



---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ  
ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ»***

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Χαλακατεβάκη Μαρίας  
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**Επιβλέπων**

Τσεκούρας Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής, ΠΑ.Δ.Α.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Χαλακατεβάκη Μαρίας  
Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων

Τσεκούρας Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής, ΠΑ.Δ.Α.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

(Υπογραφή)

.....  
Γεώργιος Τσεκούρας  
Επίκουρος Καθηγητής,  
ΠΑ.Δ.Α.

(Υπογραφή)

.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Βασίλειος Ριζιώτης  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Τσεκούρα για την υποστήριξη, την καθοδήγηση, τις επικοινωνητικές διορθώσεις και παρατηρήσεις του και το χρόνο που αφιέρωσε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Επίσης, είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη και βοήθεια της οικογένειάς μου και των στενών μου φίλων καθ' όλη τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού και ιδιαίτερα κατά το δεύτερο έτος που ήταν αρκετά φορτωμένο με υποχρεώσεις. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού για τις γνώσεις και την εμπειρία που μας μετέδωσαν, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Χατζηαργυρίου και κ. Ριζιώτη.

Με εκτίμηση,  
Μαρία Χαλακατεβάκη,  
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.ΤΤ.

<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	<b>«ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ»</b>
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	<b>Μαρία Χαλακατεβάκη</b>
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	<b>Γεώργιος Τσεκούρας, Επίκουρος Καθηγητής, ΠΑ.Δ.Α.</b>
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	<b>2019-2020</b>

## Σύνοψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά την παρουσίαση των επιμέρους χαρακτηριστικών ενός μΥΗΕ και την ανάπτυξη πρότυπου κώδικα επιλογής μΥΗΕ. Με δεδομένα τη χρονολογική καμπύλη ύδατος, τη διάφορα υδατόπτωσης, το μήκος του αγωγού (δηλαδή τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού ενός υδροηλεκτρικού έργου) σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται από τον ελληνικό κανονισμό επιλέγεται ο καταλληλότερος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (στρόβιλος, γεννήτρια, μετασχηματιστής τάσης κ.λ.π.). Πραγματοποιείται επίσης και η προσεγγιστική κοστολόγηση της εγκατάστασης με δεδομένο το κόστος πώλησης της ενέργειας και το επιτόκιο δανεισμού στο πλαίσιο της μελέτης βιωσιμότητας της επένδυσης. Ολοκληρώνεται ο κώδικας με την ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της παροχής του υδατορέματος, την τιμή πώλησης της ενέργειας, και το επιτόκιο δανεισμού ώστε να ελεγχθεί πως επηρεάζονται ο Βαθμός Ενεργειακής Αξιοποίησης, ο χρόνος αποπληρωμής, το ολικό κέρδος από την επένδυση, και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης.

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τη σχεδίαση μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας συμπεριλαμβάνοντας τα στοιχεία έργων πολιτικού, υδραυλικού, μηχανολόγου και ηλεκτρολόγου μηχανικού, καθώς και η δυνατότητα διερεύνησης διαμόρφωσής του ως αντλησιοταμιευτικής.

Αρχικά πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με έμφαση στα υδροηλεκτρικά έργα περιγράφοντας τις διάφορες επιμέρους κατηγορίες έργων. Στη συνέχεια αναλύεται η σχεδίαση ενός υδροηλεκτρικού έργου ξεκινώντας από την υδρολογική ανάλυση, δηλαδή μία σύντομη αναφορά στις υδρολογικές έννοιες, οι οποίες αφορούν άμεσα τη διαστασιολόγηση των υδροηλεκτρικών έργων, και τη διαμόρφωση ενός μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού, που περιλαμβάνει θεωρητική περιγραφή των κύριων συνιστωσών του, ενεργειακή ανάλυση, γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τη διαμόρφωση και περιπτώσεις διαμόρφωσης διάφορων τύπων υδροστροβίλων. Παράλληλα εντοπίζονται και διαφοροποιήσεις με τις πρακτικές που εφαρμόζονται στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα.

Ακολουθώς περιγράφονται τα έργα του πολιτικού μηχανικού, όπως είναι τα φράγματα, οι ταμιευτήρες, οι υπερχειλιστές, τα έργα υδροληψίας, τα έργα του μηχανολόγου μηχανικού, που σχετίζονται με τη λειτουργία, τη διαμόρφωση και την τυποποίηση των υδροστροβίλων, τα έργα του ηλεκτρολόγου μηχανικού, που αφορούν τις γεννήτριες, τους μετασχηματιστές, το διακοπτικό υλικό, τους αυτοματισμούς ελέγχου, καθώς και τους τρόπους διασύνδεσης του υδροηλεκτρικού σταθμού με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόσθετα αναλύονται οι αρνητικές και θετικές επιπτώσεις των υδροηλεκτρικών σταθμών στο περιβάλλον, τόσο κατά τη φάση κατασκευής τους, όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.

Επειτα πραγματοποιείται η οικονομοτεχνική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών μονάδων, όπου αναφέρονται τα βασικά στοιχεία της οικονομικής ανάλυσης, τα κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας, ο υπολογισμός των συνιστωσών του κόστους κατασκευής και των εσόδων των μικρών υδροηλεκτρικών έργων, καθώς και οι φάσεις μελέτης της υδροηλεκτρικής μονάδας, οι διαδικασίες που απαιτούνται για την αδειοδότηση, το νομικό καθεστώς που ισχύει και τα βήματα που ακολουθούνται για την τεχνικο-οικονομική επιλογή της υδροηλεκτρικής μονάδας.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται πρότυπος κώδικας επιλογής / διαμόρφωσης μικρού υδροηλεκτρικού έργου με δεδομένη τη χρονολογική καμπύλη ύδατος, τη διάφορα υδατόπτωσης, το μήκος του αγωγού και τα βασικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού έργου επιλέγοντας τον καταλληλότερο στρόβιλο, γεννήτρια, μετασχηματιστή κτλ. με δεδομένο κόστος πώλησης ενέργειας, δηλαδή η διαδικασία της αναγνωριστικής μελέτης ενός έργου για να διαπιστωθεί κατά πόσο αξίζει να επενδύσει κάποιος στο συγκεκριμένο έργο. Πραγματοποιείται επίσης ανάλυση

ευαισθησίας ως προς την τιμή της παροχής του υδατορέματος, την τιμή πώλησης της ενέργειας, και το επιτόκιο δανεισμού ώστε να ελεγχθεί πώς επηρεάζονται ο Βαθμός Ενεργειακής Αξιοποίησης, ο χρόνος αποπληρωμής, το ολικό κέρδος από την επένδυση, και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης.

Τέλος ολοκληρώνεται η παρούσα διπλωματική με τα συμπεράσματα και τις περιοχές για περαιτέρω έρευνα.

**POST-GRADUATE THESIS:**        **«Design of small hydroelectric power plants»**

**STUDENT:**                       **Maria Chalakatevaki, Dipl. Civil Engineer, N.T.U.A**

**SUPERVISOR:**               **Georgios Tsekouras, Assistant Professor, UNI.W.A.**

**ACADEMIC YEAR:**           **2019-2020**

## **Abstract**

The scope of this master thesis is to present the various features of a small hydroelectric power plant and develop a comprehensive MATLAB script for the design of the hydro plant. Given the water inflow time-series, the headwater level difference, the length of the pipe (i.e. the basic parameters for the design of a hydroelectric scheme) and complying with the specifications of the Greek regulations, the most suitable electromechanical equipment is chosen (turbine, generator, converter, etc). Moreover, an approximate pricing scenario of the installation is carried out considering certain prices for energy selling and interest rate in terms of the viability study for the investment. The coding part is concluded with a sensitivity analysis regarding the river flow discharge, the selling price of energy and the interest rate. Their influence on the level of energy utilisation, the payback time, the total profit and the internal rate of return is investigated.

## **Summary**

The scope of this thesis is the design of a small hydroelectric power plant taking into account features of civil, hydraulic, mechanical and electrical engineering, as well as considering the addition of pump storage.

Initially, a small introduction on the different electrical systems and the renewable energy sources, with a focus on hydropower, is presented. Next, there is an analysis of the design of a hydroelectric scheme, starting from the hydrologic analysis with a brief reference on some basic hydrologic terms that are highly relevant for the design of hydropower dams and the installation of hydroelectric plants, their basic features, energy analysis, general remarks and different types of water turbines. In addition, a comparison with the larger-scale hydroelectric dams is presented.

Furthermore, there is a comprehensive description of the civil engineering works, such as dams, basins, spillways, water outlets, the mechanical engineering works that are focused on the operation, design and standardisation of water turbines, the electrical engineering works, such as generators, converters, circuit breakers, control automation, as well as the interconnection options between the hydroelectric plant and the power transmission network. Besides, there is a discussion on the positive and negative effects of hydro plants during their installation and operation phases.

Moreover, a technical and financial analysis is presented with the basic economic analysis tools, the economic viability criteria, the different financial components for the installation and construction of the power plant and the revenue streams of a small hydroelectric scheme. The different stages of design studies, the procedures for licencing, the legal and statutory regimes and the steps for the selection of the appropriate hydroelectric unit are also described.

Further, a series of comprehensive MATLAB scripts are developed and presented for the design of small hydroelectric power plants given the water inflow time-series, the headwater level difference, the length of the pipe and the basic features of such a scheme. The most suitable hydro turbines, generators, converters, etc are selected considering the selling price of power produced based on the preliminary analysis of the value and viability of such an investment. Also, a sensitivity analysis regarding the river flow discharge, the selling price of energy and the interest rate is conducted in order to study the influence on the level of energy utilisation, the payback time, the total profit and the internal rate of return.

Finally, the present study is concluded with the conclusions of this piece of research and a few suggestions for future research.

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	1
Ευρετήριο Σχημάτων .....	7
Ευρετήριο Πινάκων .....	10
<b>1 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας &amp; στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στα Υδροηλεκτρικά Έργα .....</b>	<b>12</b>
1.1 Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας; .....	12
1.2 Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	13
1.3 Το νερό: ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους .....	15
1.4 Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος.....	16
1.5 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου .....	17
1.6 Μορφές υδροδυναμικών εγκαταστάσεων .....	18
1.7 Διάκριση μικρών- μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
1.8 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα των υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στα μικρά έργα.....	20
1.9 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των μικρών υδροηλεκτρικών έργων.....	21
1.10 Υδραυλική ενέργεια στον κόσμο και στην Ελλάδα .....	21
1.11 Μικρά υδροηλεκτρικά έργα με αντλησιοταμίευση .....	24
1.12 Προτεινόμενη δομή διπλωματικής εργασίας.....	26
<b>2 Υδρολογική ανάλυση .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1. Υδρολογικοί Υπολογισμοί .....</b>	<b>31</b>
2.1.1. Μηχανισμοί που συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο .....	31
2.1.1.1. Κατακρμνήσεις.....	31
2.1.1.2. Εξατμισοδιαπνοή .....	31
2.1.1.3. Κατακράτηση – Διήθηση.....	32
2.1.1.4. Ενεργός Βροχόπτωση.....	33
2.1.2. Επιφανειακή απορροή .....	34
2.1.2.1. Μηχανισμοί και προέλευση της επιφανειακής απορροής .....	34
2.1.2.2. Υδρογράφημα πλημμυρικού επεισοδίου.....	35
2.1.2.4. Υδρολογικά μοντέλα επιφανειακής απορροής .....	37
2.1.2.5. Καμπύλη διάρκειας παροχής.....	38
2.1.3. Πλημμυρική Παροχή.....	39
<b>2.2. Μέτρηση Παροχής – Επεξεργασία Υδρομετρικών Δεδομένων .....</b>	<b>40</b>

2.2.1.	Απευθείας μέτρηση παροχής.....	41
2.2.2.	Καμπύλη στάθμης - παροχής .....	42
2.2.3.	Επέκταση της καμπύλης στάθμης παροχής .....	42
<b>3</b>	<b>Διαμόρφωση μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Περιγραφή κύριων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>Ενεργειακή ανάλυση μικρού υδροηλεκτρικού έργου.....</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Διαδικασία επιλογής και επιλογή βέλτιστης θέσης κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού έργου .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5</b>	<b>Γενικές παρατηρήσεις περί διαμόρφωσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού .....</b>	<b>49</b>
<b>3.6</b>	<b>Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Pelton ή cross flow.....</b>	<b>50</b>
<b>3.7</b>	<b>Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο τύπου Francis.....</b>	<b>52</b>
<b>3.8</b>	<b>Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο αξονικής ροής.....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>Έργα πολιτικού μηχανικού.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Φράγματα.....</b>	<b>55</b>
4.1.1	Τύποι φραγμάτων .....	55
4.1.2	Φράγματα βαρύτητας σκυροδέματος .....	57
4.1.3	Αντηριδωτά φράγματα .....	58
4.1.4	Τοξωτά φράγματα .....	59
4.1.5	Χωμάτινα φράγματα βαρύτητας .....	60
4.1.6	Λιθόρριπτα φράγματα βαρύτητας.....	61
4.1.7	Φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.....	62
4.1.8	Φράγματα από σκληρό επίχωμα. ....	63
4.1.9	Λοιποί τύποι φραγμάτων.....	63
4.1.10	Εκτροπή υδατορέματος για την κατασκευή φράγματος .....	64
<b>4.2</b>	<b>Ταμιευτήρες.....</b>	<b>64</b>
4.2.1	Ταμιευτήρας μικρού υδροηλεκτρικού ροής.....	65
4.2.2	Ταμιευτήρας αποθήκευσης ύδατος .....	66
4.2.3	Διόδευση πλημμύρας .....	67
4.2.4	Ολοκληρωτικές καμπύλες, καμπύλες διάρκειας – παροχής, λειτουργίας ταμιευτήρα αποθήκευσης ύδατος .....	68
4.2.5	Απώλειες νερού ταμιευτήρα αποθήκευσης ύδατος.....	71
4.2.6	Απόθεση φερτών υλών.....	72
<b>4.3</b>	<b>Υπερχειλιστές.....</b>	<b>72</b>
4.3.1	Γενικά.....	72
4.3.2	Υπερχειλιστές καμπύλης στέψης .....	73
4.3.3	Ρυθμιζόμενοι υπερχειλιστές – εκχειλιστές.....	74
4.3.4	Λοιποί τύποι υπερχειλιστών – εκχειλιστών .....	76



4.3.5 Έργα εξόδου μεγάλων ταμιευτήρων .....	77
<b>4.4 Λεκάνη ηρεμίας .....</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Έργα υδροληψίας .....</b>	<b>81</b>
4.5.1 Γενικά.....	81
4.5.2 Βυθισμένη Υδροληψία ή Υδροληψία Ταμιευτήρα .....	82
4.5.3 Διώρυγες υδροληψίας – Ποτάμια Υδροληψία .....	82
4.5.4 Εξαμμωτής .....	87
<b>4.6 Διώρυγα.....</b>	<b>90</b>
4.6.1 Στοιχεία μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα .....	90
4.6.2 Κατασκευαστικά και σχεδιαστικά στοιχεία διώρυγας.....	97
<b>4.7 Δεξαμενή φόρτισης.....</b>	<b>98</b>
<b>4.8 Αγωγός πτώσης.....</b>	<b>99</b>
4.8.1 Υλικό του αγωγού πτώσης .....	99
4.8.2 Επιλογή της διαμέτρου του αγωγού πτώσης.....	101
4.8.3 Υπολογισμός πάχους.....	102
4.8.4 Δυνάμεις και στηρίγματα .....	104
4.8.5 Υδραυλικές απώλειες .....	107
4.8.6 Εξαρτήματα αγωγού πτώσης.....	109
4.8.7 Διάταξη αγωγού πτώσης .....	110
4.8.8 Κοστολόγηση αγωγού πτώσης.....	111
<b>4.9 Όργανα διακοπής.....</b>	<b>112</b>
<b>4.10 Το πρόβλημα του υδραυλικού πλήγματος.....</b>	<b>114</b>
4.10.1 Γενικά.....	114
4.10.2 Βασικές εξισώσεις υδραυλικού πλήγματος & επίλυση.....	115
4.10.3 Υπολογισμός υδραυλικού πλήγματος σε οποιοδήποτε χρόνο και σημείο του αγωγού	118
4.10.4 Δεξαμενές ανάπαλσης.....	118
<b>4.11 Λοιπά στοιχεία .....</b>	<b>120</b>
4.11.1 Γέφυρα ανόδου ψαριών.....	120
4.11.2 Γέφυρα καθόδου ψαριών.....	123
<b>5 Έργα Μηχανολόγου Μηχανικού .....</b>	<b>125</b>
<b>5.1 Αρχή Λειτουργίας Υδροστροβίλων.....</b>	<b>125</b>
5.1.1 Ενεργειακός Υπολογισμός .....	125
5.1.2 Εφαρμογή του Θεωρήματος της Ροπής της Ορμής - Συστροφής.....	127
5.1.3 Συνιστώσες της ταχύτητας – Τρίγωνο ταχυτήτων .....	131
5.1.4 Εφαρμογή του Θεωρήματος της Ροπής της Ορμής σε μερικό Δρομέα .....	131
5.1.5 Περιπτώσεις άεργης ισχύος.....	133
5.1.5.1 Διατήρηση της συστροφής .....	133
5.1.5.2 Άεργη μεταβολή της συστροφής.....	133

5.1.6	Διερεύνηση θεμελιώδους εξίσωσης στροβιλομηχανών.....	135
5.1.7	Διαμόρφωση υδροστροβίλων.....	138
<b>5.2</b>	<b>Καμπύλες λειτουργίας και βαθμοί απόδοσης υδροστροβίλων.....</b>	<b>138</b>
5.2.1	Θεωρητική χαρακτηριστική.....	138
5.2.2	Απώλειες και βαθμοί απόδοσης.....	139
5.2.3	Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλων.....	142
5.2.4	Νόμοι ομοιότητας και αναγωγής του βαθμού απόδοσης.....	143
5.2.5	Αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας υδροστροβίλων.....	145
5.2.6	Ειδικός αριθμός στροφών.....	146
5.2.7	Επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, του ειδικού αριθμού στροφών και ταχύτητας περιστροφής.....	147
5.2.8	Λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές.....	151
<b>5.3</b>	<b>Εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής μικρών υδροστροβίλων.....</b>	<b>152</b>
<b>5.4</b>	<b>Το πρόβλημα της σπηλαιώσης και η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου.....</b>	<b>153</b>
<b>5.5</b>	<b>Τυποποίηση μικρών υδροστροβίλων.....</b>	<b>155</b>
5.5.1	Γενικά.....	155
5.5.2	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Francis.....	156
5.5.3	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι αξονικής ροής.....	157
5.5.4	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton.....	157
5.5.5	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι cross-flow.....	158
5.5.6	Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Turgo.....	158
5.5.7	Αντίστροφη λειτουργία φυγόκεντρων αντλιών.....	159
<b>5.6</b>	<b>Κιβώτιο ταχυτήτων.....</b>	<b>160</b>
<b>6</b>	<b>Έργα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.....</b>	<b>162</b>
<b>6.1</b>	<b>Βασική δομή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού....</b>	<b>162</b>
<b>6.2</b>	<b>Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά γεννητριών.....</b>	<b>163</b>
6.2.1	Εισαγωγή.....	163
6.2.2	Σύγχρονες γεννήτριες.....	166
6.2.3	Ασύγχρονες γεννήτριες.....	172
6.2.4	Σύγκριση γεννητριών.....	176
6.2.5	Τυποποίηση γεννητριών.....	177
<b>6.3</b>	<b>Μετασχηματιστές Ισχύος.....</b>	<b>178</b>
<b>6.4</b>	<b>Εσωτερικές καταναλώσεις &amp; λοιπά βοηθητικά συστήματα.....</b>	<b>179</b>
<b>6.5</b>	<b>Διακοπτικό υλικό πινάκων.....</b>	<b>180</b>
<b>6.6</b>	<b>Συστήματα αυτομάτου ελέγχου.....</b>	<b>180</b>
<b>6.7</b>	<b>Διασύνδεση υδροηλεκτρικού σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....</b>	<b>182</b>

6.7.1	Διασύνδεση υδροηλεκτρικού σταθμού σε δίκτυο.....	182
6.7.2	Αυτόνομη λειτουργία υδροηλεκτρικού σταθμού.....	184
6.7.3	Ζητήματα Ποιότητας Ισχύος.....	185
<b>7</b>	<b>Επίδραση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών στο Περιβάλλον.....</b>	<b>187</b>
7.1	Εισαγωγή.....	187
7.2	Καταγραφή περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	188
7.3	Επιπτώσεις ως προς το περιβάλλον.....	189
7.3.1	Στο φυσικό περιβάλλον.....	189
7.3.2	Στο κοινωνικό και πολιτιστικό περιβάλλον.....	192
<b>8</b>	<b>Οικονομοτεχνική Ανάλυση Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων.....</b>	<b>199</b>
8.1	Εισαγωγή.....	199
8.2	Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης.....	200
8.3	Τεχνικές και κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας.....	202
8.4	Υπολογισμός συνιστωσών κόστους κατασκευής μικρών υδροηλεκτρικών έργων 204	
8.4.1	Εισαγωγή.....	204
8.4.2	Προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους.....	205
8.4.3	Συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους κάθε συνιστώσας του έργου.....	206
8.5	Εκτίμηση λειτουργικού κόστους.....	211
8.6	Οικονομικά κίνητρα και τιμολόγηση.....	211
8.7	Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων.....	213
8.8	Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια με αντλησιοταμίευση.....	213
8.9	Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων με αντλησιοταμίευση.....	214
8.10	Οικονομική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών έργων με αντλησιοταμίευση.....	214
<b>9</b>	<b>Αρχές Σχεδίασης &amp; Εγκατάστασης Υδροηλεκτρικής Μονάδας Παραγωγής Ενέργειας. 216</b>	
9.1	Φάσεις της μελέτης υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής ενέργειας.....	216
9.1.1	Αναγνωριστική Μελέτη.....	217
9.1.2	Προκαταρκτική Μελέτη.....	219
9.1.3	Μελέτη εφαρμογής.....	222
9.2	Κατασκευή υδροηλεκτρικής μονάδας.....	223
9.3	Διαδικασίες αδειοδότησης.....	225
9.3.1	Έκδοση Άδειας Παραγωγής.....	225
9.3.2	Έκδοση Άδειας Εγκατάστασης.....	225
9.3.3	Προκαταρκτική Περιβαλλοντική Εκτίμηση και Αξιολόγηση (Π.Π.Ε.Α.).....	225

9.3.4 Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (Ε.Π.Ο.) .....	226
9.3.5 Έγκριση Επέμβασης σε δάσος ή δασική έκταση (Εεπ) .....	226
9.3.6 Άδεια Χρήσης Νερού – Εκτέλεση Έργου Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων.....	226
9.3.7 Έκδοση Άδειας Λειτουργίας.....	226
<b>9.4 Νομικό καθεστώς .....</b>	<b>227</b>
<b>9.5 Βήματα τεchnοοικονομικής επιλογής υδροηλεκτρικής μονάδας.....</b>	<b>230</b>
9.5.1 Εκτίμηση ύπαρξης υδροδυναμικής ενέργειας.....	230
9.5.2 Θέση εγκατάστασης υδροηλεκτρικής μονάδας.....	231
9.5.3 Εκτίμηση ενεργειακών αναγκών.....	232
9.5.4 Εκτίμηση γενικών διαστάσεων υδροηλεκτρικής μονάδας.....	233
9.5.5 Τελικά παραγόμενη ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικής μονάδας.....	233
<b>10 Προσομοίωση Τεchnοοικονομικής Επιλογής Υδροηλεκτρικής Μονάδας Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Περιβάλλον MatLab .....</b>	<b>234</b>
<b>10.1 Ανάπτυξη Προγράμματος.....</b>	<b>234</b>
10.1.1 hydrology.m .....	234
10.1.2 single_penstock.m.....	235
10.1.3 mechel_equipment.m .....	237
10.1.4 sHPP_function.m.....	238
10.1.5 economics.m.....	240
<b>10.2 Δεδομένα βασικής εκτέλεσης προγράμματος .....</b>	<b>241</b>
<b>10.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος.....</b>	<b>246</b>
<b>10.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων.....</b>	<b>251</b>
<b>11 Γενικά Συμπεράσματα &amp; Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα .....</b>	<b>256</b>
11.1 Γενικά Συμπεράσματα .....	256
11.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα .....	257
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>259</b>
<b>Παράρτημα .....</b>	<b>261</b>

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Κατσαπρακάκης, 2015).....	12
Σχήμα 1.2: Τυπική μορφή ενός ΥΗΕ (Cora, et al., 2019).....	17
Σχήμα 1.3: Εγκατεστημένη Υδροηλεκτρική Ισχύς Διεθνώς (International Hydropower Association, 2019).....	22
Σχήμα 1.4: Υβριδικό σύστημα «Ναέρας», Ικαρία .....	25
Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε 1190 km <sup>3</sup> /έτος (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016). .....	29
Σχήμα 2.2: Σχηματική απλοποιητική μορφή της λεκάνης απορροής του σημείου Α (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).....	29
Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα τυπικού πλημμυρικού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο νετογράφημα. Διαχωρισμός των συνιστωσών του υδρογραφήματος και χαρακτηριστικοί χρόνοι (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).....	30
Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα των διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).....	35
Σχήμα 3.1: Σημεία λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου (Παπαντώνης, 2008).....	46
Σχήμα 3.2: Υδροστρόβιλος Pelton οριζοντίου άξονα (Petley, 2018).....	51
Σχήμα 3.3: Διαμόρφωση υδροστρόβιλου Pelton με 6 ακροφύσια ( <a href="http://www.bflhydro.com/">http://www.bflhydro.com/</a> ). ....	52
Σχήμα 3.4: Υδροστρόβιλος Francis κατακόρυφου άξονα( <a href="https://gradeup.co/">https://gradeup.co/</a> ).....	53
Σχήμα 3.5: Υδροστρόβιλος Francis μικρής ισχύος οριζοντίου άξονα (της εταιρείας Siapro).....	53
Σχήμα 3.6: Υδροστρόβιλος αξονικής ροής τύπου Bulb. ....	54
Σχήμα 4.1:Διατομές φράγματων βαρύτητας από σκυρόδεμα. (α) Μη υπερπηδητά φράγματα: (1) Grobois (1838), (2) Puentes (1791), (3) Furens (1866), (4) Chambon (1934), (5) Bratskaya (1965), (6) Grand Coolee (1942), (7)Toktogul (1978), (8) Hoover (1935), (9) Grande Dixen s (1961). (b) Υπερπηδητά φράγματα: (1) Tsimlanskaya (1951), (2) Dneprovskaya (1932), (3) Noris (1935) (4) Grand Coolee (1942), (5) Krasnoyarskaya (1970), (6) Shasta (1944) (Tanchev, 2014).....	58
Σχήμα 4.2: Μορφή αντηριδωτού φράγματος με επίπεδη ανάντη πλάκα σκυροδέματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).....	59
Σχήμα 4.3: Κάτοψη τοξωτού φράγματος Ταυρωπού(Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).....	60
Σχήμα 4.4: Τυπική διατομή χωμάτινου Φράγματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).....	60
Σχήμα 4.5: Τυπική διατομή Λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).....	61
Σχήμα 4.6: Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκληρό επίχωμα(Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).....	63
Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική μορφή Ολοκληρωτικής Καμπύλης.....	68
Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης διάρκειας παροχών υδατορέματος (Τσόγκας, 2018). .....	70
Σχήμα 4.9: Υπερχειλιστής Λεπτής Στέψης (Akan, 2006).....	73

Σχήμα 4.10: Συντελεστής παροχής $C_D$ υπερχειλιστή καμπύλης στέψης (Akan, 2006).....	74
Σχήμα 4.11: Συντελεστής απορροής κυκλικού ρυθμιζόμενου θυροφράγματος ανοίγματος $dH_1$ ....	75
Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση του υδραυλικού άλματος (Παπανικολάου, 2016). ....	78
Σχήμα 4.13: Μήκος Λεκανών Ηρεμίσεως τύπου USBR (Akan, 2006).....	80
Σχήμα 4.14: Αγωγός με ελεύθερη επιφάνεια σε ομοιόμορφη ροή (Παπανικολάου, 2016).....	90
Σχήμα 4.15: Σχηματική απεικόνιση επενδεδυμένης διώρυγας (Παπανικολάου, 2016). ....	95
Σχήμα 4.16: Προτεινόμενες τιμές για το Ελεύθερο ύψος $F$ και το Ύψος Επένδυσης $f$ (U.S. Bureau of Reclamation). ....	96
Σχήμα 4.17: Τυπική διαμόρφωση και κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης $\mu\text{ΥΗΕ}$ (Παπαντώνης, 2008).....	99
Σχήμα 4.18: Δυνάμεις λόγω της εσωτερικής πίεσης σε αλλαγή κλίσης (Παπαντώνης, 2008). ....	105
Σχήμα 4.19: Συντελεστής τοπικών απωλειών για συνηθισμένα εξαρτήματα και διαμορφώσεις (Παπανικολάου, 2016).....	109
Σχήμα 4.20: Κόστος αγωγού πτώσης συναρτήσει της ονομαστικής παροχής με παράμετρο το ύψος πτώσης .....	112
Σχήμα 4.21: Βάνα πεταλούδας (αριστερά) και σφαιρική βάνα (δεξιά) (Παπανικολάου, 2016). ..	113
Σχήμα 4.22: Διαμορφώσεις της πιεζομετρικής γραμμής ανάλογα με τη λειτουργία της δικλείδας. ΠΓ <sub>1</sub> η δικλείδα ανοιχτή, ΠΓ <sub>2</sub> η δικλείδα εν μέρει ανοιχτή, ΠΓ <sub>3</sub> η δικλείδα κλειστή, ΠΓ <sub>4</sub> η δικλείδα κλείνει απότομα (πιεζομετρικό φορτίο αυξημένο κατά το ωστικό κύμα) (Τσόγκας, 2018). ....	115
Σχήμα 4.23: Συστοιχία ορθογωνικών υπερχειλιστών (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).....	121
Σχήμα 4.24: Σύστημα τύπου «Denil» (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004). ....	122
Σχήμα 4.25: Τομή συστήματος «Borland» (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).....	122
Σχήμα 4.26: Σύστημα ορεινής υδροληψίας τύπου Coanda (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).....	124
Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση του στροβίλου (Παπαντώνης, 2009).....	125
Σχήμα 5.2: Ροπή διανύσματος ως προς άξονα (Παπαντώνης, 2009). ....	128
Σχήμα 5.3: Σχηματική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα $\omega_0$ (Παπαντώνης, 2009).....	129
Σχήμα 5.4: Μερικός δρομέας στροβίλου και συνιστώσες ταχυτήτων (Παπαντώνης, 2008).....	131
Σχήμα 5.5: Διάταξη ακίνητης ακτινικής περωτής (Παπαντώνης, 2009).....	134
Σχήμα 5.6: Δρομέας και Τρίγωνα Ταχυτήτων Στροβίλου Ακτινικής Ροής (Παπαντώνης, 2009). 136	
Σχήμα 5.7: Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων συναρτήσει του φορτίου τους (Παπαντώνης, 2008). ....	150
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα επιλογής κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για τις ανάγκες του έργου (Παπαντώνης, 2008).....	156
Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Παπαντώνης, 2008). ....	163
Σχήμα 6.2: Στοιχειώδης ηλεκτρική γεννήτρια (Παπαντώνης, 2008).....	163
Σχήμα 6.3: Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σπείρα (Παπαντώνης, 2008) .....	164
Σχήμα 6.4: Διέγερση διπολικής μηχανής (Παπαντώνης, 2008).....	165
Σχήμα 6.5: Τετραπολική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια (Παπαντώνης, 2008) .....	167

Σχήμα 6.6: Ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις τριφασικής γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008) .....	167
Σχήμα 6.7: Σύνδεση σε αστέρα (άνω) και σε τρίγωνο (κάτω) (Παπαντώνης, 2008).....	168
Σχήμα 6.8: Χαρακτηριστικές φορτίου σύγχρονης γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008).....	169
Σχήμα 6.9: Ενδεικτική καμπύλη βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008).	170
Σχήμα 6.10: Βραχυκυκλωμένος δρομέας τύπου κλωβού (Παπαντώνης, 2008) .....	174
Σχήμα 10.1: Χαρακτηριστικές διαστάσεις στροβίλου οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba (Παπαντώνης, 2008). .....	243
Σχήμα 10.2: Χρονοσειρά παροχών υδατορέματος και χρονοσειρά αξιοποιήσιμων παροχών από το μΥΗΕ. ....	246
Σχήμα 10.3: Καμπύλη διάρκειας αξιοποιήσιμων παροχών και διαδικασία εύρεσης της παροχής σχεδιασμού $Q_N=Q_{40}$ .....	247
Σχήμα 10.4: Καμπύλες διάρκειας αξιοποιήσιμων (Net) και αξιοποιημένων (Used) παροχών. ...	248
Σχήμα 10.5: Καμπύλη διάρκειας αξιοποιούμενης ισχύος.....	248
Σχήμα 10.6: Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας. ....	249
Σχήμα 10.7: Χρηματοροή μΥΗΕ. ....	249
Σχήμα 10.8: Ανάλυση ευαισθησίας των εισερχόμενων παροχών στο σύστημα. ....	252
Σχήμα 10.9: Ανάλυση ευαισθησίας της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.....	252
Σχήμα 10.10: Ανάλυση ευαισθησίας του επιτοκίου. ....	253
Σχήμα 10.11: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο Βαθμό Ενεργειακής Αξιοποίησης.....	253
Σχήμα 10.12: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο Χρόνο Αποπληρωμής..	254
Σχήμα 10.13: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο ολικό κέρδος από την επένδυση. ....	254
Σχήμα 10.14: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης. ....	255
Σχήμα Π.0.1: Διάγραμμα Moody-Rouse. Έκδοση Κουτσογιάννη - Παπαλεξίου (Παπανικολάου, 2016).....	261

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Στοιχεία σημαντικότερων μΥΗΕ Ελλάδος Πηγή: (ΔΕΗ Ανανεώσιμες, 2016).....	23
Πίνακας 4.1: Κατηγορίες υδραυλικού άλματος και τα χαρακτηριστικά τους (Παπανικολάου, 2016). .....	79
Πίνακας 4.2: Λεκάνες Ηρεμίσσεως κατά USBR (Παπανικολάου, 2016).....	80
Πίνακας 4.3: Συντελεστής σχήματος ράβδων εσχάρας (Παπαντώνης, 2008).....	84
Πίνακας 4.4: Συντελεστής εισροής εσχάρας ορεινής Υδροληψίας (Παπαντώνης, 2008).....	86
Πίνακας 4.5: Συντελεστής εισροής διάτρητου ελάσματος (Παπαντώνης, 2008).....	86
Πίνακας 4.6: Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας κατακάθισης κόκκων άμμου σε ακίνητο νερό θερμοκρασίας 25[°C] (Παπαντώνης, 2008).....	88
Πίνακας 4.7: Κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης μΥΗΕ συναρτήσει της παροχής σχεδιασμού (Παπαντώνης, 2008).....	98
Πίνακας 4.8: Τυποποιημένες ονομαστικές διάμετροι χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων (Παπαντώνης, 2008).....	100
Πίνακας 4.9: Χάλυβες κατάλληλοι για την κατασκευή σωλήνων (Παπαντώνης, 2008).....	104
Πίνακας 5.1: Εκτίμηση της διαμέτρου $D$ και της ταχύτητας περιστροφής $n$ μικρών υδροστροβίλων (Παπαντώνης, 2008).....	153
Πίνακας 6.1: Ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονων γεννητριών $\eta_{GM}$ (%) συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος (Παπαντώνης, 2008).....	171
Πίνακας 6.2: Ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης ασύγχρονων γεννητριών $\eta_{GM}$ συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος και του πλήθους $p$ των ζευγών των πόλων (Παπαντώνης, 2008).....	176
Πίνακας 6.3: Σύγκριση Σύγχρονων και Ασύγχρονων γεννητριών (Παπαντώνης, 2008).....	176
Πίνακας 6.4: Βαθμός απόδοσης και κύριες διαστάσεις τυποποιημένων μετασχηματιστών ισχύος με τάση εξόδου 24 kV (Παπαντώνης, 2008).....	179
Πίνακας 8.1: Συντελεστές προσδιορισμού του κόστους του υδροστροβίλου (Παπαντώνης, 2008). .....	209
Πίνακας 10.1: Μέσες μηνιαίες παροχές 10 ετών στη πιθανή θέση του έργου $m^3s$ .....	241
Πίνακας 10.2: Τυποποιημένες διάμετροι χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων (Παπαντώνης, 2008).....	242
Πίνακας 10.3: Υδροστρόβιλοι οριζοντίου άξονα σειράς $B$ της εταιρείας Toshiba (μετατροπή από διάγραμμα) (Παπαντώνης, 2008).....	242
Πίνακας 10.4: Χαρακτηριστικά στροβίλων οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba (Παπαντώνης, 2008).....	243
Πίνακας 10.5: Ολικός βαθμός απόδοσης στροβίλου συναρτήσει της ισχύος του και του ειδικού αριθμού στροφών (Παπαντώνης, 2008).....	244
Πίνακας 10.6: Μέγιστη τιμή ολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της φαινόμενης ισχύος της (Παπαντώνης, 2008).....	244
Πίνακας 10.7: Ενδεικτικές διαστάσεις σύγχρονων γεννητριών οριζοντίου άξονα (Παπαντώνης, 2008).....	244
Πίνακας 10.8: Βαθμός απόδοσης και κύριες διαστάσεις μετασχηματιστή λαδιού τάσης εξόδου 24[kV] (Παπαντώνης, 2008).....	245



*Πίνακας 10.9: Βασικά μεγέθη από την επίλυση. ....250*

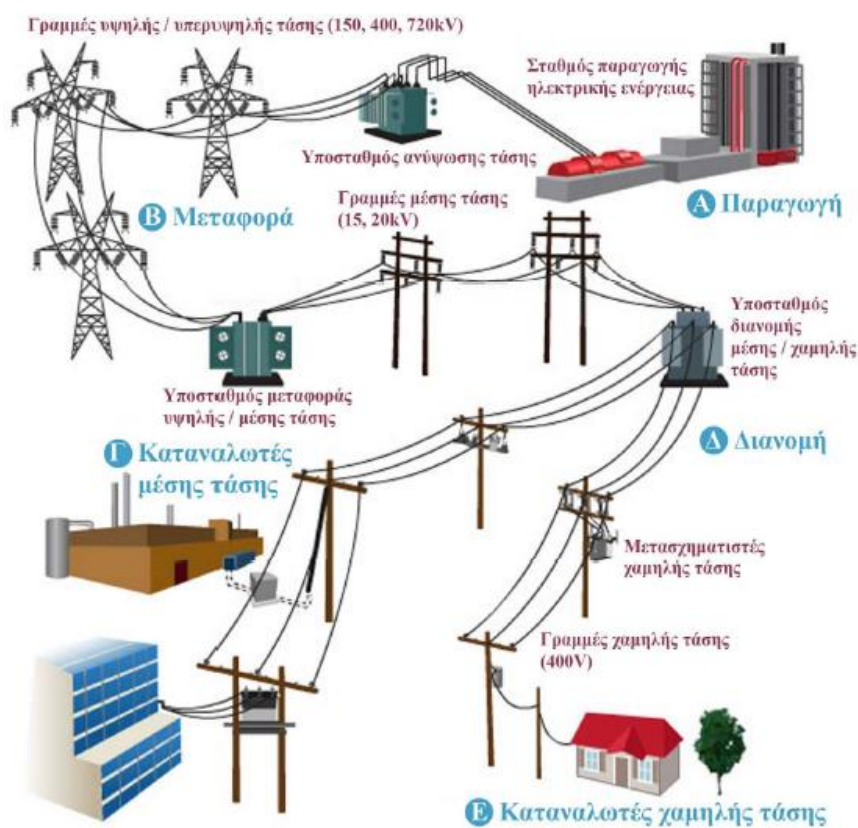
# 1 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας & στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στα Υδροηλεκτρικά Έργα

## 1.1 Τι είναι Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας;

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελείται από τις ακόλουθες διακριτές συνιστώσες:

- σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
- γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής, υψηλής και μέσης τάσης,
- γραμμές διανομής μέσης και χαμηλής τάσης,
- υποσταθμοί μετασχηματισμού τάσης,
- καταναλώσεις.

