoiisi apo simeio ydrolifias simeio
for i_met_y_new=1:Ny_new
    thesi_poreias(i_met_y_new,1)=-1;
    if
(i_flag_energou(i_met_y_new,1)==1)&(height_new(i_met_y_new,1)<=simeio_ydrolifias_h_new)
        distance_pro=(((x_mikos_new(1,1)-
simeio_ydrolifias_x_new)^2)+((y_mikos_new(i_met_y_new,1)-
simeio_ydrolifias_y_new)^2)+((height_new(i_met_y_new,1)-simeio_ydrolifias_h_new)^2))^0.5;
        weight_cost_pro=10^20;
        for i_met_weight_flag=1:N_weight_flag
            if (weight_flag(i_met_weight_flag)==char_new(i_met_y_new,1))
                weight_cost_pro=weight_cost(i_met_weight_flag);
            end;
        end;
        V_pdyn(i_met_y_new,1)=weight_cost_pro*distance_pro;
        thesi_poreias(i_met_y_new,1)=0;
    else
        V_pdyn(i_met_y_new,1)=10^25;
    end;
end;
% ----- epomena simeia apo simeio ydrolifias xwris apoliji
for i_met_x_new=2:Nx_new
    i_met_x_new_1=i_met_x_new-1;
    for i_met_y_new=1:Ny_new
        % fajimo olwn tw'n proigoumenwn y

```

```

        thesi_poreias(i_met_y_new,i_met_x_new)=-1;
        V_pdyn(i_met_y_new,i_met_x_new)=10^30;
        for i_met_y_new_1=1:Ny_new
            if
(i_flag_energou(i_met_y_new,i_met_x_new)==1)&(height_new(i_met_y_new,i_met_x_new)<=height_new(i_me
t_y_new_1,i_met_x_new_1))
                distance_pro=((x_mikos_new(i_met_x_new,1)-
x_mikos_new(i_met_x_new_1,1))^2)+((y_mikos_new(i_met_y_new,1)-
y_mikos_new(i_met_y_new_1,1))^2)+((height_new(i_met_y_new,i_met_x_new)-
height_new(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1))^2))^0.5;
                weight_cost_pro=10^20;
                for i_met_weight_flag=1:N_weight_flag
                    if (weight_flag(i_met_weight_flag)==char_new(i_met_y_new,1))
                        weight_cost_pro=weight_cost(i_met_weight_flag);
                    end;
                end;
V_pdyn_pro=V_pdyn(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1)+weight_cost_pro*distance_pro;
                if (V_pdyn_pro<V_pdyn(i_met_y_new,i_met_x_new))
                    V_pdyn(i_met_y_new,i_met_x_new)=V_pdyn_pro;
                    thesi_poreias(i_met_y_new,i_met_x_new)=i_met_y_new_1;
                end;
            end;
        end;
        end;
        % teleutaio simeio apoliji
        i_met_x_new_1=Nx_new;
        % fajimo olwn twn proigoumenwn y
        thesi_poreias_apoliji=-1;
        V_pdyn_apoliji=10^35;
        for i_met_y_new_1=1:Ny_new
            if (simeio_apoliji_h_new<=height_new(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1))
                distance_pro=((simeio_apoliji_x_new-
x_mikos_new(i_met_x_new_1,1))^2)+((simeio_apoliji_y_new-
y_mikos_new(i_met_y_new_1,1))^2)+((simeio_apoliji_h_new-
height_new(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1))^2))^0.5;
                V_pdyn_pro=V_pdyn(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1)+1.0*distance_pro;
                if (V_pdyn_pro<V_pdyn_apoliji)
                    V_pdyn_apoliji=V_pdyn_pro;
                    thesi_poreias_apoliji=i_met_y_new_1;
                end;
            end;
        end;
        % euresi poreias & euresi mikous swlina
        i_met_x_new_1=Nx_new;
        distance_swlina=((simeio_apoliji_x_new-
x_mikos_new(i_met_x_new_1,1))^2)+((simeio_apoliji_y_new-
y_mikos_new(thesi_poreias_apoliji,1))^2)+((simeio_apoliji_h_new-
height_new(thesi_poreias_apoliji,i_met_x_new_1))^2))^0.5;
        i_met_y_new=thesi_poreias_apoliji;
        x_xaraji(Nx_new)=x_mikos_new(i_met_x_new_1,1)*cos(gwnia_thita_AB)-
y_mikos_new(thesi_poreias_apoliji,1)*sin(gwnia_thita_AB);

y_xaraji(Nx_new)=x_mikos_new(i_met_x_new_1,1)*sin(gwnia_thita_AB)+y_mikos_new(thesi_poreias_apolij
i,1)*cos(gwnia_thita_AB);

        for i_met_x_new_1=(Nx_new-1):-1:1
            i_met_x_new=i_met_x_new_1+1;
            i_met_y_new_1=thesi_poreias(i_met_y_new,i_met_x_new);
            distance_swlina=distance_swlina+((x_mikos_new(i_met_x_new,1)-
x_mikos_new(i_met_x_new_1,1))^2)+((y_mikos_new(i_met_y_new,1)-
y_mikos_new(i_met_y_new_1,1))^2)+((height_new(i_met_y_new,i_met_x_new)-
height_new(i_met_y_new_1,i_met_x_new_1))^2))^0.5;
            i_met_y_new=i_met_y_new_1;
            x_xaraji(i_met_x_new)=x_mikos_new(i_met_x_new_1,1)*cos(gwnia_thita_AB)-
y_mikos_new(i_met_y_new_1,1)*sin(gwnia_thita_AB);

y_xaraji(i_met_x_new)=x_mikos_new(i_met_x_new_1,1)*sin(gwnia_thita_AB)+y_mikos_new(i_met_y_new_1
,1)*cos(gwnia_thita_AB);
        end;
        distance_swlina=distance_swlina+((x_mikos_new(1,1)-
simeio_ydrolifias_x_new)^2)+((y_mikos_new(i_met_y_new,1)-
simeio_ydrolifias_y_new)^2)+((height_new(i_met_y_new,1)-simeio_ydrolifias_h_new)^2))^0.5;

        % apothikeusis katallilou
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,1)=katallilo_zeugos_A_B;
% aujwn arithmos
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,2)=simeio_ydrolifias_x;
% simera A to x
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,3)=simeio_ydrolifias_y;
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,4)=simeio_ydrolifias_h;
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,5)=simeio_apoliji_x; %
simeio B
        pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,6)=simeio_apoliji_y;

```



```

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,7)=simeio_apoliji_h;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,8)=gwnia_thita_AB*180/pi; %
gwnia_thita_AB se moires

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,9)=simeio_ydrolifias_x_new; % simera
A to x nees sintetagemenes

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,10)=simeio_ydrolifias_y_new;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,11)=simeio_ydrolifias_h_new;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,12)=simeio_apoliji_x_new; % simeio B
nees sintetagemenes

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,13)=simeio_apoliji_y_new;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,14)=simeio_apoliji_h_new;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,15)=distance_koiti_ydrolifias_apoliji;
% mikos koitis potamou
pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,16)=distance_swlina; %
mikos swlina ydrolifias
for i_met_x_new=1:Nx_new
    thesi1=16+2*(i_met_x_new-1)+1;
    thesi2=16+2*i_met_x_new;

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,thesi1)=x_xaraji(i_met_x_new);

pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(katallilo_zeugos_A_B,thesi2)=y_xaraji(i_met_x_new);
end;
else
    % apothikeusi akatallilou
    akatallilo_zeugos_A_B=akatallilo_zeugos_A_B+1;

pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,1)=akatallilo_zeugos_A_B; % aujwn
arithmos

pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,2)=simeio_ydrolifias_x; % simera A
to x

pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,3)=simeio_ydrolifias_y;

pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,4)=simeio_ydrolifias_h;
pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,5)=simeio_apoliji_x;
% simeio B
pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,6)=simeio_apoliji_y;
pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(akatallilo_zeugos_A_B,7)=simeio_apoliji_h;
end; % ejetasi apostasis A kai B
end; % for i_met_potamos_apoliji
end; % for i_met_potamos_ydrolifias

length_pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous=length(pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(:,1)
);
Plithos_pinakwn=ceil(length_pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous/1000);
for il_met_arxeiwn=1:Plithos_pinakwn
    filename1=['Apotelesmata_xarajis_epitixi_',num2str(il_met_arxeiwn),'.xlsx'];
    il_arxi=1+(il_met_arxeiwn-1)*1000;
    il_telos=il_met_arxeiwn*1000;
    if (il_telos>length_pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous)
        il_telos=length_pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous;
    end;
    xlswrite(filename1,pinakas_apothikeusis_katallilou_zeugous(il_arxi:il_telos,:),1);
end;

length_pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous=length(pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(:,
1));
Plithos_pinakwn=ceil(length(pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous)/1000);
for il_met_arxeiwn=1:Plithos_pinakwn
    filename1=['Apotelesmata_xarajis_ANEPITYXH_',num2str(il_met_arxeiwn),'.xlsx'];
    il_arxi=1+(il_met_arxeiwn-1)*1000;
    il_telos=il_met_arxeiwn*1000;
    if (il_telos>length_pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous)
        il_telos=length_pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous;
    end;
    xlswrite(filename1,pinakas_apothikeusis_akatallilou_zeugous(il_arxi:il_telos,:),1);
end;

% gia anaparastasi arxikou
%for i_met_y=1:Ny
%    i_met_y2=Ny-i_met_y+1;
%    y_mikos_graph(i_met_y)=y_mikos(i_met_y2);
%end;

```

```

%surf(x_mikos,y_mikos_graph,char_initial)  anaparastasi me katakorifo
%antistrofa topothetimenw wste optika na einai swsto...

% surf(x_mikos,y_mikos,char_initial)
% surf(x_mikos_new,y_mikos_new,char_new)

```

Π.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου στροβίλων σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα

```

clear;
clc;
% anagwnsi pinaka strobilou arxikis morfis
% ana stili mpainei strobilos -
% 1h grammi typos strobilou
% 2h grammi a/a strobilou
% 3h grammi eidos strobilou (1-> Francis katakorifos kata ton Pinaka 5.2
% Papantwni, 12-> Pelton me 1 akrofisio, 122 -> Pelton -> 2akrofisia, 124
% -> Pelton me 4 arkorifisia, 123 me tria akrofisia , 101 -> Francis kleistou thalamou
% 4h grammi Hnom [m]
% 5h grammi Qnom [m3/s]
% 6h grammi Hmin_oper kata pinaka 5.2 [logos]
% 7h grammi Hmax_oper kata pinaka 5.2 [logos]
% 8h grammi Qmin_oper kata pinaka 5.2 [logos]
% 9h grammi Qmax_oper kata pinaka 5.2 [logos]
% 10h grammi ns (eidiki taxitita)
% 11h grammi n (RPM)
% 12h grammi plithos simeiwv poligownou
% 13h grammi HnomA [m]
% 14h grammi QnomA[m3/s]
% 15h grammi HnomB [m]
% 16h grammi QnomB[m3/s]
% 17h grammi HnomC [m]
% 18h grammi QnomC[m3/s]
% 19h grammi HnomD [m]
% 20h grammi QnomD[m3/s]
% 21h grammi HnomE [m]
% 22h grammi QnomE[m3/s]
% 23h grammi HnomF [m]
% 24h grammi QnomF[m3/s]
% h apodosi toso onomastiki, oso kai epimerous prosdiorizontai me basi eidos strobilou
....
TABLE_STROBILOS=xlsread('strobiloi_typoul.xlsx');
length_TABLE_STROBILOS_plithos=length(TABLE_STROBILOS(:,1)); % prosoxi to MATLAB pida
ti grammi me grammata !!!!
length_TABLE_STROBILOS_stiles=length(TABLE_STROBILOS(1,:));
counter_new_strobilos=0;
for counter_strobilos=1:length_TABLE_STROBILOS_stiles
    % euresi apodosis
    if (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==1)|| (TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)==2)|| (TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)==101)|| (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==3)
        % prokeitai gia Francis pinakas 5_4
        ns_Francis=[78 137 208 275];
        N_MW=[1.0 3.0 5.0 7.0 10.0];
        apodosi_Francis=[ 0.861 0.875 0.885 0.895 0.895;
                        0.876 0.891 0.901 0.908 0.911;
                        0.879 0.893 0.902 0.909 0.912;
                        0.862 0.876 0.885 0.892 0.895];
        %
        Q/Qnom 5.25b          0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50
0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90 0.95 1.00 1.05 1.10 1.15 1.20]
        ns_endiamesa_Francis_400=[0.0 0.0 0.0 0.0 0.08 0.25 0.37 0.50 0.60 0.68 0.74
0.78 0.81 0.83 0.85 0.87 0.885 0.90 0.91 0.92 0.92 0.92 0.92 0.91 0.90];
        ns_endiamesa_Francis_100=[0.0 0.0 0.28 0.47 0.60 0.69 0.75 0.80 0.82 0.84
0.855 0.865 0.875 0.8825 0.90 0.905 0.91 0.915 0.9175 0.92 0.92 0.92 0.92 0.91 0.90];
        Nominal_Power_old=9.81*1000*TABLE_STROBILOS((4-
1),counter_strobilos)*TABLE_STROBILOS((5-1),counter_strobilos)/(10^6); % MW
        ns_nominal=TABLE_STROBILOS((10-1),counter_strobilos);
        flag_eustathis_lysi=0;
        counter_proxeiro_apodosis=0;

```

```

while (flag_eustathis_lysi==0)&&(counter_proxeiro_apodosis<10)
    counter_proxeiro_apodosis=counter_proxeiro_apodosis+1;
% euresi simeiou tou pinaka
i_flag_ns=0;
for i_counter_thesi=1:length(ns_Francis)
    if (ns_nominal>ns_Francis(i_counter_thesi))
        i_flag_ns=i_counter_thesi;
    end;
end;
i_flag_Nominal_power=0;
for i_counter_thesi=1:length(N_MW)
    if (Nominal_Power_old>N_MW(i_counter_thesi))
        i_flag_Nominal_power=i_counter_thesi;
    end;
end;
% me basi ta simeia ginetai paremboli, efoson xreiazetai
if (i_flag_ns==0)
    if (i_flag_Nominal_power==0)
        nominal_apodosi=apodosi_Francis(1,1);
    else
        if (i_flag_Nominal_power==length(N_MW))
            nominal_apodosi=apodosi_Francis(1,length(N_MW));
        else
            % paremboli ws lh grammi
nominal_apodosi=apodosi_Francis(1,i_flag_Nominal_power)+(apodosi_Francis(1,(i_flag_Nominal_power+1))-apodosi_Francis(1,i_flag_Nominal_power))*(Nominal_Power_old-N_MW(i_flag_Nominal_power))/(N_MW((i_flag_Nominal_power+1))-N_MW(i_flag_Nominal_power));
            end;
        end;
    end;
    if (i_flag_ns==length(ns_Francis))
        if (i_flag_Nominal_power==0)
            nominal_apodosi=apodosi_Francis(length(ns_Francis),1);
        else
            if (i_flag_Nominal_power==length(N_MW))
                nominal_apodosi=apodosi_Francis(length(ns_Francis),length(N_MW));
            else
                % paremboli ws teleutaia grammi
nominal_apodosi=apodosi_Francis(length(ns_Francis),i_flag_Nominal_power)+(apodosi_Francis(length(ns_Francis),(i_flag_Nominal_power+1))-apodosi_Francis(length(ns_Francis),i_flag_Nominal_power))*(Nominal_Power_old-N_MW(i_flag_Nominal_power))/(N_MW((i_flag_Nominal_power+1))-N_MW(i_flag_Nominal_power));
            end;
        end;
    end;
    if (i_flag_Nominal_power==0)
        if (i_flag_ns==0)
            nominal_apodosi=apodosi_Francis(1,1);
        else
            if (i_flag_ns==length(ns_Francis))
                nominal_apodosi=apodosi_Francis(length(ns_Francis),1);
            else
                % paremboli ws lh stili
nominal_apodosi=apodosi_Francis(i_flag_ns,1)+(apodosi_Francis((i_flag_ns+1),1)-apodosi_Francis(i_flag_ns,1))*(ns_nominal-ns_Francis(i_flag_ns))/(ns_Francis((i_flag_ns+1))-ns_Francis(i_flag_ns));
            end;
        end;
    end;
    if (i_flag_Nominal_power==length(N_MW))
        if (i_flag_ns==0)
            nominal_apodosi=apodosi_Francis(1,length(N_MW));
        else
            if (i_flag_ns==length(ns_Francis))
                nominal_apodosi=apodosi_Francis(length(ns_Francis),length(N_MW));
            else
                % paremboli ws teleytaia stili
nominal_apodosi=apodosi_Francis(i_flag_ns,length(N_MW))+apodosi_Francis((i_flag_ns+1),length(N_MW))-apodosi_Francis(i_flag_ns,length(N_MW))*(ns_nominal-ns_Francis(i_flag_ns))/(ns_Francis((i_flag_ns+1))-ns_Francis(i_flag_ns));
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