Η συνδυασμένη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, των υποσταθμών και των γραμμών μεταφοράς και διανομής αποσκοπεί στην αδιάλειπτη ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, χωρίς περικοπές παροχής ισχύος και χωρίς παρεκκλίσεις από τις προδιαγραφές λειτουργίας του συστήματος, αναφορικά με την ονομαστική τάση και συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Κατσαπρακάκης, 2015).

Τα ΣΗΕ χωρίζονται σε διασυνδεδεμένα και αυτόνομα. Ως διασυνδεδεμένο ορίζεται ένα ΣΗΕ, όταν είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένο με γειτονικά ΣΗΕ, π.χ. άλλων κρατών ή γεωγραφικών ενοτήτων. Έτσι όλα τα ηπειρωτικά ευρωπαϊκά εθνικά δίκτυα είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Επίσης τα Επτάνησα, και κάποια ακόμα από τα ελληνικά νησιά, έχουν διασυνδεθεί με το ηπειρωτικό εθνικό σύστημα μεταφοράς. Ως απομονωμένο, ή μη διασυνδεδεμένο, σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (isolated ή autonomous power production system) ορίζεται το σύστημα το οποίο καλύπτει κατ' αποκλειστικότητα τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια μιας απομονωμένης γεωγραφικά περιοχής, στην οποία και είναι εγκατεστημένο, χωρίς να είναι διασυνδεδεμένο με «μεγάλα» δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορετικά λέμε ότι μία γεωγραφική περιοχή αποτελεί απομονωμένο ενεργειακό σύστημα, όταν όλες οι ανάγκες της σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται αποκλειστικά από συστήματα παραγωγής που είναι εγκατεστημένα στην περιοχή αυτή.

Στόχος ενός ΣΗΕ είναι η κάλυψη της ζήτησης με όσο το δυνατό μεγαλύτερη συνέπεια και σταθερότητα. Η ζήτηση ισχύος σε ένα ΣΗΕ καταγράφεται αυτόματα μέσω συστημάτων τηλεμετρίας (SCADA) ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. μέσες ωριαίες τιμές) και για περιόδους ενός έτους. Στο τέλος του έτους συντάσσονται τεχνικά δελτία από τον αρμόδιο διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ για τα μη διασυνδεδεμένα συστήματα και ΑΔΜΗΕ για το διασυνδεδεμένο σύστημα), στα οποία παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία αναφορικά με τη ζήτηση ισχύος, την κατανομή της παραγωγής ανάμεσα στις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής, τις καταναλώσεις καυσίμου, τους βαθμούς απόδοσης των μονάδων παραγωγής, πιθανές ειδικές καταστάσεις που προέκυψαν κατά την ετήσια περίοδο που ολοκληρώθηκε (σφάλματα, αποκοπές φορτίου κλπ) και, τελικά, τα ετήσια κόστη και τα ειδικά κόστη παραγωγής.

## 1.2 Η χρησιμοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον και ανανεώνονται ετησίως με ρυθμούς υψηλότερους από την κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί με εντατικούς ρυθμούς στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών επανεμφανίστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων και σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία, προβλήματα που έχουν προκληθεί από τη χρήση των ορυκτών καυσίμων.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- ο ήλιος – ηλιακή ακτινοβολία,
- ο άνεμος – αιολική ενέργεια,
- οι υδατοπτώσεις – υδραυλική ενέργεια,
- η γεωθερμία – γεωθερμική ενέργεια,
- η βιομάζα: θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- οι θάλασσες: ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής (Κατσαπρακάκης, 2015):

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης του ανθρώπου από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, οι οποίοι, με το πέρασμα του χρόνου, εξαντλούνται.
- Είναι εγγώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος.
- Έχουν, συνήθως, χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο, επιπλέον, δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και, ειδικότερα, των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στην ηλεκτροπαραγωγή από τεχνολογίες ΑΠΕ.
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Ωστόσο, οι περισσότερες ΑΠΕ παρουσιάζουν, δυστυχώς, και αρνητικά χαρακτηριστικά, που δεν επιτρέπουν την υψηλή ποσοστιαία διείσδυσή τους σε ενεργειακά συστήματα. Τέτοια είναι τα ακόλουθα (Κατσαπρακάκης, 2015):

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και, συνεπώς, για μεγάλη παραγωγή, απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή, γενικά, δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης και προκαλώντας, σε περιπτώσεις υψηλής συμμετοχής στο ισοζύγιο παραγωγής ισχύος, προβλήματα ασφάλειας και ευστάθειας των ηλεκτρικών συστημάτων.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή απασχόλησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.

Ο στόχος της ΕΕ να γίνει η πρώτη κλιματική ουδέτερη ήπειρος στον κόσμο μέχρι το 2050 διαπνέει την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία [COM(2019) 640 final], την πιο φιλόδοξη δέσμη μέτρων, που αναμένεται να δώσει στους Ευρωπαίους πολίτες και τις επιχειρήσεις τη δυνατότητα να επωφεληθούν από τη βιώσιμη πράσινη μετάβαση.

Η χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχει πολλά δυναμικά πλεονεκτήματα, όπως τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη διαφοροποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού και τον περιορισμό της εξάρτησης από τις αγορές ορυκτών καυσίμων (ειδικότερα, πετρελαίου και φυσικού αερίου). Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί επίσης να τονώσει την απασχόληση στην ΕΕ, με τη δημιουργία θέσεων απασχόλησης σε νέες «πράσινες» τεχνολογίες.

Η ΕΕ επιδίωκε, έως το 2020, το 20% της ακαθάριστης τελικής ενεργειακής κατανάλωσής της να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο στόχος αυτός επιμερίζεται μεταξύ των κρατών

μελών της ΕΕ, και έχουν καταρτιστεί εθνικά σχέδια δράσης, για να χαραχθεί η πορεία προς την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κάθε κράτος μέλος. Στην ΕΕ το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ήταν 18.9% το 2018, έναντι 9.6% το 2004. Η θετική αυτή εξέλιξη ήταν αποτέλεσμα των νομικώς δεσμευτικών στόχων για αύξηση του μεριδίου της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, οι οποίοι τέθηκαν σε εφαρμογή με την οδηγία 2009/28/ΕΚ σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Οι λογιστικοί κανόνες της οδηγίας 2009/28/ΕΚ (ενσωματώθηκε στην Ελληνική Νομοθεσία με το Ν4546/2018) ορίζουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από υδροηλεκτρική και αιολική ενέργεια πρέπει να είναι κανονικοποιημένη (η υδροηλεκτρική ενέργεια να είναι τα τελευταία 15 έτη και η αιολική ενέργεια τα τελευταία 5 έτη), ώστε να συνυπολογίζονται οι ετήσιες κλιματικές διακυμάνσεις. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σύμφωνα με το Παράρτημα ΙΙ της άνω οδηγίας ως εξής:

Για τον καταλογισμό της υδροηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε ένα δεδομένο κράτος μέλος, εφαρμόζεται ο ακόλουθος κανόνας:

$$Q_{N(norm)} = C_N \cdot \left( \sum_{i=N-14}^N \frac{Q_i}{C_i} \right) / 15 \quad (1.1)$$

όπου:  $N$  το έτος αναφοράς,  $Q_{N(norm)}$  η τυποποιημένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που έχει παραχθεί από όλους τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς του δεδομένου κράτους μέλους το έτος  $N$ , για λογιστικούς σκοπούς,  $Q_i$  η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε GWh που όντως παράγουν το έτος  $i$  όλοι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί του συγκεκριμένου κράτους μέλους, εξαιρουμένης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με συστήματα αποθήκευσης μέσω άντλησης από νερό που έχει προηγουμένως αντληθεί στον άνω ταμιευτήρα,  $C_i$  η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε MW, αφαιρουμένων των συστημάτων αποθήκευσης μέσω άντλησης, όλων των υδροηλεκτρικών σταθμών του κράτους μέλους στο τέλος του έτους  $i$ .

Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές την περίοδο 2008-2018 αντικατοπτρίζει, σε μεγάλο βαθμό, την αύξηση που διαπιστώθηκε σε όλη την ΕΕ όσον αφορά τρεις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: πρωτίστως την αιολική ενέργεια, αλλά και την ηλιακή ενέργεια και τα στερεά βιοκαύσιμα (συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων αποβλήτων). Το 2018 η αιολική ενέργεια ήταν η μεγαλύτερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ΕΕ. Πράγματι, η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη από υδροηλεκτρική ενέργεια ήταν σχετικά παρόμοια με το επίπεδο που είχε καταγραφεί πριν από μία δεκαετία. Αντιθέτως, η ποσότητα της ενέργειας που παρήχθη στην ΕΕ από τον ήλιο και τις ανεμογεννήτριες ήταν 15.5 και 2.9 φορές υψηλότερη το 2018 απ' ό,τι το 2008. Η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια υπήρξε ραγδαία, από μόλις 7.4[TWh] το 2008 σε 115.0[TWh] το 2018.

### 1.3 Το νερό: ένα ελεύθερο καύσιμο σχεδόν άνευ τέλους

Η υδραυλική ενέργεια παρέχεται δωρεάν από τη φύση, αλλά η εκμετάλλευσή της προϋποθέτει σημαντικές δαπάνες και έργα και έχει επίδραση στο περιβάλλον. Είναι γεγονός ότι ένας

υδροηλεκτρικός σταθμός έχει μηδενικό κόστος καυσίμου και χρειάζεται λιγότερο προσωπικό και μικρότερη συντήρηση από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό του ίδιου μεγέθους, αλλά οι ετήσιες δαπάνες εξυπηρέτησης κεφαλαίου ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι μεγαλύτερες από του θερμοηλεκτρικού, λόγω των μεγάλων δομικών έργων που απαιτεί η διαμόρφωση της όλης υδραυλικής εγκατάστασης.

Οπωσδήποτε όμως, το κόστος της εγκατεστημένης ισχύος ή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν αποτελεί το μόνο κριτήριο της κατασκευής ενός υδροηλεκτρικού έργου, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως η ενεργειακή πολιτική της επιχείρησης ή της χώρας, ο συνδυασμός της υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με άλλες κοινωφελείς εργασίες, όπως άρδευση, ύδρευση, κ.λπ.

Το κόστος της εγκατεστημένης ισχύος ποικίλλει για τους διάφορους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Ο λόγος είναι ότι μέρος του κόστους αυτού είναι ανεξάρτητο από την ισχύ του σταθμού και αφορά αγορές εκτάσεων, απαλλοτριώσεις, έργα διαμόρφωσης, έργα στεγανοποίησης, σήραγγες εκτροπής, κατασκευή φράγματος, δρόμους προσπέλασης και άλλα έργα απαραίτητα για την εγκατάσταση σταθμού εκμετάλλευσης της υδραυλικής ενέργειας. Το ποσοστό αυτό του συνολικού κόστους μειώνεται εν γένει με την αύξηση του μεγέθους του σταθμού και εξαρτάται, από τη θέση και τις ιδιομορφίες της περιοχής του σταθμού.

Η μεγάλη πλειοψηφία των μΥΗΕ τροφοδοτούνται απευθείας από το υδατόρεμα με την έννοια ότι δεν έχουν (ή έχουν πολύ μικρή) δυνατότητα ταμίευσης νερού. Ο στρόβιλος παράγει ενέργεια μόνο όταν το νερό είναι διαθέσιμο από το υδατόρεμα. Όταν η παροχή του υδατορέματος είναι μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή (λεγόμενη και οικολογική παροχή  $Q_{eco}$ ), ο στρόβιλος σταματάει την εισροή νερού και όλη η παροχή του υδατορέματος συνεχίζει το φυσικό της δρόμο. Κάποια συστήματα είναι ανεξάρτητα, εγκατεστημένα σε απομονωμένες περιοχές, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις στην Ευρώπη, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται μέσω του παραδοσιακού δικτύου διανομής. Τα ανεξάρτητα μΥΗΕ είναι πιθανό να μην μπορούν να παράγουν ενέργεια συνεχώς εκτός και αν ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος που επιτρέπει τη λειτουργία τους σε μεγάλο εύρος παροχών. Σε μερικές περιπτώσεις αυτό ξεπερνιέται χρησιμοποιώντας υπάρχουσες λίμνες ή ταμιευτήρες που πιθανόν υπάρχουν στα ανάντη του μΥΗΕ. Η διασύνδεση με το δίκτυο έχει το πλεονέκτημα του ευκολότερου ελέγχου.

#### 1.4 Βασική αρχή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πτώση ύδατος

Η δυναμική ενέργεια  $E_d$  [kJ] μια ποσότητας νερού (υδροδυναμική ενέργεια ή υδροδυναμικό) μάζας  $m$  [kg] που βρίσκεται σε ύψος  $H$  [m] (γνωστό και ως ολικό ή ακαθάριστο ύψος) από το επίπεδο αναφοράς των στροβίλων δίνεται από τη σχέση:

$$E_d = mgH = \rho VgH \quad (1.2)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $V$  ο όγκος της ποσότητας του νερού. Λαμβάνοντας υπόψιν τις υδραυλικές απώλειες  $\Delta H_f$  που συμβαίνουν κατά την προσαγωγή του νερού στους στροβίλους

$$\Delta H_Y = H - H_n \quad (1.3)$$

η υδραυλική ενέργεια  $E_Y$  [kJ] της ποσότητας αυτής του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$E_Y = \rho V g H_n \quad (1.4)$$

όπου το  $H_n$  [m] είναι το λεγόμενο καθαρό ύψος πτώσης. Στη συνέχεια η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια (στο στρόβιλο) και τέλος σε ηλεκτρική ενέργεια (στη γεννήτρια). Θεωρώντας  $\eta$  το συντελεστή απόδοσης του στροβίλου (θεωρώντας μηδενικές τις απώλειες στη γεννήτρια) η ενέργεια που παράγεται είναι,

$$E = \eta \rho V g H_n \quad (1.5)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της παραγόμενης ενέργειας ονομάζεται ισχύς  $P$ . Η ισχύς  $P$  [kW] που παράγεται στο στρόβιλο δίνεται από τη σχέση:

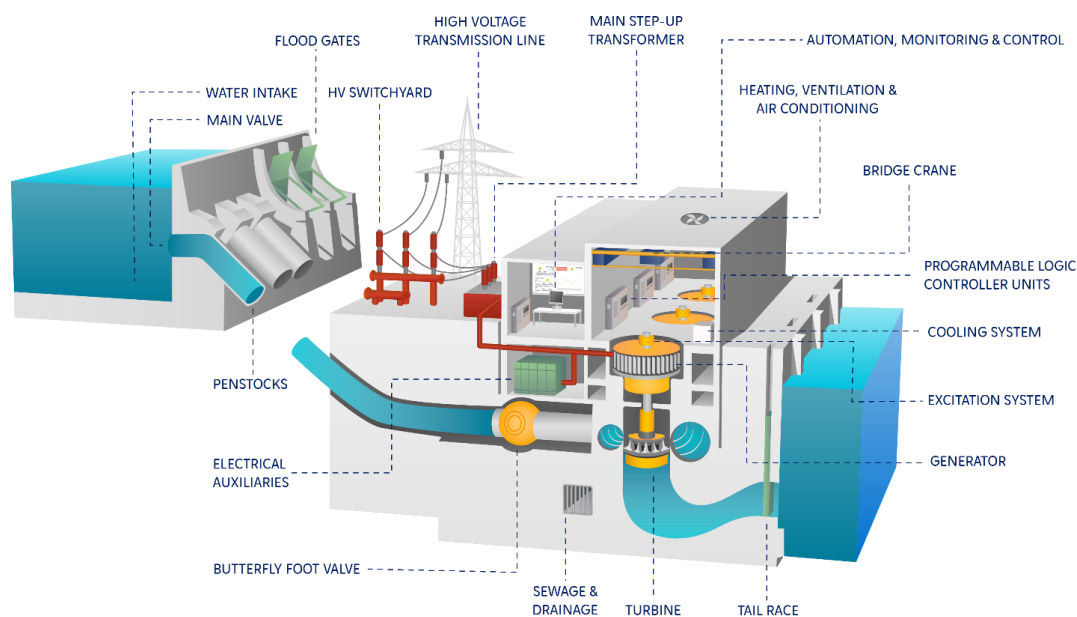
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(\eta \rho V g H_n)}{dt} = \eta \rho \frac{dV}{dt} g H_n = \eta \rho Q g H_n \quad (1.6)$$

όπου  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] η διερχόμενη παροχή από το στρόβιλο.

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι η παραγωγή ενέργειας δεν εξαρτάται μόνο από την διερχόμενη παροχή από το στρόβιλο αλλά και από το (καθαρό) ύψος από το οποίο πέφτει αυτή. Το γινόμενο  $Q \cdot H_n$  καλείται γινόμενο ενέργειας.

## 1.5 Γενική περιγραφή υδροηλεκτρικού έργου

Ένα Υδροηλεκτρικό Έργο (ΥΗΕ) περιλαμβάνει σημαντικά έργα πολιτικού μηχανικού καθώς και σημαντικό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από μια υδροδυναμική εγκατάσταση απαιτείται (Παπαντώνης, 2009; Τσόγκας, 2018):



Σχήμα 1.2: Τυπική μορφή ενός ΥΗΕ (Cora, et al., 2019).

Η κατασκευή του φράγματος το οποίο σταματά τη ροή του ποταμού, συγκρατεί το νερό αποθηκευοντάς το, δημιουργώντας δηλαδή τον ταμιευτήρα ανεξαρτητοποιώντας έτσι την παραγωγή ενέργειας από τη φυσική διακύμανση της ροής του υδατορέματος.

Τεχνικό έργο μέσα σε αυτόν τον ταμιευτήρα, η υδροληψία (water intake) από την οποία εισέρχεται το νερό και μέσω του συστήματος των σωληνώσεων (penstocks) θα καταλήξει στο στρόβιλο (turbine). Το σύστημα των σωληνώσεων, των δικλίδων (valve), των τυχόντων πύργων ανάπαυσης για αντιμετώπιση των υπερπίεσεων κατά τα μεταβατικά φαινόμενα που συμβαίνουν στο κλείσιμο της δικλίδας, αποτελεί το σύστημα προσαγωγής.

Εκεί, το νερό με ορμή θα χτυπά τα πτερύγια του στροβίλου αναγκάζοντάς τα να περιστραφούν. Καθώς αυτά περιστρέφονται, όντας μονολιθικά συνδεδεμένα με τον άξονα του στροβίλου εξαναγκάζουν σε περιστροφή τον άξονα, και επακόλουθα μια σειρά μαγνητών που βρίσκονται πάνω του μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Το σύνολο αυτό καλυμμένο με ισχυρό μεταλλικό κάλυμμα λέγεται γεννήτρια (generator).

Στον κύριο ηλεκτρομηχανολογικό (H/M) εξοπλισμό ενός ΥΗΕ περιλαμβάνονται εκτός του υδροστρόβιλου και της γεννήτριας, οι μετασχηματιστές (transformers) και οι ασφαλειοαποζεύκτες. Στο βοηθητικό H/M εξοπλισμό περιλαμβάνονται οι γερανογέφυρες (bridge crane), τα υδραυλικά συστήματα πεπιεσμένου αέρα και ελαίου, και τα συστήματα αυτοματισμών.

Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από τη γεννήτρια λόγω της ανάγκης μεταφοράς του σε μεγάλες αποστάσεις υφιστάμενο τις λιγότερες δυνατές απώλειες, μετασχηματίζεται στους μετασχηματιστές σε ρεύμα με μεγάλη διαφορά δυναμικού (ρεύμα υψηλής τάσης) και αυτό μεταφέρεται μέσω των γραμμών μεταφοράς.

Το νερό αφού έθεσε σε κίνηση τα πτερύγια του στροβίλου οδηγείται μέσω των διωρύγων φυγής έξω από το σταθμό παραγωγής και επιστρέφεται στο υδατόρεμα.

## **1.6 Μορφές υδροδυναμικών εγκαταστάσεων**

Οι υδροδυναμικές εγκαταστάσεις ταξινομούνται ανάλογα με το ύψος πτώσης του νερού σε υψηλής, μέσης και χαμηλής υδατόπτωσης και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε εγκαταστάσεις βάσης, αιχμής και αντιστρεπτής λειτουργίας (Τσόγκας, 2018).

Υψηλής υδατόπτωσης χαρακτηρίζονται οι εγκαταστάσεις που έχουν ύψος πτώσης μεγαλύτερο των 200[m]. Στην περίπτωση αυτή ανήκουν ΥΗΕ των οποίων οι ΥΗΣ βρίσκονται κατάντη και σε μεγάλη απόσταση από τη θέση του φράγματος, στους πρόποδες συνήθως του ορεινού όγκου που έχει κατασκευαστεί το φράγμα ώστε να εκμεταλλευτούν όσο το δυνατόν περισσότερο την υψομετρική διαφορά. Η διαφοροποίηση ως προς τη μορφή σε σχέση με τα μέσης και χαμηλής υδατόπτωσης ΥΗΕ έγκειται κυρίως στο μήκος του αγωγού προσαρμογής. Η εγκατάσταση του αγωγού αυτού είναι μια ιδιαίτερη και δύσκολη μελέτη, καθώς εμφανίζει κινδύνους τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά την τοποθέτησή του, λόγω των συνήθως απότομων κλίσεων των πλαγιών, τις οποίες πρέπει να ακολουθεί για να εξοικονομείται μήκος αγωγού και άρα απώλειες.



Μέσης υδατόπτωσης χαρακτηρίζονται οι εγκαταστάσεις που έχουν ύψος πτώσης μεγαλύτερο των 30[m] και μικρότερο των 200[m]. Στην περίπτωση αυτή ανήκουν ΥΗΕ των οποίων οι ΥΗΣ κατασκευάζονται στον (κατάντη) πόδα του φράγματος.

Χαμηλής υδατόπτωσης χαρακτηρίζονται οι εγκαταστάσεις που έχουν ύψος πτώσης μεγαλύτερο των 5[m] και μικρότερο των 30[m]. Αυτές κατασκευάζονται σε υδατορέματα που έχουν μεν μικρή κλίση αλλά έχουν μεγάλη και σταθερή παροχή.

Οι εγκαταστάσεις βάσης παράγουν ενέργεια με συνεχή λειτουργία (όλο το 24ωρο) και έχουν συντελεστή φορτίου 50-70%. Εγκαθίστανται συνήθως σε μεγάλους ποταμούς με συνεχή ροή που διατρέχουν μεγάλες λεκάνες απορροής ενώ το ύψος πτώσης είναι συνήθως μικρό.

Οι εγκαταστάσεις αιχμής λειτουργούν μόνο για να καλύψουν τις ανάγκες ζήτησης για μικρά συνήθως χρονικά διαστήματα και έχουν απόδοση 20-50%. Τα υδροδυναμικά έργα εν γένει έχουν το πλεονέκτημα της άμεσης παραγωγής ενέργειας και διασύνδεσής τους με το δίκτυο σε σχέση με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης, τους θερμοηλεκτρικούς. Οι τελευταίοι απαιτούν αρκετές ώρες για την έναρξη της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας λόγω του τρόπου λειτουργίας τους αφού απαιτείται χρόνος να καεί το καύσιμο, να ανέβει η θερμοκρασία μέχρι να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα, να ανέβει η πίεση μέχρι να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα και κατόπιν να εκκινήσει ο θερμοστρόβιλος να κινείται παράγοντας ενέργεια. Αντίθετα, στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, με το πάτημα ενός κουμπιού που ανοίγει το θυρόφραγμα της υδροληψίας, η παραγωγή ενέργειας ξεκινά το πολύ σε λίγα λεπτά. Το γεγονός αυτό επιτρέπει σε αυτές τις εγκαταστάσεις να καλύπτουν την πιθανή παραπάνω ζήτηση ενέργειας όταν το σύστημα βάσης έχει φτάσει στο όριο παραγωγής του, ενώ η ζήτηση συνεχίζει να αυξάνεται. Το μεγαλύτερο μέρος των ΗΥΣ της ΔΕΗ είναι αυτού του τύπου.

Οι εγκαταστάσεις αντιστρεπτής λειτουργίας παράγουν ενέργεια σαν τις εγκαταστάσεις αιχμής, αλλά τις ώρες που δεν λειτουργούν και η παραγόμενη ενέργεια από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραμένει αχρησιμοποίητη λόγω πολύ χαμηλής ζήτησης, αντλούν νερό από κατάντη ταμιευτήρα και το μεταφέρουν στα ανάντη, έτοιμο προς επαναδιάθεση όταν χρειαστεί. Η σημασία τους είναι μεγάλη, αφού θεωρητικά με την ίδια ποσότητα νερού μπορούν να παράγουν ενέργεια από τον ίδιο στρόβιλο περισσότερες από μία φορές. Στην Ελλάδα έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν 2 ΥΗΣ αντιστρεπτής λειτουργίας, αυτός της Σφηκιάς στον ποταμό Αλιάκμονα που αντλεί νερό από τον κατάντη ταμιευτήρα των Ασωμάτων και αυτός του Θησαυρού που αντλεί το νερό από τον ταμιευτήρα της Πλατανόβρυσης.

## **1.7 Διάκριση μικρών- μεγάλων υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**

Ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ των υδροστροβίλων τα ΥΗΕ χωρίζονται σε μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (μΥΗΕ) αν αυτή δεν ξεπερνά τα 15[MW] και σε μεγάλα ΥΗΕ (ο προσδιορισμός είθισται να παραλείπεται) για κάθε άλλη περίπτωση. Η διάκριση αυτή αφορά μόνο την εγκατεστημένη ισχύ του υδροστροβίλου χωρίς να έχει καμία επίπτωση στην αρχή λειτουργίας ή στα απαραίτητα έργα του μΥΗΕ. Η τιμή αυτή των 15[MW] δεν είναι διεθνώς ακολουθούμενη, καθώς σε κάποιες χώρες το όριο είναι 10[MW], ενώ σε άλλες ακόμη μικρότερο.

Η ουσιαστική διάκριση λοιπόν των μΥΗΕ δεν είναι τόσο ποσοτική, όσο ποιοτική και αφορά την επιλογή του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, στη διαμόρφωση και εκμετάλλευση τους (Παπαντώνης, 2008). Πιο συγκεκριμένα επιλέγεται η εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, οι οποίοι συνήθως φτάνουν στα 10[MW], ενώ υπάρχουν και λύσεις που φτάνουν τα 15[MW]. Η πιο σημαντική όμως διαφοροποίηση των μΥΗΕ ιδιαίτερα για την Ελλάδα είναι η απλουστευμένη διαδικασία αδειοδότησής τους.

Για τα μΥΗΕ υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία και επιμέρους διακρίσεις για τα μΥΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, ως *micro* χαρακτηρίζεται ένα ΥΗΕ όταν η ονομαστική ισχύς του είναι μικρότερη των 100[kW] και *mini* όταν η ονομαστική ισχύς είναι μικρότερη από 1[MW]. Τα όρια αυτά επίσης δεν είναι σταθερά διεθνώς καθώς σχετίζονται κυρίως με τις διαδικασίες αδειοδότησης και τις προδιαγραφές διασύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο (Παπαντώνης, 2008).

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

Ένα βασικό πλεονέκτημα των μΥΗΕ είναι ότι στηρίζονται κυρίως στις φυσικές υδατοπτώσεις. Αυτές συνιστούν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και έτσι δεν αντιμετωπίζουν ορατό κίνδυνο εξάντλησης, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά καύσιμα. Σε εθνικό επίπεδο η λειτουργία πολλών μΥΗΕ είναι σημαντική, καθώς οι αξιοποιησιμες θέσεις για μΥΗΕ είναι πολλές περισσότερες σε σχέση με αυτές που προσφέρονται για τα συμβατικά ΥΗΕ. Για το λόγο αυτό όλες σχεδόν οι χώρες της ΕΕ διαθέτουν ήδη εδώ και πολλά χρόνια σημαντικό πλήθος μΥΗΕ.

Τα ΥΗΕ γενικότερα και τα μΥΗΕ ειδικότερα στη φάση λειτουργίας τους δεν έχουν απόβλητα ή κατάλοιπα, δεν μολύνουν το περιβάλλον, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού του υδατορέματος κατάντη της επανένωσης του νερού που παρήγαγε ενέργεια με το φυσικό νερό είναι αμελητέα.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των μΥΗΕ είναι ότι μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με άλλες διευθετίσεις π.χ. ύδρευσης ή άρδευσης. Μπορούν δηλαδή να αξιοποιηθούν υπάρχοντα μικρά αρδευτικά ή υδρευτικά φράγματα και με μικρές τροποποιήσεις να παράγουν και ενέργεια.

Οι υδροστρόβιλοι είναι στιβαρές και αξιόπιστες μηχανές που απαιτούν μικρή συντήρηση και επίβλεψη (ο προληπτικός έλεγχος γίνεται μετά από 5000[h] λειτουργίας). Για το λόγο αυτό το απαιτούμενο προσωπικό για τη λειτουργία ενός μΥΗΕ περιορίζεται σε έναν τεχνικό μερικής απασχόλησης. Τα δύο παραπάνω οδηγούν σε μικρό λειτουργικό κόστος των μΥΗΕ. Ταυτόχρονα η διάρκεια ζωής ενός μΥΗΕ έργου είναι 20-30 έτη, με τους ίδιους βαθμούς ενεργειακής απόδοσης, η οποία αυξάνεται με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Έτσι αν έχει χωροθετηθεί και υπολογιστεί σωστά η εγκατάσταση του μΥΗΕ, η απόσβεση της αρχικής επένδυσης είναι ταχεία. Το γεγονός αυτό κάνει τα μΥΗΕ να έχουν τη μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση σε χρόνο κύκλου ζωής από όλες τις άλλες ΑΠΕ και τη μεγαλύτερη αντίσταση σε κάθε ρυθμό αύξησης του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

Στο πλαίσιο της εγκατάστασης, παρακολούθησης της λειτουργίας και συντήρησης ενός μΥΗΕ πραγματοποιούνται έργα οδοποιίας και ηλεκτρικής διασύνδεσης και μεταφοράς, έργα δηλαδή που συνεισφέρουν στην αξιοποίηση και αναβάθμιση απομακρυσμένων εκτάσεων. Το γεγονός αυτό

όμως συνιστά και ένα αυξημένο κόστος στην αρχική επένδυση, όταν πρόκειται για απομακρυσμένη περιοχή. Αντίστοιχα, τα έργα αυτά αυξάνουν και το χρόνο κατασκευής τέτοιων έργων όπου μπορεί να είναι 1-2 χρόνια. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για ένα έργο με διάρκεια ζωής τα 20 χρόνια, το 1/10 της λειτουργίας του δεν παράγει κανένα κέρδος προς τον επενδυτή.

Κύριο όμως μειονέκτημα των μΥΗΕ, όπως και κάθε άλλης μορφής ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, είναι η εξάρτηση της παραγωγής ενέργειας από τις φυσικές μεταβλητές. Η παραγωγή ενέργειας σχετίζεται με την ποσότητα του νερού που είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή για το στρόβιλο κάτι που στα ελληνικά υδατορέματα, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη εποχικότητα, οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις. Ο παράγοντας αυτός καθιστά απαραίτητη τη διενέργεια σημαντικών υδρολογικών μελετών, με την απαιτούμενη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα, αυξάνοντας έτσι το χρόνο και κόστος εκπόνησης των μελετών.

## **1.9 Ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των μικρών υδροηλεκτρικών έργων**

Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα (μΥΗΕ) είναι η σύγχρονη μορφή των παραδοσιακών νερόμυλων. Οι νερόμυλοι είναι κατασκευές μεγάλου μεγέθους και μικρής ισχύος, οι οποίες μετέτρεπαν την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική. Πρώτη καταγραφή του νερόμυλου γίνεται από το Στράβωνα στα Γεωγραφικά ΙΒ§3.30 όπου αναφέρεται «... ἐν δὲ τοῖς Καβείροις τὰ βασιλεία Μιθριδάτου κατεσκεύαστο καὶ ὁ ὑδραλέτης καὶ τὰ ζωγρεῖα καὶ αἱ πλησίον θῆραι καὶ τὰ μέταλλα.» αναφερόμενος στο παλάτι του Μιθριδάτη ΣΤ' του Ευπάτορα, βασιλιά του Πόντου στα Κάβειρα.

Η τεχνολογία αυτή έμεινε σχετικά στάσιμη μέχρι τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, οπότε και εμφανίστηκαν οι πρώτες μηχανές που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως υδροστρόβιλοι. Και πάλι οι μηχανές αυτές ήταν μικρής ισχύος λόγω των περιορισμών των τεχνικών μέσων της περιόδου αυτής, καθώς επίσης και της τοποθεσίας κατανάλωσης, καθώς η μηχανική ενέργεια δεν μεταφέρεται.

Σταθμός για την περεταίρω ανάπτυξη των υδροδυναμικών μηχανών είναι η ανάπτυξη των εφαρμογών του ηλεκτρισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται σχετικά εύκολα (με μικρές απώλειες) από τη θέση παραγωγής προς τις θέσεις κατανάλωσης, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη ακόμη μεγαλύτερων υδροστροβίλων, οι οποίοι μπορούν να αξιοποιούν όλο και περισσότερη υδραυλική ενέργεια και να τη μετατρέπουν σε μηχανική και στη συνέχεια μέσω της συζευγμένης γεννήτριας σε ηλεκτρική.

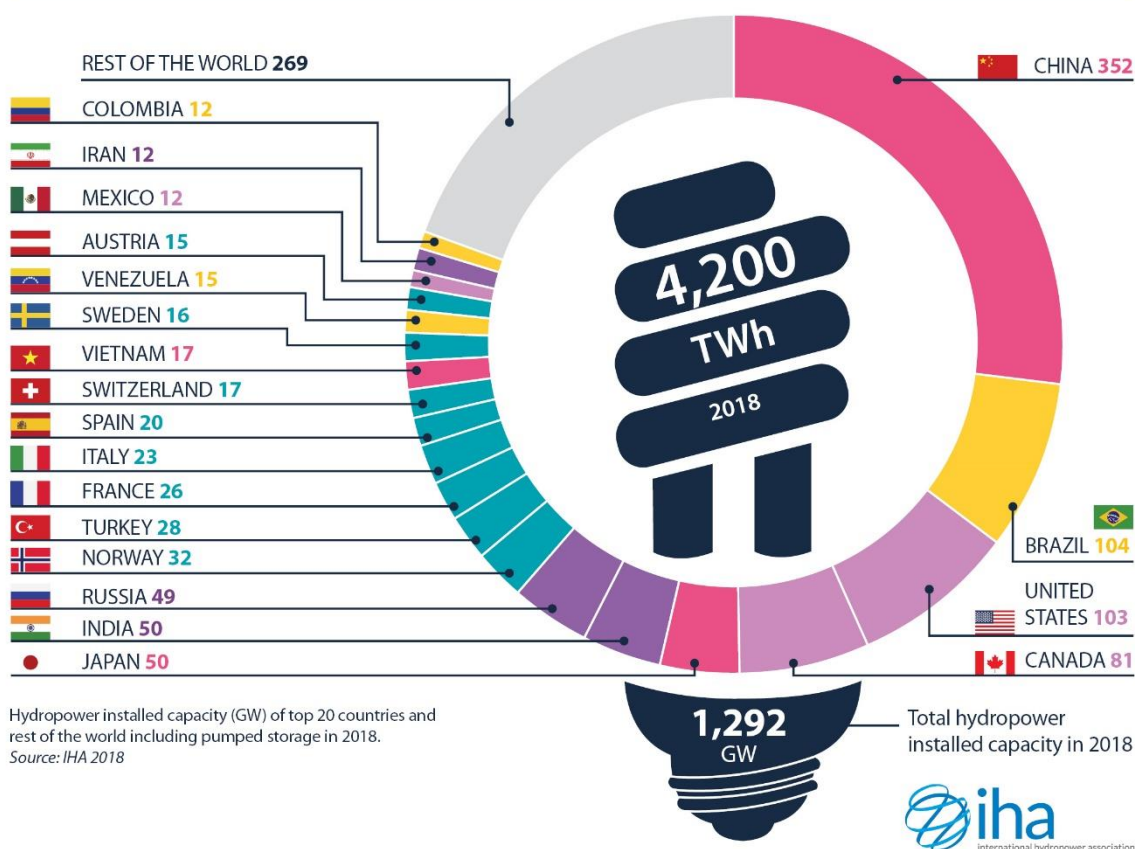
Η εισαγωγή στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα της έννοιας της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή χρήση, οι παλιοί νερόμυλοι μετατράπηκαν σε υδροηλεκτρικά έργα μικρής ισχύος καλύπτοντας τοπικές μικρές καταναλώσεις. Τέτοιας μορφής ΥΗΕ υπήρχαν και στην Ελλάδα μέχρι που αναγκαστικά απορροφήθηκαν από τη ΔΕΗ το 1954.

## **1.10 Υδραυλική ενέργεια στον κόσμο και στην Ελλάδα**

Το 2018 η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από υδροηλεκτρικά έργα εκτιμάται ότι έφτασε στην τιμή των 4200[TWh], θέτοντας τη μεγαλύτερη συνεισφορά όλων των εποχών από ανανεώσιμη πηγή. Η νέα εγκαθιστάμενη ισχύς για τη χρονιά αυτή έφτασε τα 21.8[GW] εκ των οποίων τα

2[GW] ήταν έργα αντλησιοταμίευσης. Έτσι το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος στον πλανήτη έφτασε τα 1292[GW]. Η Ανατολική Ασία διατήρησε τον τίτλο της πιο ταχέως αναπτυσσόμενης για το έτος αυτό, αφού πρόσθεσε στο σύστημά της 9.2[GW] υδροηλεκτρικής ισχύος. Στη δεύτερη θέση είναι η Νότια Αμερική με 4.9[GW], ενώ ακολουθούν κατά σειρά η Νότια και Κεντρική Ασία με 4[GW], η Ευρώπη με 2.2[GW], η Αφρική με 1[GW] και η Βόρεια και Κεντρική Αμερική με 0.6[GW]. Ο αριθμός των χωρών που επέλεξε την προσθήκη νέων ΥΗΕ στο σύστημά τους την χρονιά αυτή είναι 48. Από αυτές την μεγαλύτερη αύξηση πραγματοποίησαν η Κίνα με 8.5[GW] και η Βραζιλία με 3.9[GW]. Η τελευταία με την αύξηση αυτή έφτασε τα 104[GW] συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, ξεπερνώντας τις ΗΠΑ στη δεύτερη θέση με τις χώρες με μεγαλύτερες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Την πεντάδα συμπληρώνει το Πακιστάν με 2.5[GW], η Τουρκία με 1.1[GW] και η Ανγκόλα με 0.7[GW] (International Hydropower Association, 2019).

## HYDROPOWER INSTALLED CAPACITY WORLDWIDE



Σχήμα 1.3: Εγκατεστημένη Υδροηλεκτρική Ισχύς Διεθνώς (International Hydropower Association, 2019).

Εστιάζοντας στην Ευρωπαϊκή πραγματικότητα, από τα 2.2[GW] που αναφέρονται παραπάνω τα 1.1[GW] είναι τα ΥΗΕ που έθεσε σε λειτουργία η Τουρκία, ενώ 419[MW] πρόσθεσε η Νορβηγία, 385[MW] πρόσθεσε η Αυστρία, 100[MW] πρόσθεσε η Ισλανδία και 88[MW] πρόσθεσε η Ιταλία. Όλες οι υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες αθροιστικά πρόσθεσαν 225[MW]. Ως προς τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ, η Νορβηγία βρίσκεται στην πρώτη θέση με 32.3[GW], ενώ η Ελλάδα

βρίσκεται στη 14<sup>η</sup> θέση με 3.4[GW] εκ των οποίων 2474[MW] είναι συμβατικά ΥΗΕ, 699[MW] αντλησιοταμιευτικά και 222[MW] μΥΗΕ (Γεωργιόπουλος & Δήμου, 2017).

Το υδατικό δυναμικό μιας χώρας διαμορφώνεται από το συνδυασμό δύο παραγόντων, ήτοι των βροχοπτώσεων και του γεωγραφικού ανάγλυφου. Στην Ελλάδα επικρατεί η άποψη ότι η χώρα είναι φτωχή σε υδατικούς πόρους, άποψη που απορρέει από τη μη ορθή διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την απουσία οργανωμένης υδατικής πολιτικής που θα ήταν ικανή να αντιμετωπίσει την αναπτυξιακή ασυμμετρία και την ιδιαίτερη χωροταξική διάρθρωση της χώρας. Στην πραγματικότητα υπάρχει αθροιστική υπερεπάρκεια υδατικών πόρων, οι οποίοι όμως παρουσιάζουν ανομοιόμορφη χωροχρονική κατανομή.

Η Ελλάδα διαθέτει ένα από τα πλέον έντονα ορεινά τοπογραφικά του Ευρωπαϊκού χώρου, τα οποία, εφόσον αξιοποιηθούν μπορούν να δώσουν άριστα αποτελέσματα, όσον αφορά στη χρήση των επιφανειακών υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, η μορφολογία του ελληνικού εδάφους είναι αρκετά ευνοϊκή για τη δημιουργία αξιόλογου υδροδυναμικού καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό περιοχών εδράζονται σε ορεινό έδαφος, ενώ λιγότερες σε πεδινό και ημιορεινό. Τα ορεινά και ανώμαλα εδάφη σχηματίζουν έντονες κλίσεις και κοιλάδες, οι οποίες διευκολύνουν τη δημιουργία ποταμών και τη συγκράτηση των υδάτων (σχηματισμός λεκανών απορροής με αρκετή επιφάνεια).

Επίσης, η Ελλάδα διαθέτει έναν ικανοποιητικό αριθμό ποταμών με επαρκή βασική απορροή καθώς και φυσικές λίμνες. Στους κυριότερους ποταμούς περιλαμβάνονται οι: Έβρος, Νέστος, Στρυμόνας, Αξίος, Αλιάκμονας, Πηνειός, Αραχθός, Αχελώος, Σπερχειός και ο Αλφειός. Ιδιαίτερη βέβαια σημασία έχει το ποσοστό της παροχής του κάθε ποταμού που είναι διαθέσιμο τελικά, δεδομένων των πολλαπλών χρήσεων των υδατικών πόρων. Βάσει αριθμητικών δεδομένων, ο Αχελώος για το μήνα Δεκέμβριο παρουσιάζει παροχή της τάξης των  $300 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , ενώ ο Αξίος για το μήνα Μάρτιο εμφανίζει παροχή  $230 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ . Τέλος, ο ποταμός Έβρος διαθέτει παροχές της τάξης των  $200 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  σε όλο το διάστημα Ιανουαρίου-Μαρτίου.

Σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία, του Φεβρουαρίου 2016, της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), στην Ελλάδα οι ισχύουσες άδειες παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε, για μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος μικρότερης των 15[MW], είναι 432 συνολικής ισχύος 975[MW]. Στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί φαίνονται τα σημαντικότερα μΥΗΕ της ΔΕΗ.

Πίνακας 1.1: Στοιχεία σημαντικότερων μΥΗΕ Ελλάδος Πηγή: (ΔΕΗ Ανανεώσιμες, 2016).

Όνομασία ΜΥΗΣ	Περιοχή	Έτος	Ισχύς (MW)	Παραγωγή Ενέργειας (Μέση ετήσια) [GWh]	Στοιχεία Έργου
Αγ. Βαρβάρας	Βέροια	2008	0.92	4	1 μονάδα Kaplan S-type οριζοντίου άξονα
Αγ. Ιωάννης	Σέρρες	1931	0.70	0,71	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα
Αλατόπετρα	Γρεβενά	2013	2.43	14,5	2 μονάδες – 1 Francis οριζοντίου άξονα & 1 Pelton κάθετου άξονα
Ιλαρίωνας	Κοζάνη	2014	4.20	22	1 μονάδα Francis οριζοντίου άξονα
Βέρμιο	Βέροια	1929	1.80	6	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα

Γιτάνη	Θεσπρωτία	2006	2.06	17,5	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 2.1 MW)
Μακροχώρι	Ημαθία	1992	10.80	30	3 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (3 x 3.6 MW)
Οινούσα	Σέρρες	2004	1.50	3,8	1 μονάδα Pelton οριζοντίου άξονα
Λούρος	Αρτας	1954	10.30	48	3 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα
Σμόκοβο	Καρδίτσα	2008	10.40	10,7	2 μονάδες Francis οριζοντίου άξονα
Στράτος II	Νεάπολη Αιτωλοακαρνανίας	1989	6.20	12	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 3.15[MW])
Γλαύκος	Πάτρα	1992	3.70	10,3	2 μονάδες οριζοντίου άξονα (Francis – 2.3[MW] & Pelton – 1.4[MW])
Ελεούσα	Θεσσαλονίκη	2008	3.23	30	2 μονάδες Kaplan S-type οριζοντίου άξονα (2 x 3,3 MW)

### 1.11 Μικρά υδροηλεκτρικά έργα με αντλησιοταμίευση

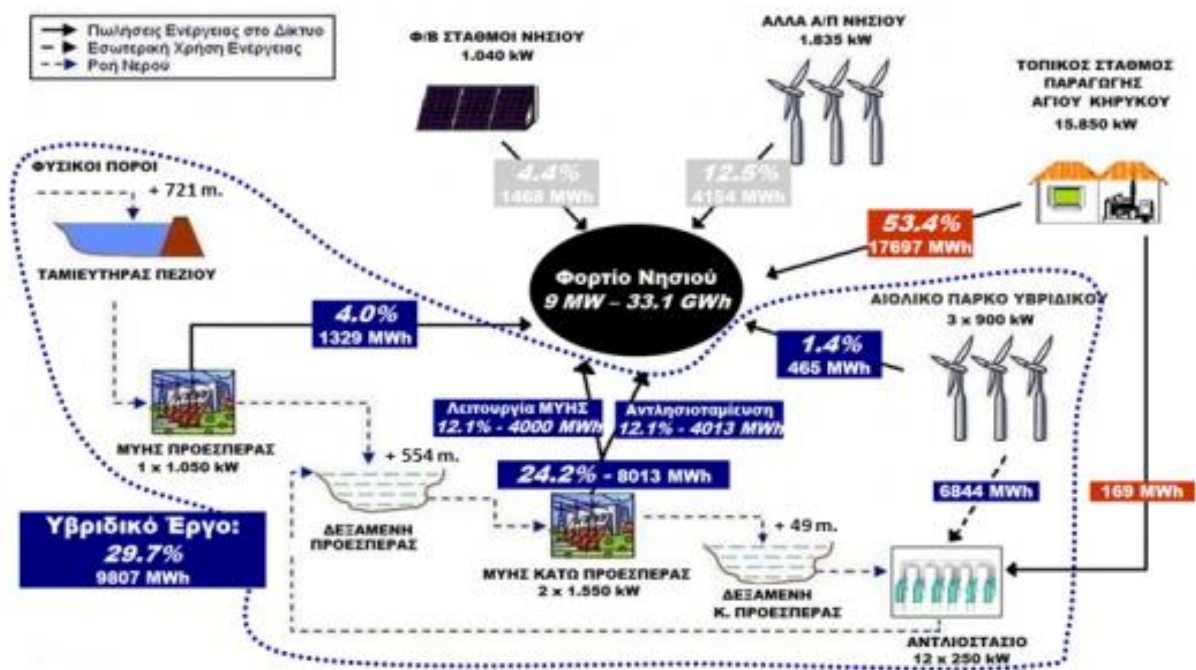
Με την αύξηση της διείσδυσης των μεταβλητών ΑΠΕ (αιολικοί και φωτοβολταϊκοί σταθμοί), αυξάνεται η μεταβλητότητα και η αβεβαιότητα του υπολειπόμενου φορτίου (φορτίο μείον παραγωγή από μεταβλητές ΑΠΕ) και οι ανάγκες ευελιξίας του συστήματος. Οι βασικές κατηγορίες πηγών ευελιξίας είναι οι κατανεμημένες μονάδες παραγωγής, η αποθήκευση, οι διασυνδέσεις και η απόκριση ζήτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημερινό επίπεδο διείσδυσης ΑΠΕ (5.5[GW] περίπου αιολικών και φωτοβολταϊκών σταθμών σταδιακά τα προηγούμενα χρόνια) έχει επιτευχθεί χωρίς νέες εγκαταστάσεις αποθήκευσης (Ελληνική Δημοκρατία - Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019).

Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα διείσδυσης μεταβλητών ΑΠΕ με οικονομικά ορθολογικό τρόπο (επαρκώς χαμηλές περικοπές της παραγωγής τους) προκύπτουν εν γένει ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό προωθείται η εγκατάσταση Υβριδικών Σταθμών ΑΠΕ στα νησιά που προβλέπεται να παραμείνουν μη διασυνδεδεμένα με την ηπειρωτική χώρα είτε μέσω ιδιωτικών έργων, είτε μέσω πιλοτικών έργων. Οι τεχνολογικές εξελίξεις διεθνώς είναι σημαντικές όσον αφορά μορφές αποθήκευσης είτε για μεγάλες εγκαταστάσεις, είτε για μικρές και ιδίως όσον αφορά τις μπαταρίες διαφόρων ειδών. Ενδεικτικά αναφέρεται το έργο του ΚΑΠΕ για τη μετατροπή του Άη Στράτη σε «Πράσινο Νησί», ενώ ήδη έχει τεθεί σε λειτουργία ένας υβριδικός σταθμός ΑΠΕ στο νησί της Τήλου. Υπάρχει επίσης ενδιαφέρον για εφαρμογές αποθήκευσης με μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο (π.χ. υδρογόνο), στο πλαίσιο των οποίων διερευνάται και η σύζευξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου. Εδώ και αρκετές δεκαετίες όμως, η αντλησιοταμίευση είναι η πλέον διαδεδομένη διεθνώς μέθοδος για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλα μεγέθη.

Η συνδυασμένη λειτουργία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και μονάδων ΑΠΕ, πρακτικά αιολικών πάρκων, παρόλο που αποτελεί εδώ και δύο δεκαετίες περίπου ένα ιδιαίτερα δημοφιλές θέμα στις επιστημονικές δημοσιεύσεις, έχει εφαρμοστεί στην πράξη σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη από αυτές απαντάται στο νησί El Hierro του συμπλέγματος των Καναρίων Νήσων, ενώ η δεύτερη από αυτές είναι ο Ναέρας στο νησί της Ικαρίας, στην Ελλάδα. Και στις δύο περιπτώσεις, ο υβριδικός σταθμός αιολικού πάρκου – αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού αποσκοπεί στη

μεγιστοποίηση της διείσδυσης της πρωτογενούς ΑΠΕ (αιολική ενέργεια) στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικά, ο Ναέρας στην Ικαρία αποτελείται από το αιολικό πάρκο στην περιοχή του λόφου Στραβοκουντούρα, με τρεις ανεμογεννήτριες των 900[kW] η καθεμία, το μΥΗΣ Προεσπέρας, με έναν υδροστρόβιλο ισχύος 1,05[MW], ο οποίος αξιοποιεί μόνο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα του Φράγματος στο Πέξι (αφού πρώτα καλυφθούν οι υποχρεώσεις για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση), το μΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, με δύο υδροστρόβιλους ισχύος 3.1[MW] συνολικά, που αξιοποιεί τόσο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα, όσο και τα νερά που προέρχονται από αντλιοσταμείωση (υβριδική ενέργεια), δύο δεξαμενές νερού χωρητικότητας 80.000[m<sup>3</sup>] έκαστη στις περιοχές Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας, που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλιοσταμείωσης για την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας και έναν ταμιευτήρα νερού συνολικού όγκου περίπου 910.000[m<sup>3</sup>] στο Πέξι, το Αντλιοστάσιο Κάτω Προεσπέρας, με 12 αντλίες ονομαστικής ισχύος 250[kW] έκαστη, εκ των οποίων οι 4 είναι μεταβλητών στροφών, τα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας και Κατανομής Φορτίου του Ναέρα και της Ικαρίας, που θα εγκατασταθούν σε χώρο εντός του Τοπικού Σταθμού Παραγωγής στον Άγιο Κήρυκο, εξασφαλίζοντας τόσο την επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του Έργου όσο και την ενεργειακή ασφάλεια του νησιού και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος.



Σχήμα 1.4: Υβριδικό σύστημα «Ναέρας», Ικαρία

Ο ΜΥΗΣ Προεσπέρας παράγει ενέργεια από την υπερχειλίση του παλαιού Φράγματος στο Πέξι. Λειτουργεί μόνο κατά τη μη αρδευτική περίοδο (Οκτώβριος-Απρίλιος). Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, το νερό κυκλοφορεί μεταξύ της Άνω και της Κάτω Δεξαμενής μέσω των αντλιών και των 2 αγωγών (προσαγωγής και καταθλιπτικού) και παράγεται υδροηλεκτρική ενέργεια από το μΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, που διοχετεύεται στο δίκτυο του νησιού. Η βασική παραγωγή υβριδικής ενέργειας του έργου προκύπτει από το γεγονός ότι για τη λειτουργία του Αντλιοστασίου αξιοποιείται η αιολική ενέργεια, που παράγεται από το Αιολικό Πάρκο στη Στραβοκουντούρα. Η

ενεργειακή τροφοδότηση του Αντλιοστασίου συνιστά αποθήκευση ενέργειας (μπαταρία), διότι η αιολική ενέργεια του Αιολικού Πάρκου δεν απορροφάται από το έργο, αλλά, «αποθηκευόμενη» στο νερό που μεταφέρεται από την Κάτω στην Άνω Δεξαμενή, θα αποδοθεί τελικά στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού μέσω του μΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας με τη μορφή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Μια ειδική κατηγορία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών, ιδιαίτερης σημασίας για την Ελλάδα και, ακόμα περισσότερο, για τα ελληνικά νησιά, είναι η χρήση θαλασσινού νερού ως εργαζόμενου μέσου στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό και η απευθείας χρήση της θάλασσας ως κάτω δεξαμενή του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού.

Η περίπτωση λειτουργίας αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με θαλασσινό νερό παρέχει μία πολύτιμη εναλλακτική λύση σε γεωγραφικές περιοχές με χαμηλές βροχοπτώσεις, καθώς εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου χωρίς να επηρεάζει τα περιορισμένα αποθέματα γλυκού νερού. Έχει κατασκευαστεί ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό με χρήση θαλασσινού νερού (Seawater Pumped Storage System – S-PSS) στην Okinawa της Ιαπωνίας, απασχολούμενο για απαλοιφή αιχμών ισχύος, το οποίο λειτουργεί ήδη για περισσότερο από δέκα έτη.

Είναι αυτονόητο ότι τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά με χρήση θαλασσινού νερού πρέπει να εγκαθίστανται επί της ακτογραμμής. Η μορφολογία του εδάφους στην ακτογραμμή αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σχετικά με την τεχνική επιτευξιμότητα του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και τη διαμόρφωση του συνολικού αρχικού κόστους εγκατάστασής του. Λόφοι και μικρά υψώματα με απόλυτα υψόμετρα από 200[m] έως 600[m] θεωρούνται ιδανικά για την εγκατάσταση αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών. Οι ήπιες κλίσεις των πρανών από τις κορυφές προς την ακτή, καθώς και η ήπια μορφολογία τόσο των πρανών, όσο και της ακτής (απουσία γκρεμών, χαραδρών κ.λ.π.), συμβάλλουν προς την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων χωματουργικών έργων για την εγκατάσταση των αγωγών και των σταθμών υδροδυναμικών μηχανών (αντλιοστάσιο και υδροηλεκτρικός σταθμός). Τα ανωτέρω συμβάλουν συντεταγμένα στην ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης του έργου.

## **1.12 Προτεινόμενη δομή διπλωματικής εργασίας**

Από τα παραπάνω προκύπτει λογική η επένδυση μιας χώρας όπως η Ελλάδα σε ΥΗΕ, ιδιαίτερα λόγω των πολλαπλών λειτουργιών που δύνανται να εξυπηρετήσουν βοηθώντας έτσι τόσο στην ποιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, όσο και στον περιορισμό της χρήσης ορυκτών καυσίμων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της υδρολογικής ανάλυσης που ακολουθείται κατά το σχεδιασμό ενός μΥΗΕ. Περιγράφεται αναλυτικά πως υπολογίζεται με δεδομένες τις καταγεγραμμένες παροχές ενός υδατορέματος, η παροχή σχεδιασμού του μΥΗΕ.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και επιγραμματικά στοιχεία που αφορούν τη διαμόρφωση ενός μΥΗΕ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια πιο εκτενής αναφορά στα έργα πολιτικού μηχανικού, δηλαδή στα φράγματα, στα έργα υδροληψίας, στα έργα προσαγωγής και στη μελέτη του αγωγού πτώσης.



Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα στοιχεία του μηχανολογικού εξοπλισμού, στα κριτήρια σχεδιασμού αλλά και επιλογής του, και στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα στοιχεία ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων.

Στο όγδοο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία για την οικονομοτεχνική ανάλυση των μικρών Υδροηλεκτρικών έργων.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία ως προς τη διαδικασία που απαιτείται για το σχεδιασμό και εγκατάσταση ενός μΥΗΕ.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και ο οποίος πραγματοποιεί μια αναγνωριστική μελέτη ενός μΥΗΕ, ώστε να διαπιστωθεί η βιωσιμότητά του.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα και οι περιοχές προς περαιτέρω έρευνα.

## 2 Υδρολογική ανάλυση

Όπως ήδη έχει αναφερθεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εγκατάσταση ενός αποδοτικού μΥΗΕ σταθμού είναι η ύπαρξη υδροδυναμικού. Αυτό απαιτεί την ύπαρξη αφενός στο σημείο επιφανειακής απορροής και αφετέρου κατάλληλες κλίσεις, ώστε να δημιουργείται η απαραίτητη υψομετρική διαφορά για την παραγωγή ενέργειας.

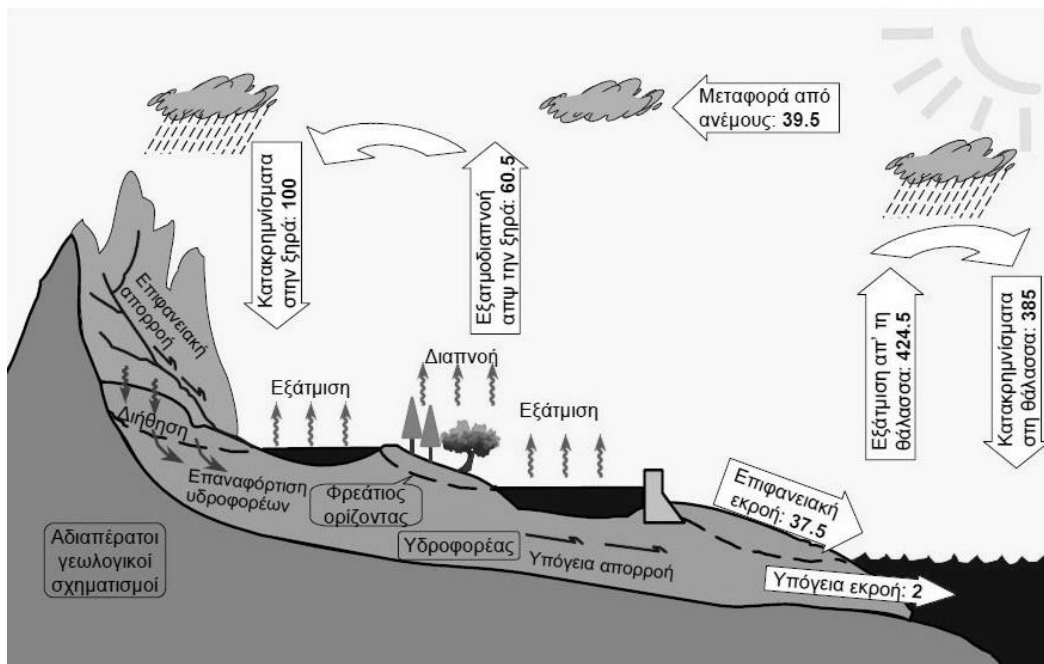
Το βασικό μέγεθος που καθορίζει το σχεδιασμό ενός μΥΗΕ είναι η χρονική κατανομή της παροχής του υδατορέματος στη θέση που θα κατασκευαστεί η υδροληψία του έργου. Από την κατανομή αυτή της παροχής πρέπει να επιλεγεί μια τιμή η οποία θα είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό ολόκληρου του έργου, ειδικά για ένα μΥΗΕ όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ταμίευσης. Λάθος εκτίμηση της τιμής αυτής οδηγεί σε έργο διαφορετικό από αυτό που απαιτείται για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου δυναμικού.

Για το τυχόν υδατόρεμα όπου εξετάζεται η εγκατάσταση ενός μΥΗΕ (δεδομένου ότι έχει βρεθεί μια τοποθεσία με τις κατάλληλες υψομετρικές συνθήκες) υπάρχουν 2 περιπτώσεις. Αρχικά να υπάρχουν μετρήσεις παροχής στη θέση αυτή ή σε κάποια θέση κοντινή (στο ιδεατό σενάριο συστηματικά λαμβανόμενες μετρήσεις επί μακρά σειρά ετών) ή να μην υπάρχουν οι μετρήσεις αυτές. Για το πρώτο σενάριο, αρκετά σπάνιο για τα ελληνικά δεδομένα, η λύση δίνεται από μεθόδους ανάλυσης των μετρημένων χρονοσειρών παροχών καθώς και από μεθόδους παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών, ενώ για το δεύτερο σενάριο λύση καλείται να δώσει η επιστήμη της Υδρολογίας. (Παπαντώνης, 2008)

Κατά τη Διεθνή Υδρολογική Δεκαετία (1965-1974) που οργανώθηκε από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών, έγινε δεκτός ο ακόλουθος ορισμός της υδρολογίας: *«Υδρολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τα ύδατα της Γης, την παρουσία, την κυκλοφορία και κατανομή τους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους, και τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον, στο οποίο περιλαμβάνονται και τα έμβια όντα. Το γνωστικό πεδίο της υδρολογίας καλύπτει την όλη ιστορία της παρουσίας του νερού στη Γη.»*.

Η αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, που συνοδεύεται και από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού περιγράφεται από τον Υδρολογικό κύκλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Έτσι το νερό (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016) *«εξατμίζεται από τη θάλασσα και την ξηρά, ανεβαίνοντας κατακόρυφα, υπό μορφή υδρατμών, στην ατμόσφαιρα, αλλά και κινούμενο οριζόντια υπό την επίδραση των ανέμων· διαπνέεται από τα δέντρα και τη βλάστηση, οδηγούμενο και πάλι στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών· συμπυκνώνεται στην ατμόσφαιρα, σχηματίζοντας σύννεφα· - κατακρημνίζεται από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα και την ξηρά, σε διάφορες μορφές (βροχή, χιόνι, χαλάζι)· κατακρατείται από τα δέντρα, τη βλάστηση και το έδαφος· διηθείται στο έδαφος εμπλουτίζοντάς το με εδαφική υγρασία· επαναφορτίζει τους ταμειυτήρες υπόγειου νερού· απορρέει επιφανειακά, σχηματίζοντας ρέματα και ποτάμια και καταλήγοντας τελικά στη θάλασσα· απορρέει υπόγεια, μέσω των πόρων και ρωγμών των γεωλογικών σχηματισμών, και είτε εκφορτίζεται επιφανειακά μέσω των πηγών, είτε εκρέει προς τη θάλασσα.»*.

Αυτή η αχανής και αέναη “ατμομηχανή” του νερού τροφοδοτείται ενεργειακά από την ηλιακή ενέργεια και οδηγείται από τη βαρύτητα.



Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση του υδρολογικού κύκλου και του μέσου ετήσιου υδατικού ισοζυγίου της Γης. Οι μέσες ετήσιες διακινήσεις νερού έχουν εκφραστεί ως ποσοστό (%) επί της ετήσιας ποσότητας των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο χερσαίο τμήμα της Γης. Μία ποσοστιαία μονάδα αντιστοιχεί σε 1190 km<sup>3</sup>/έτος (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Η τεχνική υδρολογία συνδέει κυρίως τα χερσαία ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα με την επιφανειακή (και υπόγεια) απορροή με τη μορφή του αιτίου - αποτελέσματος.

Η πιο χαρακτηριστική χωρική κλίμακα της τεχνικής υδρολογίας είναι η κλίμακα της λεκάνης απορροής ή υδρολογικής λεκάνης. Η λεκάνη απορροής στη συγκεκριμένη διατομή A ενός υδατορέματος (συνήθως φυσικού, όπως ποταμού ή χειμάρρου, αλλά και τεχνητού, όπως συλλεκτήρα ομβρίων ή αντιπλημμυρικής τάφρου) εκείνη και μόνο η γεωγραφική περιοχή S<sub>A</sub> που τα νερά της συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη δεδομένη διατομή A του υδατορέματος.

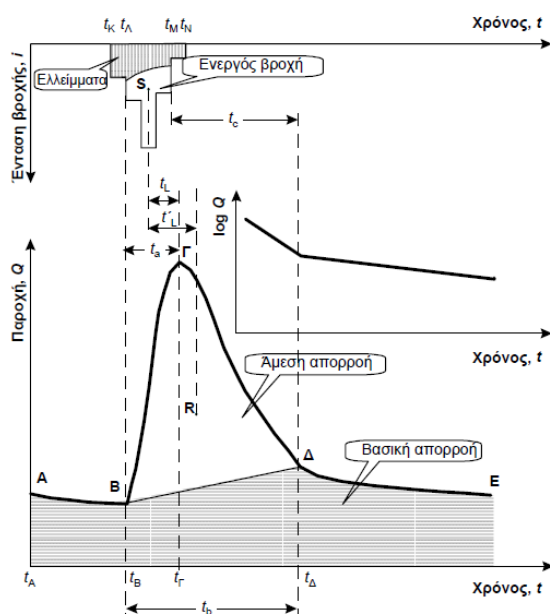


Σχήμα 2.2: Σχηματική απλοποιητική μορφή της λεκάνης απορροής του σημείου A (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Το όριο της λεκάνης απορροής ορίζεται από τη γεωμορφολογία της περιοχής και ονομάζεται υδροκρίτης. Το σύστημα της λεκάνης απορροής δέχεται ως «είσοδο» τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και αφού δράσει, με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά φυσικά χαρακτηριστικά της δίνει ως «έξοδο» την απορροή στη διατομή A (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Για τροπικές, υποτροπικές και εύκρατες περιοχές, ενδιαφέρουν από άποψης κατακρημνισμάτων εμφανίζουν κυρίως οι βροχοπτώσεις, γιατί και συνηθέστερες είναι και ποσοτικά υπερέχουν πολύ των άλλων μορφών, αλλά και δημιουργούν τα σημαντικότερα φαινόμενα επιφανειακής απορροής. Δεύτερη σε σπουδαιότητα μορφή κατακρημνισμάτων είναι οι χιονοπτώσεις, που στα εύκρατα κλίματα αποτελούν την κυριότερη πηγή της εαρινής (μερικές φορές και της θερινής) απορροής, ρυθμίζοντας, με την υστέρηση στην τήξη του χιονιού, τη διαίτα των μεγάλων κυρίως υδατορεμάτων που έχουν τις πηγές τους σε ψηλούς ορεινούς σχηματισμούς. Το χαλάζι είναι μια τρίτη μορφή κατακρημνίσματος, η μελέτη του οποίου αποκτά σημασία λόγω των καταστροφικών αποτελεσμάτων του ιδίως στη γεωργία. Άλλες μορφές κατακρημνισμάτων, όπως το χιονόβροχο, ή αποθέσεων, όπως η δρόσος, η πάχνη, η βρέχουσα ομίχλη και η αχλή έχουν μικρότερη σημασία για την υδρολογία. Η ποσοτική απεικόνιση της μεταβολής της έντασης της βροχόπτωσης με το χρόνο (εκφρασμένης κατά κανόνα σε μονάδες ύψους βροχής, π.χ. mm) ονομάζεται βροχογράφημα ή υετογράφημα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Με τον όρο επιφανειακή απορροή εννοείται η ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορεμάτων. Εκφράζεται με εναλλακτικούς τρόπους και συγκεκριμένα σε όρους παροχής, όγκου, ή ισοδύναμου ύψους. Η ποσοτική απεικόνιση της μεταβολής της απορροής με το χρόνο (εκφρασμένης κατά κανόνα σε μονάδες παροχής, π.χ. m<sup>3</sup>/s) σε μια δεδομένη διατομή A ενός υδατορέματος ονομάζεται υδρογράφημα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).



Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα τυπικού πλημμυρικού υδρογραφήματος με το αντίστοιχο υετογράφημα. Διαχωρισμός των συνιστωσών του υδρογραφήματος και χαρακτηριστικοί χρόνοι (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται ένα υδρογράφημα χαρακτηριστικής μορφής, ενός πλημμυρικού επεισοδίου που οφείλεται σε ένα επεισόδιο βροχής.

## 2.1. Υδρολογικοί Υπολογισμοί

### 2.1.1. Μηχανισμοί που συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο

#### 2.1.1.1. Κατακρημνήσεις

Από άποψη ενδιαφέροντος για την τεχνική υδρολογία, η κύρια μετρική ιδιότητα των βροχοπτώσεων και γενικότερα των κατακρημνισμάτων είναι το ύψος τους  $h$  σε δεδομένο χρόνο  $t$ , το οποίο είναι εύκολο να μετρηθεί σε σημειακή βάση, μέσω των κυλίνδρων των βροχομέτρων ή βροχογράφων. Παράγωγο μέγεθος είναι η ένταση βροχής  $i$  που κατ' αρχήν ορίζεται σε στιγμιαία βάση ως

$$i := \frac{dh}{dt} \quad (2.1)$$

όπου  $dh$  είναι η μεταβολή του ύψους στο διαφορικό χρόνο  $dt$ . Επειδή όμως στην πραγματικότητα η στιγμιαία ένταση βροχής δεν είναι δυνατό να μετρηθεί, χρησιμοποιούνται πάντα προσεγγίσεις της μορφής

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (2.2)$$

όπου  $\Delta h$  είναι η μεταβολή του ύψους στον πεπερασμένο χρόνο  $\Delta t$ .

Το φαινόμενο της κατακρήμνισης είναι επιφανειακά ανομοιόμορφο. Η πλήρης γνώση της χωροχρονικής εξέλιξης ενός φαινομένου θα απαιτούσε να είναι γνωστό το πεδίο  $h(x, y, t)$  σε κάθε σημείο  $(x, y)$  της επιφάνειας που ενδιαφέρει και σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Αυτό πρακτικώς είναι αδύνατο. Στην πραγματικότητα, τα συμβατικά όργανα μετρήσεων παρέχουν σημειακή πληροφορία για ένα επιφανειακό φαινόμενο, η οποία αναφέρεται σε συγκεκριμένες θέσεις της βρεχόμενης επιφάνειας, δηλαδή στις θέσεις των εγκαταστημένων βροχομέτρων ή βροχογράφων. Κατά συνέπεια η ολική διαθέσιμη πληροφορία μιας περιοχής προσεγγίζει την πραγματική χωρική κατανομή των κατακρημνισμάτων τόσο ακριβέστερα, όσο πυκνότερα είναι τα σημεία της πληροφορίας στην επιφάνεια του φαινομένου. Η ολοκλήρωση της σημειακής πληροφορίας στην επιφάνεια αποτελεί άλλωστε και τον τελικό στόχο της μελέτης των βροχοπτώσεων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

#### 2.1.1.2. Εξατμισοδιαπνοή

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, ένα σημαντικό ποσοστό των κατακρημνισμάτων που πέφτουν στο χερσαίο τμήμα της Γης, πάνω από 60%, χάνεται με τους μηχανισμούς της εξάτμισης και διαπνοής. Το μεγάλο αυτό ποσοστό των υδρολογικών απωλειών εξηγεί την ιδιαίτερη σημασία των

αντίστοιχων φυσικών διεργασιών στο υδατικό ισοζύγιο και, ειδικότερα, στην υδατική οικονομία μιας περιοχής (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Ο όρος εξάτμιση (evaporation) περιγράφει, τόσο φαινομενολογικά, όσο και ποσοτικά, τη μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση (υδρατμοί). Η μετατροπή του νερού σε υδρατμούς που πραγματοποιείται στους πόρους της χλωρίδας, και ιδίως των φυλλωμάτων των φυτών, είναι γνωστή ως διαπνοή (transpiration). Το σύνολο των πραγματικών απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας αποδίδεται μαζικά με τον όρο εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration) (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Βέβαια, το ποσοστό αυτό δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται έντονα, τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά. Έτσι, σε ένα συγκεκριμένο τόπο και χρόνο, οι υδρολογικές απώλειες, δεν μπορούν μέχρι σήμερα να εκτιμηθούν άμεσα με ικανοποιητική ακρίβεια (όπως θα δειχτεί και στο κεφάλαιο αυτό), παρόλο που θα ήταν ιδιαίτερα επιθυμητό λόγω της πρωτεύουσας σημασίας τους στο σχεδιασμό των διαφόρων έργων υδατικής οικονομίας. Πράγματι, η ακριβής εκτίμηση των συνολικών απωλειών από εξάτμιση και διαπνοή θα επέτρεπε τον έμμεσο αλλά ακριβή υπολογισμό του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, δηλαδή της συνολικής απορροής, σε οποιαδήποτε σχετικά μεγάλη χρονική κλίμακα (υπερετήσια, ετήσια ή εποχιακή), δεδομένου ότι για τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα υπάρχουν συνήθως αρκετά δεδομένα που επιτρέπουν την ακριβή εκτίμησή τους (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

### *2.1.1.3. Κατακράτηση – Διήθηση*

Σε λεπτότερη χρονική κλίμακα, π.χ. ώρας ή ημέρας, οι ποσοτικές διαφορές ανάμεσα στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την επιφανειακή απορροή περιλαμβάνουν και άλλες συνιστώσες, πέρα από την εξάτμιση και τη διαπνοή. Πρόκειται για τις διάφορες μορφές κατακράτησης (retention) δηλαδή είτε παρεμπόδισης ενός τμήματος της βροχής να φθάσει στο έδαφος λόγω παρεμβολής της χλωρίδας, είτε επιφανειακής παγίδευσης της επιφανειακής απορροής από τις μικροκοιλότητες του τοπογραφικού ανάγλυφου, και την εδαφική διήθηση δηλαδή τη φυσική διεργασία της εισχώρησης στο έδαφος νερού που προέρχεται από βροχόπτωση, τήξη χιονιού ή άρδευση. Σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα οι ποσότητες αυτές μετατρέπονται εν μέρει σε εξάτμιση και διαπνοή (υδρολογικές απώλειες), και εν μέρει σε απορροή, επιφανειακή ή υπόγεια (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Η παρεμπόδιση περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες: τη διάπτωση (throughfall), που καταλήγει στο έδαφος μέσω των κενών της φυτοκάλυψης ή στάζοντας από το φύλλωμα, την κορμοροή (stemflow), που ρέει κατά μήκος των κλάδων και τελικά του κορμού προς το έδαφος, και την απώλεια παρεμπόδισης (interception loss) που συγκρατείται στη χλωρίδα και τελικά εξατμίζεται ή απορροφάται από αυτή. Η τελευταία συνιστώσα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά τόσο της χλωρίδας, όσο και της βροχόπτωσης αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες που καθορίζουν το ρυθμό εξάτμισης. Ο ρυθμός διήθησης να εξαρτάται από την ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων, τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, την κατάσταση του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος και την παρουσία ή όχι χλωρίδας, την περιεκτικότητα σε υγρασία του επιφανειακού

εδάφους στην αρχή της βροχής, τη θερμοκρασία, την ποιότητα του βρόχινου νερού κτλ., παράγοντες δηλαδή που εκτιμώνται δύσκολα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

#### 2.1.1.4. Ενεργός Βροχόπτωση

Ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν ακριβή θεωρητικά μοντέλα περιγραφής των διεργασιών αυτών, η αβεβαιότητα ως προς τις φυσικές παραμέτρους και τη γεωγραφική και χρονική διακύμανσή τους δεν επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της εξέλιξης των αντίστοιχων υδρολογικών μεταβλητών. Για πρακτικές εφαρμογές δεν εμφανίζουν ενδιαφέρον οι επιμέρους συνιστώσες των υδρολογικών ελλειμμάτων και οι μηχανισμούς που τις διέπουν, αλλά η αθροιστική ποσοτική συνισταμένη τους. Με δεδομένη την ολική ένταση βροχής και τα ολικά ελλείμματα, είναι εφικτό να προσδιοριστεί το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, το οποίο είναι γνωστό ως ενεργός βροχόπτωση (effective rainfall) (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Η ενεργός ένταση βροχής  $i_e$  γενικά προσδιορίζεται από τη σχέση

$$i_e = i - i_a \quad (2.3)$$

όπου  $i$  η ολική (πραγματική) ένταση βροχής και  $i_a$  η ένταση όλων των ελλειμμάτων αδιακρίτως, ήτοι

$$i_a = i_I + i_D + i_F \quad (2.4)$$

με  $i_I$ ,  $i_D$  και  $i_F$  την ένταση των απωλειών παρεμπόδισης, της παγίδευσης και της διήθησης, αντίστοιχα.