        end;
    end;
end;
% alliws DIPLH PAREMBOLH
if
((i_flag_Nominal_power<length(N_MW))&&(i_flag_Nominal_power>0)&&(i_flag_ns<length(ns_F
rancis))&&(i_flag_ns>0))

nominal_apodosi_1=apodosi_Francis(i_flag_ns,i_flag_Nominal_power)+(apodosi_Francis((i_
flag_ns+1),i_flag_Nominal_power)-
apodosi_Francis(i_flag_ns,i_flag_Nominal_power))*(ns_nominal-
ns_Francis(i_flag_ns))/(ns_Francis((i_flag_ns+1))-ns_Francis(i_flag_ns));

nominal_apodosi_2=apodosi_Francis(i_flag_ns,(i_flag_Nominal_power+1)+(apodosi_Francis
((i_flag_ns+1),(i_flag_Nominal_power+1))-
apodosi_Francis(i_flag_ns,(i_flag_Nominal_power+1)))*(ns_nominal-
ns_Francis(i_flag_ns))/(ns_Francis((i_flag_ns+1))-ns_Francis(i_flag_ns));
    nominal_apodosi=nominal_apodosi_1+(nominal_apodosi_2-
nominal_apodosi_1)*(Nominal_Power_old-
N_MW(i_flag_Nominal_power))/(N_MW((i_flag_Nominal_power+1))-
N_MW(i_flag_Nominal_power));
    end;
    Nominal_Power_new=nominal_apodosi*9.81*1000*TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)/(10^6); % MW
    if (abs((Nominal_Power_new-Nominal_Power_old)/Nominal_Power_old)<0.0001)
        flag_eustathis_lysi=1;
    end;
    Nominal_Power_old=Nominal_Power_new;
end;
if (ns_nominal<100)
    for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=ns_endiamesa_Francis_100(counter_kampili_ap
odosis)*nominal_apodosi/ns_endiamesa_Francis_100(21);
    end;
    else
        if (ns_nominal>400)
            for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=ns_endiamesa_Francis_400(counter_kampili_ap
odosis)*nominal_apodosi/ns_endiamesa_Francis_400(21);
            end;
            else % metaj;y 100 ws 400
                for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=ns_endiamesa_Francis_100(counter_kampili_ap
odosis)*nominal_apodosi/ns_endiamesa_Francis_100(21)+(ns_endiamesa_Francis_400(counter
_kampili_apodosis)*nominal_apodosi/ns_endiamesa_Francis_400(21)-
ns_endiamesa_Francis_100(counter_kampili_apodosis)*nominal_apodosi/ns_endiamesa_Franci
s_100(21))*(ns_nominal-100)/(400-100);
                end;
            end;
            if (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==101) % diorthwsi gia kleistou
thalamou apodosi
                for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)*
0.975; % typiki meiws kat;a 2.5% (86% anti 88%)
                end;
                nominal_apodosi=nominal_apodosi*0.975;
            end;

Nominal_Power_N1_kW_for_cost=kampili_apodosis(21)*9.81*999.7/1000*TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos);
%    costos(counter_strobilos)=1.15*10513*(Nominal_Power_N1_kW_for_cost^(1.000-
0.287))*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^(-0.134);
%    costos(counter_strobilos)=116400*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.481)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.1953);
% diortheseis logw kleistou thalamou h anoiktou thalamou se kostos
    if (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==101)|| (TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)==3)
        costos(counter_strobilos)=costos(counter_strobilos)*0.95;
    end;
% diorthwseis logw anoiktou thalamou se apodosi afoy ypologistike kostos
% logw epidrasis pollaplasiasi sti strofwn

```

```

        if (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==3)
            for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)*
0.97; % typiki meiwsi kata 3%
                end;
                nominal_apodosi=nominal_apodosi*0.97;
            end;
        end; % Francis
        if (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==5) % kaplan
% Q/Qnom 5.25b      0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50 0.55
0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90 0.95 1.00 1.05 1.10 1.15 1.20]
                ns_endiamesa_Kaplan=[0.0 0.0 0.07 0.60 0.78 0.83 0.87 0.90 0.91 0.92 0.93
0.933 0.934 0.935 0.935 0.934 0.933 0.93 0.927 0.924 0.92 0.91 0.895 0.88 0.86];
                nominal_apodosi=ns_endiamesa_Kaplan(21);
                for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=ns_endiamesa_Kaplan(counter_kampili_apodosi
s);
                    end;

Nominal Power N1_kW_for_cost=nominal_apodosi*9.81*999.7/1000*TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos);
%      costos(counter_strobilos)=1.15*15311*(Nominal Power N1_kW_for_cost^(1.000-
0.125))*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^(-0.9506);
                costos(counter_strobilos)=104800*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.410)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.2000);
                end; % kaplan
                if ((TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==12)|| (TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)==122)|| (TABLE_STROBILOS((3-
1),counter_strobilos)==123)|| (TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==124)) %
pelton
%      Q/Qnom 5.25b      0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50
0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90 0.95 1.00 1.05 1.10 1.15 1.20]
                ns_endiamesa_Pelton=[0.0 0.65 0.77 0.82 0.85 0.86 0.87 0.875 0.876 0.877 0.878
0.879 0.880 0.882 0.884 0.886 0.888 0.89 0.89 0.885 0.88 0.87 0.86 0.85 0.80];
                nominal_apodosi=ns_endiamesa_Pelton(21);
                for counter_kampili_apodosis=1:25

kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis)=ns_endiamesa_Pelton(counter_kampili_apodosi
s);
                    end;

Nominal Power N1_kW_for_cost=nominal_apodosi*9.81*999.7/1000*TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)*TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos);
                if ((TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==12))
                    costos(counter_strobilos)=138500*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.444)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.2582);
                end;
                if ((TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==122)) % me 2 akrofisia
                    costos(counter_strobilos)=138500*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.444)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.2582);
                end;
                if ((TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==123))
                    costos(counter_strobilos)=138500*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.444)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.2582);
                end;
                if ((TABLE_STROBILOS((3-1),counter_strobilos)==124)) % me 4 akrofia
                    costos(counter_strobilos)=138500*(TABLE_STROBILOS((5-
1),counter_strobilos)^0.444)*(TABLE_STROBILOS((4-1),counter_strobilos)^0.2582);
                end;
            end; % pelton
% grafi pinaka strobilou telikis morfis
% ana stili mpainei strobilos - 1h grammi a/a strobilou
% 2h grammi eidos strobilou (1-> Francis katakorifos kata ton Pinaka5.2
% 3h grammi Hnom [m]
% 4h grammi Qnom [m3/s]
% 5h grammi Hmin_oper kata pinaka 5.2 [m]
% 6h grammi Hmax_oper kata pinaka 5.2 [m]
% 7h grammi Qmin_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]
% 8h grammi Qmax_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]
% 9h grammi ns (eidiki taxitita)
% 10h grammi n (onomastiki taxitita)
% 11h grammi HnomA [m]
% 12h grammi QnomA [m3/s]
% 13h grammi HnomB [m]

```

```

% 14h grammi QnomB[m3/s]
% 15h grammi HnomC [m]
% 16h grammi QnomC[m3/s]
% 17h grammi n_factor_nom onomastiki apodosi [-]
% 18h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.00
% 19h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.05
% 20h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.10
% 21h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.15
% 22h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.20
% 23h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.25
% 24h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.30
% 25h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.35
% 26h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.40
% 27h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.45
% 28h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.50
% 29h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.55
% 30h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.60
% 31h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.65
% 32h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.70
% 33h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.75
% 34h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.80
% 35h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.85
% 36h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.90
% 37h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.95
% 38h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.00
% 39h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.05
% 40h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.10
% 41h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.15
% 42h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.20
% 43h grammi kostos egkatastasis
    for counter_endiam=1:(TABLE_STROBILOS((12-1),counter_strobilos)-2)
        counter_new_strobilos=counter_new_strobilos+1;
        TABLE_NEW_STROBILOS(1,counter_new_strobilos)=counter_strobilos; % a/a arithmos
        stobilou anti grammatwn

TABLE_NEW_STROBILOS(2,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(2,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(3,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(3,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(4,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(4,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(5,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(5,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(6,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(6,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(7,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(7,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(8,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(8,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(9,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(9,counter_strobilos);
TABLE_NEW_STROBILOS(10,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(10,counter_strobilos);
% ftiaximo trigwnwn

TABLE_NEW_STROBILOS(11,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(12,counter_strobilos); %
simeio A panta,H PREPEI na einai kirto poligwno !!

TABLE_NEW_STROBILOS(12,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS(13,counter_strobilos); %
simeio A panta,Q

TABLE_NEW_STROBILOS(13,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS((12+2*counter_endiam),co
unter_strobilos); % simeio B gia lo trigwno,C gia 2o trigwno,H

TABLE_NEW_STROBILOS(14,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS((13+2*counter_endiam),co
unter_strobilos); % simeio B gia lo trigwno,C gia 2o trigwno,Q

TABLE_NEW_STROBILOS(15,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS((12+2*(counter_endiam+1)
),counter_strobilos); % simeio C gia lo trigwno,D gia 2o trigwno,H

TABLE_NEW_STROBILOS(16,counter_new_strobilos)=TABLE_STROBILOS((13+2*(counter_endiam+1)
),counter_strobilos); % simeio C gia lo trigwno,D gia 2o trigwno,Q
% apodoseis
    TABLE_NEW_STROBILOS(17,counter_new_strobilos)=nominal_apodosi; %nominal
    apodosi
    for counter_kampili_apodosi=1:25

```

```

TABLE_NEW_STROBILOS((17+counter_kampili_apodosis),counter_new_strobilos)=kampili_apodosis(counter_kampili_apodosis);
    end;
    TABLE_NEW_STROBILOS(43,counter_new_strobilos)=costos(counter_strobilos);
    end;
end;
% grafi se arxeio
xlswrite('strobiloi_typou2.xlsx',TABLE_NEW_STROBILOS);

```

Π.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου γεννητριών σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα

```

clear;
clc;
% grafimo pinaka gennitriwn
% ana stili gennitria -
% 1h grammi a/a gennitrias
% 2h grammi eidos gennitrias sixronis -> 1, asigxronis ->2 , dc-> 3
% 3h grammi onomastiki isxis [kVA]
% 4h grammi zeugi poloi
% 5h grammi taxitita peristrofis [RPM]
% 6h grammi onomastiki tasi [Volt]
% 7h grammi cosf [-]
% 8h grammi onomastiki apodosi [-]
% 9h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.00 opou
n_factor_nom*cosf/cosf_nom
% 10h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.05
% 11h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.10
% 12h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.15
% 13h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.20
% 14h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.25
% 15h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.30
% 16h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.35
% 17h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.40
% 18h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.45
% 19h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.50
% 20h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.55
% 21h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.60
% 22h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.65
% 23h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.70
% 24h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.75
% 25h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.80
% 26h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.85
% 27h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.90
% 28h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.95
% 29h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.00
% 30h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.05
% 31h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.10
% 32h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.15
% 33h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.20
% 34h grammi kostos gennitrias
frequency=50; % Hz
% genikes sixrones ----- Marelli S400
S500          S500          S560          S630          S400
S500          S560          S630          S400
S500          S560          S630          S500
S630          S630          S710          S710
S710          S710          S400
S450          S500          S560          S630
S400          S500          S560          S630
S710          S400          S500          S560
S630          S710          S500
S630          S710          S630
S710          S710          S710
S710
S_nom_sigxrones=[ 500  1000  2000  3000  4000  5000  8000  10000  725
815   895  1010  1100  1210  1340  1460  1675  1945  2145  2555  2350
2550  2780  330  380  510  575  660  815  865  1100  1320  1540
1595  1900  1690  2020  2150  2390  200  255  355  420  500  610

```

```

675 840 1045 1235 1245 1485 1280 1530 2020 635 670 780
865 1020 1210 1300 1420 720 870 1100 1280 1380 1780 2200
750 1020 1220 1500 1700 660 900 1070 1330 1500 590 810
970 1190 1350 375 540 750 920 960 1060 1185 1290 1540
1665 1980 2250 1770 2040 2310 2640 3090 385 560 600 685
840 1000 1125 1710 1890 1320 1610 1900 2000 2100 2180 2930
3220 3710 245 425 485 620 745 880 1010 1350 1475 1090
1220 1350 1500 1650 1980 2610 2960 3340 465 565 665 740
920 1030 1150 1210 1400 1600 2200 2500 3090 650 740 820
920 1100 1250 1790 2230 810 1060 1250 1610 1750 720 960
1130 1440 650 860 1010 1290 1430];
V_nom_sigxrnes=[ 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000];
n_nom_sigrxnes=[0.965 0.9664 0.9702 0.9724 0.9740 0.975 0.9775 0.9786 0.9656
0.9659 0.9661 0.9665 0.9668 0.9672 0.9677 0.9681 0.9690 0.9700 0.9705 0.9714 0.9710
0.9714 0.9719 0.9633 0.9638 0.9650 0.9652 0.9654 0.9659 0.9660 0.9668 0.9676 0.9685
0.9687 0.9698 0.9690 0.9702 0.9705 0.9711 0.9610 0.9626 0.9636 0.9462 0.9600 0.965
0.9655 0.9660 0.9666 0.9673 0.9673 0.9682 0.9675 0.9684 0.9702 0.9654 0.9655 0.9658
0.9660 0.9665 0.9672 0.9675 0.9680 0.9656 0.9660 0.9668 0.9675 0.9678 0.9694 0.9706
0.9657 0.9665 0.9672 0.9683 0.9691 0.9654 0.9661 0.9667 0.9677 0.9683 0.9653 0.9659
0.9663 0.9671 0.9677 0.9638 0.9651 0.9657 0.9662 0.9663 0.9666 0.9671 0.9675 0.9685
0.9689 0.9701 0.9708 0.9693 0.9703 0.9709 0.9716 0.9705 0.9634 0.9652 0.9653 0.9655
0.9660 0.9664 0.9669 0.9691 0.9698 0.9676 0.9687 0.9698 0.9702 0.9704 0.9706 0.9722
0.9728 0.9735 0.9623 0.9643 0.9649 0.9654 0.9657 0.9661 0.9664 0.9677 0.9683 0.9667
0.9672 0.9677 0.9683 0.9689 0.9701 0.9715 0.9723 0.9729 0.9647 0.9652 0.9655 0.9657
0.9662 0.9665 0.9670 0.9672 0.9679 0.9689 0.9706 0.9713 0.9725 0.9654 0.9657 0.9659
0.9662 0.9668 0.9674 0.9719 0.9707 0.9659 0.9666 0.9674 0.9687 0.9693 0.9656 0.9663
0.9669 0.9681 0.9615 0.9660 0.9664 0.9675 0.9680];
zeugi_sigrxnes=[ 5 5 5 5 5 5 5 5 5 2
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 5
5 6 6 6 6 6 6 6 7 7 7 7
8 8 8 8 8 8 9 9 9 9 2 2
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6
6 6 6 6 6 6 7 7 7 7 7 8
8 8 9 9 9 9 9];
cosf_sigrxnes =[0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800
0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800 0.800];
% S/Snom sxima 6.13 0.0 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50
0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85 0.90 0.95 1.00 1.05 1.10 1.15 1.20]
apodosi_endiamesa_sigxrnes=[0.0 0.40 0.60 0.65 0.70 0.725 0.75 0.80 0.825 0.85 0.875
0.8875 0.90 0.905 0.910 0.915 0.920 0.925 0.930 0.935 0.940 0.93 0.91 0.89
0.87];
% asigxrnes

```