Η πρώτη σχέση προσδιορισμού της ενεργού βροχής από την ολική, στηρίζεται στην απλή αναλογία:

$$i_e = \psi i \quad (2.5)$$

όπου  $\psi$  ο συντελεστής απορροής, κατά παραδοχή σταθερός. Η σχέση 2.5 αποτελεί τη βάση της λεγόμενης ορθολογικής μεθόδου, η οποία, αν και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι σήμερα, είναι ανακριβής (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Μια πιο ακριβής και εύχρηστη προσέγγιση για τον προσδιορισμό των ολικών ελλειμμάτων (παρόλο που δε λαμβάνει υπόψιν τη χρονική μεταβολή τους) αποτελεί η μέθοδος του δείκτη  $\varphi$ , ο οποίος έχει μονάδες ίδιες με αυτές έντασης βροχής. Σύμφωνα με αυτήν, τα ελλείμματα πραγματοποιούνται με ρυθμό χρονικά σταθερό, μεγέθους  $\varphi$ . Αν η ένταση βροχής γίνει  $i < \varphi$ , τότε βέβαια τα ελλείμματα πραγματοποιούνται με ρυθμό ίσο με  $i$ . Κατά συνέπεια

$$i_a = \min\{\varphi, i\} \quad (2.6)$$

Για δεδομένη βροχόπτωση και επιφανειακή απορροή, ο δείκτης  $\varphi$  προκύπτει με απλή αφαίρεση των ποσοτήτων βροχής και επιφανειακής απορροής και διαίρεση της διαφοράς με τη διάρκεια της

βροχόπτωσης. Σε περίπτωση πολύπλοκου υετογραφήματος η υπολογιστική διαδικασία απαιτεί επαναλήψεις.

Πιο ρεαλιστική είναι η μέθοδος SCS (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016). Σε ένα αρχικό χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  όλη η πραγματική (ακαθάριστη) βροχόπτωση, συνολικού ύψους  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο  $t_{a0}$  το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής  $h_e$  δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ( $y := h - h_{a0}$ ), όπου  $h$  το ολικό (ακαθάριστο) ύψος βροχής. Το επιπλέον, πέραν του αρχικού  $h_{a0}$ , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$  δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$ , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention). Σε κάθε χρονική στιγμή μετά το χρόνο  $t_{a0}$ , οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής  $h_e$  και του ελλειμματικού ύψους μείον το αρχικό έλλειμμα ( $x := h_a - h_{a0}$ ), προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $y$  και  $S$ , αντίστοιχα) είναι ίσοι. Για περαιτέρω απλοποίηση, υιοθετείται η επιπλέον παραδοχή ότι  $h_{a0} = 0.2S$ , η οποία θεωρείται ως η βέλτιστη προσέγγιση από δεδομένα παρατηρήσεων, οπότε η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μία μόνο παράμετρο την  $S$ . Η μαθηματική έκφραση του ενεργού ύψους βροχόπτωσης κατά την μέθοδο  $S$  φαίνεται από τη σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (2.7)$$

Σε περίπτωση που είναι γνωστό το τελικό ενεργό ύψος  $h_e$  (από μέτρηση της απορροής, τότε από αυτό και το τελικό ολικό ύψος  $h$ , μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος  $S$  λύνοντας την σχέση 2.7 ως προς  $S$ . Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, ακολουθείται άλλη, εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης της  $S$ . Συγκεκριμένα, η παράμετρος  $S$  συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, την  $CN$ , η οποία είναι γνωστή ως αριθμός καμπύλης απορροής (runoff curve number), με τη σχέση:

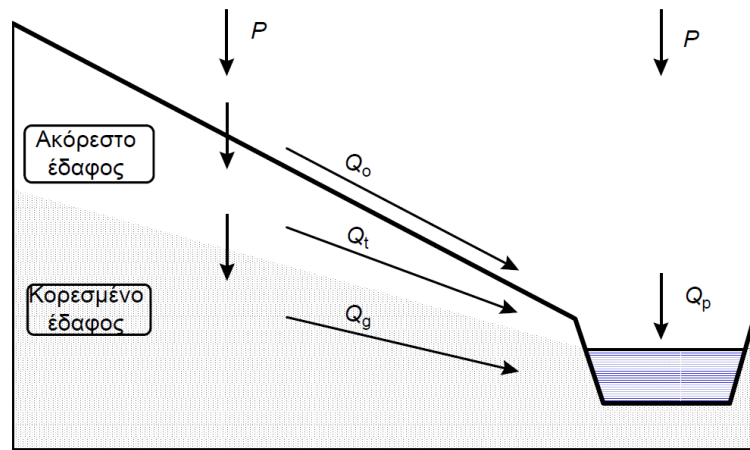
$$S[mm] = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.8)$$

## 2.1.2. Επιφανειακή απορροή

### 2.1.2.1. Μηχανισμοί και προέλευση της επιφανειακής απορροής

Η κίνηση του νερού κατά μήκος των γραμμικών κλάδων του φυσικού υδρογραφικού δικτύου είναι εύκολα κατανοητή και μαθηματικά περιγράφεται από τις γνωστές εξισώσεις της υδραυλικής. Η δυσκολία στην κατανόηση της επιφανειακής απορροής έγκειται στους μηχανισμούς γένεσής της, οι οποίοι δρουν πριν το νερό φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο και περιλαμβάνουν επίγειες και υπεδάφειες ροές σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο. Στο Σχήμα 2.4 βλέπουμε μια σχηματοποίηση των διαφορετικών προελεύσεων του νερού της επιφανειακής απορροής. Αυτό μπορεί να είναι είτε από άμεσα κατακρημνίσματα στο υδατόρευμα  $Q_p$ , είτε από επίγεια ροή  $Q_o$ , είτε από υποδερμική ροή  $Q_i$ , είτε τέλος από υπόγεια ροή  $Q_g$  (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).





Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα των διαφορετικών προελεύσεων της επιφανειακής (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016)

#### 2.1.2.2. Υδρογράφημα πλημμυρικού επεισοδίου

Διακρίνονται δύο συνιστώσες της επιφανειακής απορροής, η βασική απορροή (base runoff) η οποία δε σχετίζεται έντονα με το ρυθμό των κατακρημνισμάτων, αφού είναι ορατή ακόμη και σε παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας και η πλημμυρική απορροή (direct runoff) δηλαδή η άμεση απόκριση της ροής των υδατορευμάτων όταν ένα τμήμα των κατακρημνισμάτων ακολουθεί μια γρήγορη πορεία προς τα υδατορεύματα. Η βασική απορροή οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο μηχανισμό της υπόγειας ροής και γι' αυτό δεν επηρεάζεται αισθητά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών. Ανάλογα με το χαρακτήρα της βασικής απορροής σε μια συγκεκριμένη λεκάνη, η διάταξη απορροής σε αυτή χαρακτηρίζεται ως διαρκής (perennial), όταν η απορροή δεν παύει καθόλου στη διάρκεια του έτους, διακοπτόμενη (intermittent), όταν η απορροή παρατηρείται μόνο κατά την υγρή περίοδο και εξαφανίζεται κατά την ξηρή περίοδο, και εφήμερη ή χειμαρρική (ephemeral) όταν δεν υπάρχει βασική απορροή και το υδατόρευμα παρουσιάζει ροή μόνο μετά από ισχυρές καταιγίδες. Η άμεση απορροή σε μια δεδομένη λεκάνη απορροής, αποτελεί μετασχηματισμό της ενεργού βροχής, ο οποίος χαρακτηρίζεται αφενός από μια χρονική υστέρηση, λόγω του χρόνου που απαιτεί η διαδρομή του νερού μέχρι να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, και αφετέρου από τη διατήρηση της ολικής μάζας ή του όγκου καθότι ο όγκος της ενεργού βροχόπτωσης ταυτίζεται με τον όγκο της άμεσης απορροής (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

#### 2.1.2.3. Χαρακτηριστικά Λεκάνης Απορροής

Η λεκάνη απορροής, ως σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή, παρουσιάζει ορισμένα ειδικά φυσικά γνωρίσματα που επηρεάζουν καταφανώς, τόσο τη διαδικασία του μετασχηματισμού όσο και το τελικό της αποτέλεσμα, δηλαδή το υδρογράφημα της

απορροής. Τα γνωρίσματα αυτά ονομάζονται φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και μπορούν να καταταγούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Μορφολογικά χαρακτηριστικά (μορφή, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο).
- Εδαφολογικά χαρακτηριστικά (μηχανικές ιδιότητες, χημική σύσταση).
- Φυτοκάλυψη (είδη χλωρίδας και χωρική διάταξή της).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν χωρικά κατανεμημένη πληροφορία (μεταβάλλονται από θέση σε θέση) αλλά στην πράξη γίνεται συμπυκνωμένη περιγραφή τους χρησιμοποιώντας δείκτες και διαγράμματα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Το κυριότερο γεωμετρικό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι το εμβαδό της  $S_A$ . Το σχήμα μιας λεκάνης απορροής είναι πάντα πολύπλοκο, δεν μοιάζει με κανένα από τα απλά γεωμετρικά σχήματα, και έτσι δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από μικρό αριθμό παραμέτρων.

Δευτερεύον γεωμετρικό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι το ανάγλυφο. Η γενική εικόνα του ανάγλυφου αποδίδεται από την υψομετρική καμπύλη της λεκάνης, δηλαδή την καμπύλη που σε κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψομέτρου  $z$  αντιστοιχίζει το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης  $F(z)$  που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής. Η μορφή της υψομετρικής καμπύλης αποκαλύπτει αρκετά ποιοτικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου της λεκάνης, σύμφωνα με τη γενική παρατήρηση ότι ισχυρές κλίσεις σε μια περιοχή της καμπύλης υποδηλώνουν ισχυρές κλίσεις του ανάγλυφου της λεκάνης και αντίστροφα. Προκύπτουν έτσι μερικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αναμενόμενη μορφή των πλημμυρογραφημάτων και τους χαρακτηριστικούς χρόνους τους.

Ένα τρίτο χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι το υδρογραφικό της δίκτυο, δηλαδή το οργανωμένο δίκτυο των κλάδων των φυσικών υδατορευμάτων που αποχετεύουν τα νερά της επιφανειακής απορροής. Οι κλάδοι αυτοί παρουσιάζουν ποικιλία χαρακτηριστικών με διατομές που προοδευτικά αυξάνονται, ξεκινώντας από τα τελευταία μικρορυάκια του ανάγλυφου και καταλήγοντας στο υδατόρευμα που συγκεντρώνει την απορροή του συνόλου της λεκάνης. Όλοι οι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους σε τρόπο ώστε οι πιο κατάντη να δέχονται την απορροή των πιο ανάντη. Μια συγκεκριμένη διαδρομή κατά μήκος του υδατορεύματος, η οποία καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης, χαρακτηρίζεται ως κύριο υδατόρευμα ή κύρια μισγάγκεια της λεκάνης. Η αναγνώριση του κύριου υδατορεύματος είναι εύκολη στο χαμηλό τελευταίο τμήμα της λεκάνης, όπου συνήθως υπερέχει σαφώς από άποψη διαστάσεων και παροχής, αλλά έχει και τη μεγαλύτερη τάξη. Προχωρώντας όμως στα μεγαλύτερα υψόμετρα, αυξάνονται προοδευτικά οι δυσκολίες επιλογής και πρέπει να τεθούν κριτήρια επιλογής, που είναι η υπεροχή στο μήκος, στη μέση ετήσια παροχή, στην έκταση της αποχετευόμενης λεκάνης απορροής ή στην τάξη (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής σημαντικό ρόλο παίζουν και τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά. Η σύσταση των εδαφών της λεκάνης απορροής επηρεάζει ιδιαίτερα τα υδρολογικά ελλείμματα, άρα και την επιφανειακή απορροή. Οι μηχανικές ιδιότητές των εδαφών καθορίζουν το ρυθμό της διήθησης και επηρεάζουν άμεσα την απορροή. Η χημική σύσταση των εδαφών, σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητές τους, καθορίζει τη φυτοκάλυψη

και τους επικρατούντες τύπους χλωρίδας. Ο μηχανισμός της παρεμπόδισης της χλωρίδας, έχει συνέπεια τη μείωση του όγκου απορροής κατά την ποσότητα που κατακρατείται από τη χλωρίδα και τελικώς εξατμίζεται ή απορροφάται απ' αυτή. Ο ίδιος μηχανισμός είναι υπεύθυνος και για τη χρονική υστέρηση της απορροής. Στη χρονική υστέρηση συντείνει εξ άλλου και η αύξηση της τραχύτητας των εδαφών, η οποία προκαλείται από τη φυτοκάλυψη. Μια άλλη δράση της χλωρίδας, η οποία επηρεάζει την απορροή, έχει σχέση με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του επιφανειακού εδαφικού στρώματος (από τη δράση των ριζών αλλά και των φυλλωμάτων που πέφτουν) σε τρόπο ώστε να αυξάνεται η διηθητική ικανότητα του εδάφους και συνακόλουθα να μειώνεται η απορροή. Τελική συνέπεια των παραπάνω είναι η μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφήματων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

#### 2.1.2.4. Υδρολογικά μοντέλα επιφανειακής απορροής

Η ποσοτική εκτίμηση των όρων που υπεισέρχονται στο υδατικό ισοζύγιο μιας συγκεκριμένης λεκάνης απορροής θα επέτρεπε τον προσδιορισμό του μεγέθους που αναζητούμε, δηλαδή της παροχής  $Q$  στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Όπως έγινε σαφές από τα παραπάνω, μόνο η «είσοδος»  $i(t)$  του συστήματος είναι γνωστή με σχετική ακρίβεια από τις διάφορες σημειακές (αρκετά πυκνό βροχομετρικό δίκτυο) ή επιφανειακές μεθόδους μέτρησης - εκτίμησης που είναι διαθέσιμες στις μέρες μας. Το υδρολογικό μοντέλο λοιπόν πρέπει να εκμεταλλευτεί την πληροφορία αυτή και να μας δώσει την «έξοδο»  $q(t)$ .

Η πιο διαδεδομένη λόγω της απλότητας που τη διακρίνει εμπειρική μέθοδος που χρησιμοποιείται για μικρής έκτασης λεκάνες απορροής (<35 [km<sup>2</sup>]) είναι η ορθολογική μέθοδος. Βασίζεται στην αρχή ότι για βροχές με ομοιόμορφη έκταση και κατανομή πάνω στη λεκάνη απορροής, διάρκειας τουλάχιστο ίσης με το χρόνο συρροής της λεκάνης, η μέγιστη πλημμυρική παροχή εμφανίζεται όταν το νερό από όλα τα σημεία της λεκάνης απορροής φτάσει στην έξοδό της. Η απορροή αυτή είναι ένα συγκεκριμένο ποσοστό της βροχής που την προκαλεί. Η ορθολογική μέθοδος εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_p \left[ \frac{m^3}{s} \right] = 0.278CI \left[ \frac{mm}{hr} \right] A [km^2] \quad (2.9)$$

Όπου  $Q_p$  η παροχή αιχμής,  $I$  η ένταση της βροχής,  $A$  η ένταση της λεκάνης και  $C$  μια αδιάστατη παράμετρος γνωστή και ως συντελεστής απορροής (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Η διαδικασία εκτίμησης τόσο της αιχμής όσο και εν γένει της μορφής του πλημμυρογραφήματος που προκαλείται από μια βροχή μπορεί να βασιστεί στο μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥ). Το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10[mm] συγκεκριμένης διάρκειας ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης. Για λόγους ταξινόμησης, τα μοναδιαία υδρογραφήματα χαρακτηρίζονται από την διάρκεια της ενεργού βροχής από την οποία προέρχονται. Για παράδειγμα μοναδιαίο υδρογράφημα 1 ώρας χαρακτηρίζεται αυτό που προέκυψε ως απόκριση της λεκάνης σε βροχή ύψους 10[mm] και διάρκειας 1 ώρας.

Πρώτη βασική αρχή του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας. Σύμφωνα με αυτή 2 διαφορετικές βροχές ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικής έντασης δημιουργούν υδρογραφήματα με ίδια χρονική βάση, αλλά με τεταγμένες που σε κάθε χρονική στιγμή ο λόγος τους είναι ίσος με αυτό των εντάσεων των αντίστοιχων βροχοπτώσεων από τις οποίες προήλθαν. Δεύτερη βασική αρχή του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι αυτή της επαλληλίας όπου το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις έχει ως τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων κάθε χρονική στιγμή (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

Τα δεδομένα που χρειάζονται για την κατασκευή του μοναδιαίου υδρογραφήματος υδρολογικής λεκάνης είναι ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής και απορροής για ένα χρονικό διάστημα, κατά κανόνα μερικών ετών. Από τις παρατηρήσεις αυτές επιλέγονται 4-5 βροχές με την ίδια περίπου διάρκεια, ομοιόμορφη κατανομή στην υδρολογική λεκάνη όσο το δυνατόν και σημαντική ένταση. Τα υδρογραφήματα αυτά ανάγονται σε μοναδιαία και λαμβάνεται ως χαρακτηριστικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης ο μέσος όρος των υδρογραφημάτων αυτών (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2012).

#### 2.1.2.5. Καμπύλη διάρκειας παροχής

Η καμπύλη διάρκειας της παροχής είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση μιας θέσης όσον αφορά την υδροηλεκτρική της αξιοποίηση για τον υπολογισμό της ισχύος που θα εγκατασταθεί και της ενέργειας που θα παράγεται. Ορίζεται ως η καμπύλη που παριστά την τιμή της παροχής συναρτήσει του χρονικού διαστήματος επί τοις εκατό (% του χρόνου) για το οποίο η παροχή έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από αυτή της καμπύλης.

Για τη χάραξη της καμπύλης διάρκειας της διαθέσιμης (αξιοποιήσιμης) παροχής αρχικά μετατρέπουμε τις παροχές σε χρονοσειρά όπως καταγράφηκαν δηλαδή πρώτα οι παροχές του χρόνου 1, μετά του χρόνου 2 κλπ. Κατόπιν κατατάσσονται οι παροχές αυτές σε φθίνουσα σειρά και υπολογίζεται για κάθε παροχή το ποσοστό επί της εκατό του χρόνου που η παροχή είναι μεγαλύτερη από τη συγκεκριμένη τιμή (εμπειρική συχνότητα υπέρβασης) από τη σχέση:

$$100 \frac{n_i}{N} \quad (2.10)$$

όπου  $n_i$  η θέση της κάθε παροχής στη φθίνουσα σειρά και  $N$  το πλήθος των παροχών. Το διάγραμμα των  $N$  σημείων που στον κατακόρυφο άξονα έχει τις παροχές σε φθίνουσα σειρά και στον οριζόντιο έχει τον χρόνο % είναι η καμπύλη διάρκειας των αξιοποιήσιμων παροχών. Το εμβαδό που περικλείεται κάτω από την καμπύλη είναι ίσο με τον όγκο νερού που διέρχεται από την επιφάνεια της διατομής κατά το χρονικό διάστημα στο οποίο λαμβάνεται το εμβαδό αυτό. Χαρακτηριστικές τιμές της καμπύλης διάρκειας παροχής είναι η  $Q_{50}$  δηλαδή η τιμή αυτή της παροχής από την οποία το 50% του χρόνου η αξιοποιήσιμη παροχή είναι ίση ή μεγαλύτερη της, και αντίστοιχα η  $Q_{30}$  (Παπαντώνης, 2008).

Βασικό μειονέκτημα της καμπύλης διάρκειας παροχής είναι ότι από αυτή δεν προκύπτει η αλληλουχία των παροχών για παράδειγμα δεν ξέρουμε αν οι μεγάλες παροχές είναι ομαδοποιημένες σε μία περίοδο του έτους ή αν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το έτος,

δεν έχουμε με άλλα λόγια την πληροφορία της εποχικότητας. Είναι προφανές ότι η κατάρτιση καμπύλης στάθμης παροχής απαιτεί μετρήσεις της παροχής για μεγάλο χρονικό διάστημα (μερικά έτη) το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν είναι συνήθως εφικτό σε περιπτώσεις διερεύνησης της κατασκευής ενός μΥΗΕ. Υπάρχουν λοιπόν μέθοδοι που μεταφέρουν αυτή την πληροφορία από άλλες θέσεις του ίδιου υδατερέματος που πιθανόν υπάρχουν μετρήσεις ή ακόμη και από άλλα υδατορέματα.

### 2.1.3. Πλημμυρική Παροχή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πλημμυρική παροχή μπορεί να βρεθεί είτε από στοχαστική ανάλυση ιστορικών χρονοσειρών παροχής (με τις δυσκολίες που έχουν αναφερθεί ως προς την παρουσία μετρήσεων) είτε από μεθόδους που βασίζονται στην έννοια της μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης αφού αυτή αποτελεί το αίτιο της πλημμύρας. Σε κάθε περίπτωση, λόγω των αβεβαιοτήτων (διαφορετικής φύσης για κάθε μέθοδο) η πλημμυρική παροχή συνοδεύεται από την περίοδο επαναφοράς της  $T$ . Η περίοδος επαναφοράς αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα σε έτη που χρειάζεται κατά μέσο όρο να παρέλθει ώστε η μέση τιμή της μεταβλητής  $I$  να υπερβεί την τιμή  $i$ . Η συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής  $I$ , ορίζεται ως

$$F_I(i) = P(I \leq i) \quad (2.11)$$

όπου με  $P(I \leq i)$  συμβολίζεται η πιθανότητα να μην πραγματοποιηθεί υπέρβαση της τιμής  $i$  κατά τη διάρκεια ενός (υδρολογικού ή ημερολογιακού) έτους. Η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής  $i$  κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι

$$F_{1,I}(i) = 1 - F_I(i) = P(I > i) \quad (2.12)$$

Η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας υπέρβασης, δηλαδή

$$T = \frac{1}{F_{1,I}(i)} = \frac{1}{P(I > i)} \quad (2.13)$$

Συνήθως για μικρά υδροηλεκτρικά έργα λαμβάνεται ως περίοδος επαναφοράς της πλημμυρικής αιχμής  $T=50$  ή  $T=100$  έτη (Παπαντώνης, 2008).

Το κλασικό μαθηματικό εργαλείο που περιγράφει αυτή τη δίαιτα είναι οι λεγόμενες όμβριες καμπύλες, δηλαδή καμπύλες έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης (Intensity-Duration-Frequency curves). Πρόκειται για απλές αναλυτικές ή γραφικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχής  $i$  συναρτήσει της διάρκειας  $d$  και της περιόδου επαναφοράς  $T$ . Η όμβρια καμπύλη, δηλαδή η σχέση μεταξύ των μεταβλητών  $i-d-T$ , αλλάζει από περιοχή σε περιοχή. Η μεθοδολογία κατάρτισής της είναι στατιστική· προϋπόθεση γι' αυτήν είναι να υπάρχουν διαθέσιμες στην περιοχή που ενδιαφέρει ιστορικές σειρές μέγιστων εντάσεων βροχής.

Η συνεπέστερη γενικευμένη έκφραση όμβριων καμπυλών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016) είναι

$$i = \frac{\lambda(T^{\kappa} - \psi)}{(d + \theta)^{\eta}} \quad (2.14)$$

όπου  $\omega$ ,  $\theta$  και  $\eta$  είναι παράμετροι που οι τιμές τους εξαρτώνται από την περίοδο επαναφοράς  $\kappa$ ,  $\lambda$  και  $\psi$  είναι αριθμητικές παράμετροι. Για παράδειγμα με τα δεδομένα του βροχομετρικών σταθμών Λόφου Νυμφών (περιοχή Αστεροσκοπείου) και Ελληνικού (περιοχή πρώην αεροδρομίου Αθήνας) είχε καταρτιστεί η ακόλουθη γενικευμένη έκφραση όμβριων καμπυλών (Koutsoyiannis & Baloutsos, 2000):

$$i \left[ \frac{mm}{h} \right] = \frac{40.6(T^{0.185} - 0.45)}{(d[h] + 0.189)^{0.796}} \quad (2.15)$$

Σε επόμενο στάδιο η βροχή αυτή είτε δίνει απευθείας την επιφανειακή απορροή με χρήση της ορθολογικής μεθόδου είτε μετατρέπεται σε επεισόδιο βροχής (για παράδειγμα με την μέθοδο των εναλλασσόμενων block) και με τη μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος λαμβάνεται το ζητούμενο υδρογράφημα εξόδου μέγιστη τιμή του οποίου είναι η τιμή της μέγιστης πλημμυρικής παροχής.

## 2.2. Μέτρηση Παροχής – Επεξεργασία Υδρομετρικών Δεδομένων

Η αξία των μετρήσεων στα υδρολογικά φαινόμενα είναι μεγάλη καθότι η Υδρολογία ως επιστήμη δεν έχει νόμους με παγκόσμια εφαρμογή αλλά σχέσεις περιορισμένη χωροχρονικής ισχύος. Για παράδειγμα οι δαπάνες εγκατάστασης και 20ετούς λειτουργίας ενός υδρομετρικού σταθμού, είναι πολύ μικρότερες από το επιπλέον κόστος κατασκευής ενός έργου αξιοποίησης υδατικού δυναμικού, το οποίο προκύπτει από τη μεγάλη αβεβαιότητα εξαιτίας της μη λειτουργίας του σταθμού (π.χ. όταν η εκτίμηση της παροχής γίνεται από τις βροχές). Η εξαγωγή και η επαλήθευση αυτών των εξισώσεων και σχέσεων δεν είναι δυνατή παρά μόνο όταν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου.

Το σύνολο των πρωτογενών και επεξεργασμένων μετρήσεων των συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου σε μια περιοχή αποτελεί την υδρολογική πληροφορία της περιοχής. Κύρια ή πρωτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις της παροχής των υδατορευμάτων. Δυστυχώς για τις υδρολογικές μελέτες, η πρωτεύουσα πληροφορία είναι συνήθως ελλιπής ή ανύπαρκτη, γιατί όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, η μέτρηση της παροχής είναι μια δύσκολη αλλά και δαπανηρή επιχείρηση. Δευτερεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Συγκρινόμενα με τις παροχές, τα κατακρημνίσματα έχουν πολύ πυκνότερο δίκτυο σημειακών μετρήσεων και πολύ μακρύτερες ιστορικές χρονοσειρές, για τον απλό λόγο ότι η καταγραφή τους ήταν και είναι πολύ ευκολότερη και φθηνότερη. Η λογικά προφανής σχέση αιτίου-αποτελέσματος μεταξύ κατακρημνισμάτων και απορροών οδηγεί στην κατά προτεραιότητα χρησιμοποίηση της δευτερεύουσας αυτής πληροφορίας για τη βελτίωση της εκτίμησης των παροχών. Τριτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις όλων των υπόλοιπων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών που κατά

περίπτωση χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση ή και την απευθείας εκτίμηση της κύριας ή της δευτερεύουσας πληροφορίας (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Ο καθορισμός της πρωτεύουσας πληροφορίας δηλαδή της μέτρησης των παροχών είναι το αντικείμενο της υδρομετρίας. Η υδρομετρία (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016) αποτελεί σήμερα ολόκληρη εφαρμοσμένη επιστήμη που απασχολεί σημαντικές βιομηχανικές μονάδες με ενσωματωμένα ερευνητικά κέντρα, αλλά και υδρολογικές υπηρεσίες. Προδιαγραφές για την υδρομετρία έχουν εκδώσει τόσο ο World Meteorological Organization (1981) όσο και ο International Standards Organization (1983). Κύριος στόχος της είναι η παραγωγή αδιάλειπτων χρονοσειρών παροχής σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Για την εξυπηρέτηση αυτού του στόχου απαιτείται κατ' αρχήν η εκτέλεση μετρήσεων παροχής ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. εβδομάδας ή δεκαπενθημέρου). Όμως, ποτέ η χρονική πυκνότητα των μετρήσεων παροχής δεν είναι η απαιτούμενη, λόγω των ιδιαίτερων δυσκολιών και του σημαντικού κόστους τους. Έτσι, για την πυκνωση των χρονοσειρών παροχής στο επιθυμητό χρονικό βήμα (π.χ. ημερήσιο, ωριαίο ή και ακόμη μικρότερο) αξιοποιούνται και άλλα χαρακτηριστικά της ροής των υδατορευμάτων, των οποίων η μέτρηση είναι απλούστερη. Το κυριότερο απ' αυτά είναι η στάθμη.

Τυπικά, ένας υδρομετρικός σταθμός εγκαθίσταται σε κατάλληλη διατομή υδατορεύματος και η τυπική σύνθεσή του περιλαμβάνει διάφορα όργανα και εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν τη μέτρηση τόσο της στάθμης όσο και της παροχής του υδατορεύματος. Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης του υδρομετρικού σταθμού είναι επίσης πολύ σημαντική για την επίτευξη καλών μετρήσεων. Ιδανικά η διατομή του ποταμού πρέπει να είναι απλή και ομαλή, χωρίς εμπόδια στην ευρύτερη περιοχή που να προκαλούν τοπικές μεταβολές στη ροή, να μην «ταλαιπωρείται» από φαινόμενα στερεοπαροχής, να βρίσκεται κοντά στη θέση που μας ενδιαφέρει για το έργο μας καθώς επίσης και να είναι δυνατή η γεφύρωσή του ποταμού με καλώδια πάνω στα οποία θα γίνεται η διαδικασία της μέτρησης του πεδίου των ταχυτήτων, να είναι εύκολα προσβάσιμο στο προσωπικό που είναι υπεύθυνο για τη συντήρηση του σταθμού και των συνεργείων μέτρησης σε οποιεσδήποτε συνθήκες πλημμύρας για να λαμβάνονται οι πλημμυρικές αιχμές καθώς επίσης και διάφορες άλλες παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

### 2.2.1. Απευθείας μέτρηση παροχής

Ο πιο ακριβής τρόπος για μέτρηση της παροχής είναι ο προσδιορισμός ενός πλέγματος ταχυτήτων στη διατομή και ολοκλήρωση των ταχυτήτων αυτών στη διατομή σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = \int_A u_A dA \quad (2.16)$$

Επομένως ένας υδρομετρικός σταθμός πρέπει να διαθέτει όργανο μέτρησης της ταχύτητας το οποίο όμως δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία οπότε περισσότεροι του ενός σταθμοί μιας περιοχής μπορούν να εξυπηρετούνται από το ίδιο σύστημα μέτρησης της ταχύτητας. Ένας υδρομετρικός σταθμός περιλαμβάνει επίσης σταθμήμετρο για τη μέτρηση της στάθμης του υδατορεύματος (σταθμημετρία) και σταθμηγράφο, ο οποίος καταγράφει συνεχώς τη στάθμη,

παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για λεπτομερέστερη χρονική αποτύπωση της εξέλιξης της στάθμης του υδατορεύματος, απαραίτητη ιδίως για τη μελέτη πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Με τις δύο αυτές πληροφορίες καθορίζεται ένα σημείο με τετμημένη την στάθμη του υδατορέματος και τεταγμένη την παροχή του τη χρονική αυτή στιγμή.

### 2.2.2. Καμπύλη στάθμης - παροχής

Επανάληψη των παραπάνω μετρήσεων σε διάφορες καταστάσεις του ποταμού οδηγεί στη δημιουργία της καμπύλης στάθμης-παροχής για τη θέση αυτή του υδατορέματος. Συχνά αυτή μπορεί να έχει μια απλή μαθηματική έκφραση όπως

$$Q = C(h - a)^N \quad (2.17)$$

όπου  $a$  η στάθμη  $h$  για την οποία η παροχή είναι μηδέν, και  $C$  και  $N$  σταθερές. Η παραπάνω σχέση δικαιολογείται με εφαρμογή των τύπων της υδραυλικής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ομοιόμορφης ροής σε ορθογωνική διατομή μεγάλου πλάτους ( $> 20(h - a)$ ), η εφαρμογή του τύπου του Manning οδηγεί στην (2.17) με εκθέτη  $N = 1.67$ .

Αν όλα τα σημεία περιγράφονται από ενιαία εξίσωση, τότε αυτή μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα με γραμμική παλινδρόμηση. Πράγματι, η (2.17) μετά από λογαρίθμιση γράφεται:

$$\log Q = \log C + N \log(h - a) \quad (2.18)$$

που δείχνει ότι οι λογάριθμοι της παροχής  $Q$  και της στάθμης  $h - a$  ακολουθούν γραμμική σχέση, οπότε μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν τα  $\log C$  και  $N$ . Η παράμετρος  $a$  είτε καθορίζεται αυθαίρετα, με τρόπο ώστε για όλες τις στάθμες που έχουν μετρηθεί να ισχύει απαραίτητα  $h - a \geq 0$ , είτε προσδιορίζεται με επαναληπτική διαδικασία, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο συντελεστής προσδιορισμού της παλινδρόμησης (2.18), αλλά και πάλι με τον περιορισμό  $h - a \geq 0$  (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Η σταθερότητα της καμπύλης στάθμης - παροχής και η ευαισθησία της στάθμης στη μεταβολή της παροχής είναι στοιχεία σημαντικά για να ελεγχθεί αν η θέση των μετρήσεων έχει επιλεγθεί σωστά αλλά μπορούν να ελεγχθούν μόνο αφού εγκατασταθεί και λειτουργήσει για ένα διάστημα ο σταθμός. Από τα παραπάνω είναι εύκολο να καταλάβει κανείς γιατί οι μετρήσεις παροχών στα υδατορέματα δεν απαντώνται τόσο συχνά και όπου υπάρχουν εμφανίζουν κενά ως προς τις μετρήσεις.

### 2.2.3. Επέκταση της καμπύλης στάθμης παροχής

Ένας ακόμη λόγος που οι χρονοσειρές των παροχών εμφανίζουν κενά στις μετρήσεις τους είναι επειδή σε φυσικά υδατορέματα, οι υδρομετρικοί σταθμοί ενδέχεται να είναι μη προσβάσιμοι κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού επεισοδίου λόγω των ιδιαίτερων συνθηκών της ροής τις ώρες αυτές. Έτσι δεν είναι εύκολη η μέτρηση των ταχυτήτων τις ώρες αυτές και λόγω ευαισθησίας των



οργάνων και λόγω του κινδύνου να παρασυρθεί το μετρητικό όργανο από το νερό και να χαθεί. Έτσι συνήθως, από τέτοια φαινόμενα έχουμε μόνο μετρήσεις στάθμης και όχι παροχής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα υιοθετούνται υδραυλικές μέθοδοι. Υπολογίζονται (ή έχουν ήδη υπολογιστεί) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής στη συγκεκριμένη θέση για ύψος τουλάχιστο ίσο με αυτό που μετρήθηκε κατά το πλημμυρικό φαινόμενο καθώς και μια μέση κλίση  $J$  του υδατορέματος και εφαρμόζεται κάποια σχέση υδραυλικής όπως του Manning που ελαφρώς τροποποιημένη έχει τη μορφή:

$$Q = \frac{\sqrt{J}}{n} AR^{2/3} \quad (2.19)$$

Για τον προσδιορισμό του σταθερού όρου χρησιμοποιούνται δεδομένα από τις υψηλές μετρήσεις παροχής. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό σχεδιάζονται οι μετρήσεις αυτές σε διάγραμμα, όπου στον κατακόρυφο άξονα τίθεται η παροχή  $Q$  και στον οριζόντιο η παράσταση  $AR^{2/3}$ . Αν οι ψηλές υδρομετρήσεις διατάσσονται γύρω από ευθεία, μπορεί με παλινδρόμηση, να εκτιμηθεί η κλίση της ευθείας, η οποία ταυτίζεται με το σταθερό όρο  $J/n$  (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016).

Συνοψίζοντας, η αρχική εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού για τη διαστασιολόγηση του μΥΗΕ απαιτεί μια συνεπή χρονοσειρά καταγεγραμμένων παροχών. Όταν αυτή δεν είναι διαθέσιμη, εφαρμόζονται υδρολογικές μέθοδοι (και συλλογή πληροφοριών και μαρτυριών) για τον προσδιορισμό των παροχών και αν κριθεί ότι το έργο είναι βιώσιμο ξεκινούν και διαδικασίες καταγραφής των παροχών ώστε να τροποποιηθεί κατάλληλα η αρχικά εκτιμώμενη παροχή σχεδιασμού. Με δεδομένη την παροχή σχεδιασμού μπορεί ο μελετητής να αποφασίσει τη γενική διάταξη των έργων, τουλάχιστο σε ότι αφορά αυτά που άπτονται της ειδικότητας του πολιτικού μηχανικού, όπως αυτά περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3 Διαμόρφωση μικρού Υδροηλεκτρικού Σταθμού

#### 3.1 Περιγραφή κύριων συνιστωσών ενός μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Ένα ΥΗΕ αποτελείται από έργα πολιτικού μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό.

Τα κύρια μέρη των έργων πολιτικού μηχανικού ενός ΥΗΕ έργου είναι:

Το φράγμα σκοπός του οποίου είναι η δημιουργία ταμιευτήρα, στον οποίο συγκεντρώνεται ποσότητα νερού προερχόμενη από τη φυσική απορροή του υδατορέματος. Ενώ στα ΥΗΕ σκοπός του φράγματος είναι η αποθήκευση όσο το δυνατό μεγαλύτερης ποσότητας νερού, στα μΥΗΕ είναι η εξασφάλιση ομαλών συνθηκών στην υδροληψία, ώστε να μην εισέρχονται στο σύστημα προσαγωγής φερτά υλικά ή αέρας, τα οποία θα μπορούσαν να φθάσουν μέχρι τον υδροστρόβιλο και θα είχαν ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της λειτουργίας του ή ακόμη και την πρόωρη φθορά του.

Το φράγμα συνοδεύεται και από τα ακόλουθα έργα τα οποία εξυπηρετούν το έργο ή σχετίζονται με την ασφάλειά του, όπως:

- ο υπερχειλιστής που σκοπό έχει τη διοχέτευση της πλημμυρικής παροχής ώστε η στάθμη του νερού να μην ξεπεράσει αυτή της στέψης του φράγματος
- τα έργα εκτροπής μέσω των οποίων διοχετεύεται η φυσική παροχή κατά τη διάρκεια κατασκευής του φράγματος
- ο εκκενωτής πυθμένα μέσω του οποίου εκκενώνεται ο ταμιευτήρας σε περίπτωση ανάγκης ή συντήρησης, ενώ επίσης από αυτόν διοχετεύεται η απαιτούμενη παροχή συντήρησης της κοίτης του ποταμού
- η υδροληψία η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις μΥΗΕ συνοδεύεται και από δεξαμενή εξάμμωσης.