```

Marelli S250 S280 S315 S355 S400
S400 S500 S315 S355 S400
S450 S500 S630 S315 S355
S400 S450 S500 S630 S700
S355 S400 S450 S500
S630 S710 S355 S400
S450 S500 S630 S710 S400
S450 S500 S630 S710 S
S_nom_asigrxones=[ 400 500 700 1000 2000 3000 4000 5000 400 500
700 1000 2000 3000 4000 5000 400 500 700 1000 2000 3000 4000
5000 60.55 82.93 97.41 119.1 140.9 173.1 215.9 263.9 333.0 402.1 422.6 481.1 587.8
748.3 855.0 951.1 1237 1391 1575 1842 2025 2302 123.1 147.4 179.0 252.1 302.1
348.2 419.9 597.0 674.6 732.6 787.2 884.6 995.2 1106 1397 1611 1842 2250 2587
3003 107.3 129.0 151.4 185.6 231.7 290.3 324.5 356.7 419.9 503.5 552.9 649.0 727.3
816.8 962.3 1132 1302 1554 1726 2071 2328 2762 3222 154.7 187.6 208.6 231.7
288.9 337.0 379.1 421.2 515.4 579.9 661.5 763.5 870.1 1008 1189 1343 1566 1676
1988 2293 147.4 177.1 214.6 234.3 257.3 228.9 321.2 360.0 404.1 415.5 511.4 563.4
681.2 763.5 870.1 986.0 1160 1272 1476 1784 190.2 228.4 253.4 291.6 321.2 365.9
407.4 481.8 550.9 633.8 707.5 818.8 939.2 1070 1249 1409];
V_nom_asigrxones=[ 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 690 690 690 690 690 690 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 690 690 690 690
690 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 690 690 690 690 690 690 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400];
n_nom_asigrxones=[0.920 0.927 0.933 0.940 0.950 0.954 0.956 0.957 0.920 0.927
0.933 0.940 0.950 0.954 0.956 0.957 0.875 0.900 0.913 0.925 0.940 0.948 0.951
0.952 0.896 0.897 0.898 0.900 0.901 0.903 0.906 0.910 0.914 0.918 0.920 0.924 0.929
0.933 0.935 0.938 0.941 0.943 0.944 0.946 0.948 0.950 0.900 0.901 0.903 0.908 0.911
0.914 0.920 0.928 0.930 0.932 0.933 0.935 0.938 0.940 0.942 0.944 0.946 0.950 0.951
0.953 0.898 0.900 0.901 0.903 0.906 0.910 0.912 0.914 0.920 0.924 0.927 0.929 0.932
0.934 0.937 0.940 0.960 0.944 0.945 0.948 0.950 0.952 0.953 0.808 0.815 0.820 0.825
0.835 0.845 0.854 0.863 0.888 0.900 0.905 0.910 0.915 0.920 0.926 0.928 0.931 0.933
0.937 0.941 0.803 0.808 0.815 0.820 0.825 0.831 0.838 0.845 0.860 0.870 0.883 0.895
0.905 0.910 0.915 0.919 0.925 0.927 0.930 0.921 0.813 0.820 0.825 0.833 0.840 0.850
0.856 0.870 0.885 0.900 0.905 0.912 0.916 0.921 0.926 0.928];
zeugi_asigrxones=[ 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4
4 4 4 4 4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
2 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7
7];
cosf_asigrxones =[0.808 0.810 0.813 0.819 0.830 0.840 0.84 0.85 0.808 0.810
0.813 0.819 0.830 0.840 0.84 0.85 0.758 0.761 0.770 0.778 0.799 0.815 0.828
0.840 0.908 0.904 0.924 0.923 0.937 0.924 0.926 0.947 0.946 0.932 0.947 0.935 0.936
0.935 0.936 0.946 0.889 0.899 0.889 0.869 0.889 0.869 0.894 0.895 0.894 0.893 0.894
0.905 0.893 0.905 0.904 0.915 0.915 0.904 0.904 0.904 0.859 0.869 0.869 0.889 0.889
0.899 0.839 0.853 0.872 0.862 0.863 0.861 0.863 0.883 0.893 0.894 0.904 0.894 0.894
0.894 0.883 0.883 0.883 0.869 0.869 0.869 0.859 0.869 0.869 0.853 0.853 0.863 0.863
0.831 0.831 0.831 0.831 0.873 0.862 0.862 0.851 0.862 0.873 0.883 0.894 0.894 0.895
0.905 0.916 0.746 0.746 0.746 0.768 0.777 0.779 0.778 0.778 0.841 0.842 0.841 0.852
0.851 0.851 0.862 0.862 0.862 0.904 0.915 0.925 0.789 0.788 0.789 0.789 0.809 0.820
0.810 0.789 0.799 0.789 0.820 0.831 0.830 0.841 0.841 0.852];
% S/Snom sxima 6.13 0.0 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25];
apodosi_endiamesa_asigrxones=[0.0 0.90 0.970 0.995 1.00 0.98];
pososto_fortiou=[0.0 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25];
% diorwsi_logw_metabolis_cosf= [0.20 0.30 0.64 0.87 0.89 0.90];
% sigrxones
for counter_gennitries=1:length(S_nom_sigrxones)
TABLE_GENNHTRIES(1,counter_gennitries)=counter_gennitries;
TABLE_GENNHTRIES(2,counter_gennitries)=1; % sigxroni
TABLE_GENNHTRIES(3,counter_gennitries)=S_nom_sigrxones(counter_gennitries);
TABLE_GENNHTRIES(4,counter_gennitries)=zeugi_sigrxones(counter_gennitries);
TABLE_GENNHTRIES(5,counter_gennitries)=60*frequency/zeugi_sigrxones(counter_gennitries);
];

```

```

TABLE_GENNHTRIES(6,counter_gennitries)=V_nom_sigxrones(counter_gennitries);
TABLE_GENNHTRIES(7,counter_gennitries)=cosf_sigrxrones(counter_gennitries);
TABLE_GENNHTRIES(8,counter_gennitries)=n_nom_sigrxrones(counter_gennitries);
for counter_apodosi=1:25

TABLE_GENNHTRIES((8+counter_apodosi),counter_gennitries)=apodosi_endiamesa_sigxrones(c
ounter_apodosi)*n_nom_sigrxrones(counter_gennitries)/apodosi_endiamesa_sigxrones(21);
end;

N_nominal=TABLE_GENNHTRIES(3,counter_gennitries)*TABLE_GENNHTRIES(7,counter_gennitries
);
if (N_nominal<1300)

TABLE_GENNHTRIES(34,counter_gennitries)=26000*((N_nominal/1000)^2)+76600*(N_nominal/10
00)+33600;
else
TABLE_GENNHTRIES(34,counter_gennitries)=-
2000*((N_nominal/1000)^2)+126000*(N_nominal/1000)+116000;
end;
end;
% asigxrones
counter_asigxrones=0;
for
counter_gennitries=(length(S_nom_sigxrones)+1):(length(S_nom_sigxrones)+length(S_nom_a
sigxrones))
counter_asigxrones=counter_asigxrones+1;
TABLE_GENNHTRIES(1,counter_gennitries)=counter_gennitries;
TABLE_GENNHTRIES(2,counter_gennitries)=2; % asigxroni
TABLE_GENNHTRIES(3,counter_gennitries)=S_nom_asigxrones(counter_asigxrones);
TABLE_GENNHTRIES(4,counter_gennitries)=zeugi_asigxrones(counter_asigxrones);

TABLE_GENNHTRIES(5,counter_gennitries)=1.01*60*frequency/zeugi_asigxrones(counter_asig
xrones); % logw olisisthisi
TABLE_GENNHTRIES(6,counter_gennitries)=V_nom_asigxrones(counter_asigxrones);
TABLE_GENNHTRIES(7,counter_gennitries)=cosf_asigxrones(counter_asigxrones);
TABLE_GENNHTRIES(8,counter_gennitries)=n_nom_asigxrones(counter_asigxrones);
for counter_apodosi=1:25
timi_fortiou=0.05*(counter_apodosi-1);
deiktis_fortiou=1;
while (deiktis_fortiou<length(pososto_fortiou))
if
((pososto_fortiou(deiktis_fortiou)<=timi_fortiou)&&(pososto_fortiou(deiktis_fortiou+1)
>timi_fortiou))
apodosi_proxeiro=apodosi_endiamesa_asigxrones(deiktis_fortiou)+(apodosi_endiamesa_asig
xrones(deiktis_fortiou+1)-
apodosi_endiamesa_asigxrones(deiktis_fortiou))*(timi_fortiou-
pososto_fortiou(deiktis_fortiou))/(pososto_fortiou(deiktis_fortiou+1)-
pososto_fortiou(deiktis_fortiou));
%
cosf_proxeiro=diorwsi_logw_metabolis_cosf(deiktis_fortiou)+(diorwsi_logw_metabolis_cos
f(deiktis_fortiou+1)-diorwsi_logw_metabolis_cosf(deiktis_fortiou))*(timi_fortiou-
pososto_fortiou(deiktis_fortiou))/(pososto_fortiou(deiktis_fortiou+1)-
pososto_fortiou(deiktis_fortiou));
end;
deiktis_fortiou=deiktis_fortiou+1;
end;
end;
% yparxei elleima apo epidrasi cosf

TABLE_GENNHTRIES((8+counter_apodosi),counter_gennitries)=apodosi_proxeiro*(n_nom_asigr
xrones(counter_asigxrones)/1.0);
end;

N_nominal=TABLE_GENNHTRIES(3,counter_gennitries)*TABLE_GENNHTRIES(7,counter_gennitries
);
if (N_nominal<1300)

TABLE_GENNHTRIES(34,counter_gennitries)=0.95*(26000*((N_nominal/1000)^2)+76600*(N_nomi
nal/1000)+33600);
else
TABLE_GENNHTRIES(34,counter_gennitries)=0.95*(-
2000*((N_nominal/1000)^2)+126000*(N_nominal/1000)+116000);
end;
end;

% grafi se arxeio

```

```
xlswrite('gennitries.xlsx',TABLE GENNHTRIES);
```

Π.5 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας υπολογισμού διαμόρφωσης αρχείου μετασχηματιστών σε κατάλληλη μορφή για κυρίως πρόγραμμα

```
clear;
clc;
% grafimo pinaka metasximatistwn
% ana stili metasximatisti -
% 1h grammi a/a metasximatisti
% 2h grammi eidosis metasximatisti elaiou -> 1, JHROU ->2
% 3h grammi onomastiki isxis [kVA]
% 4h grammi Vnom1 [Volt]
% 5h grammi Vnom2 [Volt]
% 6h grammi onomastiki apodosi [-]
% 7h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.00 opou
n_factor_nom*cosf/cosf_nom
% 8h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.05
% 9h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.10
% 10h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.15
% 11h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.20
% 12h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.25
% 13h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.30
% 14h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.35
% 15h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.40
% 16h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.45
% 17h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.50
% 18h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.55
% 19h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.60
% 20h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.65
% 21h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.70
% 22h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.75
% 23h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.80
% 24h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.85
% 25h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.90
% 26h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.95
% 27h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.00
% 28h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.05
% 29h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.10
% 30h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.15
% 31h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.20
% 32h grammi kostos egkatastasis M/S
S_nom=[ 100 200 250 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150 4000 5000 10000 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000
5000 10000 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 10000 1000
1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 10000];
V_nom1=[ 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400 400
400 400 400 400 400 690 690 690 690 690 690 690
690 690 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000 3000
6600 6600 6600 6600 6600 6600 6600 6600 6600];
V_nom2=[ 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000
20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000
20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000
20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000 20000];
cosf=[ 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900
0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900
0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900
0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900 0.900];
n_nom=[0.9803 0.9841 0.9852 0.9872 0.9879 0.9890 0.9897 0.9901 0.9908 0.9913 0.9914
0.9917 0.9924 0.9935 0.9941 0.9941 0.9901 0.9908 0.9913 0.9914 0.9917 0.9924 0.9935
0.9941 0.9941 0.9901 0.9908 0.9913 0.9914 0.9917 0.9924 0.9935 0.9941 0.9941 0.9901
0.9908 0.9913 0.9914 0.9917 0.9924 0.9935 0.9941 0.9941;
0.9792 0.9831 0.9842 0.9863 0.9872 0.9883 0.9890 0.9895 0.9902 0.9906 0.9911
0.9914 0.9923 0.9934 0.9941 0.9941 0.9895 0.9902 0.9906 0.9911 0.9914 0.9923 0.9934
0.9941 0.9941 0.9895 0.9902 0.9906 0.9911 0.9914 0.9923 0.9934 0.9941 0.9941 0.9895
0.9902 0.9906 0.9911 0.9914 0.9923 0.9934 0.9941 0.9941;
0.9764 0.9807 0.9820 0.9843 0.9854 0.9867 0.9875 0.9880 0.9888 0.9892 0.9899
0.9903 0.9914 0.9927 0.9935 0.9935 0.9880 0.9888 0.9892 0.9899 0.9903 0.9914 0.9927
0.9935 0.9935 0.9880 0.9888 0.9892 0.9899 0.9903 0.9914 0.9927 0.9935 0.9935 0.9880
0.9888 0.9892 0.9899 0.9903 0.9914 0.9927 0.9935 0.9935];
pososto_fortiou=[0.50 0.75 1.00];
for counter_metasximatistes=1:length(S_nom)
TABLE METASXHMATISTES(1,counter_metasximatistes)=counter_metasximatistes;
```

```

TABLE_METASXHMATISTES(2,counter_metasximatistes)=1; % elaiou
TABLE_METASXHMATISTES(3,counter_metasximatistes)=S_nom(counter_metasximatistes);
TABLE_METASXHMATISTES(4,counter_metasximatistes)=V_nom1(counter_metasximatistes);
TABLE_METASXHMATISTES(5,counter_metasximatistes)=V_nom2(counter_metasximatistes);
TABLE_METASXHMATISTES(6,counter_metasximatistes)=n_nom(3,counter_metasximatistes);
% ypologismos apwleiwv apo arxika dedomena mesw hlektrikwn mixanwn
a_pososto1=pososto_fortiou(length(pososto_fortiou));
a_pososto2=pososto_fortiou(1);

PCu1=(S_nom(counter_metasximatistes)*cosf(counter_metasximatistes)*a_pososto1*(1/n_nom
(length(pososto_fortiou),counter_metasximatistes)-1)-
S_nom(counter_metasximatistes)*cosf(counter_metasximatistes)*a_pososto2*(1/n_nom(1,cou
nter_metasximatistes)-1))/(a_pososto1^2-a_pososto2^2);

PFel2=S_nom(counter_metasximatistes)*cosf(counter_metasximatistes)*a_pososto1*(1/n_nom
(length(pososto_fortiou),counter_metasximatistes)-1)-PCu1;
disp(['Transformer with increment number ',num2str(counter_metasximatistes),' with
nominal apparent power [kVA] ',num2str(S_nom(counter_metasximatistes)), ' Cu losses
[kW] ',num2str(PCu1),' Fe losses [KW] ',num2str(PFel2)]);
for counter_apodosi=1:25
    timi_fortiou=0.05*(counter_apodosi-1);

apodosi_proxeiro=S_nom(counter_metasximatistes)*cosf(counter_metasximatistes)*timi_for
tiau/(S_nom(counter_metasximatistes)*cosf(counter_metasximatistes)*timi_fortiou+PFel2+
PCu1*timi_fortiou^2);

TABLE_METASXHMATISTES((6+counter_apodosi),counter_metasximatistes)=apodosi_proxeiro;
end;
% transformer cost

TABLE_METASXHMATISTES(32,counter_metasximatistes)=13.5*((S_nom(counter_metasximatistes
)/1000)^2)+14250*S_nom(counter_metasximatistes)/1000+33375;
end;

% grafi se arxeio
xlswrite('metasximatistes.xlsx',TABLE_METASXHMATISTES);

```

Π.6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Κύριος κώδικας βέλτιστης επιλογής ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού ενός στροβίλου.

```

clear;
clc;
% exei mpei Pelton / TUrgo / Cross flow me -2m pantou + periorismos se eed
% >0.75 ypoxrewrtika ejarxis....
% pososto sintirisis paroxis
a_per_sintirisi=0.30; % [-]
b_per_sintirisi=0.50; % [-]
c_per_sintirisi=0.030; % [m3/s]
% gewmetrika stoixeia "stathera"
Length_DAM=12.0; % [m] % gia pososto p 15%
Height_DAM=2.45; % [m]
Length_LEAD_IN_CANAL=28.0; % [m]
Length_ROAD=2.0; % [km]
Length_TRANSFER_LINE=5.0; % [km]
% oikonomika stoixeia
Energy_Cost_kWh=0.08785; % [eurw/kWh]
Dicount_Rate_Nom=0.05; % apoplithwrismeno epitokio
Construction_Time_Period=2; % [years] - plirwmes sto meso tou xronou gia kataskeui , gia ofelos
/ leitourgia sto telos toy etous
Operation_Cost_Ratio=0.15; % [-]
Study_time_period=25; % [years]
% rythmisi kanonikou simeiou leitourgias
Qparoxi_init=0.05; % logos [-]
Qparoxi_end=0.50; % logos [-]
Qparoxi_bima=0.01; % logos [-]
% peri ektypwsiw basic boithitikes simatal simata2 sx apodosis sx Isxios kampili diarkeias
isxios NetPresValuGraph IRRgraph
flag_print_figure=[0 1 0 1 0 0 0
0 0 ];
% gewmetrika stoixeia pou metabalontai
% anagnwsi stoixeiwn apo arxeio basikwn stoixeiwn xarajis
% ana grammi mpainei kataxwrisi
% 1h grammi-> taytotita arithmou xarajis apo programma xarajis
% 2h grammi-> mikos koitis
% 3h grammi-> mikos swlinas
% 4h grammi-> ofelimo yfos
% 5h grammi-> logos yfous/ mikos swlina

```

```

TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA=xlsread('Apotelesmata_xarajis_kata_yfos_1000a.xlsx');
length_TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA_plithos=length(TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA(:,1)); %
stoixeia pou exoun kataxwrithei
for i_general_scenario_1=1:length_TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA_plithos
identification_xarajis=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA(i_general_scenario_1,1);
L_distance_koiti_ydrolifia_apolliji=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA(i_general_scenario_1,2); %
[m]
Lswlina=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA(i_general_scenario_1,3); % [m]
hinitial=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRAFIKA(i_general_scenario_1,4); % [m]
% arxikopoiisi telikwn timwn
for il_kataxwrisi=1:22
if (il_kataxwrisi<=4)

FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPO
GRAFIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPO
GRAFIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA
TOPOGRAFIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPO
GRAFIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRA
FIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRA
FIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOP
OGRAFIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);

FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=TABLE_TELIKA_STOIXEIA_TOPOGRA
FIKA(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi);
end;
if ((il_kataxwrisi>4)&&(il_kataxwrisi<=16))||((il_kataxwrisi>=21)&&(il_kataxwrisi<=22))
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=0;
end;
if (il_kataxwrisi==17)|| (il_kataxwrisi==18)|| (il_kataxwrisi==20)
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=-(10^10);
end;
if (il_kataxwrisi==19)
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eed(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(i_general_scenario_1,il_kataxwrisi)=(10^10);
end;
end; % il_kataxwrisi
%-----%

name_arxeio_apotelesmata_analytika=['apotelesmata_analytika_',num2str(identification_xarajis),'.xl
sx'];

name_arxeio_apotelesmata_beltista=['apotelesmata_beltista_',num2str(identification_xarajis),'.xlsx
'];
%-----%

% ANAGNWSH pinaka strobilou telikis morfis
% ana stili mpainei strobilos - 1h grammi a/a strobilou
% 2h grammi eidos strobilou (1-> Francis katakorifos kata ton Pinaka5.2
% 3h grammi Hnom [m]
% 4h grammi Qnom [m3/s]
% 5h grammi Hmin_oper kata pinaka 5.2 [m]
% 6h grammi Hmax_oper kata pinaka 5.2 [m]
% 7h grammi Qmin_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]
% 8h grammi Qmax_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]

```

```

% 9h grammi ns (eidiki taxitita)
% 10h grammi n (onomastiki taxitita)
% 11h grammi HnomA [m]
% 12h grammi QnomA[m3/s]
% 13h grammi HnomB [m]
% 14h grammi QnomB[m3/s]
% 15h grammi HnomC [m]
% 16h grammi QnomC[m3/s]
% 17h grammi n_factor_nom onomastiki apodosi [-]
% 18h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.00
% 19h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.05
% 20h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.10
% 21h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.15
% 22h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.20
% 23h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.25
% 24h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.30
% 25h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.35
% 26h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.40
% 27h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.45
% 28h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.50
% 29h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.55
% 30h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.60
% 31h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.65
% 32h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.70
% 33h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.75
% 34h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.80
% 35h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.85
% 36h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.90
% 37h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=0.95
% 38h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.00
% 39h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.05
% 40h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.10
% 41h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.15
% 42h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia Q/Qnom=1.20
% 43h grammi kostos strobilou
TABLE STROBILOS2=xlsread('strobiloi_typou2.xlsx');
length_TABLE_STROBILOS2_plithos=length(TABLE_STROBILOS2(:,1)); % stoixeia strobilwn
length_TABLE_STROBILOS2_stiles=length(TABLE_STROBILOS2(1,:));
% grafimo pinaka gennitriwn arxikis morfis
% ana stili gennitria -
% 1h grammi a/a gennitrias
% 2h grammi eidos gennitrias sixronis -> 1, asigxronis ->2 , dc-> 3
% 3h grammi onomastiki isxis [kVA]
% 4h grammi zeugi poloi
% 5h grammi taxitita peristrofis [RPM]
% 6h grammi onomastiki tasi [Volt]
% 7h grammi cosf [-]
% 8h grammi onomastiki apodosi [-]
% 9h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.00 opou n_factor_nom*cosf/cosf_nom
% 10h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.05
% 11h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.10
% 12h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.15
% 13h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.20
% 14h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.25
% 15h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.30
% 16h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.35
% 17h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.40
% 18h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.45
% 19h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.50
% 20h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.55
% 21h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.60
% 22h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.65
% 23h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.70
% 24h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.75
% 25h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.80
% 26h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.85
% 27h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.90
% 28h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.95
% 29h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=1.00
% 30h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=1.05
% 31h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=1.10
% 32h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=1.15
% 33h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=1.20
% 34h grammi kostos gennitrias
TABLE GENNHTRIES2=xlsread('gennitries.xlsx');
length_TABLE_GENNHTRIES2_plithos=length(TABLE_GENNHTRIES2(:,1)); % stoixeia gennitriwn
length_TABLE_GENNHTRIES2_stiles=length(TABLE_GENNHTRIES2(1,:));
% grafimo pinaka metasximatistwn
% ana stili metasximatisti -
% 1h grammi a/a metasximatisti
% 2h grammi eidos metasximatisti elaiou -> 1, JHROU ->2
% 3h grammi onomastiki isxis [kVA]
% 4h grammi Vnom1 [Volt]
% 5h grammi Vnom2 [Volt]
% 6h grammi onomastiki apodosi [-]
% 7h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.00 opou n_factor_nom*cosf/cosf_nom
% 8h grammi pososto apodosi epi n_factor_nom gia S/Snom=0.05

```

```

% 9h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.10
% 10h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.15
% 11h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.20
% 12h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.25
% 13h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.30
% 14h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.35
% 15h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.40
% 16h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.45
% 17h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.50
% 18h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.55
% 19h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.60
% 20h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.65
% 21h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.70
% 22h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.75
% 23h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.80
% 24h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.85
% 25h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.90
% 26h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=0.95
% 27h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.00
% 28h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.05
% 29h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.10
% 30h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.15
% 31h grammi pososto apodosis epi n_factor_nom gia S/Snom=1.20
% 32h grammi kostos egkatastasis M/S
TABLE METASXHMATISTES2=xlsread('metasximatistes.xlsx');
length_TABLE_METASXHMATISTES2_plithos=length(TABLE_METASXHMATISTES2(:,1)); % stoixeia
metasximatistwn
length_TABLE_METASXHMATISTES2_styles=length(TABLE_METASXHMATISTES2(1,:));
%
% ok No De Ja Fe Ma Ap My Ju Jl Au Se
size_days_per_month=[31 30 31 31 28 31 30 31 30 31 31 30];
% anagnwsi xronologikis kampilis typou 1 diladi mesi miniaia paroxi 12
% minwn lh grammi Oktwmbrios - 2h grammi Noembrios ktl.... stili 1 etos,
% ktl.... [m3/s]
ENERGOS_TABLE_CLASSIC1=xlsread('xronologiki_kampili_paroxis_typoul.xlsx');
length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_mines=length(ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(:,1));
length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years=length(ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(1,:));
disp(['Months: ',num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_mines),' Years:
',num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years)])
if (length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_mines~=12)
disp(['ALARM months not 12 but ',num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_mines)]);
end;
% epejergasia - diamorfwni pinaka mesis hmerisias paroxis
min_Paroxi_tot=1000000000;
max_Paroxi_tot=-1000000000;
mean_Paroxi_tot=0.0;
for mines_counter=1:12
min_Paroxi(mines_counter)=1000000000;
max_Paroxi(mines_counter)=-1000000000;
mean_Paroxi(mines_counter)=0.0;
end;
for mines_counter=1:12
for years_counter=1:length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years
if (ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)>max_Paroxi(mines_counter))
max_Paroxi(mines_counter)=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter);
end;
if (ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)>max_Paroxi_tot)
max_Paroxi_tot=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter);
end;
if (ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)<min_Paroxi(mines_counter))
min_Paroxi(mines_counter)=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter);
end;
if (ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)>min_Paroxi_tot)
min_Paroxi_tot=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter);
end;
mean_Paroxi(mines_counter)=mean_Paroxi(mines_counter)+ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_c
ounter);
end;
mean_Paroxi(mines_counter)=mean_Paroxi(mines_counter)/length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years;
mean_Paroxi_tot=mean_Paroxi_tot+size_days_per_month(mines_counter)*mean_Paroxi(mines_counter);
end;
mean_Paroxi_tot=mean_Paroxi_tot/365.0; % mesi paroxi
% paroxi sintirisis
q_sintirisi=a_per_sintirisi*(size_days_per_month(9)*mean_Paroxi(9)+size_days_per_month(10)*mean_Pa
roxi(10)+size_days_per_month(11)*mean_Paroxi(11))/(size_days_per_month(9)+size_days_per_month(10)+
size_days_per_month(11));
if (q_sintirisi<(b_per_sintirisi*mean_Paroxi(12)))
q_sintirisi=b_per_sintirisi*mean_Paroxi(12);
end;
if (q_sintirisi<c_per_sintirisi)
q_sintirisi=c_per_sintirisi;
end;

disp(['Mean flow [m^3/s] ',num2str(mean_Paroxi_tot),' Compensation flow [m^3/s]
',num2str(q_sintirisi)]);
% sximatismos hmerisias xronologikis kampilis

```



```

length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days=365*length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years;
i_metritis_days=0;
for years_counter=1:length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years
    for mines_counter=1:12
        for days_counter=1:size_days_per_month(mines_counter)
            i_metritis_days=i_metritis_days+1;
            Xronologiki_kampili(i_metritis_days,1)=i_metritis_days;

Xronologiki_kampili(i_metritis_days,2)=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter);
        end;
    end;
end;
% elegxos orthis diamorfwsis xronologikis kampilis no.2
if (length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days~=i_metritis_days)
    disp(['ALARM days not ',num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days),' but
',num2str(i_metritis_days)]);
else
    disp(['Time period days for full flow chronological curve ',
num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days)]);
end;
if (flag_print_figure(1)==1)
    figure; % pliris xronologiki kampili
    plot(Xronologiki_kampili(:,1),Xronologiki_kampili(:,2));
    ylabel('Water flow [m^3/h]');
    xlabel('Time [days]');
    axis([0 length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days 0 max_Paroxi_tot]);
end;
% sximatismos hmerisias xronologikis kampilis meta tin afaireisi paroxis
% sintirisis
length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days=365*length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years;
i_metritis_days=0;
for years_counter=1:length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC1_years
    for mines_counter=1:12
        for days_counter=1:size_days_per_month(mines_counter)
            i_metritis_days=i_metritis_days+1;
            Xronologiki_kampili(i_metritis_days,1)=i_metritis_days;
            if (ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)>q_sintirisi)

Xronologiki_kampili(i_metritis_days,2)=ENERGOS_TABLE_CLASSIC1(mines_counter,years_counter)-
q_sintirisi;
            else
                Xronologiki_kampili(i_metritis_days,2)=0.0;
            end;
        end;
    end;
end;
% elegxos orthis diamorfwsis xronologikis kampilis no.2
if (length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days~=i_metritis_days)
    disp(['ALARM days not ',num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days),' but
',num2str(i_metritis_days)]);
else
    disp(['Time period days for useful flow chronological flow curve ',
num2str(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days)]);
end;
xlswrite('xronologiki_kampili_paroxis_typou2.xlsx',Xronologiki_kampili);
if (flag_print_figure(1)==1)
    figure; % xronologiki kampili meta tin afaireisi paroxis sintirisis
    plot(Xronologiki_kampili(:,1),Xronologiki_kampili(:,2));
    ylabel('Water flow [m^3/h]');
    xlabel('Time [days]');
    axis([0 length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days 0 max_Paroxi_tot]);
end;
% diamorfwsis kampilis diarkeias paroxis mesw bubblesort
i_metritis_days1=1;
noswaps=0; %false
while ((i_metritis_days1<length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days) && (noswaps==0))
    noswaps=1; % true
    for i_metritis_days2=(length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days-1):(-1):i_metritis_days1
        if (Xronologiki_kampili(i_metritis_days2,2)<Xronologiki_kampili((i_metritis_days2+1),2))
            proxeiro=Xronologiki_kampili(i_metritis_days2,2);
            Xronologiki_kampili(i_metritis_days2,2)=Xronologiki_kampili((i_metritis_days2+1),2);
            Xronologiki_kampili((i_metritis_days2+1),2)=proxeiro;
            noswaps=0;
        end;
    end;
    i_metritis_days1=i_metritis_days1+1;
end;
xlswrite('xronologiki_kampili_paroxis_typou3.xlsx',Xronologiki_kampili);
if (flag_print_figure(1)==1)
    figure;
    plot(Xronologiki_kampili(:,1),Xronologiki_kampili(:,2));
    ylabel('Water flow [m^3/h]');
    xlabel('Time [days]');
    axis([0 length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days 0 max_Paroxi_tot]);
end;
% rythmisi kanonikou simeiou leitoyrgias
Qparoxi_logos=Qparoxi_init-Qparoxi_bima;

```



```

counter_Qparoxi_logos=0;
while (Qparoxi_logos<Qparoxi_end)
    counter_diathesimi_lysi=0;
    Qparoxi_logos=Qparoxi_logos+Qparoxi_bima;
    counter_Qparoxi_logos=counter_Qparoxi_logos+1;
    % euresi simeiou poy antistoixei sto Qparoxi_logos tou xronou apo
    % kampili diarkeia paroxis
    time_point=Qparoxi_logos*length_ENERGOS_TABLE_CLASSIC2_days;
    time_point_low=floor(time_point);
    time_point_high=time_point_low+1;

Qnominal(counter_Qparoxi_logos)=Xronologiki_kampili(time_point_low,2)+(Xronologiki_kampili(time_po
int_high,2)-Xronologiki_kampili(time_point_low,2))*(time_point-
Xronologiki_kampili(time_point_low,1))/(Xronologiki_kampili(time_point_high,1)-
Xronologiki_kampili(time_point_low,1));
    disp(['Nominal useful flow for hydropower plant [m^3/s] ',
num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos))]);
    % anagnwsi stoixeiwv swlina ana stili swlinas - 1h grammi onomastiki
    % diametros -2h ejwteriki diametros - 3h grammi paxos - 4h grammi tribi
    % [mm]
    TABLE_SWLHNES=xlsread('swlines1.xlsx');
    length_TABLE_SWLHNES_lines=length(TABLE_SWLHNES(:,1));
    length_TABLE_SWLHNES_columns=length(TABLE_SWLHNES(1,:));
    if (length_TABLE_SWLHNES_lines~=4)
        disp(['ALARM lines for tubes not 4 but ',num2str(length_TABLE_SWLHNES_lines)]);
    end;
    % gia kathe swlina faxnw tribes
    for counter_swlines=1:length_TABLE_SWLHNES_columns
        for counter_swlines=24:24
            Dnet=TABLE_SWLHNES(2,counter_swlines)-2.0*TABLE_SWLHNES(3,counter_swlines);
        % apwleies tribes
            velocity=4.0*Qnominal(counter_Qparoxi_logos)/(pi*((Dnet/1000)^2));
            Reynolds=velocity*(Dnet/1000)/(10^(-6));
            lamda_friction_old=0.001;
            counter_friction=0;
            relative_tolerance_friction=1000;
        % euresi sintelesti tribis
            while ((counter_friction<10)&&(relative_tolerance_friction>0.0001))
                counter_friction=counter_friction+1;
                lamda_friction_new=(1/(-
2.0*log10(2.51/(Reynolds*lamda_friction_old^0.5)+TABLE_SWLHNES(4,counter_swlines)/(3.71*Dnet)))^2
;
                relative_tolerance_friction=abs((lamda_friction_new-
lamda_friction_old)/lamda_friction_old);
                lamda_friction_old=lamda_friction_new;
            end;
            hapwleies=lamda_friction_new*(Lswlina/(Dnet/1000))*(velocity^2)/(2*9.81);
            h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)=hinitial-hapwleies;
            if (hapwleies>hinitial)
                if (flag_print_figure(3)==1)
                    disp(['For Qnominal ',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' this is not accepted
nominal diameter tube ', num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ',
num2str(counter_swlines), ' with friction height [m] ',num2str(hapwleies)]);
                end;
            else % efoson einai apodektes oi ydraylikes apwleies
                if (flag_print_figure(3)==1)
                    %diereunisi biwsimotitas swlina
                    if (velocity>4.0)
                        disp(['Alarm: For Qnominal ',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal
diameter tube ', num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ',
num2str(counter_swlines), ' has BIG velocity ',num2str(velocity), ' with friction height [m]
',num2str(hapwleies)]);
                    else
                        disp(['For Qnominal ',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal diameter
tube ', num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ',
num2str(counter_swlines), ' has velocity ',num2str(velocity), ' with friction height [m]
',num2str(hapwleies)]);
                    end;
                end;
                % gia kathe diathesimo strobilo
                for counter_strobiloi=1:length_TABLE_STROBILOS2_styles
                    %
                    for counter_strobiloi=109:110
                        % elegxos entos perioxis
                        HnomA=TABLE_STROBILOS2(11,counter_strobiloi);
                        QnomA=TABLE_STROBILOS2(12,counter_strobiloi);
                        HnomB=TABLE_STROBILOS2(13,counter_strobiloi);
                        QnomB=TABLE_STROBILOS2(14,counter_strobiloi);
                        HnomC=TABLE_STROBILOS2(15,counter_strobiloi);
                        QnomC=TABLE_STROBILOS2(16,counter_strobiloi);
                        hpnom=h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines);
                        if
((TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==11)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==12)|| (TABLE_
STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==122)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==123)|| (TABLE_STROBI
LOS2(2,counter_strobiloi)==124)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==13))
                            hpnom=hpnom-2.0;
                            if (hpnom<=0.0)
                                hpnom=0.0000001;

```

```

end;
end;
Qpnom=Qnominal(counter_Qparoxi_logos);
% ypologismos emdwn trigwnwn
pinakas_Emb_ABC=[HnomA QnomA 1;
                 HnomB QnomB 1;
                 HnomC QnomC 1];
pinakas_Emb_pBC=[hpnom Qpnom 1;
                 HnomB QnomB 1;
                 HnomC QnomC 1];
pinakas_Emb_ApC=[HnomA QnomA 1;
                 hpnom Qpnom 1;
                 HnomC QnomC 1];
pinakas_Emb_ABp=[HnomA QnomA 1;
                 HnomB QnomB 1;
                 hpnom Qpnom 1];

Diafora_embadon=0.5*(abs(det(pinakas_Emb_pBC))+abs(det(pinakas_Emb_ApC))+abs(det(pinakas_Emb_ABp))-
abs(det(pinakas_Emb_ABC)));
% ypologismos oriou FEK B 518 /5-4-2011

P_typical_unit_MW=0.96*0.99*TABLE_STROBILOS2(17,counter_strobiloi)*9.81*hpnom*TABLE_STROBILOS2(4,c
ounter_strobiloi)/1000.0;
if (P_typical_unit_MW<0.3)
    Lmax_epitrepto_FEK=500.0; % [m]
elseif (P_typical_unit_MW<15.0)
    Lmax_epitrepto_FEK=500.0+11400.0*(P_typical_unit_MW-0.3)/(4+P_typical_unit_MW-
0.3); % [m]
else % mi epitrepto
    Lmax_epitrepto_FEK=-1.0;
end;
if (abs(Diafora_embadon)<0.00001) &&
(L_distance_koiti_ydrolifia_apoliiji<=Lmax_epitrepto_FEK)
    counter_diathesimi_lysi=counter_diathesimi_lysi+1;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)=TABLE_STROBILOS2(1,counter_strobi
loi);
if (flag_print_figure(3)==1)
    disp(['For Qnominal [m^3/s] ',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the
nominal diameter tube [mm] ', num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ',
num2str(counter_swlines), ' with available nominal height [m]
',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1))])
end;
% Ypologismos diathesimis onomastikis isxios strobilou

P_nominal_strobilos_kW=TABLE_STROBILOS2(17,counter_strobiloi)*9.81*TABLE_STROBILOS2(3,counter_stro
biloi)*TABLE_STROBILOS2(4,counter_strobiloi);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2)=P_nominal_strobilos_kW;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,7)=counter_swlines;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,8)=TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines);
if (flag_print_figure(3)==1)
    disp(['For Qnominal [m^3/s] ',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the
nominal diameter tube [mm] ', num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ',
num2str(counter_swlines), ' with available nominal height [m]
',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)), ' with nominal Power
[kW] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2))])
end;
% epilogi gennitrias
flag_euresi_gennitrias=0;
for counter_gennitrias=1:length_TABLE_GENNHTRIES2_styles
%
    for counter_gennitrias=5:5
        % euresi +sigrisi onomastikis fainomenis isxios me +2% anekti apoklisi
        Snom>1.02*apodosi_gennitrias*Pmech/cosf & elegxos taxititas
        if
            ((TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias)>=(1.02*TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias)*P_nominal
_strobilos_kW/TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias))) &&
            (abs((TABLE_STROBILOS2(10,counter_strobiloi)-
TABLE_GENNHTRIES2(5,counter_gennitrias))/TABLE_STROBILOS2(10,counter_strobiloi))<0.05))
                pososto_fortisis_gennitrias=TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias)*P_nominal_strobilos_kW/(TABLE_
GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias)*TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias));
                apodosi_gennitrias_new=TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias);
                apodosi_gennitrias=apodosi_gennitrias_new;
                flag_siglisis=0;
                counter_siglisis=0;
                while ((counter_siglisis<10)&&(flag_siglisis==0))
                    counter_siglisis=counter_siglisis+1;
                    deiktis_fortisis=1;
                    flag_euresis=0;
                    while ((deiktis_fortisis<25)&&(flag_euresis==0))
                        if ((0.05*(deiktis_fortisis-
1))<=pososto_fortisis_gennitrias)&&((0.05*deiktis_fortisis)>pososto_fortisis_gennitrias)

```

```

apodosi_gennitrias_new=TABLE_GENNHTRIES2((8+deiktis_fortisis),counter_gennitrias)+(TABLE_GENNHTRIE
S2((8+deiktis_fortisis+1),counter_gennitrias)-
TABLE_GENNHTRIES2((8+deiktis_fortisis),counter_gennitrias))*(pososto_fortisis_gennitrias-
0.05*(deiktis_fortisis-1))/0.05;
        flag_euresis=1;
        end;
        deiktis_fortisis=deiktis_fortisis+1;
        end;

pososto_fortisis_gennitrias_new=apodosi_gennitrias_new*P_nominal_strobilos_kW/(TABLE_GENNHTRIES2(7
,counter_gennitrias)*TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias));
        if (abs((pososto_fortisis_gennitrias_new-
pososto_fortisis_gennitrias)/(pososto_fortisis_gennitrias+0.000001))<0.0001)
            flag_siglisis=1;
        end;
        pososto_fortisis_gennitrias=pososto_fortisis_gennitrias_new;
        apodosi_gennitrias=apodosi_gennitrias_new;
        end; % while siglisis
        if (flag_euresi_gennitrias==0)

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,3)=TABLE_GENNHTRIES2(1,counter_genni
tries);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,4)=TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_genni
tries);
        flag_euresi_gennitrias=1;
        else % prosthiki epipleon lysis

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),1)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,1);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),2)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,2);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),7)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,7);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),8)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,8);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),3)=TABLE_GENNHTRIES2(1,counter_g
ennitrias);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),4)=TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_g
ennitrias);
        counter_diathesimi_lysi=counter_diathesimi_lysi+1;
        end;
        if (flag_print_figure(3)==1)
            disp(['For Qnominal [m^3/s]
',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ', num2str(counter_swlines), '
with available nominal height [m] ',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)), '
has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)), ' with nominal Power
[kW] ', num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2)), ' with generator
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,3)), ' with nominal power
[kVA] ', num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,4))]
        end;
        % epilogi metaximatisti
        flag_euresi_MS=0;
        for counter_metaximatistes=1:length_TABLE_METASXHMATISTES2_stiles
            %
            for counter_metaximatistes=14:14
                % euresi +siglisis onomastikis fainomenis isxios me +2% anekti apoklisi
                Snom>1.02*apodosi_MS*apodosi_gennitrias*Pmech/cosf && periorismos fainomenis isxios o MS na einai
                isos h megaliteros gennitrias !!
                if
                ((TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metaximatistes)>=(1.02*TABLE_METASXHMATISTES2(6,counter_metax
imatistes)*apodosi_gennitrias*P_nominal_strobilos_kW/TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias)))&&(T
ABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metaximatistes)>=TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias))&&(abs((
TABLE_METASXHMATISTES2(4,counter_metaximatistes)-
TABLE_GENNHTRIES2(6,counter_gennitrias))/TABLE_GENNHTRIES2(6,counter_gennitrias))<0.01))

pososto_fortisis_MS=TABLE_METASXHMATISTES2(6,counter_metaximatistes)*apodosi_gennitrias*P_nominal
_strobilos_kW/(TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias)*TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metaximat
istes));

        apodosi_MS_new=TABLE_METASXHMATISTES2(6,counter_metaximatistes);
        apodosi_MS=apodosi_MS_new;
        flag_siglisis=0;
        counter_siglisis=0;
        while ((counter_siglisis<10)&&(flag_siglisis==0))
            counter_siglisis=counter_siglisis+1;
            deiktis_fortisis=1;
            flag_euresis=0;
            while ((deiktis_fortisis<25)&&(flag_euresis==0))
                if ((0.05*(deiktis_fortisis-
1))<=pososto_fortisis_MS)&&((0.05*deiktis_fortisis)>pososto_fortisis_MS)

```

```

apodosi_MS_new=TABLE_METASXHMATISTES2((6+deiktis_fortisis),counter_metasximatistes)+(TABLE_METASXH
MATISTES2(6+deiktis_fortisis+1),counter_metasximatistes)-
TABLE_METASXHMATISTES2((6+deiktis_fortisis),counter_metasximatistes))*(pososto_fortisis_MS-
0.05*(deiktis_fortisis-1))/0.05;
    flag_euresis=1;
    end;
    deiktis_fortisis=deiktis_fortisis+1;
end;

pososto_fortisis_MS_new=apodosi_MS_new*apodosi_gennitrias*P_nominal_strobilos_kw/(TABLE_GENNHTRIES
2(7,counter_gennitrias)*TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes));
    if (abs((pososto_fortisis_MS_new-
pososto_fortisis_MS)/(pososto_fortisis_MS+0.000001))<0.0001)
        flag_siglisi=1;
    end;
    pososto_fortisis_MS=pososto_fortisis_MS_new;
    apodosi_MS=apodosi_MS_new;
end; % while siglisis
if (flag_euresi_MS==0)

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,5)=TABLE_METASXHMATISTES2(1,counter_
metasximatistes);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,6)=TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_
metasximatistes);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,9)=1; % OLOKLHRVWMENH LYSH me ola ta
stoxeia
    flag_euresi_MS=1;
    else % prosthiki epipleon lysis

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),1)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,1);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),2)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,2);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),3)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,3);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),4)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,4);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),7)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,7);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),8)=diathesimi_lysi(counter_Qparo
xi_logos,counter_diathesimi_lysi,8);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),5)=TABLE_METASXHMATISTES2(1,coun
ter_metasximatistes);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),6)=TABLE_METASXHMATISTES2(3,coun
ter_metasximatistes);

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,(counter_diathesimi_lysi+1),9)=1; % OLOKLHRVWMENH LYSH me
ola ta stoxeia
        counter_diathesimi_lysi=counter_diathesimi_lysi+1;
    end;
    if (flag_print_figure(3)==1)
        disp(['For Qnominal [m^3/s]
',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ', num2str(counter_swlines), '
with available nominal height [m] ',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)), '
has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)), ' with nominal Power
[kW] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2)), ' with generator
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,3)), ' with nominal power
[kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,4)), ' with
transformer ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,5)), ' with
nominal power [kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,6))])
    end;
    % monosimantos ypologismos synolikis kampilis apodosis gia diafora
epipeda fortisewn
    Qmin_oper=TABLE_STROBILOS2(7,counter_strobiloi); % 7h grammi Qmin_oper
kata pinaka 5.2 [m3/s]
    Qmax_oper=TABLE_STROBILOS2(8,counter_strobiloi); % 8h grammi Qmax_oper
kata pinaka 5.2 [m3/s]
    Q_step=0.001; % KRISIMH PARAMETROS diakritopoiisis apodosis
    Q_bimata=ceil((Qmax_oper-Qmin_oper+0.000001)/Q_step);
    for counter_Q_bimata=1:Q_bimata
        %
        for counter_Q_bimata=1:1
            q_paroxi(counter_Q_bimata)=(Qmin_oper+(counter_Q_bimata-
1)*Q_step)*TABLE_STROBILOS2(4,counter_strobiloi);
            h_apwleies_q_paroxi=
hapwleies*((q_paroxi(counter_Q_bimata)/Qnominal(counter_Qparoxi_logos))^2);

```

```

        h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata)=hinitial-h_apwleies_q_paroxi;
        if
((TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==11)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==12)|| (TABLE_
STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==122)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==123)|| (TABLE_STROBI
LOS2(2,counter_strobiloi)==124)|| (TABLE_STROBILOS2(2,counter_strobiloi)==13))

h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata)=h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata)-2.0;
        if (h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata)<=0.0)
            h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata)=0.0000000;
        end;
    end;

P_mech_q_paroxi_ideal=9.81*q_paroxi(counter_Q_bimata)*h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_bimata);

P_mech_Q_nominal=9.81*TABLE_STROBILOS2(3,counter_strobiloi)*TABLE_STROBILOS2(4,counter_strobiloi);
    % prosthiki logw kakis onomastikis paroxis / onomastikoy yfous gia
    orismenous ydorstobilous / asfalis perioxi
    if (P_mech_q_paroxi_ideal>(1.19999*P_mech_Q_nominal))
        P_mech_q_paroxi_ideal=(1.19999*P_mech_Q_nominal); % xeirokiniti
diorthwsi
    end;
    % apodosi strobilou
    apodosi_strobilou_q_paroxi=TABLE_STROBILOS2(17,counter_strobiloi);

pososto_fortisis_strobilou=apodosi_strobilou_q_paroxi*P_mech_q_paroxi_ideal/(TABLE_STROBILOS2(17,c
ounter_strobiloi)*P_mech_Q_nominal);
    flag_siglisi=0;
    counter_siglisi=0;
    while ((counter_siglisi<10)&&(flag_siglisi==0))
        counter_siglisi=counter_siglisi+1;
        deiktis_fortisis=1;
        flag_euresis=0;
        while ((deiktis_fortisis<25)&&(flag_euresis==0))
            if (((0.05*(deiktis_fortisis-
1))<=pososto_fortisis_strobilou)&&((0.05*deiktis_fortisis)>pososto_fortisis_strobilou))
                apodosi_strobilou_q_paroxi_new=TABLE_STROBILOS2((17+deiktis_fortisis),counter_strobiloi)+(TABLE_ST
ROBILOS2((17+deiktis_fortisis+1),counter_strobiloi)-
TABLE_STROBILOS2((17+deiktis_fortisis),counter_strobiloi))*(pososto_fortisis_strobilou-
0.05*(deiktis_fortisis-1))/0.05;
                    flag_euresis=1;
                end;
                deiktis_fortisis=deiktis_fortisis+1;
            end;
        end;

pososto_fortisis_strobilou_new=apodosi_strobilou_q_paroxi_new*P_mech_q_paroxi_ideal/(TABLE_STROBILO
S2(17,counter_strobiloi)*P_mech_Q_nominal);
        if (abs((pososto_fortisis_strobilou_new-
pososto_fortisis_strobilou)/(pososto_fortisis_strobilou+0.000001))<0.0001)
            flag_siglisi=1;
        end;
        pososto_fortisis_strobilou=pososto_fortisis_strobilou_new;
        apodosi_strobilou_q_paroxi=apodosi_strobilou_q_paroxi_new;
    end; % while siglisis gia strobilo !
    % apodosi gennitrias

S_GEN_q_paroxi=TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias)*apodosi_strobilou_q_paroxi*P_mech_q_paroxi_
ideal/TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias);

pososto_fortisis_gennitrias=S_GEN_q_paroxi/TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias);
    apodosi_gennitrias_new2=TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias);
    apodosi_gennitrias2=apodosi_gennitrias_new2;
    flag_siglisi=0;
    counter_siglisi=0;
    while ((counter_siglisi<10)&&(flag_siglisi==0))
        counter_siglisi=counter_siglisi+1;
        deiktis_fortisis=1;
        flag_euresis=0;
        while ((deiktis_fortisis<25)&&(flag_euresis==0))
            if (((0.05*(deiktis_fortisis-
1))<=pososto_fortisis_gennitrias)&&((0.05*deiktis_fortisis)>pososto_fortisis_gennitrias))
                apodosi_gennitrias_new2=TABLE_GENNHTRIES2((8+deiktis_fortisis),counter_gennitrias)+(TABLE_GENNHTRI
ES2((8+deiktis_fortisis+1),counter_gennitrias)-
TABLE_GENNHTRIES2((8+deiktis_fortisis),counter_gennitrias))*(pososto_fortisis_gennitrias-
0.05*(deiktis_fortisis-1))/0.05;
                    flag_euresis=1;
                end;
                deiktis_fortisis=deiktis_fortisis+1;
            end;
        end;

pososto_fortisis_gennitrias_new=(apodosi_gennitrias_new2/TABLE_GENNHTRIES2(8,counter_gennitrias))*
S_GEN_q_paroxi/TABLE_GENNHTRIES2(3,counter_gennitrias);
        if (abs((pososto_fortisis_gennitrias_new-
pososto_fortisis_gennitrias)/(pososto_fortisis_gennitrias+0.000001))<0.0001)
            flag_siglisi=1;
        end;
    end;

```