Η αποθηκευμένη ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα μέσω του υδραυλικού συστήματος προσαγωγής, προσάγεται στον υδροστρόβιλο και κατόπιν απάγεται στη φυσική κοίτη του υδατορέματος κατάντη του ΥΗΣ. Το υδραυλικό σύστημα προσαγωγής περιλαμβάνει:

- τη διώρυγα προσαγωγής αμέσως κατάντη της υδροληψίας ή της εξάμμωσης
- τη δεξαμενή φόρτισης αμέσως κατάντη του αγωγού προσαγωγής με σκοπό την αποθήκευση ικανής ποσότητας νερού ώστε ο αγωγός πτώσης που ακολουθεί να λειτουργεί πάντα υπό πίεση.
- τον αγωγό πτώσης ο οποίος καταλήγει στον υδροστρόβιλο (ή σε περισσότερους του ενός αν έτσι σχεδιαστεί το σύστημα) με τα εξαρτήματά του όπως τις βάνες και τα θυροφράγματα ανάντη των υδροστροβίλων (για τις ανάγκες κατασκευής και συντήρησης του έργου οι οποίες κατά διάρκεια της λειτουργίας είναι πλήρως ανοικτές) και τυχόν πύργους ανάπαλσης (για προστασία από τα μεταβατικά φαινόμενα)
- τον αγωγό απαγωγής αποτελεί μέρος του υδροστροβίλου και σκοπό έχει την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας σε στατική πίεση. Στα μΥΗΕ το νερό από την έξοδο του αγωγού απαγωγής συνήθως τροφοδοτεί διώρυγα απαγωγής, η στάθμη της οποίας είναι (για λόγους ασφαλείας) υψηλότερη από τη μέγιστη πλημμυρική στάθμη του υδατορέματος και καθορίζεται από υπερχειλιστή διαμορφωμένο στο άκρο της.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος προσαγωγής και απαγωγής του νερού καθορίζεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Για παράδειγμα, εάν ο ΥΗΣ είναι εξοπλισμένος με περισσότερους από έναν υδροστροβίλους και εάν ο αγωγός πτώσης έχει μεγάλο μήκος προκύπτει προτιμότερη η κατασκευή ενός αγωγού προσαγωγής για την τροφοδοσία όλων των υδροστροβίλων του ΥΗΣ με διαμόρφωση διακλάδωσης ακριβώς ανάντη του ΥΗΣ. Στην αντίθετη περίπτωση αγωγού πτώσεως μικρού μήκους, κάθε υδροστροβίλος τροφοδοτείται από ανεξάρτητο αγωγό.

Ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός αποτελείται από:

- τον υδροστροβίλο (ή τους υδροστροβίλους)
- τους ρυθμιστές στροφών
- τις ηλεκτρογεννήτριες
- τους μετασχηματιστές σκοπός των οποίων είναι η ανύψωση της τάσης που παράγουν οι γεννήτριες στη μέση ή στην υψηλή τάση του διασυνδεδεμένου δικτύου ώστε η μεταφορά της ενέργειας να γίνεται με τις μικρότερες απώλειες
- τους ηλεκτρικούς πίνακες
- τους ασφαλειοαποζεύκτες
- και βοηθητικό εξοπλισμό, όπως τα ανυψωτικά μηχανήματα (γερανογέφυρες), το σύστημα πεπιεσμένου ελαίου και αέρα, τους αυτοματισμούς κλπ.

Στα μΥΗΕ το βέλτιστο πλήθος των μονάδων παραγωγής προκύπτει από καθαρά οικονομοτεχνικά κριτήρια, δεδομένου ότι η όποια αύξηση της παραγωγής ενέργειας προκύπτει από την εγκατάσταση δύο υδροστροβίλων αντί ενός, συνοδεύεται και από αύξηση του ύψους της επένδυσης.

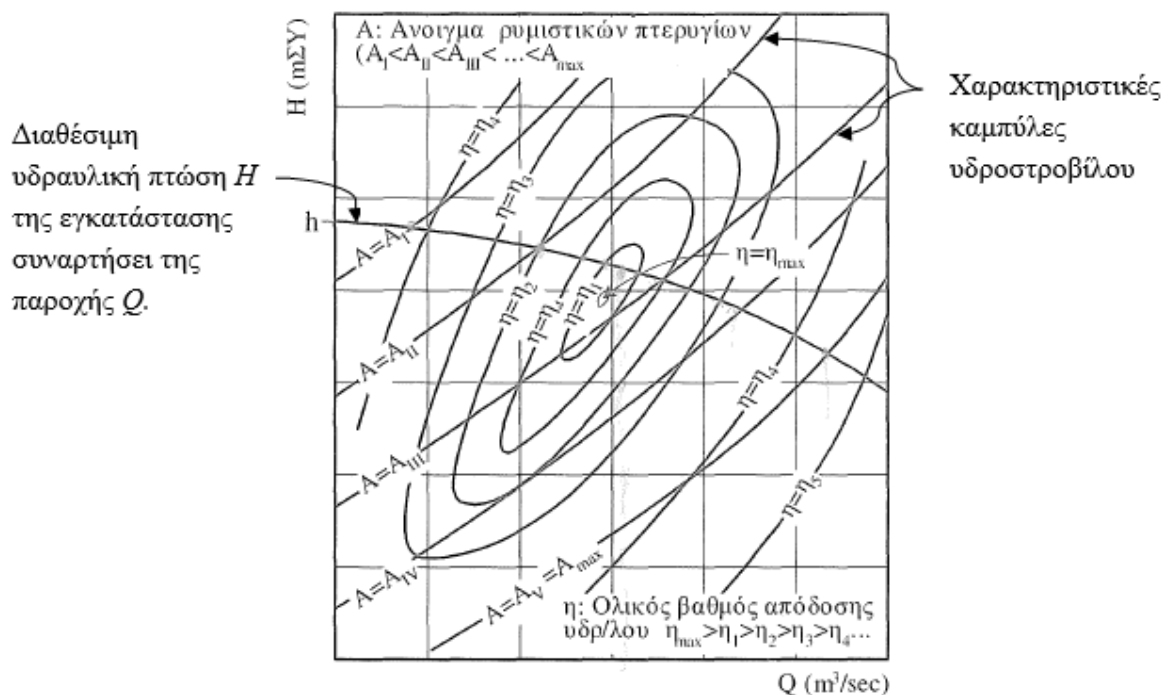
### 3.2 Σημείο λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου

Ο υδροστροβίλος καλείται να μετατρέψει τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$ , ανά μονάδα μάζας του διερχόμενου νερού, σε μηχανική ενέργεια. Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$  σε μία συγκεκριμένη εγκατάσταση εκφράζεται συναρτήσει της διακινούμενης παροχής  $Q$  από εξίσωση παραβολικής μορφής σε διάγραμμα ύψους – παροχής ( $H, Q$ ).

Η λειτουργία ενός υδροστροβίλου, υπό σταθερή ταχύτητα περιστροφής, περιγράφεται στο διάγραμμα ύψους-παροχής ( $H, Q$ ) από ένα πλέγμα καμπύλων με θετική κλίση, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε μία τιμή του ανοίγματος του ρυθμιστικού οργάνου, δηλαδή των ρυθμιστικών πτερυγίων. Σε κάθε ένα από τα σημεία λειτουργίας αντιστοιχεί μία τιμή του βαθμού απόδοσης  $\eta$  του υδροστροβίλου. Ενώνοντας όλα τα σημεία λειτουργίας που έχουν την ίδια τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης  $\eta$  προκύπτουν οι καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης, οι οποίες έχουν τη μορφή ισούψων καμπύλων.

Εάν ο υδροστροβίλος, του οποίου οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας, εγκατασταθεί σε υδραυλική εγκατάσταση της οποίας η καμπύλη της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης περιγράφεται από την καμπύλη του σχήματος, τα μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας είναι αυτά της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  της εγκατάστασης. Εάν χαραχθεί η καμπύλη της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροστροβίλου προκύπτουν τα

χαρακτηριστικά των δυνατών σημείων λειτουργίας (σημεία τομής των καμπύλων), όπως σχηματικά φαίνεται στο Σχήμα 3.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.1: Σημεία λειτουργίας υδροηλεκτρικού έργου (Παπαντώνης, 2008).

Γίνεται φανερό ότι η λειτουργία ενός συγκεκριμένου υδροστροβίλου σε μία συγκεκριμένη υδραυλική εγκατάσταση έχει ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας από μία ελάχιστη τιμή της παροχής  $Q_{min}$  μέχρι μία μέγιστη παροχή λειτουργίας  $Q_{max}$ , που αντιστοιχεί στο μέγιστο άνοιγμα των ρυθμιστικών πτερυγίων, άρα σε μία μέγιστη παραγόμενη μηχανική ισχύ. Όλα τα σημεία λειτουργίας μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης παροχής, άρα ελάχιστης και μέγιστης παραγόμενης ισχύος, είναι δυνατόν να επιτευχθούν με κατάλληλο άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων του υδροστροβίλου. Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι είναι επιθυμητή η λειτουργία του υδροστροβίλου σε περιοχές λειτουργίας του όπου ο ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  έχει υψηλές τιμές (έτσι ώστε να μετατρέπεται μεγάλο ποσοστό της διαθέσιμης υδραυλικής ισχύος σε μηχανική).

### 3.3 Ενεργειακή ανάλυση μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Με δεδομένη την καμπύλη διάρκειας της παροχής του υδατορέματος σε εξεταζόμενη διατομή είναι δυνατός ο υπολογισμός της ενέργειας που αναμένεται να παραχθεί ετησίως καθώς και η επιλογή του μεγέθους του υδροστροβίλου με τον οποίο επιτυγχάνεται η καλύτερη ενεργειακή αξιοποίηση του υδατορέματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του μεγέθους του

υδροστρόβιλου τίθεται από το περιορισμένο εύρος παροχής λειτουργίας του υδροστρόβιλου σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο εύρος της διαθέσιμης επιφανειακής απορροής του υδατορέματος.

Στην περίπτωση όπου ο ανάντη ταμιευτήρας έχει μεγάλη χωρητικότητα ο προβληματισμός αυτός δεν είναι τόσο κρίσιμος καθώς, χάρη στη δυνατότητα αποθήκευσης της επιφανειακής απορροής ή μεγάλου μέρους αυτής στον ταμιευτήρα, αποσυνδέεται για κάποιο χρονικό διάστημα η παροχή λειτουργίας της εγκατάστασης από τη διαθέσιμη, σε κάθε χρονική στιγμή, επιφανειακή απορροή.

Όμως στα μΥΗΕ, τα οποία για οικονομικούς αλλά και για περιβαλλοντικούς κυρίως λόγους δεν έχουν ταμιευτήρα μεγάλης χωρητικότητας, το πρόβλημα της επιλογής του μεγέθους του υδροστρόβιλου είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Η επιλογή του μεγέθους του υδροστρόβιλου επηρεάζεται σημαντικά από το εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετεύεται σε ισχυρό διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο ή εάν το ΥΗΕ τροφοδοτεί μικρό αυτόνομο δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση η επιλογή επηρεάζεται και από το εάν ισχύει ενιαίο ή διαφορικό τιμολόγιο της ηλεκτρικής ενέργειας (πχ. σε ορισμένες χώρες η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας εξαρτάται από την εποχή του έτους και τη μεταβαλλόμενη ζήτηση ανάλογα με την εποχή οπότε όταν μεγαλώνει η ζήτηση αυξάνεται και η τιμή). Στην περίπτωση τροφοδοσίας αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου σημαντικό κριτήριο για την επιλογή αποτελεί η κατά το δυνατό καλύτερη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια  $E$  που παράγεται σε κάθε ποσοστό ( $\varepsilon_i\%, \varepsilon_{i+1}\%$ ) του χρόνου στην καμπύλη διάρκειας είναι ίση προς τη μέση ισχύ  $\bar{N}$  στο διάστημα αυτό επί το αντίστοιχο χρονικό διάστημα εκφρασμένο σε ώρες. Για ετήσια καμπύλη διάρκειας παροχής το πλήθος των ωρών που αντιστοιχεί στο 100% της κλίμακας του χρόνου είναι ίσο προς  $24 \times 365 = 8.760$  ώρες. Είναι δηλαδή:

$$E_i = \bar{N} \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{100} 8760 \quad (3.1)$$

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας, μπορεί να υπολογισθεί η ποσότητα του νερού  $V$  [m<sup>3</sup>] που διέρχεται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Αντίστοιχα προς την Εξίσωση 3.1:

$$V_{r,i} = \bar{Q}_r \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{100} 8760 \quad (3.2)$$

στην οποία  $\bar{Q}_r$   $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  η μέση παροχή του υδατορέματος στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Το άθροισμα όλων των είναι ίσο προς τον όγκο του νερού του υδατορέματος που διέρχεται από τη θέση της υδροληψίας σε χρονικό διάστημα ενός έτους. Εάν αντί της μέσης παροχής του υδατορέματος τεθεί η μέση παροχή που διέρχεται από τον υδροστρόβιλο  $\bar{Q}_t$   $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  προκύπτει η ποσότητα του νερού που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο σε κάθε ποσοστό του χρόνου.

$$V_{t,i} = \bar{Q}_t \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{100} 8760 \quad (3.3)$$

Το άθροισμα όλων των επιμέρους όγκων εκφράζει τον όγκο του νερού που αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ο λόγος  $\frac{\sum V_{t,i}}{\sum V_{r,i}}$

χαρακτηρίζεται ως βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης και όσο η τιμή του πλησιάζει προς την μονάδα τόσο καλύτερη η ενεργειακή αξιοποίηση του υδατορέματος. Σύμφωνα με την νομοθεσία σε μΥΗΕ ισχύος μικρότερης των 5[MW] ο λόγος αυτός δεν μπορεί να είναι μικρότερος του 0.75.

Μία έννοια που σχετίζεται με την επιλογή της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είναι ο ετήσιος συντελεστής φορτίου  $\Sigma\Phi$  που ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που παράγεται από τον ΥΗΣ κατά τη διάρκεια ενός έτους (λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της διαθέσιμης παροχής και τις περιόδους συντήρησης) προς την ενέργεια που θα παρήγαγε το έργο εάν ο υδροστρόβιλος λειτουργούσε συνεχώς επί ένα έτος υπό την εγκατεστημένη ονομαστική του ισχύ  $N$ , δηλαδή:

$$\Sigma\Phi = \frac{\Sigma E_i}{8760 \cdot N} \quad (3.4)$$

Στα μΥΗΕ ο ετήσιος συντελεστής φορτίου είναι υψηλός, της τάξεως του 0.7-0.8, αντίθετα με τα μεγάλα ΥΗΕ στα οποία ο συντελεστής φορτίου είναι της τάξης του 0.35.

### 3.4 Διαδικασία επιλογής και επιλογή βέλτιστης θέσης κατασκευής μικρού υδροηλεκτρικού έργου

Έστω ότι εξετάζεται η υδροηλεκτρική αξιοποίηση ενός υδατορέματος με την κατασκευή ενός μΥΗΕ. Οι πιθανές θέσεις κατασκευής του φράγματος και του ΥΗΣ είναι θεωρητικά άπειρες, εάν δεν συντρέχουν λόγοι απαγορευτικοί, όπως οικολογικοί, κατασκευαστικοί κλπ. Σκοπός είναι να επιλεγεί η θέση η οποία συγκεντρώνει τα βασικά πλεονεκτήματα, όπως μεγάλη επιφανειακή απορροή και υψηλή τιμή της υδραυλικής πτώσης ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας.

Σε κάθε σημείο του υδατορέματος, θεωρούμενο ως υποψήφιο σημείο κατασκευής του φράγματος και της υδροληψίας, αντιστοιχεί μία επιφάνεια της λεκάνης απορροής, η οποία συνεχώς αυξάνει όσο το εξεταζόμενο σημείο μετατοπίζεται προς τα κατάντη. Θα πρέπει αρχικά να γίνει η χάραξη της μηκοτομής του κυρίου υδατορέματος, δηλαδή της στάθμης  $z$  [m] συναρτήσεως του αναπτύγματος  $x$ [m], όπως προκύπτει από χάρτη κλίμακας 1:50.000 ή 1 :50.000. Η μηκοτομή του υδατορέματος καταλήγει στη θάλασσα, στάθμη  $z=0$ , από την οποία μετριέται και το ανάπτυγμα του υδατορέματος. Εάν γίνει η υπόθεση ότι η ετήσια επιφανειακή απορροή του υδατορέματος είναι ανάλογη της επιφάνειας της αντίστοιχης λεκάνης απορροής είναι πλέον δυνατή η χάραξη σε διάγραμμα με οριζόντιο άξονα το ανάπτυγμα  $x$  του υδατορέματος των ακόλουθων καμπυλών:

- της στάθμης  $z$  του υδατορέματος
- της επιφάνειας  $A$  [km<sup>2</sup>] της λεκάνης απορροής
- της ετήσιας επιφανειακής απορροής  $V$  [hm<sup>3</sup>]
- της υδραυλικής ενέργειας  $E$  που αντιστοιχεί στην ετήσια ποσότητα  $V$ , από τη θέση στάθμης  $z$  μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας  $z=0$ , εάν δεν ληφθούν υπόψη βαθμοί απόδοσης και θεωρηθεί πλήρης ενεργειακή αξιοποίηση του νερού

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο κατ' αρχήν εντοπισμός των προσφορότερων θέσεων κατά μήκος του υδατορέματος από ενεργειακής και μόνο πλευράς. Για να είναι εφικτή η κατασκευή ενός ΥΗΣ θα πρέπει να συντρέχουν και άλλοι λόγοι όπως η δυνατότητα κατασκευής των έργων,

η δυνατότητα προσπέλασης, άλλες χρήσεις της γης κλπ. Οι θέσεις αυτές στη συνέχεια αξιολογούνται οικονομοτεχνικά με σκοπό να επιλεγεί η βέλτιστη θέση.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται σχετικά εύκολα σήμερα με τη χρήση μεθόδων Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS) στις οποίες με την είσοδο ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους και με εφαρμογή μαθηματικοποιημένων κριτηρίων μπορούν να πραγματοποιηθούν όλες οι παραπάνω διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, για μια περιοχή μπορεί να βρεθεί όλο το υδρογραφικό δίκτυο, να προσδιοριστούν οι επιμέρους λεκάνες απορροής, να προστεθούν οι χρήσεις γης και να ορισθούν διάφορα κριτήρια τα οποία να εφαρμόζονται ταυτόχρονα ώστε να προκύψουν οι δυνητικά κατάλληλες περιοχές.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο γραφείο με μικρό υπολογιστικό κόστος και έτσι δίνεται η δυνατότητα στο μηχανικό να εντοπίσει τα σημεία τα οποία θα πρέπει να αξιολογήσει με επίσκεψη στο πεδίο ως προς την καταλληλότητά τους.

### **3.5 Γενικές παρατηρήσεις περί διαμόρφωσης μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού**

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) ενός ΥΗΕ στεγάζει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του έργου και εξασφαλίζει την είσοδο και απαγωγή της παροχής που προσάγεται στους υδροστροβίλους. Η διαμόρφωσή του εξαρτάται από τον τύπο του ΥΗΕ, τον τύπο και το πλήθος των υδροστροβίλων και την ονομαστική τους ισχύ. Η επιλογή της θέσης του ΥΗΣ και η διαμόρφωση του ΥΗΣ πρέπει να εξασφαλίζουν την υψηλή απόδοση, την ασφάλεια (κυρίως έναντι πλημμυρικών φαινομένων), την ευκολία στην πρόσβαση συντήρηση και επιτήρηση του εξοπλισμού με την κατά το δυνατόν μικρή επιβάρυνση του προϋπολογισμού.

Εκτός από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας και τον έλεγχο αυτού, ο ΥΗΣ περιλαμβάνει εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την εγκατάσταση και συντήρηση του κύριου εξοπλισμού όπως η γερανογέφυρα, αντλίες αποστράγγισης (εάν απαιτούνται), εργαλεία επισκευών (δράπανο, ηλεκτροσυγκόλληση, τροχός κλπ). Στη διαμόρφωση του ΥΗΣ θα πρέπει να προβλεφθεί χώρος πρόσβασης και συναρμολόγησης του εξοπλισμού και θύρες κατάλληλων διαστάσεων για την εισαγωγή του εξοπλισμού. Στον ΥΗΣ διαμορφώνεται χώρος γραφείου ελέγχου (control room) στον οποίο φυλάσσονται όλα τα σχέδια της εγκατάστασης και εγχειρίδια του εξοπλισμού, χώρος αποθήκευσης των ανταλλακτικών και λιπαντικών και χώροι για τις ανάγκες του προσωπικού (όπως WC, αποδυτήρια), πάγκος εργασίας.

Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να ληφθεί για το χώρο του (ή των) μετασχηματιστή ισχύος ο οποίος πρέπει να πληροί τους ισχύοντες κανονισμούς ώστε να εξασφαλίζεται ή ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού.

Τα μΥΗΕ διακρίνονται σε αυτά στα οποία η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω εκτροπής του υδατορέματος, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ΥΗΕ εκτροπής, και σε αυτά στα οποία η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω του έργου υδροληψίας και τα οποία χαρακτηρίζονται ως ΥΗΕ κατά το ρου του ποταμού ή ως ΥΗΕ ροής. Τα ΥΗΕ ροής έχουν συνήθως μικρή υδραυλική πτώση, η οποία επιτυγχάνεται από εκχειλιστή μικρού ύψους, χωρίς την παρεμβολή διώρυγας ή αγωγού

προσαγωγής. Αντίθετα τα ΥΗΕ εκτροπής έχουν υδραυλική πτώση συνήθως μεγαλύτερη των 15 m (από 15 έως 500 m περίπου) και ο ΥΗΣ τροφοδοτείται μέσω διώρυγας και αγωγού προσαγωγής ή μόνο μέσω αγωγού προσαγωγής. Για λόγο αυτό τα μικρά ΥΗΕ εκτροπής εξοπλίζονται με υδροστροβίλους Francis ή δράσεως (Pelton, Tui-go ή Coss-Flow). Αντίθετα τα μικρά ΥΗΕ ροής εξοπλίζονται με υδροστροβίλους αξονικής ροής ή Francis ανοικτού θαλάμου.

Σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ υδροστροβίλου οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα. Όταν όμως αυτό είναι δυνατό, συνήθως για υδροστροβίλους Francis ή Pelton, η επιλογή οριζόντιου άξονα παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως ευκολότερη εγκατάσταση, ευκολία στην επίβλεψη και συντήρηση, μικρότερο απαιτούμενο ύψος του ΥΗΣ, ευκολία στην εγκατάσταση σφονδύλου, με το μειονέκτημα όμως ότι οι συνολικές διαστάσεις της κάτοψης του ΥΗΣ προκύπτουν αυξημένες σε σύγκριση με την κατακόρυφη διάταξη.

Η εγκατάσταση δύο όμοιων υδροστροβίλων αντί ενός ισοδύναμου ενδέχεται να αντιστοιχεί σε σαφή βελτίωση της ενεργειακής αξιοποίησης, όμως αντιστοιχεί και σε αύξηση του ύψους της επένδυσης. Η τελική επιλογή προκύπτει από οικονομοτεχνική μελέτη. Επίσης, σε περίπτωση εγκατάστασης δύο υδροστροβίλων σε μΥΗΕ δεν είναι πάντοτε προφανής η επιλογή δύο ταυτόσημων υδροστροβίλων (παρά τα προφανή πλεονεκτήματα που έχει η επιλογή αυτή όσον αφορά τα ανταλλακτικά και την ευελιξία της λειτουργίας) ή ακόμη υδροστροβίλων του ίδιου τύπου. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μικρών ΥΗΕ των οποίων η καμπύλη διάρκειας της παροχής είναι απότομη, όπως συνήθως συμβαίνει με τα υδατορέματα στο ελληνικό χώρο, η επίτευξη του ορίου 0.75 στο βαθμό αξιοποίησης του έργου μπορεί να οδηγήσει στη χρήση ενός μικρού υδροστροβίλου Pelton και ενός μεγαλύτερου Francis.

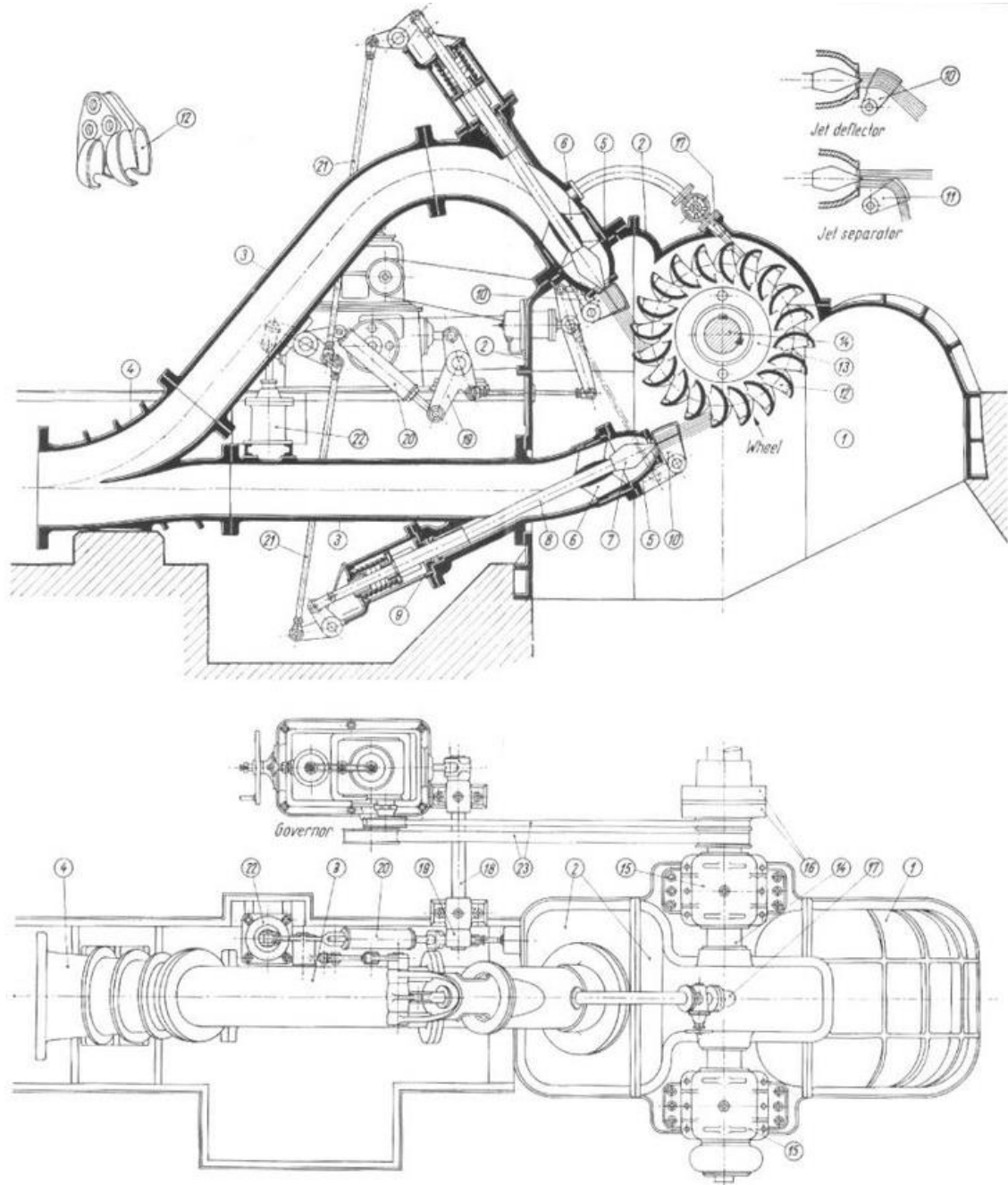
### **3.6 Διαμόρφωση με υδροστροβίλο τύπου Pelton ή cross flow**

Οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton χρησιμοποιούνται κατά κανόνα σε υψηλές υδατοπτώσεις. Αποτελούν στροβίλους εκτόξευσης. Το νερό στους στροβίλους αυτούς έχει την ατμοσφαιρική πίεση πριν και μετά την επαφή του με τα πτερύγια. Το σύστημα των πτερυγίων βρίσκεται σε κάποιο ύψος πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού κατάντη τους, που σημαίνει ότι το ύψος αυτό χάνεται από πλευρά εκμετάλλευσης της ενέργειας. Τα ύψος αυτό όμως είναι ελάχιστο σχετικά με το ύψος πτώσης. Το νερό εκτοξεύεται εφαπτομενικά της περιφέρειας του τροχού. Οι εκτοξευτήρες (ακροφύσια) καθοδηγούν τη δέσμη του νερού επάνω σε μια σειρά πτερυγίων, που έχουν τη διατομή κουταλιού, και είναι στερεωμένοι πάνω στην περιφέρεια του στροβίλου (τροχού).

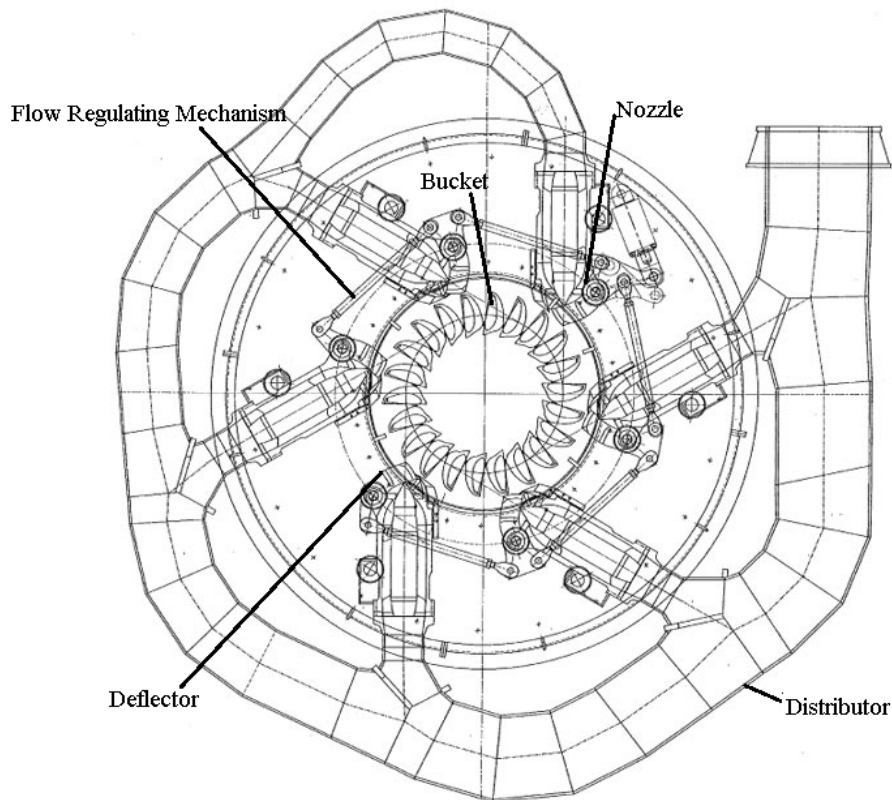
Οι μικρής ισχύος (έως 500[kW]) υδροστροβίλοι Pelton με 1 ή 2 το πολύ ακροφύσια μπορούν να είναι είτε οριζοντίου είτε κατακόρυφου άξονα. Χαρακτηριστικό του ΥΗΣ είναι η ημικυκλική διατομή του η οποία επιχωματώνεται στην εξωτερική πλευρά προκαλώντας έτσι ελάχιστη παρέμβαση στον περιβάλλοντα χώρο. Στην περίπτωση περισσοτέρων των 2 ακροφυσίων, ο υδροστροβίλος Pelton είναι οπωσδήποτε κατακόρυφου άξονα.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται σε τομή κατά τον άξονα της φλέβας και σε κάτοψη η διαμόρφωση ενός στροβίλου τύπου pelton οριζοντίου άξονα με 2 ακροφύσια. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται σε κάτοψη η διαμόρφωση υδροστροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια.





Σχήμα 3.2: Υδροστρόβιλος Pelton οριζοντίου άξονα (Petley, 2018)



Σχήμα 3.3: Διαμόρφωση υδροστροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια (<http://www.bflhydro.com/>).

Οι υδροστροβίλοι Cross Flow είναι πάντοτε οριζόντιου άξονα και για το λόγο αυτό ο ΥΗΣ με υδροστροβίλο Cross Flow σχεδιάζεται όμοια με ΥΗΣ εξοπλισμένο με υδροστροβίλο Pelton οριζοντίου άξονα.

### 3.7 Διαμόρφωση με υδροστροβίλο τύπου Francis

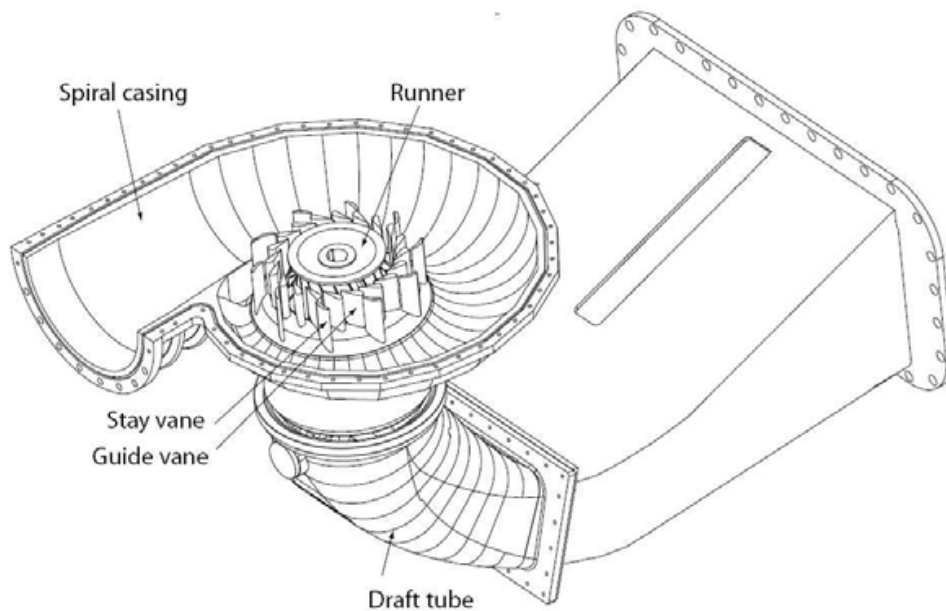
Αντίστοιχα με τους στροβίλους Pelton, η τοποθέτησή των στροβίλων Francis, ανάλογα με τα στοιχεία του έργου και το μέγεθός τους, μπορεί να είναι με τον άξονα οριζόντιο (στροβίλοι μικρής ισχύος) ή κατακόρυφο (μεγαλύτεροι στροβίλοι).

Το σύστημα αποτελείται από δύο ομόκεντρες στεφάνες. Μια σταθερή και μια κινητή. Η σταθερή στεφάνη (διανομέας) καθοδηγεί και μοιράζει το νερό, έτσι που να μπαίνει με την κατάλληλη γωνία στη δεύτερη στεφάνη (δρομέας), που περιστρέφει τον άξονα. Και οι δύο στεφάνες έχουν περιφερειακά μια σειρά πτερυγίων. Τα πτερύγια του διανομέα είναι ρυθμιζόμενα, για να προσαρμόζονται καλύτερα στις μεταβολές της παροχής, ενώ του δρομέα σταθερά συνδεδεμένα με τη στεφάνη. Το νερό οδηγείται από τα πτερύγια του διανομέα, εφαπτομενικά προς την περιφέρεια του δρομέα και ταυτόχρονα με κατάλληλη κλίση προς τα πτερύγιά του.

Η ακτινωτή ροή δρα πάνω στα πτερύγια του δρομέα, προκαλώντας την επιτάχυνσή του, ενώ η ρύθμιση των πτερυγίων του διανομέα δίνει υψηλό βαθμό απόδοσης στη λειτουργία της τουρμπίνας για ένα εύρος συνθηκών ροής. Καθώς το νερό κινείται μέσα στο δρομέα, η ακτίνα

περιστροφής του μειώνεται, πράγμα που επαυξάνει τη δράση του. Ο άξονας περιστροφής του δρομέα μεταδίδει την κίνησή του στην ηλεκτρογεννήτρια, που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

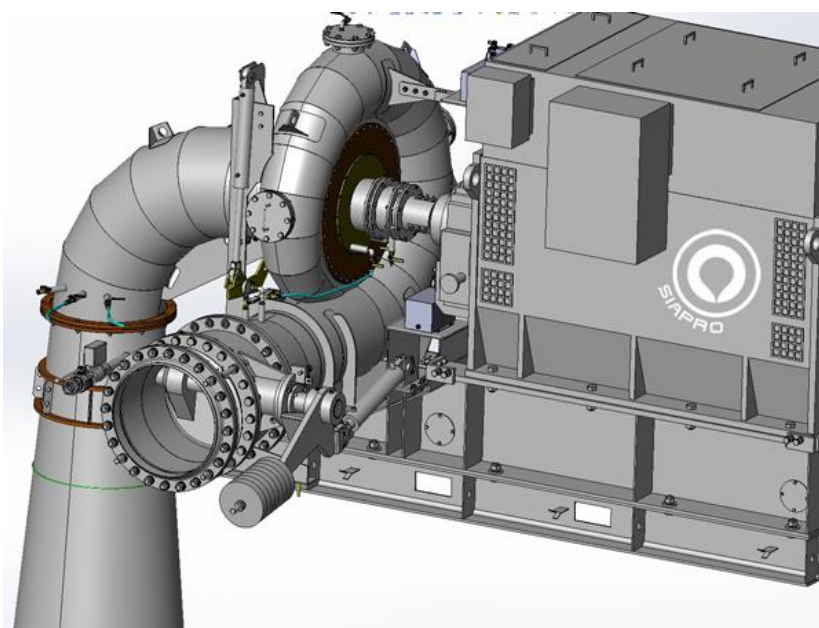
Στο σχήμα 3.4 που ακολουθεί φαίνεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση διαμόρφωση στροβίλου Francis κατακόρυφου άξονα.



Σχήμα 3.4: Υδροστρόβιλος Francis κατακόρυφου άξονα(<https://gradeup.co/>).

Οι υδροστρόβιλοι Francis έχουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα, ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς αντιστρεπτής λειτουργίας.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται διαμόρφωση στροβίλου Francis μικρής ισχύος οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 3.5: Υδροστρόβιλος Francis μικρής ισχύος οριζοντίου άξονα (της εταιρείας Siapro).

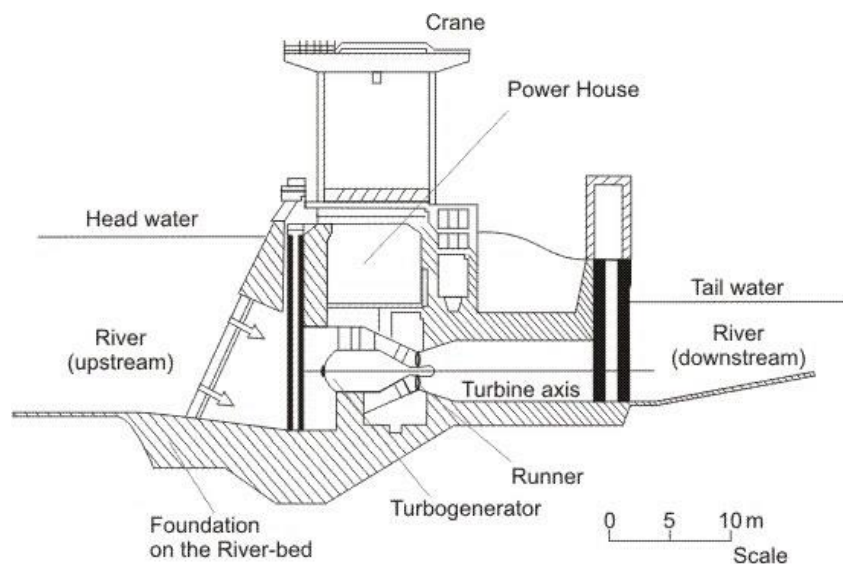
Οι τουρμπίνες Kaplan είναι τύπου προπέλας με ρυθμιζόμενους έλικες και αποτελούν εξέλιξη της τουρμπίνας Francis, δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από χαμηλές υδατοπτώσεις, για τις οποίες δεν μπορούσε να εφαρμοστεί η τουρμπίνα Francis. Επομένως η διαμόρφωση των στροβίλων αυτών δεν διαφέρει με αυτή των Francis εκτός από τα έργα ανάντη που δεν είναι για να εξυπηρετούν τόσο μεγάλο ύψος.

### 3.8 Διαμόρφωση με υδροστρόβιλο αξονικής ροής

Οι τουρμπίνες αυτές είναι βυθισμένες μέσα στο νερό, στη δίοδο του από ανάντη προς τα κατόντη. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση του μεγέθους των εγκαταστάσεων και την οικονομία της εγκατάστασης

Οι υδροστρόβιλοι Bulb εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία σε πολύ μικρές υδατοπτώσεις, μέχρι 30m, εκτοπίζοντας τις Kaplan από το εύρος αυτό. Η βασική διαφορά από τις Kaplan βρίσκεται στο γεγονός ότι η Bulb τοποθετούνται αξονικά στη δίοδο του νερού από την οποία περιστρέφεται ο δρομέας, και όχι από τη διοχέτευση του νερού μέσω του σαλίγκαρου, όπως στις Kaplan. Έχουν υψηλότερη απόδοση σε πλήρες φορτίο και μεγαλύτερη ικανότητα παροχής από τις Kaplan. Ο αριθμός των πτερυγίων του δρομέα ποικίλλει ανάλογα με την παροχή και το ύψος πτώσης. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι το μικρότερο κόστος κατασκευής του σταθμού παραγωγής.

Στο Σχήμα 3.6 που ακολουθεί φαίνεται η εγκατάσταση υδροστροβίλου αξονικής ροής τύπου Bulb.



Σχήμα 3.6: Υδροστρόβιλος αξονικής ροής τύπου Bulb.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε αναφορά στη γενική διαμόρφωση ενός μΥΗΕ, και στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναφέρονται πιο αναλυτικά τα έργα πολιτικού μηχανικού.

## 4 Έργα πολιτικού μηχανικού

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα απαιτούμενα έργα πολιτικού μηχανικού που συναντώνται σε ένα μΥΗΕ. Τα έργα αυτά είναι συνάρτηση της παροχής του υδατορέματος, της μορφολογίας της περιοχής και του διαθέσιμου ύψους πτώσης.

### 4.1 Φράγματα

Τα φράγματα είναι αναπόσπαστα μέρη των παραδοσιακών ΥΗΕ. Κατασκευάζονται κάθετα στη ροή των ποταμών ανακόπτοντας την και δημιουργώντας έτσι στα ανάντη τους τον ταμιευτήρα. Επακόλουθη είναι η αύξηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στα ανάντη επομένως και του διαθέσιμου ύψους πτώσης.

Στην περίπτωση των μΥΗΕ, όταν το έδαφος είναι σχετικά επίπεδο, ένα μικρό φράγμα για την ανύψωση της στάθμης μπορεί να είναι αρκετό για τη δημιουργία του αναγκαίου ύψους πτώσης και για την απαιτούμενη ισχύ. Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας στη σημασία των φραγμάτων είναι ότι με την ύπαρξη τους η υδροληψία μπορεί να βρίσκεται σημαντικά ψηλότερα από τον πυθμένα λαμβάνοντας έτσι νερό απαλλαγμένο κατά μεγάλο μέρος από την παρουσία στερεοπαροχής.

Τα φράγματα αποτελούν εν γένει ακριβές κατασκευές καθώς και μείζονα περιβαλλοντική παρέμβαση, οπότε στα μΥΗΕ γίνεται προσπάθεια να αποφεύγεται η χρήση τους ή έστω να ελαχιστοποιείται το μέγεθός τους. Γι' αυτό και σε πολλές περιπτώσεις αντικαθίστανται από κατάλληλα διαστασιολογημένες δεξαμενές φόρτισης ειδικά σε θέσεις με μεγάλο ύψος πτώσης (Μπαλαράς, et al., 2006).

#### 4.1.1 Τύποι φραγμάτων

Ο τύπος και το μέγεθος του φράγματος που θα κατασκευαστεί εξαρτάται από τις τοπογραφικές και γεωλογικές συνθήκες της περιοχής, τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων υλικών κατασκευής στην περιοχή καθώς και τις ανάγκες του έργου σε νερό. Γενικά ταξινομούνται ανάλογα με το σκοπό, τη χρήση τους, τη στατική τους συμπεριφορά (δηλαδή τους μηχανισμούς με τους οποίους παραλαμβάνουν τις δυνάμεις και ροπές που ασκεί το νερό σε αυτά και τις μεταφέρουν στο έδαφος) και τα υλικά κατασκευής τους. Επειδή όμως στο παρόν εγχειρίδιο εξετάζονται τα μΥΗΕ ο διαχωρισμός θα γίνει ως προς τη στατική τους συμπεριφορά και τα υλικά κατασκευής.

Ως προς τη στατική τους συμπεριφορά τα φράγματα διακρίνονται σε βαρύτητας και τοξωτά. Στα πρώτα το ίδιο βάρος της κατασκευής παραλαμβάνει τις δυνάμεις ολίσθησης και ανατροπής τις οποίες δημιουργεί το νερό σε αυτά. Αντίθετα τα τοξωτά φράγματα έχουν τη μορφή κελύφους με την κυρτή επιφάνεια προς τα ανάντη και μεταβιβάζουν τις δυνάμεις ολίσθησης και ανατροπής που ασκεί το νερό στα πλευρικά αντερείσματα, δεδομένου ότι τα τελευταία έχουν τις κατάλληλες αντοχές για να τις παραλάβουν.

Ως προς τα υλικά κατασκευής διακρίνονται σε χωμάτινα, λιθόρριπτα και τσιμεντένια. Συναντώνται επίσης και φράγματα με συνδυασμό των παραπάνω υλικών κατασκευής ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και διάφορες παραλλαγές ως προς τη χρήση του κάθε υλικού.

Χαρακτηριστικό κάθε φράγματος είναι η επιδίωξη η στάθμη του νερού να βρίσκεται διαρκώς χαμηλότερα από τη στάθμη της στέψης, καθώς μια άτακτη υπερχειλίση ενδέχεται να αποβεί μοιραία τόσο για τον ΥΗΣ που βρίσκεται συνήθως στα κατάντη, όσο και για το ίδιο το φράγμα και τις κατάντη περιοχές. Για το σκοπό αυτό τοποθετείται σε κάθε φράγμα μια διάταξη υπερχειλίσης. Η στέψη της υπερχειλίσης βρίσκεται χαμηλότερα από αυτή του φράγματος, ενώ η υψομετρική αυτή διαφορά μελετάται έτσι ώστε να διοχετεύεται ασφαλώς η πλημμύρα σχεδιασμού. Οι διατάξεις αυτές είναι αποκλειστικά από σκυρόδεμα, οπότε στην περίπτωση χωμάτινων ή λιθόρριπτων φραγμάτων αποτελούν ξεχωριστή κατασκευή στο έργο καθότι αυτά είναι μη υπερπηδητά.

Στην περίπτωση που η κατασκευή του φράγματος δεν γίνεται με σκοπό τη δημιουργία ταμιευτήρα, όπως ισχύει συνήθως στα μΥΗΕ, και το μήκος του φράγματος που σχεδιάζεται είναι μικρό, υιοθετείται συνήθως η λύση του φράγματος υπερχειλίσης, δηλαδή ενός φράγματος που έχει σε όλο το μήκος του τη διατομή ενός υπερχειλιστή. Αυτά κατασκευάζονται αποκλειστικά από σκυρόδεμα.

Τα φράγματα εμφανίζουν σύνθετη συμπεριφορά ως προς τα εξωτερικά φορτία και τα εσωτερικά εντατικά μεγέθη γεγονός που είναι σε μεγάλη αντίθεση με τη φαινόμενη απλότητα της δομής τους. Πιο συγκεκριμένα, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ασύμμετρες τρισδιάστατες κατασκευές από υλικά με φυσικές και μηχανικές ιδιότητες που εμφανίζουν πολλές αβεβαιότητες. Ταυτόχρονα κατασκευάζονται σε μη ομογενείς ανισοτροπικούς εδαφικούς σχηματισμούς. Ο συνδυασμός αυτός δημιουργεί μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ του φράγματος και της θεμελίωσής του, ιδιαίτερα κατά τη σταδιακή πλήρωση του φράγματος.

Πολλά από τα φορτία του φράγματος είναι καλώς ορισμένα ως προς τη χωρική κατανομή τους, το μέγεθός τους και τη διεύθυνσή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ίδιο βάρος της κατασκευής και η υδροστατική πίεση από την παρουσία του νερού. Τα υπόλοιπα φορτία, πολλά εκ των οποίων είναι εξίσου σημαντικά με τα παραπάνω, είναι δύσκολο να οριστούν, ενώ μπορεί να είναι και μεταβλητά ως προς το χρόνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πίεση πόρων που προκαλείται λόγω της άνωσης, καθώς επίσης και τα θερμοκρασιακά φορτία από την ενυδάτωση του σκυροδέματος σε περίπτωση φράγματος κατασκευασμένο από σκυρόδεμα.

Τα φορτία που επιδρούν στα φράγματα συνήθως χωρίζονται σε κύρια, δευτερεύοντα και τυχηματικά. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ως προς την πιθανότητα εμφάνισης της φόρτισης καθώς επίσης και τη σχετική σπουδαιότητά της. Τα κύρια φορτία περιλαμβάνουν:

Το ίδιο βάρος της κατασκευής  $G$

$$G = \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i \quad (4.1)$$

Όπου  $\gamma_i \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$  το ειδικό βάρος των υλικών που βρίσκονται στη διατομή και  $A_i [m^2]$  το εμβαδό της αντίστοιχης περιοχής υλικού στη διατομή του φράγματος. Είναι προφανές ότι αυτή η διαδικασία βγάζει μια κατανομή του βάρους του φράγματος μεταβλητή κατά μήκος.

Η υδροστατική πίεση  $W_1$  στα ανάντη του φράγματος και  $W_2$  στα κατάντη του φράγματος οι οποίες έχουν τριγωνική κατανομή, δηλαδή τιμή  $0$  στην ελεύθερη επιφάνεια και τιμή  $\gamma_w \cdot H_i$  στη βάση του

φράγματος όπου  $\gamma_w \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$  το ειδικό βάρος του νερού και  $H_i[m]$  το ύψος της στήλης νερού στα ανάντη και στα κατόντη αντίστοιχα. Επομένως η αντίστοιχη οριζόντια δύναμη είναι

$$W_{1\eta 2} = \frac{1}{2} \gamma_w H_{1\eta 2}^2 \quad (4.2)$$

Η οποία επίσης έχει μεταβλητή τιμή κατά μήκος του φράγματος.

Το νερό εκτός από την οριζόντια συνιστώσα της υδροστατικής πίεσης έχει και κατακόρυφη συνιστώσα επικουρικά με το βάρος της κατασκευής η οποία οφείλεται στην κλίση της ανάντη παρειάς του φράγματος που εκτός από τα τοξωτά φράγματα δεν είναι κατακόρυφη. Η κατακόρυφη αυτή συνιστώσα είναι το βάρος του υπερκείμενου νερού του φράγματος.

Τα δευτερεύοντα φορτία επιδρούν σε διάφορα είδη φραγμάτων ενώ έχουν μικρότερο μέγεθος από τα κύρια, ή εναλλακτικά έχουν μεγάλη σημασία αλλά για συγκεκριμένο τύπο φράγματος. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι αποθέσεις, φορτία λόγω πάγου, φορτία από τη θραύση των κυματισμών, θερμικά φορτία λόγω της εξώθερμης αντίδρασης της πήξης του σκυροδέματος, εσωτερικά εντατικά μεγέθη λόγω της σχετικής δυσκαμψίας του σώματος του φράγματος για μη ομογενή φράγματα, η ένταση λόγω διαφορικών καθιζήσεων της θεμελίωσης του φράγματος για δύσκαμπτα φράγματα, η ένταση που οφείλεται στις υδροστατικές πιέσεις που ασκεί το νερό στα αντερείσματα που είναι σημαντική κυρίως σε τοξωτά φράγματα.

Τα τυχηματικά φορτία είναι αυτά που η πιθανότητα εμφάνισής τους ή η συχνότητα εμφάνισής τους στο έργο είναι μικρή. Οι σεισμικές φορτίσεις ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Κατά τη διαστασιολόγηση του έργου και τον υπολογισμό της καμπύλης στάθμης αποθηκευτικότητας και ανάλογα με το στάδιο της μελέτης πραγματοποιούνται οι κατάλληλοι συνδυασμοί των παραπάνω φορτίσεων. Είναι προφανές ότι κάποιες φορτίσεις είναι αμοιβαίως αποκλειώμενες. Για παράδειγμα η ταυτόχρονη επίδραση στο φράγμα φορτίου λόγω πάγου και λόγω θραύσης κύματος είναι εξαιρετικά απίθανη.

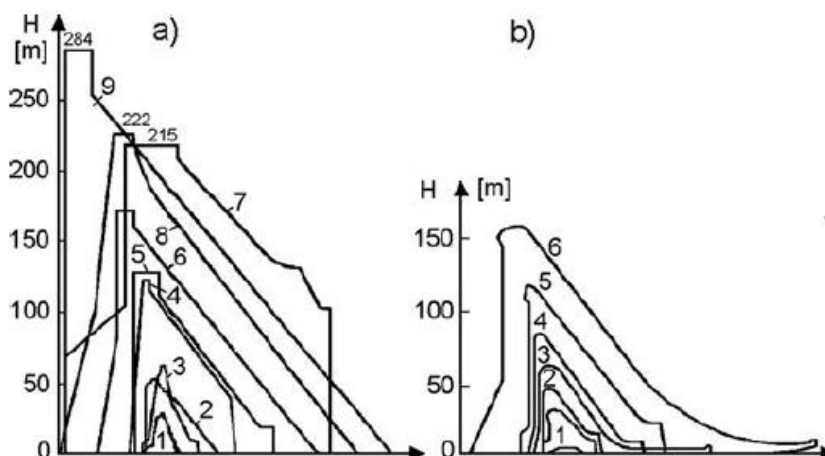
#### 4.1.2 Φράγματα βαρύτητας σκυροδέματος

Κατασκευάζονται από άοπλο σκυρόδεμα ή και από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα RCC. Τα τελευταία είναι τα λεγόμενα Roller Compacted Concrete όπως για παράδειγμα του ΥΗΣ Πλατανόβρυσης στο Νέστο ποταμό όπου ένα μέρος είναι τσιμέντο και 3 τέφρα από το ΘΥΣ της Πτολεμαΐδας. Από τα παλαιότερα φράγματα βαρύτητας στον Ελληνικό χώρο (1931) είναι αυτό του Μαραθώνα Αττικής για την ύδρευση των Αθηνών.

Η λειτουργία των φραγμάτων αυτών στηρίζεται στο βάρος τους με το οποίο και αντισταθμίζουν το σύνολο των πιέσεων, υδροστατικές, άνωση, τις σεισμικές φορτίσεις και τις δυνάμεις ανατροπής. Παράλληλα με την κατάλληλη επιλογή της διατομής και τον έλεγχο των συνθηκών της θεμελίωσης, αποτρέπεται ο κίνδυνος λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Ένα φράγμα βαρύτητας είναι μια συμπαγής, μονολιθική κατασκευή που συνήθως είναι ευθεία στο σχεδιασμό αν και μερικές φορές μπορεί να είναι ελαφρά καμπύλη και η διατομή του είναι περίπου τραπεζοειδής (Bell 1993).

Γενικά, τα φράγματα βαρύτητας μπορεί να ανεχθούν μόνο τις μικρότερες διαφορικές κινήσεις και απαιτούν μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, δεδομένου ότι η αντίσταση στη μετατόπιση και

γενικότερα η απόκριση σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις εξασφαλίζονται από το ίδιο βάρος. Εντούτοις, φράγματα βαρύτητας έχουν κατασκευαστεί σε έντονα διερρηγμένο και διαφορετικής σύστασης (εναλλαγές) πέτρωμα και ακόμα σε ποτάμια αποθέσεις, όπου η θεμελίωση απαιτεί εφαρμογή εξειδικευμένων μεθοδολογιών βελτίωσης πριν την κατασκευή. Πλεονεκτική θέση κατασκευής, είναι συνήθως σε στένωμα μίας κοιλάδας, όπου το υγιές πέτρωμα είναι λογικά κοντά στην επιφάνεια τόσο στη θεμελίωση όσο και στα ακρόβαθρα. Σημαντική επίσης θεώρηση σε μερικές περιοχές είναι η διαθεσιμότητα, σε λογική απόσταση, επαρκών δανειοθαλάμων με κατάλληλα αδρανή για σκυρόδεμα.



Σχήμα 4.1: Διατομές φράγματων βαρύτητας από σκυρόδεμα. (α) Μη υπερπηδητά φράγματα: (1) Grobois (1838), (2) Puentes (1791), (3) Furens (1866), (4) Chambon (1934), (5) Bratskaya (1965), (6) Grand Coolee (1942), (7) Toktogul (1978), (8) Hoover (1935), (9) Grande Dixen s (1961). (β) Υπερπηδητά φράγματα: (1) Tsimlanskaya (1951), (2) Dneprovskaya (1932), (3) Noris (1935), (4) Grand Coolee (1942), (5) Krasnoyarskaya (1970), (6) Shasta (1944) (Tanchev, 2014).

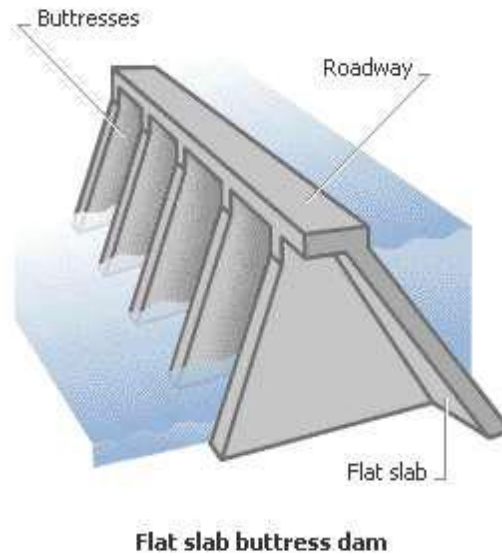
#### 4.1.3 Αντηριδωτά φράγματα

Πρόκειται για πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος η οποία φέρεται σε αντηρίδες μεταβλητού πλάτους. Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις κυρίως στην επιφάνεια θεμελίωσης και λιγότερο στα αντερείσματα, ενώ σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας, επιτυγχάνουν οικονομία στον όγκο του απαιτούμενου σκυροδέματος μέχρι και 90%.

Σε θέσεις όπου τα αδρανή σκυροδέματος είναι σε περιορισμένες ποσότητες, και το πέτρωμα θεμελίωσης ικανοποιητικό, τα αντηριδωτά φράγματα αποτελούν εναλλακτική λύση σε σχέση με άλλα τσιμεντένια φράγματα, τα οποία παράλληλα απαιτούν και πολύ περιορισμένες εκσκαφές στη θεμελίωση.

Τα φράγματα αυτά, συνιστούν μια πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα που κλίνει ανάντη και η οποία στηρίζεται από αριθμό αντηρίδων με άξονες κάθετα προς την πλάκα. Οι αντηρίδες στηρίζουν την πλάκα και μεταφέρουν τις στατικές και δυναμικές ωθήσεις στη θεμελίωση. Είναι περιορισμένης διατομής, εξασκώντας έτσι τεράστια φορτία στη θεμελίωση. Ο σχεδιασμός των αντηρίδων θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να αποτρέπει την ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας θεμελίωσης. Το πρόβλημα πιέσεων λόγω άνωσης (uplift pressure) είναι πρακτικά περιορισμένο στα αντηριδωτά φράγματα και υπάρχει πρόσβαση για την επιθεώρηση της θεμελίωσης αυτών.





Σχήμα 4.2: Μορφή αντηριδωτού φράγματος με επίπεδη ανάντη πλάκα σκυροδέματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).

#### 4.1.4 Τοξωτά φράγματα

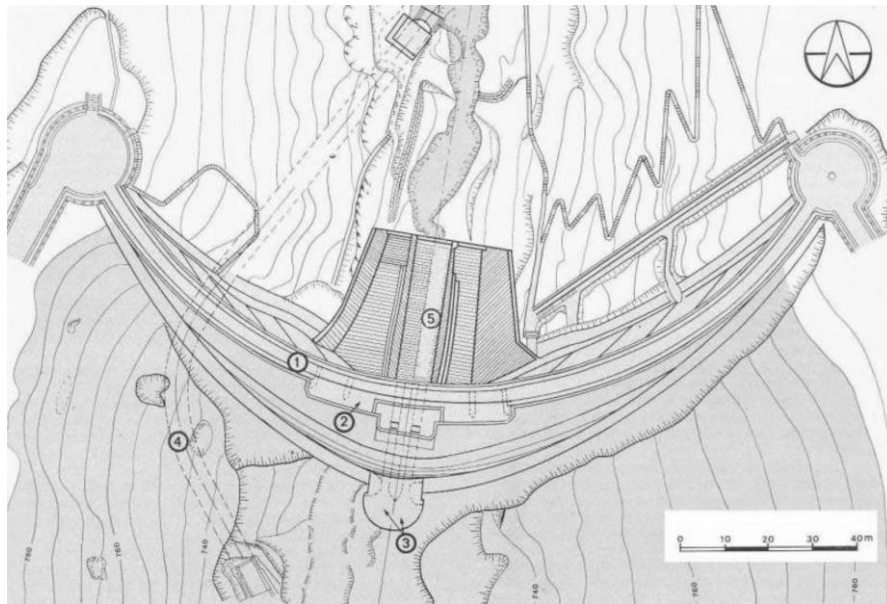
Κατασκευάζονται από άοπλο σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας αλλά ενίοτε και οπλισμένο, είναι δε καμπύλα στο σχεδιασμό με την κυρτή επιφάνεια προς τα ανάντη. Μεταφέρουν τις υδροστατικές πιέσεις στα αντερείσματα. Σε σχέση με τα φράγματα βαρύτητας, επιτυγχάνεται οικονομία στον όγκο του σκυροδέματος έως και 70%, ενώ όταν το πάχος του είναι μεγάλο λειτουργούν εν μέρει και ως φράγματα βαρύτητας (βαρύτητας – τοξωτά).

Σύμφωνα με τον Bell (1993) είναι δυνατόν να αντισταθούν σε μεγάλες παραμορφώσεις των σχηματισμών θεμελίωσης, αρκεί αυτές να είναι ομοιόμορφα διανεμημένες. Μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της οριζόντιας ώθησης από το νερό του ταμιευτήρα στα ακρόβαθρα με τη λειτουργία του τόξου και αυτό σε συνδυασμό με την περιορισμένη διατομή τους, σημαίνει ότι επιβάλλουν ισχυρά θλιπτικά φορτία σε στενές ζώνες στη βάση καθώς και στα ακρόβαθρα. Επομένως η αντοχή της βραχώμαζας στα ακρόβαθρα και στην αμέσως κατάντη περιοχή του φράγματος πρέπει να είναι αδιαμφισβήτητη και το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) αρκετά υψηλό για να διασφαλίσει ότι η παραμόρφωσή της, κάτω από την ώθηση του τόξου, δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να επιτρέψει υπερβολικές παραμορφώσεις του τόξου.

Ιδανικές θέσεις για τα τοξωτά φράγματα είναι σε στενά φαράγγια, όπου οι παρειές είναι ικανές να δεχθούν την ώθηση που προκαλείται από τη λειτουργία του τόξου. Το τόξο πρέπει να πακτώνεται καλά στα ακρόβαθρα. Διακρίνονται δύο κατηγορίες τοξωτών φραγμάτων: 1) σταθερής καμπυλότητας (constant radius) και 2) μεταβλητής καμπυλότητας (μείωση με το βάθος από τη στέψη) (variable radius).

Όταν τα φράγματα είναι διπλής καμπυλότητας, δηλαδή κατά την οριζόντια και κατακόρυφη, τότε καλούνται «Δόμοι». Τέλος, υπάρχουν τοξωτά φράγματα ή δόμοι πολλαπλής καμπυλότητας

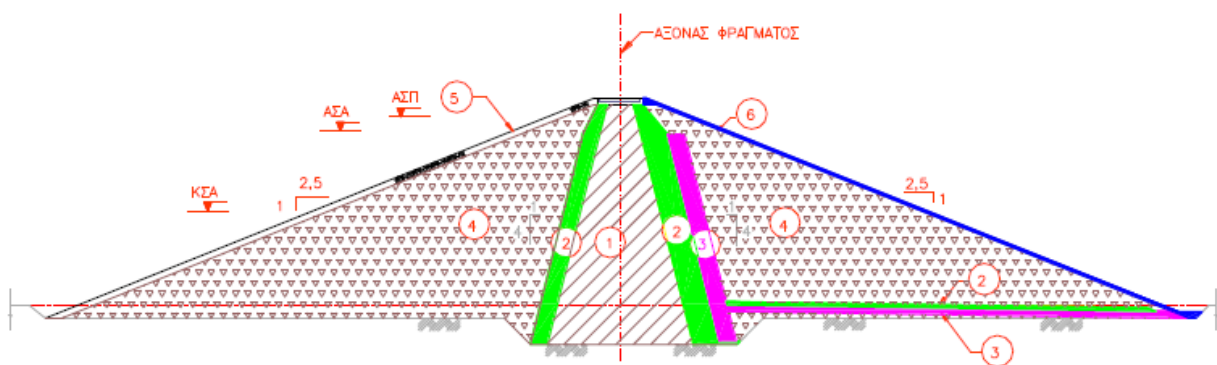
(multiple arch and multiple dome dams), τα οποία κατασκευάζονται με δύο ή περισσότερα επάλληλα τόξα ή δόμους.



Σχήμα 4.3: Κάτοψη τοξωτού φράγματος Ταυρωπού(Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).

#### 4.1.5 Χωμάτινα φράγματα βαρύτητας

Πρόκειται για εύκαμπτες κατασκευές που δεν απαιτούν σχηματισμούς θεμελίωσης εξαιρετικής ποιότητας. Διακρίνονται σε ομογενή χωμάτινα (homogenous earth dams), για τα οποία χρησιμοποιούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου ομοιόμορφα φυσικά υλικά κατασκευής, και σε ετερογενή χωμάτινα ή και λιθόρριπτα (zoned-rolled fill and rock fill dams), τα οποία αποτελούν ζωνώδεις κατασκευές με υλικά διαφόρων γεωμηχανικών ιδιοτήτων και σε διαφορετικά ποσοστά.



Σχήμα 4.4: Τυπική διατομή χωμάτινου Φράγματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018).

Τα χωμάτινα φράγματα είναι επιχώματα εδαφικών και αδρανών υλικών (τραπεζοειδές επίχωμα) με αδιαπέρατο πυρήνα (core) για το έλεγχο της διήθησης διαφυγής (seepage) νερού. Ο πυρήνας συνήθως είναι από αργιλικά υλικά και εάν αυτά δεν είναι διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες τότε χρησιμοποιούνται πλάκες σκυροδέματος ή ασφαλτοσκυρόδεμα. Ο πυρήνας συνήθως εκτείνεται

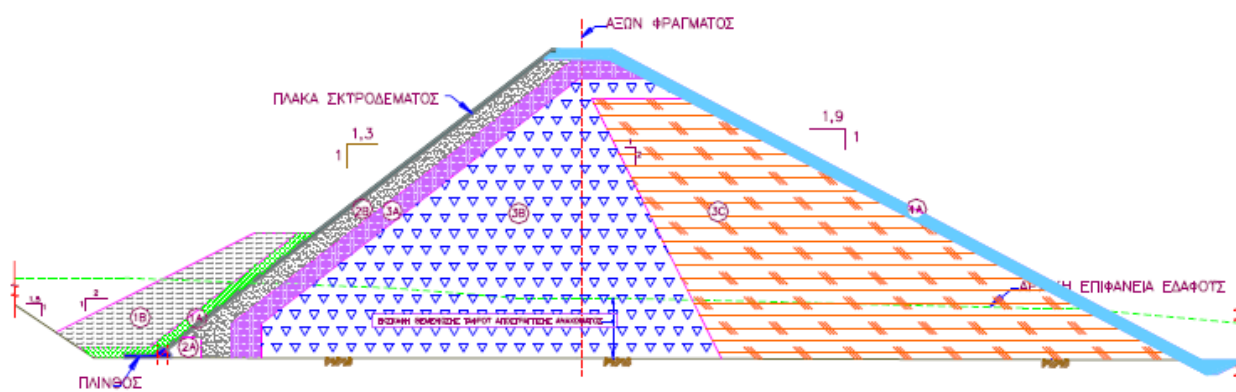
με τη μορφή όνυχα (εκσκαφής – διαφραγματικής τάφρου) εντός των σχηματισμών θεμελίωσης όταν η διήθηση κάτω από το φράγμα πρέπει να ελεγχθεί. Αυτές οι τομές (cut-offs) μπορεί να είναι και αρκετά βαθιά μερικές δε φορές επεκτείνονται και μέσα στα ακρόβαθρα ως πλευρικές τάφροι. Στραγγιστήρια (drains) άμμου ή και χαλίκων τοποθετούνται μέσα και κάτω από το φράγμα για τον έλεγχο επίσης των διαφυγών.

Λόγω της μεγάλης βάσης τους τα χωμάτινα φράγματα μεταφέρουν πολύ μικρότερες τάσεις στη θεμελίωση από τα τσιμεντένια. Επιπλέον πολύ ευκολότερα μπορεί να παραλάβουν παραμορφώσεις, όπως π.χ. αυτές λόγω διαφορικών καθιζήσεων. Έτσι, τα χωμάτινα φράγματα έχουν κατασκευαστεί σε μεγάλη ποικιλία σχηματισμών θεμελίωσης από χαλαρά μη στερεοποιημένα υλικά ποτάμιων αποθέσεων έως πολύ σκληρά πετρώματα.

#### 4.1.6 Λιθόρριπτα φράγματα βαρύτητας

Ένα φράγμα λιθορριπής κατασκευάζεται ως ένα ανάχωμα με λίθους διαφόρων μεγεθών που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της ανάντη αδιαπέραστης ζώνης, Στην ίδια κατηγορία κατατάσσονται και φράγματα με κεντρικό χωμάτινο αδιαπέραστο πυρήνα, όπως και τα χωμάτινα, με διαφορά ότι η κύρια μάζα της επιχωμάτωσης αποτελείται από λίθους. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να προβλεφθεί ζώνη φίλτρου και αποστράγγιση ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση του πυρήνα.

Οι λίθοι που απαρτίζουν την κύρια μάζα του φράγματος πρέπει να έχουν γωνίες (ακανόνιστο σχήμα), δηλαδή να προέρχονται από λατομείο και όχι από ποτάμιες αποθέσεις. Στην ιδανική περίπτωση οι λίθοι πρέπει να είναι ομοιόμορφου μεγέθους και να μην περιέχονται χαλίκια ή λεπτότεροι κόκκοι, γιατί τα υλικά αυτά θα υποχωρήσουν μεταξύ των λίθων μεγαλύτερου μεγέθους με πιθανό αποτέλεσμα την αστάθεια όλης της κατασκευής.



Σχήμα 4.5: Τυπική διατομή Λιθόρριπτου φράγματος με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018)..

Συνήθως η λιθορριπή τοποθετείται κατά στρώσεις, κάθε μία πάχους της τάξεως του 1m. Κάθε στρώση συμπιέζεται με δονητή πριν την εφαρμογή της επόμενης. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι ανάγκη το υλικό να είναι ομοιόμορφου μεγέθους, καθώς η συμπίεση αποτρέπει την τάση διαχωρισμού των λίθων διαφορετικού μεγέθους. Η κλίση των πλευρικών επιφανειών, ανάντη και κατάντη, είναι της τάξεως του οριζόντια:κατακόρυφα = 1.3÷1.4 : 1.

Στην ανάντη βάση του φράγματος πρέπει να κατασκευασθεί αγκύρωση της αδιαπέραστης ζώνης με εκσκαφή στο βράχο της θεμελίωσης όπου διαμορφώνεται τοίχιο σκυροδέματος και στεγανό παραπέτασμα. Η ανάντη αδιαπέραστη ζώνη κατασκευάζεται συνήθως από πλάκες ωπλισμένου σκυροδέματος που συνδέονται μεταξύ τους με κατακόρυφους αρμούς. Το πλάτος των πλακών είναι της τάξεως των 1[m] και το πάχος τους της τάξεως των 30[cm] στο πάνω μέρος του φράγματος και αυξάνεται προς τον πυθμένα. Οι αρμοί μεταξύ των πλακών κατασκευάζονται από λάστιχο (καουτσούκ) ή πλαστικό ώστε να επιτρέπουν μικρές μετατοπίσεις λόγω κατακαθίσεων, χωρίς απώλεια της στεγανότητας. Κατά μήκος κάθε αρμού και στο εσωτερικό του φράγματος κατασκευάζεται δοκός από ωπλισμένο σκυρόδεμα.

#### 4.1.7 Φράγματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

Ο όρος κυλινδρούμενο σκυρόδεμα περιγράφει τον τρόπο κατασκευής με τη χρήση του σκυροδέματος, το οποίο διαστρώνεται και κυλινδρώνεται με χωματουργικά μηχανήματα. Ο όρος που επικράτησε διεθνώς είναι Roller-Compacted Concrete ή πιο απλά RCC από τα αρχικά της αγγλικής ονομασίας.

Ο τρόπος αυτός της κατασκευής συνδυάζει οικονομικά οφέλη και ταχύτατη αποπεράτωση σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους κατασκευής χωμάτινων φραγμάτων, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει τις αντοχές και τη σκληρότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα.

Η τοποθέτηση του RCC γίνεται σε οριζόντιες στρώσεις όπως ακριβώς στα χωμάτινα και λιθόρριπτα φράγματα με τη βοήθεια χωματουργικών μηχανημάτων, χωρίς διακοπή των εργασιών, γεγονός που δίνει ταχύτητα ανύψωσης 10m το μήνα ή και ακόμη περισσότερο.

Στις περισσότερες περιπτώσεις το RCC περιέχει πρόσθετα, συνήθως ιπτάμενη τέφρα ως δραστικό συστατικό του σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό έδωσε τη δυνατότητα μεγαλύτερης κατανόησης του ρόλου των πρόσθετων στο σκυρόδεμα.

Το RCC χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευή προφραγμάτων, όπου η ταχύτητα κατασκευής παίζει καθοριστικό ρόλο. Ορισμένα προφράγματα έφτασαν σε ταχύτητα ανύψωσης 30m/μήνα, ενώ μερικά υπερπηδήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους από το νερό, χωρίς καμιά ζημία ή σοβαρό πρόβλημα (Yatan στην Κίνα και Serra de Mesa στη Βραζιλία).

Το μεγάλο ενδιαφέρον για κατασκευή φραγμάτων RCC οφείλεται σε οικονομικούς λόγους και σε περιπτώσεις που ο χρόνος κατασκευής είναι κριτήριο βασικής σημασίας.

Τα πλεονεκτήματα του RCC στην κατασκευή φραγμάτων σε σύγκριση με τα σκυροδετά φράγματα με τον παραδοσιακό τρόπο είναι η πιο γρήγορη κατασκευή (2.5-3[m] ανύψωση την εβδομάδα σε μεγάλα φράγματα και ακόμη μεγαλύτερη σε μικρά φράγματα), το μειωμένο κόστος καθώς πραγματοποιείται αποτελεσματική χρήση των χωματουργικών μηχανημάτων (μεγάλα φορτηγά, προωθητές (μπουλντόζες), δονούμενοι κυλινδροσυμπιεστές) καθώς και η μικρότερη παρέμβαση στο περιβάλλον μιας και δεν χρειάζονται μεγάλες εκσκαφές για τις προσωρινές εγκαταστάσεις των κλασικών μεθόδων σκυροδέτησης.

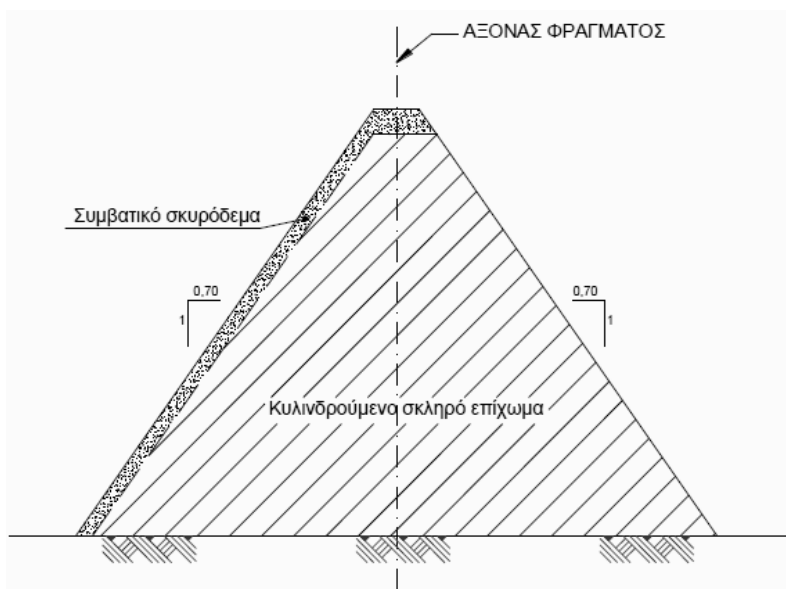
Πλεονεκτήματα εμφανίζονται επίσης και σε σύγκριση με τα χωμάτινα φράγματα καθώς κι εδώ είναι μειωμένος ο χρόνος κατασκευής, τα φράγματα από RCC ενσωματώνουν τον υπερχειλιστή στο σώμα του φράγματος, ο πύργος υδροληψίας περιττεύει αφού μπορεί πλέον η υδροληψία να κατασκευαστεί στην ανάντη πλευρά του φράγματος, ενώ τα μήκη των αγωγών μεταφοράς και των

βοηθητικών αγωγών είναι μικρότερα, γιατί περνούν μέσα από το φράγμα. Συνεπώς είναι μικρότερο το κόστος κατασκευής. Τέλος, σε αντίθεση με τα χωμάτινα, ένα φράγμα από RCC δεν κινδυνεύει να καταστραφεί από υπερπήδηση του νερού.

Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις υπερπήδησης φραγμάτων από RCC κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους χωρίς να σημειωθούν ζημιές σε αυτά. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να κατασκευαστούν τέτοιου τύπου φράγματα σε υδατορέματα που χαρακτηρίζονται από έντονη εποχική διακύμανση, γιατί σε μία περίοδο χαμηλών παροχών μπορεί να σηκωθεί ένα φράγμα αρκούτσως μεγάλο χωρίς την ανάγκη προφράγματος και όταν αυξηθούν οι παροχές το κύριο φράγμα να γεμίζει νερό, ενώ χτίζεται στο πάνω μέρος του.

#### 4.1.8 Φράγματα από σκληρό επίχωμα.

Η κατασκευή των φραγμάτων από RCC ουσιαστικά μηδένισε την κατασκευή φραγμάτων από σκυρόδεμα με την παραδοσιακή μέθοδο. Η ιδέα όμως αυτή οδήγησε στην αναθεώρηση της έννοιας των χωμάτινων φραγμάτων. Υπενθυμίζεται ότι το κύριο πλεονέκτημα της κατασκευής ενός τέτοιου φράγματος είναι η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν υλικά από την περιοχή κάτι που συνήθως δεν είναι εφικτό με το σκυρόδεμα. Τα φράγματα από σκληρό επίχωμα μοιάζουν στη φιλοσοφία με τα RCC, καθότι σηκώνονται σε στρώσεις και το υλικό συμπυκνώνεται με δονούμενους κυλινδρουμεπιεστές με τη διαφορά όμως ότι το υλικό δεν είναι σκυρόδεμα αλλά χώμα. Στο τέλος στην ανάντη παρειά στρώνεται μια πλάκα σκυροδέματος όπως στα λιθόρριπτα φράγματα για την επίτευξη της στεγανότητας.



Σχήμα 4.6: Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκληρό επίχωμα(Σημειώσεις Μαθήματος Σ.Π.Μ. Ε.Μ.Π. "Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα" 2018)..

#### 4.1.9 Λοιποί τύποι φραγμάτων

Εκτός από τα κλασσικά φράγματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στην περίπτωση των μικρών και κυρίως πολύ μικρών ΥΗΕ συναντώνται πολλές φορές διάφοροι άλλοι

τύποι φραγμάτων, συνήθως πολύ απλής κατασκευής, και τα οποία κατασκευάζονται από υλικά που αφθονούν στην περιοχή.

#### α) Λιθόκτιστα φράγματα

Τα λιθόκτιστα φράγματα απαιτούν πολλά εργατικά και λίθους καλής ποιότητας. Οι λίθοι στερεώνονται μεταξύ τους με τσιμεντοκονία. Έτσι ο τύπος αυτός του φράγματος συναντάται σε μικρού μεγέθους φράγματα και σε περιοχές με φθηνά εργατικά. Σχεδιάζονται και λειτουργούν όπως τα φράγματα βαρύτητας σκυροδέματος. Σε όλες τις περιπτώσεις η άμμος για το τσιμεντοκονίαμα καθώς και οι λίθοι πρέπει να είναι καθαροί, χωρίς λάσπες και χώματα, και απαλλαγμένοι οργανικών ουσιών, ενώ το νερό για το τσιμεντοκονίαμα θα πρέπει να έχει μικρή περιεκτικότητα σε άλατα.

#### β) Φράγματα από χαλυβοελάσματα

Στην περίπτωση εδάφους ιδιαίτερα διαπερατού και για ύψος έως 3[m] η είναι δυνατή η διαμόρφωση στεγανού παραπετάσματος από χαλυβοελάσματα κατάλληλης διατομής, σε μονή ή διπλή σειρά. Για να βυθισθούν στο έδαφος τα ελάσματα αυτά απαιτείται η χρησιμοποίηση ειδικού μηχανήματος. Πρέπει όμως να εξετασθεί το κόστος τους που επιβαρύνεται από το γεγονός ότι απαιτούνται υλικά και ειδικός εξοπλισμός των οποίων το κόστος μεταφοράς είναι ενδεχόμενα δυσανάλογα υψηλό, ιδίως για απομακρυσμένες περιοχές.

#### γ) Άλλοι τύποι μικρών πολύ φραγμάτων

Είναι επίσης δυνατή η κατασκευή μικρού φράγματος βαρύτητας με αργλικό πυρήνα και ορθογωνικά πλέγματα από ανοξείδωτο ή γαλβανισμένο συρματόπλεγμα γεμισμένα με χαλίκια ή ακόμη από οριζόντιες ξύλινες δοκούς έμφραξης που συρταρώνουν σε κατακόρυφες υποδοχές

### 4.1.10 Εκτροπή υδατορέματος για την κατασκευή φράγματος

Το έργο αυτό διευκολύνει τις εργασίες κατασκευής του φράγματος με την ομαλή παροχέτευση (εκτροπή) των νερών του ποταμού προς τα κατάντη. Στην περίπτωση ποταμών μεγάλης παροχής νερού, στους οποίους αναμένονται κατά το στάδιο κατασκευής πιθανές πλημμυρικές παροχές, η σήραγγα εκτροπής συνδυάζεται και με την κατασκευή προφράγματος, τελικά δε, με την ολοκλήρωση του έργου, και οι δύο αυτές κατασκευές ενσωματώνονται στο κυρίως έργο.

## 4.2 Ταμιευτήρες

Οι τεχνητές λίμνες διακρίνονται ανάλογα με τον όγκο τους και το σκοπό τους σε διάφορες κατηγορίες. Ανάλογα με τον όγκο τους διακρίνονται σε ταμιευτήρες μικρής και μεγάλης χωρητικότητας. Ανάλογα με τη σκοπιμότητα διακρίνονται σε απλής ή πολλαπλής σκοπιμότητας (ταμιευτήρες υδροηλεκτρικοί, άρδευσης, ύδρευσης, ανάσχεσης πλημμυρών, τουριστικής ανάπτυξης, κ.ά).

Οι ταμιευτήρες μικρής χωρητικότητας έχουν ωφέλιμο όγκο μικρό, που επαρκεί για ημερήσια η εβδομαδιαία ρύθμιση. Έτσι καλύπτονται οι ωριαίες διακυμάνσεις του φορτίου των εγκαταστάσεων. Οι ταμιευτήρες μεγάλης χωρητικότητας έχουν μεγάλο ωφέλιμο όγκο, που φτάνει για ετήσια ή υπερετήσια ρύθμιση.

Όταν λέμε ετήσια ρύθμιση σημαίνει ότι ο ετήσιος όγκος του νερού της λίμνης χρησιμοποιείται με προμελετημένη κατανομή για την κάλυψη των σκοπών για τους οποίους έγινε το φράγμα και κατά τρόπο που να μην παρουσιάζεται έλλειψη το καλοκαίρι, όταν η παροχή των ρευμάτων που τροφοδοτούν τον ταμιευτήρα είναι μικρή.

Για να γίνει ετήσια ρύθμιση πρέπει να είναι γνωστός ο ωφέλιμος όγκος της λίμνης και το ύψος της υδατόπτωσης. Ο όγκος μιας λίμνης περιλαμβάνει το νεκρό όγκο (όγκος νερού που δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί), τον ωφέλιμο όγκο (όγκος χρησιμοποιήσιμου νερού) και τον όγκο συγκράτησης πλημμυρών.

#### 4.2.1 Ταμιευτήρας μικρού υδροηλεκτρικού ροής

Αποτέλεσμα της κατασκευής ενός φράγματος είναι ο σχηματισμός ενός ταμιευτήρα δηλαδή μιας δεξαμενής νερού, η χωρητικότητα της οποίας αποτελεί βασικό στοιχείο για την υδροηλεκτρική αξιοποίηση της φυσικής απορροής. Όπως ήδη αναφέρθηκε στα μικρά ΥΗΕ δεν ενδιαφέρει η κάλυψη αιχμών του ενεργειακού δικτύου και για το λόγο αυτό το φράγμα σκοπό έχει τη δημιουργία της απαραίτητης στάθμης για την επίτευξη ικανοποιητικών συνθηκών στην υδροληψία και όχι τη δημιουργία ταμιευτήρα μεγάλης χωρητικότητας.

Βασικό χαρακτηριστικό ενός ταμιευτήρα είναι η καμπύλη στάθμης επιφάνειας του ταμιευτήρα από την ολοκλήρωση της οποίας προκύπτει η καμπύλη στάθμης χωρητικότητας. Προφανώς και οι δύο καμπύλες είναι πάντοτε αύξουσες. Η επιφάνεια του ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στη μέγιστη στάθμη λειτουργίας καλό είναι να είναι μικρή, καθώς αντιστοιχεί σε επιφάνειες που θα πρέπει να απαλλοτριωθούν. Η μέγιστη στάθμη του ταμιευτήρα καθορίζεται από τη στάθμη του εκχειλιστή του φράγματος, ενώ σε κάθε ταμιευτήρα καθορίζεται και μία ελάχιστη στάθμη λειτουργίας, η οποία σχετίζεται με τις συνθήκες της υδροληψίας και τη μη εισχώρηση αέρα ή φερτών υλικών στον αγωγό προσαγωγής. Η χωρητικότητα που αντιστοιχεί μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης στάθμης λειτουργίας καλείται ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Ο όγκος του νερού που αντιστοιχεί στην ελάχιστη στάθμη λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως νεκρός όγκος.

Σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος και ο σχηματισμός του ταμιευτήρα συνδυάζεται και με άλλες χρήσεις εκτός από τη υδροηλεκτρική αξιοποίηση, όπως ύδρευση, άρδευση, τροφοδοσία βιομηχανικών μονάδων, ιχθυοκαλλιέργειες, χώροι αναψυχής κλπ. Η μελέτη του φράγματος και του ταμιευτήρα θα πρέπει να λάβει υπόψιν τις ανταγωνιστικές ή συμπληρωματικές αυτές χρήσεις του νερού ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Επίσης κατά τη μελέτη του ταμιευτήρα θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η διήθηση νερού από τον πυθμένα και η κατάλληλη προετοιμασία του εδάφους, η εξάτμιση του νερού, η ευστάθεια του εδάφους μετά την πλήρωση του ταμιευτήρα, ιδιαίτερης σημασίας στους μεγάλους ταμιευτήρες, οπότε ενδέχεται να συμβούν κατολισθήσεις. Άλλα προβλήματα είναι σχηματισμός κυματισμού και η ανύψωση της στάθμης ως αποτέλεσμα του ανέμου (ιδιαίτερης σημασίας σε ταμιευτήρες μεγάλης επιφάνειας) και η απόθεση φερτών υλών, φαινόμενο ιδιαίτερα κρίσιμο σε μικρούς ταμιευτήρες.

#### 4.2.2 Ταμιευτήρας αποθήκευσης ύδατος

Η πρώτη και βασική λειτουργία ενός ταμιευτήρα είναι να αποθηκεύσει την απαιτούμενη ποσότητα του νερού. Η ικανότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί με τις γνωστές από τη στερεομετρία σχέσεις που δίνουν τον όγκο στερεών σωμάτων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για τον υπολογισμό του όγκου, χρησιμοποιούνται τοπογραφικοί χάρτες με ισοϋψείς καμπύλες. Από την εμβαδομέτρηση της έκτασης που περιβάλλει η κάθε καμπύλη και την ισαπόσταση των καμπυλών μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος του ταμιευτήρα. Η ικανότητα αποθήκευσης νερού ανάμεσα σε δύο οριζόντια επίπεδα με γνωστό το κάθε εμβαδόν (ισοϋψείς), ισούται με το ημίθροισμα των εμβαδών των δύο καμπυλών επί την απόσταση (υψομετρική διαφορά) των δύο οριζόντιων επιπέδων

$$V_i = \frac{E_{i-1} + E_i}{2} \Delta h_i \quad (4.3)$$

Η πρόσθεση όλων των επί μέρους όγκων δίνει το συνολικό όγκο του ταμιευτήρα. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί σε ένα υψόμετρο, που είναι το υψόμετρο της ελεύθερης στάθμης του νερού (καθρέφτης) του ταμιευτήρα.

Μέγιστη στάθμη, είναι το μέγιστο ύψος που μπορεί να φτάσει η στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης πλημμύρας, χωρίς να βάζει σε κίνδυνο την ύπαρξη του φράγματος.

Μέγιστη στάθμη λειτουργίας είναι το μέγιστο ύψος στο οποίο μπορεί να φτάσει η στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η στάθμη αυτή προσδιορίζεται από τη στέψη του υπερχειλιστή όταν δεν υπάρχουν θυροφράγματα.

Ελάχιστη στάθμη λειτουργίας είναι το χαμηλότερο υψόμετρο που μπορεί να φτάσει η στάθμη του νερού, χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα λειτουργίας. Η ελάχιστη στάθμη προσδιορίζεται από τη στάθμη της υδροληψίας ή σε περίπτωση υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα από τις συνθήκες λειτουργίας των υδροστρόβιλων.

Ο αποθηκευτικός όγκος ανάμεσα στην ελάχιστη στάθμη και στη μέγιστη στάθμη λειτουργίας λέγεται χρήσιμος αποθηκευτικός όγκος ή ωφέλιμος όγκος ταμιευτήρα.

Ο όγκος του νερού κάτω από την ελάχιστη στάθμη λέγεται νεκρός όγκος.

Σε ταμιευτήρες πολλαπλής χρήσης ο χρήσιμος όγκος μπορεί να χωρίζεται σε διατηρητέο όγκο και όγκο συγκράτησης πλημμυρικής παροχής, ανάλογα με τη λειτουργική μορφή.

Κατά τη διάρκεια πλημμυρών, η αδυναμία του υπερχειλιστή να μεταφέρει κατάντη του υπερχειλιστή την εισερχόμενη παροχή, μπορεί να προκαλέσει παροδική υπερύψωση της στάθμης του ταμιευτήρα πάνω από τη μέγιστη στάθμη λειτουργίας.

Ο όγκος αυτός του νερού δεν μπορεί να υπολογιστεί και να χρησιμοποιηθεί, γιατί υπάρχει μόνο κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, μετά το πέρας της οποίας η συνεχιζόμενη εκροή από τον υπερχειλιστή κατεβάζει τη στάθμη του στη μέγιστη στάθμη λειτουργίας.

Ο ταμιευτήρας ενός φράγματος τροφοδοτείται από το νερό των ρευμάτων. Το νερό αυτό προέρχεται από τη βροχή που πέφτει λεκάνη απορροής. Όπως είναι γνωστό, η βροχή που πέφτει



δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται από στιγμή σε στιγμή. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία των υδρολογικών στοιχείων γίνεται με τη βοήθεια πολύχρονων παρατηρήσεων.

Όταν είναι γνωστή η ημερήσια, εβδομαδιαία ή μηνιαία απορροή μιας λεκάνης, τότε είναι δυνατός ο προσδιορισμός τόσο της χρήσης του νερού όσο και της χωρητικότητας του ταμιευτήρα.

Από τους ακριβείς τοπογραφικούς χάρτες μπορούν να σχεδιαστούν οι καμπύλες επιφάνειας-χωρητικότητας, δηλαδή οι καμπύλες που δίνουν την αύξηση του όγκου του ταμιευτήρα από την αύξηση της έκτασης της επιφάνειας. Οι όγκοι εκφράζονται σε  $10^6$  κυβικά μέτρα και η επιφάνεια σε τετραγωνικά χιλιόμετρα.

#### 4.2.3 Διόδευση πλημμύρας

Η κίνηση του νερού κατά τη διάρκεια πλημμύρας είναι δυνατό να εκφραστεί με διάφορες σχέσεις (εξισώσεις Saint Venant) που όμως στην πράξη εμφανίζουν σημαντικές δυσκολίες εφαρμογής, γιατί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ρευμάτων, τόσο οριζοντιογραφικά όσο και σε διατομή, δεν είναι εύκολο να εκφραστούν με μαθηματικές σχέσεις. Η επιτυχία σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη σωστή επιλογή του βήματος, που πρέπει να είναι μικρό σχετικά με το μήκος του πλημμυρικού κύματος. Το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  στο οποίο αναφέρονται οι συνθήκες ροής, πρέπει να επιλέγεται έτσι, που να αποδίδεται η μορφή του υδρογραφήματος, ιδιαίτερα στην κορυφή του.

Η πιο συνηθισμένη λοιπόν προσέγγιση του προβλήματος περιλαμβάνει υδρολογικές μεθόδους που στηρίζονται στην εξίσωση συνέχειας και τη δυνατότητα αποθήκευσης του νερού στο εξεταζόμενο τμήμα (ταμιευτήρα).

Το σύνολο της παροχής που εισρέει από την ανάντη διατομή αποτελεί το υδρογράφημα εισροής ενώ η ζητούμενη εξερχόμενη ποσότητα το υδρογράφημα εκροής.

Η διαφορά ανάμεσα στην τεταγμένη του υδρογραφήματος εισροής και εκροής σε κάθε χρονική στιγμή παριστάνει την αποθηκευμένη ποσότητα του νερού στον χρόνο αυτό.

Το πρόβλημα της παροχέτευσης μιας πλημμυρικής παροχής μέσα από έναν ταμιευτήρα συνίσταται στην εύρεση της εκροής  $O$  σε συνάρτηση του χρόνου, με δεδομένη την εισροή  $I$  και έχοντας κάνει τις απαραίτητες υποθέσεις σχετικά με την αποθήκευση  $S$ . Η επίλυση του υδρογραφήματος παροχέτευσης γίνεται με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών. Διαλέγοντας το κατάλληλο χρονικό βήμα  $\Delta t$  η εξίσωση συνέχειας με τη μορφή πεπερασμένων διαφορών γίνεται

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = S_1 + S_2 \quad (4.4)$$

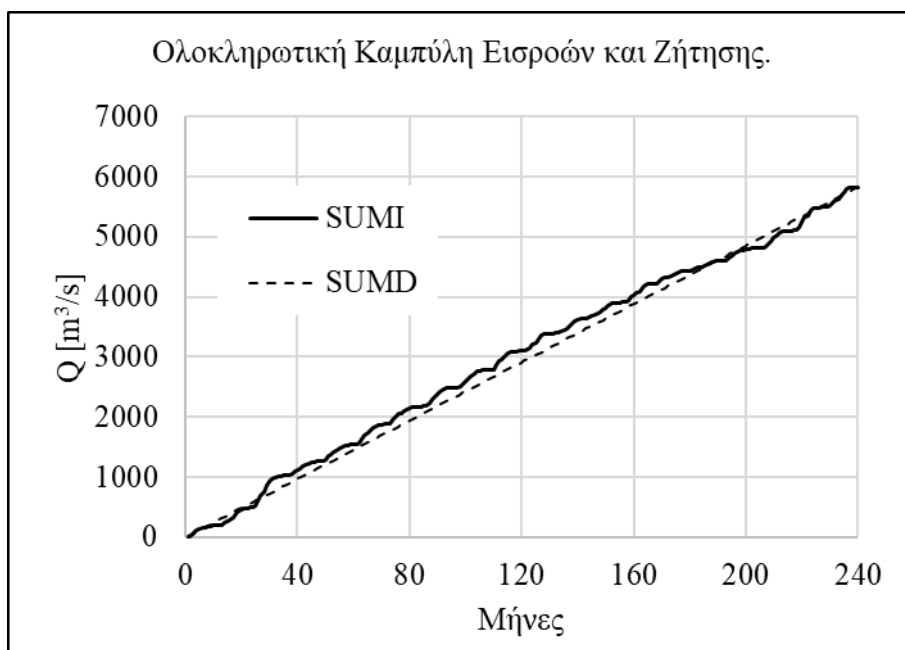
Η περίοδος παροχέτευσης  $\Delta t$  επιλέγεται όσο το δυνατό μικρότερη, έτσι ώστε η υπόθεση της γραμμικής μεταβολής της παροχής  $I$  και  $O$  στη διάρκεια  $\Delta t$  να είναι σε ανεκτά πλαίσια. Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην αρχή και στο τέλος κάθε βήματος  $\Delta t$ . Κατά την έναρξη της χρονικής περιόδου  $\Delta t$ , όλες οι τιμές είναι γνωστές εκτός από τις  $O_2$  και  $S_2$ . Επειδή οι άγνωστοι είναι δύο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη και δεύτερης εξίσωσης που θα δώσει το  $O_2$  στο τέλος του χρόνου  $\Delta t$ . Η εξίσωση αυτή βρίσκεται από τη σχέση των  $S$  και  $O$ .

Όταν η παροχέτευση μιας πλημμύρας γίνεται μέσα από ένα ταμιευτήρα η σταδιακή αποθήκευση μπορεί να προσδιοριστεί από τα τοπογραφικά στοιχεία του ταμιευτήρα, υποθέτοντας οριζόντια την ελεύθερη επιφάνειά του και είναι ανάλογη με το φορτίο  $H$  του νερού πάνω από τη διατομή ελέγχου (υπερχείλιση). Έτσι η αποθήκευση  $S$  είναι συνάρτηση της εκροής  $O$ . Με αναδιάταξη των όρων της εξίσωσης 4.4 έχουμε

$$\left(\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{O_2}{2}\right) = \left(\frac{S_1}{\Delta t} + \frac{O_1}{2}\right) + \frac{I_1 + I_2}{2} - O_1 \quad (4.5)$$

#### 4.2.4 Ολοκληρωτικές καμπύλες, καμπύλες διάρκειας – παροχής, λειτουργίας ταμιευτήρα αποθήκευσης ύδατος

Η ικανότητα που πρέπει να έχει ένας ταμιευτήρας προσδιορίζεται από τη μελέτη των στοιχείων ροής των ρευμάτων που τροφοδοτούν τον ταμιευτήρα και τη σύνταξη ενός λειτουργικού διαγράμματος για μια ορισμένη χρονική διάρκεια. Το λειτουργικό διάγραμμα μπορεί να γίνει με χρονική μονάδα ένα χρόνο, ένα μήνα ή μια μέρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο ένας χρόνος. Η ολοκληρωτική καμπύλη εισροής είναι μια καμπύλη που συντάσσεται με βάση τα στοιχεία εισροής από την αρχή ενός χρόνου αθροιστικά. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται μια αθροιστική καμπύλη εισροών (SUMI) σε διάρκεια 20 ετών. Η κλίση της καμπύλης σε έναν οποιονδήποτε χρόνο είναι η παροχή εισροής αυτό τον χρόνο.



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική μορφή Ολοκληρωτικής Καμπύλης.

Οι καμπύλες αναγκών (εκροής), όταν η εκροή είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο έτος σχεδιάζονται ως ευθείες γραμμές. Η κλίση των γραμμών αυτών είναι η συνολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται στο έτος. Με σκοπό τη διαστασιολόγηση του ταμιευτήρα, δηλαδή τον προσδιορισμό του απαιτούμενου ωφέλιμου όγκου του ώστε να καλύπτει σε έναν ορισμένο επιθυμητό βαθμό τη ζήτηση στα χρόνια χρήσης του έργου ακολουθείται η μέθοδος Ripple.

Από την επιθυμητή ετήσια ζήτηση που ορίζεται, χαράσσεται η αθροιστική καμπύλη της ζήτησης (*SUMD*). Αν η αθροιστική καμπύλη των εισροών είναι διαρκώς «πάνω» από την καμπύλη της ζήτησης, τότε για το έργο δεν απαιτείται η παρουσία ταμιευτήρα. Το πρόβλημα της διαστασιολόγησης του ταμιευτήρα ορίζεται όταν οι αθροιστικές καμπύλες «μπλέκονται» όπως στο Σχήμα 4.1. Σχηματικά φέρονται δύο παράλληλες ευθείες στην αθροιστική καμπύλη της ζήτησης τέτοιες ώστε να εφάπτονται στην αθροιστική καμπύλη των εισροών και η μία να έχει όλη την αθροιστική καμπύλη εισροών από «πάνω» και η άλλη από «κάτω» αντίστοιχα. Η κατακόρυφη απόσταση των καμπυλών αυτών είναι η επιθυμητή ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Λογιστικά βρίσκονται οι μέγιστες διαφορές (*SUMI-SUMD*) και (*SUMD-SUMI*) και το άθροισμα των διαφορών είναι η χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Αν η ποσότητα των αναγκών δεν είναι σταθερή και ομοιόμορφα κατανομημένη στο 24ωρο, τότε οι ευθείες γίνονται καμπύλες, χωρίς όμως να αλλάζει και η μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος με τη λογιστική μέθοδο. Εννοείται βέβαια ότι πρέπει να υπάρχει αντιστοίχιση των δύο καμπυλών, δηλαδή στην εισροή του Ιουνίου θα αντιστοιχεί η εκροή του ίδιου μήνα.

Η μέθοδος αυτή καλείται συμβατική μέθοδος όταν για δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται ιστορικές χρονοσειρές εισροών και ζήτησης. Σε πιο σύγχρονες προσεγγίσεις όπου δημιουργούνται συνθετικές χρονοσειρές για τη διάρκεια ζωής του έργου, ο προσδιορισμός του ωφέλιμου όγκου είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και δοκιμών ώστε να βρεθεί ο ελάχιστος δυνατός όγκος (ελάχιστο κόστος κατασκευών) που να ικανοποιεί την ανάγκη στον επιθυμητό βαθμό, ορισμένο από τον κύριο του έργου.

#### Καμπύλη διάρκειας

Τα ρεύματα που τροφοδοτούν ένα ταμιευτήρα έχουν μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής τους. Οι διακυμάνσεις αυτές πρέπει να καταγραφούν, να μελετηθούν και να αποδοθούν για εφαρμογή στα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν για την ορθολογική λειτουργία του ταμιευτήρα. Τα στοιχεία αυτά των μετρήσεων, για να ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν πληρέστερα στην πραγματικότητα, πρέπει να εκτείνονται σε βάθος χρόνου αρκετών δεκαετιών. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταρτίζεται το υδρογράφημα, το οποίο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 του παρόντος.

Η μελέτη των έργων δεν είναι δυνατό να γίνει με βάση τη μέγιστη παροχή, που παρουσιάζεται σπάνια, ούτε και την ελάχιστη, που δημιουργεί λειτουργικά προβλήματα. Η παροχή που δίνει τη λύση στο πρόβλημα της λειτουργίας είναι μια (ενδιάμεση) παροχή που βρίσκεται αφού καταρτιστεί η καμπύλη διάρκειας των παροχών του υδατορέματος.

Για τη χάραξη της καμπύλης διάρκειας της διαθέσιμης (αξιοποιήσιμης) παροχής, αρχικά μετατρέπονται οι μετρημένες παροχές σε χρονοσειρά όπως καταγράφηκαν δηλαδή πρώτα οι παροχές του χρόνου 1, μετά του χρόνου 2 κλπ και συμπληρώνονται πιθανά κενά μετρήσεων.

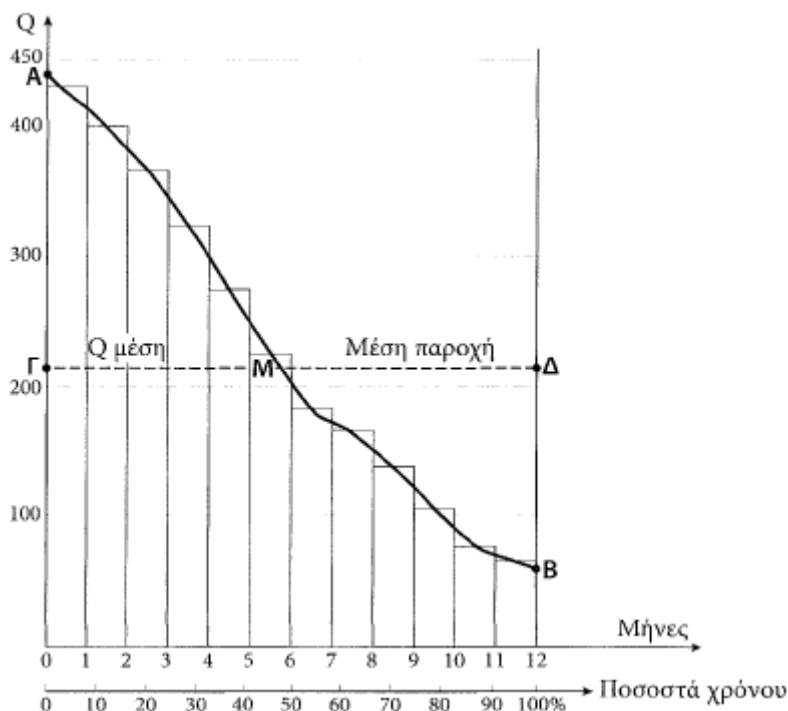
Κατόπιν κατατάσσονται οι παροχές αυτές σε φθίνουσα σειρά και υπολογίζεται για κάθε παροχή το ποσοστό επί της εκατό του χρόνου που η παροχή είναι μεγαλύτερη από τη συγκεκριμένη τιμή (εμπειρική συχνότητα υπέρβασης) ως

$$100 \frac{n_i}{N}$$

όπου  $n_i$  η θέση της κάθε παροχής στη φθίνουσα σειρά και  $N$  το πλήθος των παροχών.

Το διάγραμμα των  $N$  σημείων που στον κατακόρυφο άξονα έχει τις παροχές σε φθίνουσα σειρά και στον οριζόντιο έχει τον χρόνο % είναι η καμπύλη διάρκειας των παροχών.

Όταν κατασκευαστεί το φράγμα και δημιουργηθεί η τεχνητή λίμνη, εξασφαλίζεται η σταθερότητα της παροχής κατάντη του φράγματος, αφού αποθηκεύεται το πλεόνασμα των αιχμών του χειμώνα και χρησιμοποιείται για να καλύψει το έλλειμμα του καλοκαιριού. Η καμπύλη διάρκειας τότε τείνει να γίνει ευθεία παράλληλη με τον άξονα των χρόνων.



Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστική μορφή καμπύλης διάρκειας παροχών υδατορέματος (Τσόγκας, 2018).

Η ρύθμιση της καμπύλης διάρκειας γίνεται με τη χάραξη της γραμμής της μέσης παροχής  $Q_{μέση}$  έτσι ώστε τα εμβαδά ( $AMΓ$ ) και ( $BMA$ ), που φαίνονται στο Σχήμα 4.8 να είναι ίσα.

Για την κατανόηση της σημασίας του διαγράμματος αναφέρεται ότι  $Q_{80}$  σημαίνει την παροχή που είναι διαθέσιμη στα 80% του χρόνου,  $Q_{50}$  την παροχή που είναι διαθέσιμη στο 50% του χρόνου, κ.λ.π. Η  $Q_{μέση}$  πολλές φορές δεν ταυτίζεται με την  $Q_{50}$ , δηλαδή η μέση παροχή δεν είναι διαθέσιμη στο 50% του χρόνου, αλλά για χρόνο λιγότερο.

Οι καμπύλες διάρκειας χρησιμεύουν στον υπολογισμό των υδροδυναμικών εγκαταστάσεων και των συναφών έργων στο στάδιο της προμελέτης. Από την καμπύλη διάρκειας εκλέγεται η διαθέσιμη για την υδροδυναμική εγκατάσταση παροχή και με αυτήν υπολογίζονται τα έργα. Η παροχή αυτή τις περισσότερες φορές δεν ξεπερνάει το  $Q_{20}$  με  $Q_{40}$ , που είναι η παροχή που αντιστοιχεί στο 20-40% του χρόνου. Το ποσοστό κυμαίνεται ανάλογα με το αν ο υδροηλεκτρικός σταθμός λειτουργεί ως εργοστάσιο βάσης ή αιχμής.

Η ελάχιστη παροχή που είναι διαθέσιμη στο 100% του χρόνου (ενεργειακή βάση), αποτελεί σημαντικό στοιχείο, γιατί ρυθμιζόμενη κατάλληλα μπορεί να εξασφαλίσει το απαιτούμενο για τη

λειτουργία  $Q_{min}$ . Η μέγιστη παροχή ή πλημμυρική παροχή είναι απαραίτητη, γιατί με αυτήν υπολογίζονται τα έργα ασφάλειας των εγκαταστάσεων (υπερχειλιστές, κ.λπ.).

Λέγοντας παροχή λειτουργίας εννοείται η ελάχιστη απαιτούμενη παροχή που πρέπει να είναι διαθέσιμη από τον ταμιευτήρα, για τη λειτουργία των υδροδυναμικών εγκαταστάσεων. Μπορεί να βρεθεί από τον υπολογισμό της αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα και την επεξεργασία των στοιχείων της αθροιστικής καμπύλης. Είναι προφανές ότι αθροιστικά η παροχή αυτή δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη συνολικά εισρέουσα παροχή στον ταμιευτήρα, για το σύνολο των χρόνων που υπολογίζεται.

Ο προσδιορισμός της γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Από τα ψηλά σημεία της καμπύλης εισροής (Α, Β του Σχήματος 4.1) φέρνονται ευθείες που δεν πρέπει να απέχουν από τα χαμηλά σημεία (Γ και Δ) περισσότερο από τον ωφέλιμο αποθηκευτικό όγκο του ταμιευτήρα. Η κλίση των ευθειών αυτών δίνει την ελάχιστη παροχή λειτουργίας. Αν η κλίση ήταν μεγαλύτερη, τότε και το βέλος της χωρητικότητας θα ήταν μεγαλύτερο, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη χωρητικότητα του ταμιευτήρα.

#### 4.2.5 Απώλειες νερού ταμιευτήρα αποθήκευσης ύδατος

Ο όγκος του νερού που υπολογίζεται για να γεμίσει μια τεχνητή λίμνη είναι πάντοτε μειωμένος κατά ένα ποσοστό, εξαιτίας της εξάτμισης του νερού και της διήθησής του μέσα σε διαπερατά εδαφικά στρώματα. Η εξάτμιση, τουλάχιστον για την Ελλάδα, που είναι μια χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια και ζεστό κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου καιρού, είναι σοβαρή και δεν περιορίζεται μόνο από τον καθρέφτη της λίμνης, αλλά και από το έδαφος και τη φυτοκάλυψη της λεκάνης απορροής.

Οι απώλειες από εξάτμιση βρίσκονται πειραματικά για όλη τη διάρκεια του χρόνου με τη βοήθεια των εξατμισήμετρων. Τα όργανα αυτά τοποθετούνται στην περιοχή που θα δημιουργηθεί η λίμνη και δίνουν τη δυνατότητα μέτρησης της ημερήσιας εξάτμισης.

Εκτός από την εξάτμιση υπάρχουν και οι απώλειες εξαιτίας διαρροών από τον πυθμένα της λίμνης και από τα διάφορα τεχνικά έργα. Για το λόγο αυτό, πριν από την κατασκευή γίνεται λεπτομερής γεωλογική έρευνα και μελέτη της λεκάνης της λίμνης, έτσι ώστε να περιοριστούν οι απώλειες στο ελάχιστο. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις κατασκευής φραγμάτων, που ο ταμιευτήρας τους παρουσίασε μεγάλες απώλειες, σε σημείο που όχι μόνο να μην είναι δυνατή η λειτουργία των εγκαταστάσεων, αλλά και να μείνει ένα μεγάλο μέρος του όγκου του ταμιευτήρα χωρίς νερό. Η μελέτη υδατοπερατότητας είναι απαραίτητη δεδομένου ότι η κατασκευή πρέπει να γίνεται μόνο σε μη έντονα διαπερατά εδάφη, ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο η διήθηση και οι απώλειες που προέρχονται από αυτήν.

Απώλειες του νερού εμφανίζονται και κατά μήκος των τεχνικών έργων αλλά αυτές οφείλονται σε κακή κατασκευή ή συντήρηση των αγωγών και κυρίως των αρμών. Οι απώλειες όμως της μορφής αυτής δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να επηρεάζουν τη λειτουργία του έργου, μπορούν όμως μετά από ορισμένα όρια να προκαλέσουν υποσκαφές, διαβρώσεις και κατολισθήσεις, με συνέπεια πολλές φορές να κινδυνεύει το έργο.

#### 4.2.6 Απόθεση φερτών υλών

Κάθε υδατόρεμα μεταφέρει μια ποσότητα στερεών σωματιδίων που σέρνονται στον πυθμένα ή αιωρούνται μέσα στο νερό. Επειδή το ειδικό βάρος των στερεών σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος του νερού, τα σωματίδια υπακούοντας στο νόμο της βαρύτητας τείνουν να κατακαθίσουν στον πυθμένα του υδατορέματος, αλλά ανοδικές κινήσεις, που προέρχονται από τους στροβιλισμούς του νερού υπερνικούν την τάση για καθίζηση. Όταν το νερό ενός υδατορέματος που περιέχει στερεά φτάσει στον ταμιευτήρα, η ταχύτητα του νερού και οι στροβιλισμοί μειώνονται σημαντικά. Τα μεγαλύτερα αντικείμενα και τα πιο ογκώδη κυλιόμενα στερεά αποτίθενται στις αρχές του ταμιευτήρα δημιουργώντας προσχώσεις σχήματος «δέλτα». Τα μικρότερα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια κατακάθονται μάλλον στα βαθύτερα τμήματα του ταμιευτήρα ή διαφεύγουν και φτάνουν μέχρι τους στροβίλους.

Η ποσότητα των αιωρούμενων υλικών ενός υδατορέματος μετριέται με ειδικό μηχάνημα αποτελούμενο από ένα δοχείο που δέχεται και φιλτράρει μια ποσότητα νερού συγκεντρώνοντας όλα τα αιωρούμενα στερεά. Η ποσότητα αυτή των στερεών ξηραίνεται και ζυγίζεται. Η στερεοπαροχή εκφράζεται ως ποσοστό ανά εκατομμύριο (p.p.m.) ή mg/lit. Ο υπολογισμός γίνεται με τη διαίρεση του ξηρού βάρους των στερεών δια του συνολικού όγκου στερεής και υγρής παροχής. Συνήθως ο προσδιορισμός της στερεοπαροχής δεν είναι δυνατό να γίνει με ακρίβεια. Τα κυλιόμενα μπορεί να ποικίλλουν μέσα σε μεγάλα όρια (5-25% της παροχής). Η ποσότητα των φερτών ενός ρεύματος εξαρτάται από την ένταση της πλημμύρας, από την κατάσταση του εδάφους, τη φυτοκάλυψη και τη μορφή της λεκάνης απορροής. Η έλλειψη στοιχείων και δεδομένων για τον ακριβή προσδιορισμό της καθίζησης κάθε λεκάνης μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη μεταφορά συμπερασμάτων από άλλες παρόμοιες λεκάνες, στις οποίες έχει γίνει η έρευνα της μεταφοράς και καθίζησης της στερεοπαροχής.

### 4.3 Υπερχειλιστές

#### 4.3.1 Γενικά

Στην περίπτωση αυξημένων πλημμυρικών παροχών και πλήρωσης του ταμιευτήρα πάνω από την ανώτατη στάθμη λειτουργίας, ο εκχειλιστής και ο υπερχειλιστής εξασφαλίζουν την ελεγχόμενη ροή της περίσσειας νερού προς τα κατάντη. Ο εκχειλιστής επιτυγχάνει την παροχέτευση του νερού μέσω των θυροφραγμάτων που διαθέτει. Αντίθετα, στον υπερχειλιστή δεν μεσολαβούν θυροφράγματα και ο όγκος νερού υπερχειλίζει αυτόματα όταν η στάθμη υπερβεί τη μέγιστη στάθμη λειτουργίας.