```

        pososto_fortisis_gennitrias=pososto_fortisis_gennitrias_new;
        apodosi_gennitrias2=apodosi_gennitrias_new2;
    end; % while siglisis gia gennitria
    % apodosi metasximatisti

pososto_fortisis_MS=TABLE_METASXHMATISTES2(6,counter_metasximatistes)*apodosi_gennitrias2*apodosi_
strobilou_q_paroxi*P_mech_q_paroxi_ideal/(TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias)*TABLE_METASXHMAT
ISTES2(3,counter_metasximatistes));
    apodosi_MS_new2=TABLE_METASXHMATISTES2(6,counter_metasximatistes);
    apodosi_MS2=apodosi_MS_new2;
    flag_siglisis=0;
    counter_siglisis=0;
    while ((counter_siglisis<10)&&(flag_siglisis==0))
        counter_siglisis=counter_siglisis+1;
        deiktis_fortisis=1;
        flag_euresis=0;
        while ((deiktis_fortisis<25)&&(flag_euresis==0))
            if ((0.05*(deiktis_fortisis-
1))<=pososto_fortisis_MS)&&((0.05*deiktis_fortisis)>pososto_fortisis_MS))

apodosi_MS_new2=TABLE_METASXHMATISTES2((6+deiktis_fortisis),counter_metasximatistes)+(TABLE_METASX
HMATISTES2((6+deiktis_fortisis+1),counter_metasximatistes)-
TABLE_METASXHMATISTES2((6+deiktis_fortisis),counter_metasximatistes))*(pososto_fortisis_MS-
0.05*(deiktis_fortisis-1))/0.05;
                flag_euresis=1;
            end;
            deiktis_fortisis=deiktis_fortisis+1;
        end;

pososto_fortisis_MS_new=apodosi_MS_new2*apodosi_gennitrias2*apodosi_strobilou_q_paroxi*P_mech_q_pa
roxi_ideal/(TABLE_GENNHTRIES2(7,counter_gennitrias)*TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatist
es));
        if (abs((pososto_fortisis_MS_new-
pososto_fortisis_MS)/(pososto_fortisis_MS+0.000001))<0.0001)
            flag_siglisis=1;
        end;
        pososto_fortisis_MS=pososto_fortisis_MS_new;
        apodosi_MS2=apodosi_MS_new2;
    end; % while siglisis metastimatisti

apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)=apodosi_MS2*apodosi_gennitrias2*apodosi_strobilou_q_paroxi;
    if (apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)<0)
        apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)=0.0;
        if (flag_print_figure(4)==1)
            disp(['Negative efficiency for Qparoxi:
',num2str(q_paroxi(counter_Q_bimata)), ' Q_bima ',num2str(counter_Q_bimata)]);
        end;
    end;
    if (apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)>1.0)
        apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)=1.0;
        if (flag_print_figure(4)==1)
            disp(['Efficiency greater than 1 for Qparoxi:
',num2str(q_paroxi(counter_Q_bimata)), ' Q_bima ',num2str(counter_Q_bimata)]);
        end;
    end;

P_useful_kW(counter_Q_bimata)=apodosi_tot_q_paroxi(counter_Q_bimata)*P_mech_q_paroxi_ideal;
    end; % epipedá fortisis strobilou gia paroxes ana 1% tis onomastikis
paroxis

    if (flag_print_figure(5)==1)
        figure;
        plot(q_paroxi,apodosi_tot_q_paroxi);
        ylabel('Total efficiency [-]');
        xlabel('Flow [m3/s]');
        axis([0 q_paroxi(Q_bimata) 0 1.0]);
    end;
    if (flag_print_figure(6)==1)
        figure;
        plot(q_paroxi,P_useful_kW);
        ylabel('Useful Power [kW]');
        xlabel('Flow [m3/s]');
        axis([0 q_paroxi(Q_bimata) 0 (1.25*P_useful_kW(Q_bimata))]);
    end;
    % telos euresis kampilis apodosis - paroxis
    % ypologismos paragwgis isxios se kampili diarkeias
    plithos_diathesimwn_imerwn=length(Xronologiki_kampili(:,1)); %
plithos stoxeiwn stilis

    Useful_Energy=0.0;
    Volume_Synoliko=0.0;
    Volume_Useful=0.0;
    Operation_Time=0.0;
    for counter_day_kampilis_diarkeias=1:plithos_diathesimwn_imerwn

q_diathesimo=Xronologiki_kampili(counter_day_kampilis_diarkeias,2);
        Volume_Synoliko=Volume_Synoliko+q_diathesimo;
        % oria strobilou

```

```

qmin_oper=TABLE_STROBILOS2(7,counter_strobiloi)*TABLE_STROBILOS2(4,counter_strobiloi); % 7h grammi
Qmin_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]

qmax_oper=TABLE_STROBILOS2(8,counter_strobiloi)*TABLE_STROBILOS2(4,counter_strobiloi); % 8h grammi
Qmax_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]

hmin_oper=TABLE_STROBILOS2(5,counter_strobiloi)*TABLE_STROBILOS2(3,counter_strobiloi); % 7h grammi
Qmin_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]

hmax_oper=TABLE_STROBILOS2(6,counter_strobiloi)*TABLE_STROBILOS2(3,counter_strobiloi); % 8h grammi
Qmax_oper kata pinaka 5.2 [m3/s]

% elegxos diathesimis paroxis
if (qmin_oper<=q_diathesimo)
    if (q_diathesimo>qmax_oper)
        q_diathesimo=qmax_oper; % yperxeilisi - ajiopoisii mono
qmax_oper
    end;
% euresi simeiou paroxis
flag_euresis=0;
counter_Q_bimata=1;
counter_Q_index=0;
while ((counter_Q_bimata<Q_bimata)&&(flag_euresis==0))
    if
((q_paroxi(counter_Q_bimata)<=q_diathesimo)&&(q_diathesimo<=q_paroxi((counter_Q_bimata+1))))
        counter_Q_index=counter_Q_bimata;
        flag_euresis=1;
    end;
    counter_Q_bimata=counter_Q_bimata+1;
end;
% xeirokiniti diorthwsi se periptwsi arithmitis
mikrodiaforas
if (flag_euresis==0)
    if (q_paroxi(1)>=q_diathesimo)
        counter_Q_index=1;
    end;
    if (q_paroxi(Q_bimata)<=q_diathesimo)
        counter_Q_index=Q_bimata;
    end;
end;
% euresi antistoixou diathesimou yfous
if (counter_Q_index==Q_bimata)
h_wfelimo_q_diathesimo=h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_index);
    else
        if ((counter_Q_index==1)&&(flag_euresis==0))
            h_wfelimo_q_diathesimo=h_wfelimo_q_paroxi(1);
        else
            % paremboli
h_wfelimo_q_diathesimo=h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_index)+(h_wfelimo_q_paroxi((counter_Q_index+1)
)-h_wfelimo_q_paroxi(counter_Q_index))*(q_diathesimo-
q_paroxi(counter_Q_index))/(q_paroxi((counter_Q_index+1))-q_paroxi(counter_Q_index));
        end;
    end;
    % elegxos oriwn diathesimou yfous entos oriwn leitoyrgias
strobiliwn
if
((hmin_oper<=h_wfelimo_q_diathesimo)&&(h_wfelimo_q_diathesimo<=hmax_oper))
    if (counter_Q_index==Q_bimata)
P_production(counter_day_kampilis_diarkeias)=P_useful_kW(counter_Q_index);
        Volume_Useful=Volume_Useful+q_diathesimo;
        Operation_Time=Operation_Time+1;
    else
        if ((counter_Q_index==1)&&(flag_euresis==0))
P_production(counter_day_kampilis_diarkeias)=P_useful_kW(1);
            Volume_Useful=Volume_Useful+q_diathesimo;
            Operation_Time=Operation_Time+1;
        else
            % paremboli
P_production(counter_day_kampilis_diarkeias)=P_useful_kW(counter_Q_index)+(P_useful_kW((counter_Q
index+1))-P_useful_kW(counter_Q_index))*(q_diathesimo-
q_paroxi(counter_Q_index))/(q_paroxi((counter_Q_index+1))-q_paroxi(counter_Q_index));
            Volume_Useful=Volume_Useful+q_diathesimo;
            Operation_Time=Operation_Time+1;
        end;
    end;
else
    P_production(counter_day_kampilis_diarkeias)=0.0;
end;
else % qmin_oper>q_diathesimo - mikrotero apo elaxisti paroxi
    P_production(counter_day_kampilis_diarkeias)=0.0;
end;

Useful_Energy=Useful_Energy+P_production(counter_day_kampilis_diarkeias);

```



```

end; % kleisimo kampilis diarkeias ---- for
counter_day_kampilis_diarkeias=1:plithos_diathesimwn_imerwn
Useful_Energy=Useful_Energy*24*(365/plithos_diathesimwn_imerwn); %
etisia anagwgi se kWh

Volume_Synoliko=Volume_Synoliko*3600*24*(365/plithos_diathesimwn_imerwn); % synolikos etisios
ogkos se m3
Volume_Useful=Volume_Useful*3600*24*(365/plithos_diathesimwn_imerwn);
% ajiopoisimos etisios ogkos se m3

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,9)=Useful_Energy;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,10)=Volume_Useful/Volume_Synoliko;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,11)=Operation_Time*(1/plithos_diathe
simwn_imerwn); % logos xronou leitoyrg;ias
if (flag_print_figure(7)==1)
figure;
plot(Xronologiki_kampili(:,1),P_production);
ylabel('Produced Power [kW]');
xlabel('Time [days]');
axis([0 plithos_diathesimwn_imerwn 0
(1.25*P_useful_kW(Q_bimata))]);
end;
% ypologismos KOSTOUS egkatastasis
% kostos fragmatos / ekxeilisti-sxesi(9.11) b ekdosi Papantwni
Cost_DAM=Length_DAM*(143.1*(Heigh_DAM^2)+702.5*Heigh_DAM+1252.0);
% kostos ydrolifias-sxesi(9.12) b kedosi Papantwni
Cost_WATER_INTAKE=126560*(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)^0.72);
% kostos diwrigas prosagwgis -sxesi(9.13) b ekdosi Papantwni se braxo
+75% anti xwmatos

Cost_LEAD_IN_CANAL=Length_LEAD_IN_CANAL*1.75*(75.8*(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)^0.72)+135.6);
% prosoxi se eurw

Cost_LEAD_IN_CANAL=Cost_LEAD_IN_CANAL+2372.58*(5.2637+1.0932*Qnominal(counter_Qparoxi_logos))+384.
0; % kostos thirofragmatos me sel. 481 b ekdosi papantoni kai prosarmogi diatomis se paroxi apo
paper Mosxouidi

% kostos dejamenis fortisis -sxesi(9.14) b ekdosi Papantwni
Cost_WATER_LOADING_TANK=13575*Qnominal(counter_Qparoxi_logos)+6210;
% kostos agwgou ptwsis -sxesi(9.15 / diorthwmeno) b' ekdosi Papantwni

oxi me Q alla me D
h_gia_costos_swlna=1.40*hinitial; % gia ydrauliko pligma
if (h_gia_costos_swlna<100.0)
h_gia_costos_swlna=100.0;
end;

Cost_TUBE=Lswlna*(64.0+1.61*h_gia_costos_swlna)*((diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter
diathesimi_lysi,8)/1000)^2)+243.0*(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,8
)/1000);

Cost_TUBE=Cost_TUBE+17657.16*(pi()*((diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi
,8)/1000)^2)/4)+131.75;% kostos bannas petaloudas sel. 481 b ekdosi papantoni %
% kostos ktirioy -sxima9.9 / sxesi (9.16) b ekdosi Papantwni

Cost_BUILDING=55000*(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)^0.35)*(hinitial^0.12);
% kostos ixthioskalas - yfos fragmatos b ekdosi xwris klisi
Cost_FISH_LADDER=20000*Heigh_DAM;
% kostos dromou kata Papantwni
Cost_ROAD=40000*Length_ROAD;
% kostos pinakwn gia mia monada sxesi 9.20a
if (TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)<7000)

Cost_ELECTR_INSTALLATION=19471*(TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)/1000)+199840;
else
Cost_ELECTR_INSTALLATION=-
2361*((TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)/1000)^2)+47180*(TABLE_METASXHMATISTES2(3,
counter_metasximatistes)/1000)+122520;
end;

Cost_ELECTR_INSTALLATION=Cost_ELECTR_INSTALLATION+63800*((TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasxi
matistes)/1000)^0.91); %prostheto kostos diakoptwn isxios
% kostos hlektrikis grammis trofodosias
if (TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)<=2000)
Cost_LINE_DIANOMH=55000*Length_TRANSFER_LINE+250000;
else
if
(TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)>2000)&&(TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasx
imatistes)<5000)
Cost_LINE_DIANOMH=65000*Length_TRANSFER_LINE+600000;
else %(TABLE_METASXHMATISTES2(3,counter_metasximatistes)>5000)
Cost_LINE_DIANOMH=100000*Length_TRANSFER_LINE+2000000;
end;
end;
% ekpaideusi 750 athroimera * 30 hmeres
Cost_LOIPA=750*30;
% Total cost

```



```

Total_cost=Cost_DAM+Cost_WATER_INTAKE+Cost_LEAD_IN_CANAL+Cost_WATER_LOADING_TANK+Cost_TUBE+Cost_BU
ILDING+Cost_ROAD+TABLE_STROBILOS2(43,counter_strobiloi)+TABLE_GENNHTRIES2(34,counter_gennitries)+T
ABLE_METASXHMATISTES2(32,counter_metasximatistes)+Cost_ELECTR_INSTALLATION+Cost_LINE_DIANOMH+Cost_
LOIPA+Cost_FISH_LADDER;
Total_cost=Total_cost/(1-0.125); % 12.5% to kostos meletwn ktl.

percentage_Electromechanical=(TABLE_STROBILOS2(43,counter_strobiloi)+TABLE_GENNHTRIES2(34,counter_
gennitries)+TABLE_METASXHMATISTES2(32,counter_metasximatistes)+Cost_ELECTR_INSTALLATION+Cost_LINE_
DIANOMH)/Total_cost*100.0;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,12)=Total_cost;
if (flag_print_figure(3)==1)
disp(['For Qnominal [m^3/s]
',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ', num2str(counter_swlines), '
with available nominal height [m] ',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)), '
has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)), ' with nominal Power
[kW] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2)), ' with generator
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,3)), ' with nominal power
[kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,4)), ' with
transformer ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,5)), ' with
nominal power [kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,6)), '
with annual produced energy [kWh]
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,9)), ' with energy
exploitation factor ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,10)), '
time operation factor
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,11)), ' Total installation
cost [Eurw] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,12)), ' where
the electromechanical cost percentage is ',num2str(percentage_Electromechanical)]);
end;
% euresi oikonomikwn deiktwn

Annual_income=Energy_Cost_kWh*diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,9);
Net_annual_income=Annual_income*(1.0-Operation_Cost_Ratio);
Net_Present_Value=0.0;
Net_construction_cost=0.0;
counter_time=0;
NPVmin=10^8;
NPVmax=- (10^8);
while (counter_time<(Construction_Time_Period+Study_time_period))
if (counter_time<Construction_Time_Period)
Net_Present_Value=Net_Present_Value-
(Total_cost/Construction_Time_Period)/(1+Dicount_Rate_Nom)^(counter_time+0.5);
Net_construction_cost=Net_construction_cost+(Total_cost/Construction_Time_Period)/(1+Dicount_Rate_
Nom)^(counter_time+0.5);
else
Net_Present_Value=Net_Present_Value+Net_annual_income/(1+Dicount_Rate_Nom)^(counter_time+1);
end;
counter_time=counter_time+1;
NPV(counter_time,1)=counter_time-Construction_Time_Period-1;
NPV(counter_time,2)=Net_Present_Value;
if (NPVmin>Net_Present_Value)
NPVmin=Net_Present_Value;
end;
if (NPVmax<Net_Present_Value)
NPVmax=Net_Present_Value;
end;
end;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,13)=Net_Present_Value;

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,14)=1.0+Net_Present_Value/Net_constr
uction_cost;

if (flag_print_figure(8)==1)
figure;
plot(NPV(:,1),NPV(:,2));
ylabel('Net Present Value [Eurw]');
xlabel('Time (End of Year) [years]');
axis([NPV(1,1) NPV(counter_time,1) NPVmin NPVmax]);
end;
% Periodos apoplirwmis me xrisi NPV(:,2)
plithos_NPV=length(NPV(:,2));
Discounted_Payback_Period=Construction_Time_Period+Study_time_period; %
arxiki timi an de brethei
flag_DPR=0;
counter_DPR=1;
while ((counter_DPR<plithos_NPV)&&(flag_DPR==0))
if ((NPV(counter_DPR,2)*NPV((counter_DPR+1),2))<=0.0)
Discounted_Payback_Period=(NPV(counter_DPR,2)*NPV((counter_DPR+1),1)-
NPV((counter_DPR+1),2)*NPV(counter_DPR,1))/(NPV(counter_DPR,2)-NPV((counter_DPR+1),2)); %
paremboli
flag_DPR=1;
end;

```

```

        end;
        counter_DPR=counter_DPR+1;
    end; % while couter_DPR

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,15)=Discounted_Payback_Period;
% euresi IRR & grafiki parastasi -fajimo me IRR_step 0.01%
IRR_init=0.0000;
IRR_end= 0.1500;
IRR_step=0.0001;
counter_IRR=0;
flag_euresi_IRR=0;
NPVIRRmin=(10^10);
NPVIRRmax=-(10^10);
for IRR_current=IRR_init:IRR_step:IRR_end
    counter_IRR=counter_IRR+1;
    Net_Present_ValueIRR=0.0;
    counter_time=0;
    while (counter_time<(Construction_Time_Period+Study_time_period))
        if (counter_time<Construction_Time_Period)
            Net_Present_ValueIRR=Net_Present_ValueIRR-
(Total_cost/Construction_Time_Period)/(1+IRR_current)^(counter_time+0.5);
        else
            Net_Present_ValueIRR=Net_Present_ValueIRR+Net_annual_income/(1+IRR_current)^(counter_time+1);
        end;
        counter_time=counter_time+1;
        IRR_graph(counter_IRR,1)=IRR_current;
        IRR_graph(counter_IRR,2)=Net_Present_ValueIRR;
    end; % while - ypologismos Net_Present_ValueIRR
    if (NPVIRRmin>Net_Present_ValueIRR)
        NPVIRRmin=Net_Present_ValueIRR;
    end;
    if (NPVIRRmax<Net_Present_ValueIRR)
        NPVIRRmax=Net_Present_ValueIRR;
    end;
    % elegxos an brethike
    if ((counter_IRR>1)&&(flag_euresi_IRR==0))
        if ((IRR_graph((counter_IRR-1),2)*IRR_graph(counter_IRR,2))<=0.0)
            IRR_found=(IRR_graph((counter_IRR-
1),2)*IRR_graph(counter_IRR,1)-IRR_graph(counter_IRR,2)*IRR_graph((counter_IRR-
1),1))/(IRR_graph((counter_IRR-1),2)-IRR_graph(counter_IRR,2)); % paremboli
            flag_euresi_IRR=1;
        end;
    end;
end; % IRR fajimo
% an den brethike...
if (flag_euresi_IRR==0)
    IRR_found=0.0000;
end;
if (flag_print_figure(9)==1)
    figure;
    plot((100*IRR_graph(:,1)),IRR_graph(:,2));
    ylabel('Net Present Value [Eurw]');
    xlabel(' IRR (Internal return rate [%])');
    axis([(100*IRR_init) (100*IRR_end) NPVIRRmin NPVIRRmax]);
end;
% kataxwrisi

diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,16)=IRR_found;
% ---- IRR telos
% teliki ektypsi
if (flag_print_figure(4)==1)
    disp(['For Qnominal [m^3/s]
',num2str(Qnominal(counter_Qparoxi_logos)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(TABLE_SWLHNES(1,counter_swlines)), ' with increment number ', num2str(counter_swlines),
' with available nominal height [m] ',num2str(h_wfelimo(counter_Qparoxi_logos,counter_swlines)),
' has acceptable hydroturbine
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,1)), ' with nominal Power
[kW] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,2)), ' with generator
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,3)), ' with nominal power
[kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,4)), ' with
transformer ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,5)), ' with
nominal power [kVA] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,6)),
' with annual produced energy [kWh]
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,9)), ' with energy
exploitation factor ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,10)),
' time operation factor
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,11)), ' Total installation
cost [Eurw] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,12)), ' where
the electromechanical cost percentage is ',num2str(percentage_Electromechanical), ' Net Present
Value [Eurw] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,13)),
' Benefit cost ratio [-]
',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,14)), ' Discounted payback
period [years] ',num2str(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,15)), ' IRR
- Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_diathesimi_lysi,16))]);
end;

```

```

        end; % euresi metasximatisti
    end; % loop metasximatistwn
    end; % euresi gennitrias
    end; % loop gennitriwn
% elegos mi euresis gennitrias / metasximatisti gia dekho strobilo / ektimisi eed>0.75
    if
((flag_euresi_gennitrias==0)|| (flag_euresi_MS==0)|| (diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,counter_
diathesimi_lysi,10)>=0.75)) % allagi
        counter_diathesimi_lysi=counter_diathesimi_lysi-1;
        end; % den yparxei i antistoixi lyisi
        end; % euresi dektou strobilou
        end; % strobiloi
        end; % einai apodektes oi ydrylikes apwleies ?
    end; % swlines
    if (counter_diathesimi_lysi>0)
        flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)=1;
        Agrafimo=[]; % adeiasma pinaka apo prin
        for il=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,:,1))
            for i2=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))
                Agrafimo(i1,i2)=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,i2);
            end; % i2
            end; % i1
            xlswrite(name_arxeio_apotelesmata_analytika,Agrafimo,num2str(Qparoxi_logos));
% beltisti lyisi 2 me basi oikonomika kritiria NPV, BCR, DisPayT, IRR gia
% kathe Qparoxi_logos
        NPV_gen_max=-(10^10);
        BCR_gen_max=-(10^10);
        DisPayT_gen_min=(10^10);
        IRR_gen_max=-(10^10);
        for il=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,:,1))
            if
((NPV_gen_max<diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,13))&&(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,
i1,1)>0))
                NPV_gen_max=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,13);
                for i2=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))
                    Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,i2)=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,i2);
                end;

                Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+1))=Qp
aroxi_logos;

                Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+2))=Qn
ominal(counter_Qparoxi_logos);
                end;
                if
((BCR_gen_max<diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,14))&&(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,
i1,1)>0))
                    BCR_gen_max=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,14);
                    for i2=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))
                        Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,i2)=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,i2);
                    end;

                    Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+1))=Qp
aroxi_logos;

                    Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+2))=Qn
ominal(counter_Qparoxi_logos);
                    end;
                    if
((DisPayT_gen_min>diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,15))&&(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_lo
gos,i1,1)>0))
                        DisPayT_gen_min=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,15);
                        for i2=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))
                            Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,i2)=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,i2);
                        end;

                            Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+1))=Qp
aroxi_logos;

                            Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+2))=Qn
ominal(counter_Qparoxi_logos);
                            end;
                            if
((IRR_gen_max<diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,16))&&(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,
i1,1)>0))
                                IRR_gen_max=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,16);
                                for i2=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))
                                    Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,i2)=diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,i1,i2);
                                end;

                                    Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+1))=Qp
aroxi_logos;
                                end;
                            end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;

```

```

Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,(length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos,1,:))+2))=Qn
ominal(counter_Qparoxi_logos);
end;
end; % i1=1:length(diathesimi_lysi(counter_Qparoxi_logos, :,1))
else
flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)=0;
for i2=1:16
Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,i2)=0;
Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,i2)=0;
Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,i2)=0;
Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,i2)=0;
end;
Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,17)=Qparoxi_logos;
Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,18)=Qnominal(counter_Qparoxi_logos);
Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,17)=Qparoxi_logos;
Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,18)=Qnominal(counter_Qparoxi_logos);
Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,17)=Qparoxi_logos;
Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,18)=Qnominal(counter_Qparoxi_logos);
Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,17)=Qparoxi_logos;
Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,18)=Qnominal(counter_Qparoxi_logos);
end; %if (counter_diathesimi_lysi>0)

end; % counter_Qparoxi_logos
xlswrite(name_arxeio_apotelesmata_beltista,Beltisti_lysi_NPV,'NetPresentValue');
xlswrite(name_arxeio_apotelesmata_beltista,Beltisti_lysi_BCR,'BenefitCostRatio');
xlswrite(name_arxeio_apotelesmata_beltista,Beltisti_lysi_DisPayT,'DisPaybackTimePer');
xlswrite(name_arxeio_apotelesmata_beltista,Beltisti_lysi_IRR,'InternalRateReturn');
% beltisti_lysi_1 synolika !!!
plithos_counter_Qparoxi_logos=counter_Qparoxi_logos;
NPV_gen_max_tot=-(10^10);
BCR_gen_max_tot=-(10^10);
DisPayT_gen_min_tot=(10^10);
IRR_gen_max_tot=-(10^10);
% arxikopoiisi gia synolika apotelesmata
for i2=1:length(Beltisti_lysi_BCR(plithos_counter_Qparoxi_logos,:))
if ((i2>=1)&&(i2<=12))||((i2>=17)&&(i2<=18))
Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=0;
Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=0;
Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=0;
Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=0;
end;
if (i2==13)|| (i2==14)|| (i2==16)
Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=-(10^10);
Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=-(10^10);
Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=-(10^10);
Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=-(10^10);
end;
if (i2==15)
Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=(10^10);
Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=(10^10);
Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=(10^10);
Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=(10^10);
end;
end;
for counter_Qparoxi_logos=1:plithos_counter_Qparoxi_logos
if (flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)==1)
if (NPV_gen_max_tot<Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,13))
NPV_gen_max_tot=Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,13);
for i2=1:length(Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,:))
Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,i2);
end;
end;
if (BCR_gen_max_tot<Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,14))
BCR_gen_max_tot=Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,14);
for i2=1:length(Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,:))
Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,i2);
end;
end;
if (DisPayT_gen_min_tot>Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,15))
DisPayT_gen_min_tot=Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,15);
for i2=1:length(Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,:))
Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,i2);
end;
end;
if (IRR_gen_max_tot<Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,16))
IRR_gen_max_tot=Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,16);
for i2=1:length(Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,:))
Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,i2);
end;
end;
end; % if (flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)==1)
end; % counter_Qparoxi_logos gia euresi xwris periorsmo EED
for i2_2=1:18
FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_NPV(i2_2);

```

```

FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eeed(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_BCR(i2_2);

FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eeed(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_DisPayT
(i2_2);
    FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eeed(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=
Total_Beltisti_lysi_IRR(i2_2);
end; %i2_2=1:18
disp(['Without limitation of energy exploitation degree']);
disp(['INDEFINITION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis),' For BEST NET
PRESENT VALUE
=> Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_NPV(16))]);
disp(['INDEFINITION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis),' For BEST BENEFIT
COST RATIO
=> Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_BCR(16))]);
disp(['INDEFINITION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis),' For BEST
DISCOUNTED PAYBACK TIME PERIOD => Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(2)), ' with generator
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(3)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_DisPayT(16))]);
disp(['INDEFINITION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis),' For BEST INTERNAL
RATIO OF RETURN
=> Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_IRR(16))]);

```

```

% beltisti lysi 1 synolika !!!
% plithos_counter_Qparoxi_logos=counter_Qparoxi_logos;
NPV_gen_max_tot=-(10^10);
BCR_gen_max_tot=-(10^10);
DisPayT_gen_min_tot=(10^10);
IRR_gen_max_tot=-(10^10);
% arxikopoiisi gia synolika apotelesmata me periorismo energeiakis ajiopoiisis
for i2=1:length(Beltisti_lysi_BCR(plithos_counter_Qparoxi_logos,:))
    if ((i2>=1)&&(i2<=12))||((i2>=17)&&(i2<=18))
        Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=0;
        Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=0;
        Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=0;
        Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=0;
    end;
    if (i2==13)|| (i2==14)|| (i2==16)
        Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=-(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=-(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=-(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=-(10^10);
    end;
    if (i2==15)
        Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=(10^10);
        Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=(10^10);
    end;
end;
for counter_Qparoxi_logos=1:plithos_counter_Qparoxi_logos
    if (flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)==1)
        if
            (NPV_gen_max_tot<Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,13))&&(Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,10)>=0.75)
                NPV_gen_max_tot=Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,13);
                for i2=1:length(Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,:))
                    Total_Beltisti_lysi_NPV(i2)=Beltisti_lysi_NPV(counter_Qparoxi_logos,i2);
                end;
            end;
            if
                (BCR_gen_max_tot<Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,14))&&(Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,10)>=0.75)
                    BCR_gen_max_tot=Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,14);
                    for i2=1:length(Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,:))
                        Total_Beltisti_lysi_BCR(i2)=Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,i2);
                    end;
                end;
            if
                (DisPayT_gen_min_tot>Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,15))&&(Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,10)>=0.75)
                    DisPayT_gen_min_tot=Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,15);
                    for i2=1:length(Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,:))
                        Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2)=Beltisti_lysi_DisPayT(counter_Qparoxi_logos,i2);
                    end;
                end;
            if
                (IRR_gen_max_tot<Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,16))&&(Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,10)>=0.75)
                    IRR_gen_max_tot=Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,16);
                    for i2=1:length(Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,:))
                        Total_Beltisti_lysi_IRR(i2)=Beltisti_lysi_IRR(counter_Qparoxi_logos,i2);
                    end;
                end;
            end; % if (flag_existence_lysi(counter_Qparoxi_logos)==1)
end;
for i2_2=1:18
    FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_NPV(i2_2);
    FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_BCR(i2_2);
    FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=Total_Beltisti_lysi_DisPayT(i2_2);
    FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(i_general_scenario_1,(i2_2+4))=
    Total_Beltisti_lysi_IRR(i2_2);
end; %i2_2=1:length(Beltisti_lysi_BCR(counter_Qparoxi_logos,:))
disp(['With LIMITATION of energy exploitation degree']);
disp(['INDEFINITION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis),' For BEST NET PRESENT VALUE => Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(11)), ' Total installation cost [Eurw]

```



```

',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_NPV(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_NPV(16)));
disp(['INDETIFICATION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis), ' For BEST BENEFIT
COST RATIO      => Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_BCR(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_BCR(16))]);
disp(['INDETIFICATION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis), ' For BEST
DISCOUNTED PAYBACK TIME PERIOD => Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(2)), ' with generator
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(3)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_DisPayT(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_DisPayT(16))]);
disp(['INDETIFICATION TOPOLOGICAL SOLUTION: ',num2str(identification_xarajis), ' For BEST INTERNAL
RATIO OF RETURN      => Time percentage from inflow duration curve
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(17)), ' Qnominal [m^3/s]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(18)), ' the nominal diameter tube [mm] ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(8)), ' with increment number ',
num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(7)), ' has acceptable hydroturbine
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(1)), ' with nominal Power [kW]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(2)), ' with generator ',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(3)), '
with nominal power [kVA] ',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(4)), ' with transformer
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(5)), ' with nominal power [kVA]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(6)), ' with annual produced energy [kWh]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(9)), ' with energy exploitation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(10)), ' time operation factor
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(11)), ' Total installation cost [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(12)), ' Net Present Value [Eurw]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(13)), ' Benefit cost ratio [-]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(14)), ' Discounted payback period [years]
',num2str(Total_Beltisti_lysi_IRR(15)), ' IRR - Internal Rate of Return [%]
',num2str(100*Total_Beltisti_lysi_IRR(16))]);

xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_without_eed(1:i_general_scenario_1,1:22
),'NetPresentValue_no_eed');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_without_eed(1:i_general_scenario_1,1:22
),'BenefitCostRatio_no_eed');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_without_eed(1:i_general_scenario_1,
1:22),'DisPaybackTimePer_no_eed');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_without_eed(1:i_general_scenario_1,1:22
),'InternalRateReturn_no_eed');

xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_NPV_WITH_EED(1:i_general_scenario_1,1:22),'
NetPresentValue_EED');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_BCR_WITH_EED(1:i_general_scenario_1,1:22),'
BenefitCostRatio_EED');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_DisPayT_WITH_EED(1:i_general_scenario_1,1:2
2),'DisPaybackTimePer_EED');
xlswrite('Final Apotelesmata.xlsx',FINAL_Beltisti_Lysi_IRR_WITH_EED(1:i_general_scenario_1,1:22),'
InternalRateReturn_EED');
end; %i general scenario 1

```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

Βιβλιογραφία – Πηγές στην ελληνική γλώσσα

- [E1] Γ. Ι. Τσεκούρας: «Μέρος Α – Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή στα Σ.Η.Ε.», σημειώσεις στο μάθημα «Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας» του 5ου εξαμήνου, Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας Τ.Ε., σελ. 23.
- [E2] Η. Λιώκη – Λειβαδά, Μ. Ασημακοπούλου: «Αιολική και άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας: Βιομάζα –Γεωθερμία –Υδατοπτώσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, 2008, σελ. 247.
- [E3] Δ. Ε. Παπαντώνης: «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα», Εκδόσεις Συμμετρία, Συμμετρία 2008, σελ. 444.
- [E4] Ζερβός Γεράσιμος: «Ο Σχεδιασμός των Υδροηλεκτρικών Σταθμών Παραγωγής και Ο Λειτουργικός τους Ρόλος στο Ελληνικό Ηπειρωτικό Σύστημα – Η Αντίστοιχη Επίδραση των Διεθνών Διασυνδέσεων», Διπλωματική Εργασία, Σ.Η.Μ.Μ.Υ., Ε.Μ.Π., Ιούλιος 2001.
- [E5] Γ. Μπεργελές: «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμμετρία, Έκδοση 2005, σελ.376
- [E6] Μιχ. Παπαδόπουλος: «Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997, σελ. 450.
- [E7] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκίης: «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας – Έλεγχος και ευστάθεια συστήματος», Εκδόσεις Συμμετρία, 2011, σελ. 402.
- [E8] Δ. Ε. Παπαντώνης: «Υδροδυναμικές μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι – Υδροδυναμικές μεταδόσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, Συμμετρία 2009, σελ. 413.
- [E9] Μ. Μέγα, Μικρά υδροηλεκτρικά έργα στις ορεινές περιοχές και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, Μεταπτυχιακή εργασία, 2009, σελ 168.
- [E10] Σεραφείμ Πολύζος « Περιφερειακή ανάπτυξη», Εκδόσεις Κριτική, 2011, σελ. 664
- [E11] Dimitrios Georgiopoulos, C.K. Dimou, «Υδροηλεκτρικά Έργα 2015-2040- Ανάπτυξη και Προοπτικές - Aspects of Development for future Hydro Projects in Greece 2015-2040 (in Greek)», Research Gate, 2017, σελ.14.
- [E12] Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος: «Τεχνική Υδρολογία», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 4η έκδοση, 2016, σελ. 431.
- [E13] Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας – Ειδική Γραμματεία Υδάτων Κατάρτιση της 1^{ης} Αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Δυτ. Στερεάς Ελλάδας (EL04), 2017, σελ.34
- [E14] Α. Ευστρατιάδης & Ν. Μαμάσης, «Εισαγωγή στα υδρολογικά μοντέλα», Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών πόρων και περιβάλλοντος, 2010, σελ. 15.
- [E15] Δ. Κουτσογιάννης: «Στατιστική Υδρολογία», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 5η έκδοση, 2016, σελ. 330.

- [E16]Καραδήμου Σταματία, Ασίμης Γεώργιος «Τεχνοοικονομική μελέτη μικρού υδροηλεκτρικού έργου στο Γοργογύρι Τρικάλων (Κεφαλοπόταμος)», 2019, σελ. 187.
- [E17]Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης & Δημήτρης Κουτσογιάννης “Υδροηλεκτρικά Έργα” Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Ακαδημαϊκό έτος 2018 - 2019, σελ. 27.
- [E18] WWF Ετήσια Έκθεση, 2018, σελ. 269.
- [E19] ΝΟΜΟΣ ΥΠ’ ΑΡΙΘΜ. 4782/ΦΕΚ/Α/36/2021
- [E20] ΥΠΟΥΡΓΙΚΗ ΑΠΟΦΑΣΗ: οικ. 69001/1921/88, σελ. 37.
- [E21]Δ. Ε. Παπαντώνης: «Μικρά υδροηλεκτρικά έργα», Εκδόσεις Συμμεών, Συμμετρία 2021, σελ. 444., Β’ ΕΚΔΟΣΗ
- [E22]ΝΕΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ, 2016, Σχέδιο Νόμου ΑΠΕ.
- [E23] Ζήκος Ιωάννης, «Βέλτιστη οικονομοτεχνική σχεδίαση ΜΥΗΕ στον ποταμό Αγραφιώτη», Διπλωματική εργασία, 2012, σελ. 150
- [E24] Δ. Ε. Παπαντώνης: «Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις σωληνώσεις, αντλιοστάσιο, υδραυλικό πλήγμα», Εκδόσεις Τσότρας, σελ. 493
- [E25] Α.Γ. Μπακιρτζή: «Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1998, σελ. 376

Βιβλιογραφία – Πηγές στην αγγλική γλώσσα

- [E1]European Small Hydropower Association ESHA: “Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant”, 2004, σελ. 295.
- [E2]Garyfallos Arabatzis, Grigorios Kyriakopoulos, Panagiotis Tsiialis “Typology of regional units based on RES plants: The case of Greece”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 78, pp.1424 – 1434.
- [E3]Allison Bridges, Frank A. Felder, Kathryn McKelvey, Ishanie Niyogi, “Uncertainty in energy planning: Estimating the health impacts of air pollutions from fossil fuel electricity generation”, Energy Research & Social Science, 2015, vol.6, pp. 74 – 77.
- [E4]Kamil Kaygusuz, “Energy for sustainable development: A case of developing countries”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, vol. 16, pp.1116 – 1126.
- [E5]N.L. Panwar a, S.C. Kaushik b, Surendra Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, vol.15, pp. 1513 – 1524.
- [E6]Vineet Kumar Singh , S.K. Singal, “Operation of hydro power plants-a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 69, pp. 610 – 619.
- [E7]Katsaprakakis, D.A., “Hybrid power plants in non-interconnected insular systems”, Applied Energy, 2016, vol. 164, pp. 268 – 283.

- [E8] Yaylaci ED, Ismaila AB, Uşkay O, Düzgün Ş. “Spatial analyses of electricity supply and consumption in Turkey for effective energy management and policymaking.” *Implementing environmental and resource management*, 2011. p. 153 – 68.
- [E9]Hristos Tyralis, Nikos Mamassisa , Yorgos N. Photis “Spatial analysis of the electrical energy demand in Greece”, *Energy policy*, 2017, vol. 102, pp. 340 – 352.
- [E10]Hemant Sharma,Jasvir Singh “Run off River Plant: Status and Prospects, *IJITEE*, 2013, vol. 3, pp. 210 – 213.
- [E11]Woodruff,R.S. “Redevelopment of an abandoned small hydro project”, *Journal of Energy Engineering*, 1988, vol. 114, pp. 26 -41.
- [E12]Francisco Manzano-Agugliaroa, Myriam Tahera, Antonio Zapata-Sierraa, Adel Juaidia, Francisco G. Montoya “An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol.75, pp. 476 – 489.
- [E13]Mateus Ricardo Nogueira Vilanova, José Antônio Perrella Balestieri “Hydropower recovery in water supply systems: Models and case study”, *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 84, pp.414 – 426.
- [E14]Ömer Yüksek, Kamyl Kaygusuz “Small Hydropower Plants as a New and Renewable Energy Source”, *Energy Sources, Part B*, 2006, 1:3, pp. 279 – 290.
- [E15]Recep Bakis “Electricity production opportunities from multipurpose dams (case study)”, *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, pp. 1723 – 1738.
- [E16]Smith, N.P.A. “Key factors for the success of village hydro-electric programme”, *Renewable Energy*, 1994, vol. 5, pp. 1453 – 1460.
- [E17]Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Kadner S, Zwickel T “Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change”, *IPCC: Summary for Policymakers*, Cambridge University Press, 2011, pp. 25.
- [E18]Zimny, J.Email Author, Michalak, P., Bielik, S., Szczotka, K. “Directions in development of hydropower in the world, in Europe and Poland in the period 1995-2011”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol.21, pp. 117 – 130.
- [E19]Dogan Altinbilek, Karin Seelos, Richard Taylor, “Hydropower's Role in Delivering Sustainability”, *Energy & Environment*, 2005, vol. 16, pp. 815 – 824.
- [E20]Oliver Paish “Small hydro power: technology and current status”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, vol.6, pp. 537 – 556.
- [E21]Kamil Kaygusuz “Sustainable Development of Hydroelectric Power”, *Energy Sources*, 2002, vol. 24, pp. 803 – 815.
- [E22]Gentle, C.R., Smith, N.P.A., Williams, A.A. “ Enhancing the cost-effectiveness and sustainability of community pico hydro projects and programmes”, *Energy and the Environment – Proceedings of the International Conference on Energy and the Environment*, 2003, vol.1, pp. 274 – 280.

- [E23]Yüksel, I. “Development of hydropower: A case study in developing countries”, Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy, 2007, vol.7, pp. 113 – 121.
- [E24]F. Manzano-Agugliaro, A. Alcayde, F.G. Montoya, A. Zapata-Sierra, C. Gil “Scientific production of renewable energies worldwide: An overview”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, vol. 18, pp. 134 - 143
- [E25]Hanmandlu M, Goyal H. “Proposing a new advanced control technique for microhydro power plants.”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2008, vol. 30, pp. 272 – 282
- [E26]Malesios, C. Arabatzis, G. “Small hydropower stations in Greece: The local people's attitudes in a mountainous prefecture”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, vol 14, pp. 2492 – 2510
- [E27] I Sakellari, A Chazapi, A Nifakou, S Drosou, CK Dimou, J Stefanakos “Hydro Potential in Greece, a Review of Development and Perspectives - Comparison with other European Countries”, 11th ICOLD European Club Symposium, 2019, pp 19.
- [E28]Sharma, R.N., Chand, N, Sharma,V, Yadav, D. “Decision support system for operation, scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol.43, pp. 1099 – 1113.
- [E29]Edgardo D. Castronuovo, Joao A. Pecas Lopes “Optimal operation and hydro storage sizing of a wind–hydro power plant”, International Journal of Electrical Power and Energy System, 2004, vol.26, pp. 771 – 778.
- [E30]Juan Garrido, Angel Zafra, Francisco Vazquez “Object oriented modelling and simulation of hydropower plants with run-of-river scheme: A new simulation tool”, Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, vol. 17, pp. 1748 – 1767.
- [E31]John S. Anagnostopoulos, Dimitris E. Papantonis “Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant”, Energy Conversion and management, 2007, vol.48, pp. 2663 – 2670.
- [E32]Aslan,Y., Arslan, O., Yasar, C. “A sensitivity analysis for the design of small-scale hydropower plant: Kayabogazi case study”, Renewable Energy, 2008, vol.33, pp. 791 – 801.
- [E33]J.K. Kaldellis, D.S. Vlachou, G. Korbakis, “Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis”, Energy Policy, 2005, vol. 33, pp. 1969 - 1985.
- [E34]S.J. Williamson a, B.H. Star, J.D. Booker “Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis”, Renewable Energy, 2014, vol. 61, pp. 43 - 50.
- [E35]S.K. Singal *, R.P. Saini, C.S. Raghuvanshi “Analysis for cost estimation of low head run-of-river small hydropower schemes”, Energy for Sustainable Development, 2010, vol. 14, pp. 117 – 126.
- [E36] Najmaii M, Movaghar A. “Optimal design of run of river power plant”, Water Resources Research, 1992, vol.28, pp. 991 – 997.

- [E37]Basso, S., Botter, G. “Streamflow variability and optimal capacity of run of river hydropower plants.”, *Water Resources Research*, 2012, vol. 48:10, W10527.
- [E38]Juan Garrido, Ángel Zafra, Francisco Vázquez “Object oriented modelling and simulation of hydropower plants with run-of-river scheme: A new simulation tool”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, vol.17, pp.1748 – 1767.
- [E39]Himanshu Nautiyal , S.K. Singal, Varuna, Aashish Sharma “Small hydropower for sustainable energy development in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol.15, pp. 2021 – 2027.
- [E40]M. Karami, H.A. Shayanfar, J. Aghaei, A. Ahmadi “Mixed integer programming of security-constrained daily hydrothermal generation scheduling (SCDHGS)”, *Scientia Iranica*, 2013, vol. 20, pp. 2036 – 2050.
- [E41]Moghimi Ghadikolaei H, Ahmadi A, Aghaei J, Najafi M. “Risk constrained self-scheduling of hydro/wind units for short term electricity markets considering intermittency and uncertainty.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 4734 – 4743.
- [E42]Mahmoud Sharafi Masouleh, Farshid Salehi, Fatima Raeisi, Mojtaba Saleh, AzadeBrahman, and Abdollah Ahmadi “Mixed-integer Programming of Stochastic Hydro Self-scheduling Problem in Joint Energy and Reserves Markets”, *Electric Power Components and Systems*, 2016, vol. 44, pp. 752 – 762.
- [E43] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, J. Gómez “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, pp. 1753 – 1766.
- [E44]M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, A.S. Khwaja, A. Anpalagan “Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 640 – 654.
- [E45]Ju-Hwan Yoo “Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model” *Journal of Hydrology*, 2009, vol. 376, pp. 182 – 187.
- [E46]Michael J. Kuby, William F. Fagan , Charles S. ReVelle, William L. Graf “A multi objective optimization model for dam removal: an example trading off salmon passage with hydropower and water storage in the Willamette basin”, *Advances in Water Resources*, 2005, vol. 28, pp. 845 – 855.
- [E47]Stein-Erik Fleten, Trine Krogh Kristoffersen, “Short-term hydropower production planning by stochastic programming”, *Computers & operations research*, 2008, vol. 35, pp. 2656 – 2671.
- [E48] R. Moeini, , A. Afshar, M.H. Afshar “Fuzzy rule-based model for hydropower reservoirs operation”, *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, vol. 33, pp. 171 – 178.
- [E49]Mohammad Reza Norouzi, Abdollah Ahmadi, Adel M. Sharaf, Ali Esmaeel Nezhadd “Short-term environmental/economic hydrothermal scheduling”, *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 116, pp. 117 – 127.
- [E50] Abdollah Ahmadi, Amirabbas Kaymanesh, Pierluigi Siano, Mohammadreza Janghorbani, Ali Esmaeel Nezhad, Debora Sarno “Evaluating the effectiveness of

normal boundary intersection method for short-term environmental/economic hydrothermal self-scheduling”, Electric Power Systems Research, 2015, vol. 123, pp. 192 – 204.

[E51] Abdollah Ahmadi, Mahmoud Sharafi Masouleh, Mohammadreza Janghorbani, Navid Yadollahi Ghasemi Manjili, Adel M. Sharaf , Ali Esmaeel Nezhad, “Short term multi-objective hydrothermal scheduling”, Electric Power Systems, Research, 2015, vol.121, pp. 357 – 367.

[E52] Amin Elshorbagy “Multicriterion decision analysis approach to assess the utility of watershed modeling for management decisions”, Water Resources Research, 2006, vol.42, W09407, pp.14.

[E53] Katsaprakakis, D.A., Dakanali, I., Condaxakis, C., Christakis, D.G. “Comparing Electricity storage technologies for small insular grids”, Applied Energy, 2019, vol.251, 113332.

[E54] Ioannis A., Niadas Panos, G. Mentzelopoulos, “Probabilistic Flow Duration Curves for Small Hydro Plant Design and Performance evaluation”, Water resources management, 2008, vol.22, pp. 509 -523

[E55] Katsaprakakis, D.A., Christakis, D.G. “Seawater pumped storage systems and offshore wind parks in islands with low onshore wind potential. A fundamental case study”, Energy, 2014, vol.66, pp. 470 – 486.

[E56] Katsaprakakis, D.A., Dakanali, I. “Comparing Electricity storage technologies for small insular grids”, Energy Procedia, 2019, vol. 159, pp. 84 – 89.

[E57] Kapsali, M., Kaldellis, J.K. “Combining hydro and variable wind power generation by means of pumped-storage under economically viable terms”, Applied Energy, 2010, vol. 87, pp. 3475 – 3485.

[E58] Carmen L.T. Borges, Roberto J. Pinto “Small Hydro Power Plants Energy Availability Modeling for Generation Reliability Evaluation”, IEEE Transactions on power systems, 2008, vol.23, p.1125 – 1135.

[E59] Kaldellis, J.K. “The contribution of small hydro power stations to the electricity generation in Greece: Technical and economic considerations”, Energy Policy, 2007, vol.35, pp. 2187 – 2196.

[E60] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) “World Small Hydro power Development Report”, 2016, pp. 42.

[E61] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) “World Small Hydro power Development Report - Europe”, 2019, pp. 198.

Internet – Πηγές από το Διαδίκτυο

- [I1] http://artnotesinourlife.blogspot.com/2019/01/blog-post_77.html
- [I2] <http://www.allaboutenergy.gr/>
- [I3] www.wikipedia.com
- [I4] <https://ananeosimespigeseenergeias.wordpress.com>
- [I5] http://www.hess.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=92
- [I6] <https://docplayer.gr/46632361-I-entatikopoiisi-tis-ekuetalleysis-ton-ananeosiuon-pigon-energeias-a-p-e-eufanizetai-os-aporroia-toy-provliuatisuoy-ton-syghronon-koinonion.html>
- [I7] http://www.cs.uoi.gr/~arly/courses/ai/slides/10_fuzzy_logic.pdf
- [I8] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/qanda_20_1834
- [I9] <http://www.scientact.gr/el/46868075>
- [I10] <https://ppcr.gr/el/hydroelectric>
- [I11] <https://www.unido.org/our-focus-safeguarding-environment-clean-energy-access-productive-use-renewable-energy-focus-areas-small-hydro-power/world-small-hydropower-development-report>
- [I12] <https://docplayer.gr/80991169-Ananeosimi-energeia-kai-ydroilektrika-erga-mikra-ydroilektrika-erga.html>
- [I13] <https://docplayer.gr/48167734-Eisagogi-stin-energeiaki-tehnologia.html>
- [I14] <https://www.callisto.gr/blog/oi-periohes-natura-2000-tis-elladas>
- [I15] <https://www.callisto.gr/blog/paremvasi-gia-mellon-ton-foreon-diaheirisis>
- [I16] <https://www.callisto.gr/blog/protaseis-10-perivallontikon-organoseon-gia-ti-diaheirisi-ton-prostateyomenon-periohon>
- [I17] <https://www.callisto.gr/blog/koini-topothesisi-perivallontikon-organoseon-epi-toy-anamenomenoy-nomoshedioy-gia>
- [I18] <https://www.callisto.gr/blog/kataggelia-stin-eyropaiki-epitropi-gia-ta-aiolika-parka-entos-prostateyomenon-periohon-natura>
- [I19] <https://www.callisto.gr/blog/koini-topothesisi-ellinikis-ornithologikis-etaireias-ellinikis-etairias-prostasias-tis-fysis>
- [I20] <https://www.callisto.gr/blog/koini-topothesisi-ellinikis-ornithologikis-etaireias-ellinikis-etairias-prostasias-tis-fysis>
- [I21] <https://pixabay.com/photos/neckar-lock-power-plant-heilbronn-2291854/>
- [I22] <https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/kaplan-turbines/>
- [I23] https://energyeducation.ca/encyclopedia/Pelton_turbine
- [I24] <https://voith.com>
- [I25] <https://www.cink-hydro-energy.com>
- [I26] <https://trikalaview.gr/polos-elxis-o-kefalopotamos-gia-dekades-periigites-apo-oli-tin-ellada/>
- [I27] <https://en-gb.topographic-map.com/map-cvtgt/Europe/?center=39.54856%2C21.58168&zoom=16>