Ο εκχειλιστής μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στο κύριο σώμα του φράγματος, στην κατάντη παρειά, έξω από το φράγμα σε κάποιο πρανές ή εντός του ταμιευτήρα με τη μορφή σήραγγας (φρέαρ και σήραγγα που εξέρχεται κάτω από το φράγμα). Η θέση του σε σχέση με το φράγμα και το μέγεθος του καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του φράγματος, την τοπογραφία και τη γεωλογία στο φράγμα και τη γύρω περιοχή, καθώς και το ιστορικό πλημμυρικών γεγονότων. Η ανεπαρκής διαστασιολόγηση και οποιαδήποτε ατέλεια κατά την κατασκευή και συντήρηση του μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για το φράγμα.

Ο υπερχειλιστής παρεμβάλλεται στη ροή νερού με σκοπό να διατηρήσει τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας υψηλότερα από αυτή της στέψης. Η διερχόμενη παροχή για να ξεπεράσει το εμπόδιο του υπερχειλιστή, διαμορφώνεται σε στάθμη υψηλότερη κατά  $\Delta H$  από αυτή της στέψης του. Διακρίνονται δύο ειδών υπερχειλιστές: α) οι υπερχειλιστές φραγμάτων -σκοπός των οποίων είναι η διοχέτευση της μέγιστης πιθανής πλημμύρας έτσι ώστε να αποφευχθεί η άναρχη υπερχειλίση του νερού από τη στέψη του φράγματος με κίνδυνο την καταστροφή του και β) οι υπερχειλιστές των μΥΗΕ -που κατασκευάζονται κατά το ρου ενός ποταμού και έχουν σκοπό την εξασφάλιση καλών συνθηκών υδροληψίας ή υδραυλικής πτώσης.

Καθώς η ροή υπερχειλίζει από τη στέψη του υπερχειλιστή, ένα μέρος της δυναμικής ενέργειας της ανάντη στάθμης μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια που έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική επιτάχυνση της ροής στα κατάντη. Η μεγάλη ταχύτητα της δέσμης του νερού που πέφτει στη βάση του υπερχειλιστή μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στα κατάντη θέτοντας σε κίνδυνο την έδραση τόσο του ιδίου, όσο και του σώματος του φράγματος. Για το λόγο αυτό, σε περιπτώσεις μεγάλου ύψους πτώσης, το νερό που υπερχειλίζει οδηγείται σε λεκάνη ηρεμίας όπου μέρος της κινητικής του ενέργειας καταστρέφεται πριν αυτό καταλήξει στη φυσική κοίτη του υδατορέματος.

#### 4.3.2 Υπερχειλιστές καμπύλης στέψης

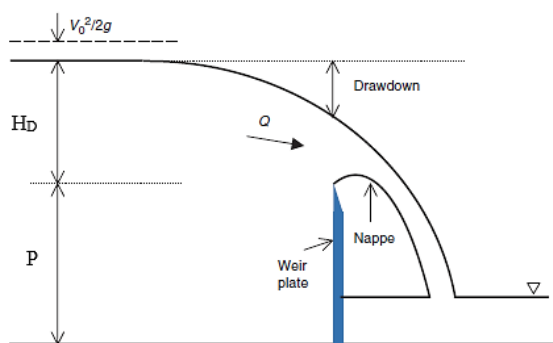
Η διερχόμενη παροχή  $Q$  από υπερχειλιστή λεπτής στέψης εκφράζεται συναρτήσει του υδροστατικού ύψους  $H_D$ , δηλαδή της διαφοράς στάθμης της ροής ανάντη του υπερχειλιστή και της στέψης του υπερχειλιστή, μέσω της εξίσωσης:

$$Q = C_D \sqrt{2g} \cdot L \cdot H_D^{3/2} \quad (4.6)$$

Στην οποία με  $L$  συμβολίζεται το μήκος της στέψης (κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής) και με  $C_D$  ο αδιάστατος συντελεστής παροχής, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το βάθος  $P$  του νερού ανάντη, την μορφή της στέψης και την κλίση της ανάντη επιφάνειας του υπερχειλιστή (συνήθως κάθετη στη ροή). Μία καλή προσέγγιση της τιμής του  $C_D$  δίνεται από τη σχέση:

$$C_D = 0.40 + 0.05 \frac{H_D}{P} \quad (4.7)$$

Η ροή σχηματίζει μία δέσμη νερού, που εκτός από την πάνω, και η κάτω παρειά της οποίας καθορίζει μία επιφάνεια πίεσης σταθερής και ίσης προς την ατμοσφαιρική (όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 με το δείκτη «Nappe»).

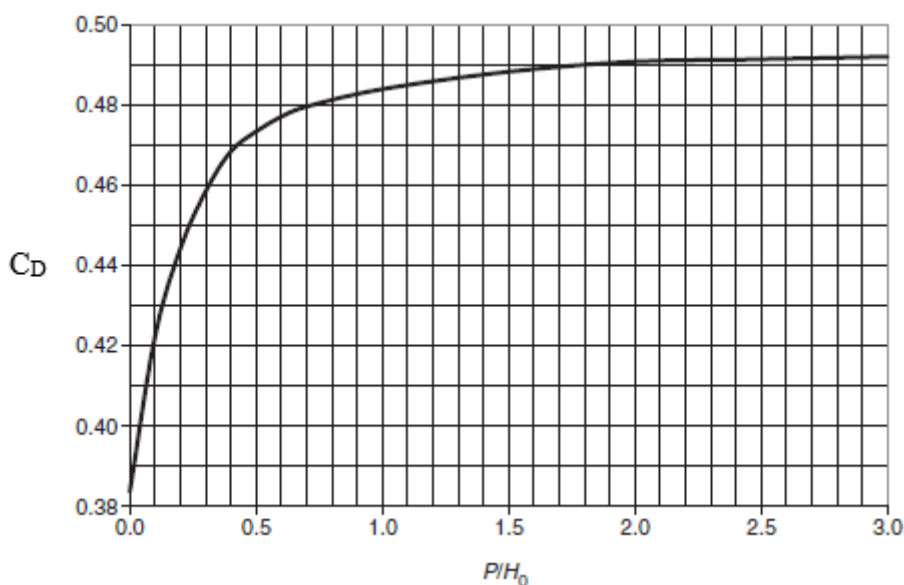


Σχήμα 4.9: Υπερχειλιστής Λεπτής Στέψης (Akan, 2006).

Οι συντεταγμένες  $y=f(x)$  της κάτω παρειάς της υδάτινης δέσμης εξαρτώνται από την παροχή που υπερχειλίζει. Εάν η επιφάνεια που δημιουργεί κατά μήκος του υπερχειλιστή η κάτω παρειά της υδάτινης δέσμης αποτελέσει το άνω «στερεό» όριο μιας κατασκευής, προκύπτει ένας υπερχειλιστής καμπύλης στέψης, ο οποίος σε σύγκριση με τον υπερχειλιστή λεπτής στέψης, έχει τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά, όμως πολύ μεγαλύτερη αντοχή ώστε να περιλαμβάνει τις δυνάμεις που ασκεί το νερό σε αυτόν.

Επιπλέον, για παροχή ίση με την παροχή σχεδίασης, επικρατεί στη βρεχόμενη επιφάνεια του υπερχειλιστή σταθερή στατική πίεση ίση προς την ατμοσφαιρική (αφού η επιφάνεια αυτή προκύπτει από «στερεοποίηση» της αντίστοιχης οριακής γραμμής ροής), με αποτέλεσμα να είναι μηδενικές οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτόν. Για παροχές μικρότερες της παροχής σχεδίασης αναπτύσσεται υπερπίεση στην επιφάνεια του υπερχειλιστή (άρα πρόσθετες δυνάμεις στην έδραση), ενώ για παροχές μεγαλύτερες αναπτύσσεται υποπίεση (άρα κίνδυνος διάβρωσης της επιφάνειας και ανάπτυξη σπηλαίωσης).

Η παροχή σε υπερχειλιστή καμπύλης στέψης με κατακόρυφη την ανάντη παρειά εκφράζεται συναρτήσει του υδροστατικού ύψους  $H_D$  μετρούμενο από το σημείο μέγιστης στάθμης της καμπύλης στέψης από την Εξίσωση 4.6. Η τιμή του αδιάστατου συντελεστή παροχής  $C_D$  δίνεται στο Σχήμα 4.10 συναρτήσει του λόγου  $\frac{P}{H_D}$ .



Σχήμα 4.10: Συντελεστής παροχής  $C_D$  υπερχειλιστή καμπύλης στέψης (Akan, 2006).

#### 4.3.3 Ρυθμιζόμενοι υπερχειλιστές – εκχειλιστές

##### Εκχειλιστές μορφής θυροφράγματος

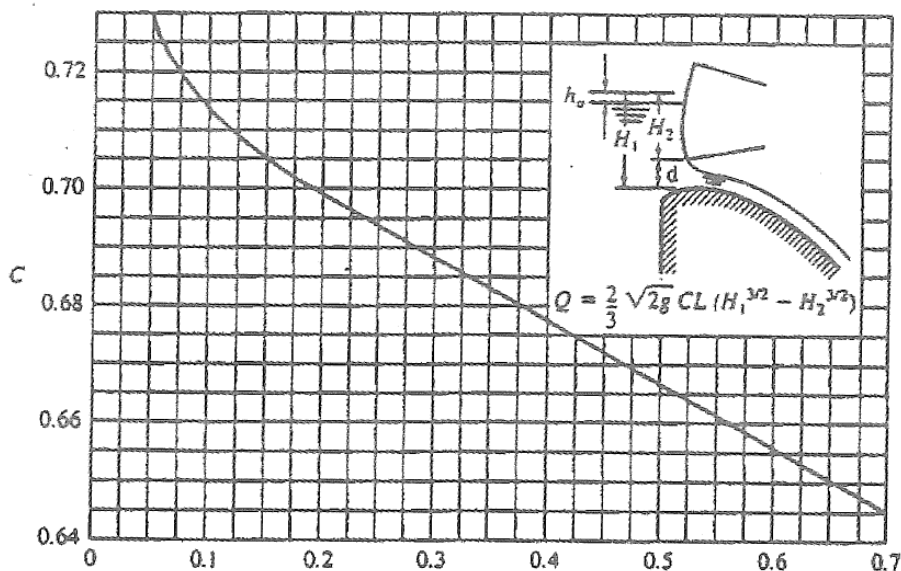
Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η πλημμυρική παροχή είναι πολύ μεγάλη, ενώ παράλληλα το απαιτούμενο μήκος  $L$  της στέψης του υπερχειλιστή ή το μέγιστο υδροστατικό ύψος  $H_D$  δεν είναι δυνατό να αναπτυχθούν, αντί του υπερχειλιστή διαμορφώνεται ένας εκχειλιστής (δηλαδή μια κατασκευή ρυθμιζόμενης υπερχειλίσης). Η δυνατότητα ρύθμισης της ανάντη στάθμης και ελέγχου της υπερχειλίσης επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση μέσω θυροφραγμάτων μορφής περυγίου ή



κυκλικού τόξου που τοποθετούνται στο πάνω μέρος της καμπύλης στέψης του σταθερού εκχειλιστή. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά η δυνατότητα διοχέτευσης της πλημμυρικής παροχής χωρίς υπερβολική ανύψωση της ανάντη στάθμης, δηλαδή του υδροστατικού ύψους. Το θυρόφραγμα μπορεί να έχει τη μορφή περιστρεφόμενου πτερυγίου, περιστρεφόμενου κυκλικού τόξου ή να είναι επίπεδο συρόμενο. Ο χειρισμός των στοιχείων αυτών (περιστροφή ή ανύψωση) μπορεί να γίνεται χειροκίνητα για μικρές μονάδες (μέσω γραναζωτού μηχανισμού και καστανίας) ή μηχανικά μέσω στεγανού ηλεκτροκινητήρα ή υδραυλικών εμβόλων.

Η λειτουργία του περιστρεφόμενου θυροφράγματος μορφής πτερυγίου εξαρτάται από τη μορφή του, η οποία καθορίζει τη διανομή πίεσης κατά την υπερχειλίση και κατά συνέπεια την απαιτούμενη δύναμη και ισχύ για την περιστροφή του. Παράλληλα, είναι σημαντική η αποφυγή ανάπτυξης υποπίεσεων στην επιφάνεια. Το παραβολικό σχήμα που πλησιάζει την μορφή της δέσμης που υπερχειλίζει είναι το βέλτιστο αφού αντιστοιχεί σε ισόθλιπτη επιφάνεια και ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ χειρισμού. Δεδομένων των δυσκολιών κατασκευής του, προτιμάται συνήθως η δημιουργία σύνθετης διατομής που απαρτίζεται από κυκλικά τόξα, ή συνδυασμό κυκλικών τόξων και επίπεδης επιφάνειας στο μέσο έτσι ώστε να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο την ιδανική παραβολική μορφή.

Το περιστρεφόμενο κυκλικό θυρόφραγμα είναι πολύ πιο απλό στην κατασκευή του καθώς η συνισταμένη των υδροστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτό διέρχεται από τον άξονα περιστροφής οπότε δεν αναπτύσσεται ροπή. Κατά συνέπεια ο μηχανισμός περιστροφής, σε όλες τις θέσεις παραλαμβάνει μόνο το ίδιο βάρος του θυροφράγματος. Κατά την ανύψωση του κυκλικού θυροφράγματος, στο κάτω μέρος αναπτύσσεται ροή μεγάλης ταχύτητας, δηλαδή στη στέψη του μόνιμου εκχειλιστή, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρεται το φορτίο των φερτών υλών. Για το λόγο αυτό τα κυκλικά θυροφράγματα είναι κατάλληλα και για εκκενωτές πυθμένα.



Σχήμα 4.11: Συντελεστής απορροής κυκλικού ρυθμιζόμενου θυροφράγματος ανοίγματος  $\frac{d}{H_1}$ .

Η παροχή που παροχετεύεται από κυκλικό θυρόφραγμα δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot C \cdot L (H_1^{3/2} - H_2^{3/2}) \quad (4.8)$$

στην οποία τα μεγέθη  $H_1$  και  $H_2$  ορίζονται από το σχήμα 4.11 όπου δίνεται και η τιμή του αδιάστατου συντελεστή παροχής  $C$  συναρτήσεως του ανοίγματος  $\frac{d}{H_1}$ .

Το συρόμενο επίπεδο θυρόφραγμα ολισθαίνει ή κυλιέται σε κατακόρυφους οδηγούς που έχουν διαμορφωθεί σε κατακόρυφο πλαίσιο και είναι προτιμότερο σε κατασκευές με μεγαλύτερο ύψος παρά πλάτος. Κατασκευάζεται συνήθως από χαλυβδοέλασμα με ενισχύσεις ή στην απλούστερη περίπτωση από ισομήκεις ξύλινες δοκούς με συντελεστή τριβής ολίσθησης της τάξης του  $f=0.3-0.5$  οπότε και η απαιτούμενη δύναμη για την ανύψωσή του υπό φορτίο γίνεται απαγορευτική καθώς το μέγεθος αυξάνει. Στην περίπτωση μεγάλου ύψους και πλάτους προτιμάται η κύλιση του επιπέδου θυροφράγματος στους οδηγούς μέσω σειράς τροχών ( $f=0.1$ ), λύση όμως που επιβαρύνει σημαντικά το κόστος κατασκευής.

Επίπεδο συρόμενο θυρόφραγμα τοποθετείται και στην είσοδο της διώρυγας έκπλυσης που διαμορφώνεται στον πυθμένα προς την πλευρά του υδροστροβίλου στην περίπτωση μΥΗΕ μικρής υδραυλικής πτώσης. Το άνοιγμα του θυροφράγματος πραγματοποιείται περιοδικά και δημιουργεί ροή υψηλής ταχύτητας η οποία συμπαρασύρει τα φερτά που συσσωρεύονται στον πυθμένα. Η διαμόρφωση αυτή εξασφαλίζει ομοιόμορφες συνθήκες ροής στην είσοδο του υδροστροβίλου.

Εκχειλιστές ελαστικοί διογκούμενοι

Στους ρυθμιζόμενους εκχειλιστές κατατάσσεται και ο διογκούμενος ελαστικός εκχειλιστής ο οποίος έχει ύψος 2-3[m], ενώ το μήκος του μπορεί να φτάσει τα 160[m]. Κατασκευάζεται από μεμβράνη ενισχυμένου καουτσούκ ή από άλλο συνθετικό ελαστικό που σχηματίζει ένα στεγανό ελαστικό θάλαμο. Προσαρμόζεται στην επίπεδη στέψη του μόνιμου εκχειλιστή μέσω λάμας τοποθετημένης προς την ανάντη πλευρά των κοχλιών. Η μεμβράνη έχει συνήθως πάχος 3-5[mm]. Η μεταβολή του ύψους του εκχειλιστή ελαστικής μεμβράνης επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης ή αφαίρεσης ποσότητας του νερού στο εσωτερικό της μεμβράνης, οπότε ο ελαστικός θάλαμος διογκώνεται ή συρρικνώνεται αντίστοιχα. Η εισαγωγή της απαιτούμενης ποσότητας νερού επιτυγχάνεται μέσω μικρού αντλητικού συγκροτήματος.

Οι εκχειλιστές αυτού του τύπου έχουν αποδειχθεί αξιόπιστοι, με χαμηλό κόστος, μεγάλη αντοχή έναντι μηχανικής διάβρωσης και χωρίς ιδιαίτερα λειτουργικά προβλήματα. Λόγω της υπερχειλίσης του νερού από το πάνω μέρος, οι εκχειλιστές αυτοί δεν έχουν τη δυνατότητα έκπλυσης του πυθμένα από τις φερτές ύλες που συσσωρεύονται. Για το λόγο αυτό στο ένα άκρο τους θα πρέπει να διαμορφώνεται διώρυγα έκπλυσης εφοδιασμένη με επίπεδο συρόμενο θυρόφραγμα.

#### 4.3.4 Λοιποί τύποι υπερχειλιστών – εκχειλιστών

Υπερχειλιστές απλής κατασκευής

Σε μΥΗΕ μικρής κλίμακας ή ακόμη και για αρδευτικούς σκοπούς, κατασκευάζονται υπερχειλιστές απλής κατασκευής, ανάλογα με τα υλικά και τους τεχνίτες που είναι διαθέσιμοι στην περιοχή – με γνώμονα το μικρό κόστος κατασκευής. Οι υπερχειλιστές αυτοί δεν μπορούν να έχουν μεγάλο ύψος λόγω του περιορισμού των υλικών της περιοχής και των προβλημάτων

υποσκαφής της θεμελίωσης λόγω της κινητικής ενέργειας του νερού κατάντη. Επιπρόσθετα, δεν έχουν τη δυνατότητα καθαρισμού του πυθμένα από φερτές ύλες και απαιτούν περιοδικό καθαρισμό με μηχανικά μέσα (εκσκαφείς). Ο καθαρισμός θα πρέπει να πραγματοποιείται πριν η στάθμη των φερτών υλών ανυψωθεί και αρχίσει να συμπαρασύρεται προς τους υδροστροβίλους μέσω της υδροληψίας.

#### Πλευρικοί υπερχειλιστές

Σε διαμόρφωση πλευρικού υπερχειλιστή, παράλληλα προς τη στέψη του, δημιουργείται διάωρυγα η οποία μεταφέρει την παροχή που υπερχειλίζει σε ένα κεκλιμένο αγωγό ή σε σήραγγα. Η πλευρική διάωρυγα πρέπει να έχει κατάλληλη κλίση ώστε να μπορεί να διοχετεύει τη μέγιστη παροχή. Σημειώνεται ότι η ροή στη διάωρυγα δεν είναι ομοιόμορφη λόγω του έντονου στροβιλισμού και ανακυκλοφορίας κατά την πτώση του νερού από τη στέψη.

#### Σιφωνοειδής υπερχειλιστής

Οι σιφωνοειδείς υπερχειλιστές διαμορφώνονται σε μΥΗΕ μικρού ύψους πτώσεως όταν είναι επιθυμητή η διατήρηση της ανάντη στάθμης σε περιορισμένα όρια διακύμανσης. Η ροή αναπτύσσεται όταν αφαιρεθεί ο αέρας από το εσωτερικό του σίφωνα και δημιουργηθεί διαφορά στάθμης μεταξύ ανάντη δεξαμενής και εξόδου. Στο υψηλότερο σημείο του σίφωνα αναπτύσσεται υποπίεση ίση προς την ανύψωση της στάθμης ως προς την ανάντη. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν ατμοποίηση του νερού, το υψηλότερο σημείο του σίφωνα δεν μπορεί θεωρητικά να βρίσκεται υψηλότερα από 10[m] ΣΥ ως προς τα ανάντη. Πρακτικά, η υψομετρική διαφορά μεταξύ οροφής του σίφωνα και ανάντη στάθμης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 7[m]. Η έναρξη της ροής γίνεται αυτόματα όταν η ανάντη στάθμη φτάσει τη στάθμη της οροφής του σίφωνα. Η διακοπή της ροής μέσω του σίφωνα επιτυγχάνεται επίσης αυτόματα όταν η ανάντη στάθμη φτάσει στη στάθμη αεραγωγού όπου εισέρχεται αέρας στο σύστημα και αποκαθίσταται η ατμοσφαιρική πίεση. Η λειτουργία του σίφωνα είναι πλήρως αυτόματη, διατηρώντας την ανάντη στάθμη στα επιθυμητά όρια διακύμανσης, χωρίς την ανάγκη κινούμενων τμημάτων, όπως στην περίπτωση θυροφραγμάτων. Η διακοπή της ροής μπορεί να γίνει ηθελημένη με το άνοιγμα της βάνας του αγωγού αερισμού οπότε επιτυγχάνεται διακοπή του κενού. Η διατομή αναρρόφησης του σίφωνα πρέπει να είναι αρκετά βυθισμένη στην ανάντη δεξαμενή ώστε να αποτρέπεται η είσοδος ξένων τεμαχίων που ενδεχόμενα επιπλέουν ή αέρα ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης στροβιλισμών.

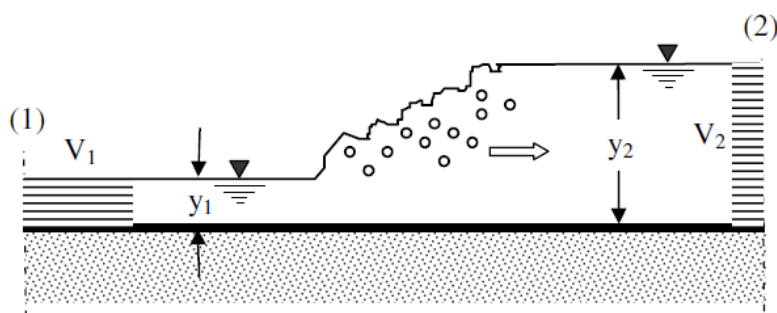
#### 4.3.5 Έργα εξόδου μεγάλων ταμιευτήρων

Σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητη η απόληψη των φερτών υλικών, λόγω της στερεοπαροχής στη λεκάνη κατάκλισης, κατασκευάζεται σήραγγα που συμβάλλει στην ταπείνωση της στάθμης του ταμιευτήρα ή και στην πλήρη εκκένωση του. Στις περιπτώσεις που είναι τεχνικά δυνατό και για λόγους οικονομίας και μείωσης των εκσκαφών, οι δύο σήραγγες, α) του υπερχειλιστή σηραγοειδούς μορφής και β) της εκτροπής, οδεύουν προς τα κατάντη μέσω κοινής σήραγγας (περίπτωση φραγμάτων Μόρνου και Αώου κ.α.).

#### 4.4 Λεκάνη ηρεμίας

Όταν η ενέργεια του νερού σε έναν υπερχειλιστή πρέπει να ελαττωθεί πριν επιστρέψει στην κοίτη του ποταμού, τότε μια από τις ενδεικνυόμενες λύσεις είναι η λεκάνη ηρεμίας (stilling basin). Η καταστροφή της ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας υδραυλικού άλματος μέσα στη λεκάνη.

Υδραυλικό άλμα είναι το φαινόμενο κατά το οποίο έχουμε μετάβαση από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη ροή. Σε περίπτωση που ο πυθμένας του καναλιού είναι οριζόντιος η μετάβαση από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη ροή συνοδεύεται από σημαντικές απώλειες ενέργειας, ενώ η ειδική δύναμη  $M$  παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Οι απώλειες ενέργειας προκαλούνται από τη δημιουργία έντονης τύρβης στην περιοχή μεταβολής του βάθους.



Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση του υδραυλικού άλματος (Παπανικολάου, 2016).

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής στην κατεύθυνση της ροής  $x$  μεταξύ των διατομών (1) αμέσως ανάντη και (2) αμέσως κατόντη του άλματος, αμελώντας τη βαρύτητα (οριζόντιος αγωγός) και τις τριβές (λόγω μικρού μήκους του άλματος), γράφεται ως εξής

$$M_1 = M_2 \Rightarrow \left| \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \right|_1 = \left| \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \right|_2 \quad (4.9)$$

Η σχέση αυτή είναι αναγκαία για τη δημιουργία υδραυλικού άλματος, τα δε βάθη ροής  $y_1$  στα ανάντη και  $y_2$  στα κατόντη του άλματος καλούνται συζυγή.

Το υδραυλικό άλμα έχει ερευνηθεί πειραματικά σε μεγάλη λεπτομέρεια. Η μορφή και ιδιότητές του (όπως π.χ. το μήκος του) είναι συνάρτηση του αριθμού Froude της υπερκρίσιμης ανάντη ροής.



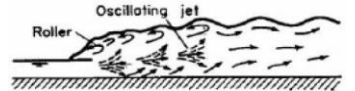


Ο αριθμός Froude σε ανοιχτό αγωγό δίνεται από τη σχέση

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (4.10)$$

Όπου  $V$  η μέση ταχύτητα της ροής και  $D = \frac{A}{T}$  το βάθος ροής της ισοδύναμης ορθογωνικής διατομής πλάτους  $T$  ίσου με το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας του αγωγού.

Οι κατηγορίες του υδραυλικού άλματος είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες υδραυλικού άλματος και τα χαρακτηριστικά τους (Παπανικολάου, 2016).

Χαρακτηρισμός Άλματος	Αριθμός Fr ανάντη	Σχηματική απεικόνιση του άλματος	Καταστροφή ενέργειας
Κυματοειδές (undular ή pre-jump)	$1 < Fr_1 < 1.7$		<5%
Ασθενές (weak)	$1.7 < Fr_1 < 2.5$		5% - 15%
Δονούμενο (oscillating)	$2.5 < Fr_1 < 4.5$		15% - 45%
Μόνιμο (steady)	$4.5 < Fr_1 < 9$		45% - 70%
Ισχυρό (strong)	$9 < Fr_1$		70% - 85%

Στην περίπτωση του ασθενούς άλματος, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται ομαλά και σταδιακά με μικρές ανωμαλίες και η λεκάνη ηρεμίας προκύπτει ίση με το μήκος του άλματος.

Στην περίπτωση του δονούμενου άλματος, προκαλούνται επιφανειακά κύματα που μεταφέρονται ακόμη και χιλιόμετρα κατάντη της λεκάνης ηρεμίας. Σε αυτή την περίπτωση, οι λεκάνες ηρεμίας δεν είναι πολύ αποτελεσματικές γιατί τα επιφανειακά κύματα δεν μπορούν να αποσβεστούν με τέτοιες λύσεις. Χρειάζεται λοιπόν λήψη μέτρων για την απόσβεση των κυματισμών που μεταφέρονται στα κατάντη.

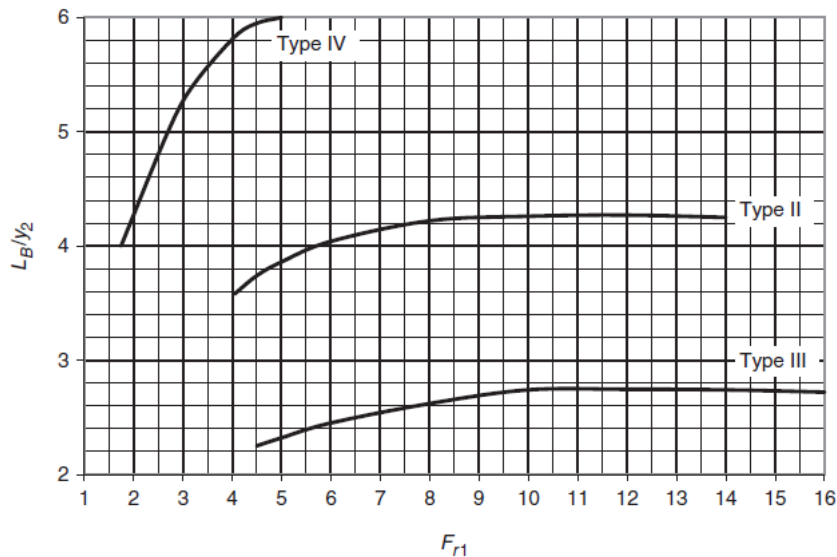
Στην περίπτωση του ισχυρού άλματος, εμφανίζονται στροβιλισμοί σε όλο το σώμα του άλματος, ενώ οι επιφανειακοί γίνονται πιο έντονοι με ανώμαλη την επιφάνεια και ισχυρά κύματα που οδηγούνται κατάντη του άλματος. Ως εκ τούτου, η κατασκευή λεκανών ηρεμίας για την περίπτωση αυτή είναι πολύ δαπανηρή.

Επιθυμητή κατηγορία του υδραυλικού άλματος ειδικότερα όταν χρησιμοποιείται σαν μηχανισμός καταστροφής ενέργειας (στις λεκάνες ηρεμίας –), είναι το μόνιμο, επειδή δεν δημιουργούνται κυματισμοί στα κατάντη. Για την περίπτωση αυτή, έχουν μελετηθεί διάφοροι τύποι λεκανών ηρεμίσσεως, με μειωμένες διαστάσεις, στις οποίες δεν μειώνεται η αποτελεσματικότητα του άλματος.

Πίνακας 4.2: Λεκάνες Ηρεμίσσεως κατά USBR (Παπανικολάου, 2016).

Όνομα	Εφαρμογή	Σχηματική Απεικόνιση
USBR type II	$q < 50 \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ $4.5 < Fr_1 < 9$	
USBR type III	$q < 20 \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ $4.5 < Fr_1 < 9$ $V_1 < 20 \left[ \frac{m}{s} \right]$	

Το μήκος  $L_B$  της λεκάνης ηρεμίας συναρτῆσει του αριθμού Froude της ανάντη ροῆς δίνεται από το παρακάτω Σχήμα 4.13. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κατασκευών φαίνονται πάνω στα επιμέρους σχήματα του Πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.13: Μήκος Λεκανών Ηρεμίσσεως τύπου USBR (Ακαν, 2006).

## 4.5 Έργα υδροληψίας

### 4.5.1 Γενικά

Σκοπός του έργου υδροληψίας είναι η καθοδήγηση της παροχής του νερού στη διώρυγα προσαγωγής (ανοικτός αγωγός) ή κατευθείαν στον αγωγό πτώσεως (ή προσαγωγής) όταν δεν παρεμβάλλεται ανοικτή διώρυγα. Έτσι διαμορφώνεται η ροή όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη, χωρίς την ανάπτυξη υπερβολικών ταχυτήτων οι οποίες θα προκαλούσαν αποκόλληση και σχηματισμό στροβιλισμών. Παράλληλα, το έργο υδροληψίας είναι εφοδιασμένο με εσχάρα για τη συγκράτηση των επιπλέοντων σωμάτων (κλαδιά δέντρων κλπ), με θυρόφραγμα (ή βάνα) ώστε να παρέχεται η δυνατότητα ηθελημένης διακοπής της λειτουργίας (για παράδειγμα στην περίπτωση συντήρησης) και με διάταξη εξαμμωτή, ώστε τα αιωρούμενα σωματίδια να απομακρύνονται και να μην συμπαρασύρονται προς τους υδροστροβίλους. Όταν η χωρητικότητα και η έκταση του ταμιευτήρα ανάντη του φράγματος (ή του υπερχειλιστή) είναι μικρή και δεν διατίθεται επαρκές μήκος διαδρομής ώστε τα αιωρούμενα σωματίδια να προλάβουν να κατακαθίσουν στον πυθμένα και μακριά από την υδροληψία, όπως συνήθως συμβαίνει στα μΥΗΕ, η διαμόρφωση εξαμμωτή είναι πολύ μεγάλης σημασίας, ώστε τα σωματίδια να μην εισχωρήσουν στη διώρυγα ή στον αγωγό προσαγωγής.

Όταν η κλίση του υδατορέματος και η ταχύτητα ροής σε αρκετή απόσταση ανάντη του έργου είναι μικρές, η ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να είναι αμελητέα και η διώρυγα υδροληψίας που είναι εγκατεστημένη στη ροή του ποταμού δεν είναι συνήθως εξοπλισμένη με διάταξη εξαμμωτή. Κατά την περίπτωση ακραίων πλημμυρικών επεισοδίων (μεγάλες ταχύτητες, σημαντική ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων) θα πρέπει να διακόπτεται η λειτουργία των υδροστροβίλων, ώστε να αποφεύγεται η φθορά τους από μηχανική διάβρωση λόγω της μη καθίζησης των αιωρούμενων. Στα μΥΗΕ μικρού ύψους πτώσης οι ταχύτητες είναι σχετικά χαμηλές (λόγω του μικρού ύψους πτώσης) και ο κίνδυνος από τη μηχανική διάβρωση είναι σχετικά μικρότερος, με αποτέλεσμα να είναι ανεκτή η υψηλότερη συγκέντρωση σε αιωρούμενα σωματίδια. Για τους λόγους αυτούς, τα μΥΗΕ μικρού ύψους πτώσης μπορεί να μην έχουν διάταξη εξαμμωτή στο έργο υδροληψίας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παροχή φερτών και αιωρούμενων σωματιδίων σε μια διατομή υδατορέματος είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια, καθώς εξαρτάται από την εκάστοτε απορροή και από τις ανάντη γεωλογικές συνθήκες. Σε υδατορέματα ορεινών περιοχών μετά από έντονα πλημμυρικά επεισόδια, είναι πιθανό η στερεοπαροχή να αντιστοιχεί ακόμη και στο 80% της ποσότητας των φερτών ενός πλήρους υδρολογικού έτους. Η συσσώρευση μεγάλης ποσότητας φερτών υλών σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα καθιστά τη διαδικασία έκπλυσης του πυθμένα ανάντη της υδροληψίας αναποτελεσματική. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι η κατασκευή προφράγματος από ογκώδεις φυσικούς λίθους, οι οποίοι συγκρατούν τα φερτά υλικά μεγάλου μεγέθους. Ο καθαρισμός της λεκάνης ανάντη του προφράγματος γίνεται περιοδικά με μηχανικά μέσα (εκσκαφείς) και για το λόγο αυτό η θέση κατασκευής του προφράγματος πρέπει να είναι εύκολα προσπελάσιμη.

#### 4.5.2 Βυθισμένη Υδροληψία ή Υδροληψία Ταμιευτήρα

Η βυθισμένη υδροληψία διαμορφώνεται στον πυθμένα του ανάντη ταμιευτήρα (ή δεξαμενής τροφοδοσίας) και συνδέεται απευθείας με τον αγωγό πτώσης. Για την επίτευξη καλών συνθηκών εισόδου του νερού στον αγωγό προσαγωγής θα πρέπει να επιδιώκονται συμμετρικές συνθήκες ροής, ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός στροβιλισμών, να είναι αρκετά υπερυψωμένη σε σχέση με τον πυθμένα ώστε να μην ευνοείται η εισαγωγή φερτών στον αγωγό, ενώ ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται επαρκές βύθισμα (υψομετρική επιφάνεια μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας της ροής και την άνω παρειά του αγωγού προσαγωγής) ώστε να αποτρέπεται η αναρρόφηση αέρα. Η διέλευση αέρα από τον υδροστρόβιλο προκαλεί λειτουργία με έντονους κραδασμούς και μείωση του βαθμού απόδοσης ακόμη και κατά 4-5%.

Η τιμή του ελάχιστου βυθίσματος  $h_{min}$  μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να ληφθεί από τη σχέση:

$$h_{min} = 1.7 \cdot D \cdot Fr \quad (4.11)$$

Όπου  $D$  η διάμετρος του αγωγού,  $Fr$  ο αριθμός Froude που δίνεται από τη σχέση 4.10.

Στη διατομή εισόδου της υδροληψίας τοποθετείται εσχάρα. Το βασικό μειονέκτημα της βυθισμένης υδροληψίας αυτού του τύπου είναι η δυσκολία προσπέλασης με σκοπό την επίβλεψη και συντήρησή της και η μη δυνατότητα ελέγχου της ενδεχόμενης εισχώρησης φερτών και αιωρούμενων υλικών. Για το λόγο αυτό το έργο υδροληψίας στα μικρά ΥΗΕ έχει, στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων, τη μορφή διώρυγας η οποία στο άκρο της τροφοδοτεί είτε τον αγωγό πτώσης, είτε τη διώρυγα προσαγωγής.

#### 4.5.3 Διώρυγες υδροληψίας – Ποτάμια Υδροληψία

Οι διώρυγες υδροληψίες σε αντίθεση με τις βυθισμένες ουσιαστικά δημιουργούν μια δεύτερη διαδρομή για το νερό την οποία το νερό να μπορεί να ακολουθεί πιο εύκολα από τη φυσική ροή, χωρίς όμως να ακυρώνουν την τελευταία με κάποιο τεχνικό έργο.

Η βασική επιδίωξη για τη σωστή σχεδίαση διώρυγας υδροληψίας είναι η εξασφάλιση του ότι η ροή που οδηγείται μέσω αυτής στη διώρυγα προσαγωγής (ή και κατευθείαν στον αγωγό πτώσης) να είναι απαλλαγμένη φερτών υλών. Πρέπει να προσανατολίζεται κατά τη διεύθυνση της ροής του υδατορέματος έτσι ώστε να εξασφαλίζεται σε αυτή μεγαλύτερη ομοιομορφία της ροής. Επίσης πρέπει να διαμορφώνεται κοντά στον υπερχειλιστή ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός νεκρών ζωνών ή ζωνών ανακυκλοφορίας στις οποίες ευνοείται η κατακάθιση των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ παράλληλα να διευκολύνεται ο καθαρισμός της εσχάρας που τοποθετείται στην είσοδο.

Προτιμότερη είναι η διαμόρφωση της υδροληψίας στο κοίλο τμήμα της καμπύλης του υδατορέματος καθώς η ζώνη ανακυκλοφορίας και κατακάθισης των φερτών σχηματίζεται στην απέναντι κυρτή καμπυλότητα. Στην περίπτωση διαμόρφωσης της υδροληψίας και του υπερχειλιστή σε ευθύγραμμο τμήμα του υδατορέματος με την κατασκευή τοιχίου στην απέναντι όχθη, είναι δυνατός ο σχηματισμός ζώνης ανακυκλοφορίας και κατακάθισης των φερτών. Με τον τρόπο αυτό τα φερτά συσσωρεύονται σε θέσεις κατά το δυνατό απομακρυσμένες από την είσοδο



της διώρυγας προσαγωγής, ενώ προς την πλευρά της διώρυγας υδροληψίας διαμορφώνεται διώρυγα έκπλυσης εξοπλισμένης με θυρόφραγμα.

### Εσχάρα συγκράτησης

Στην είσοδο της διώρυγας υδροληψίας τοποθετείται εσχάρα η οποία συγκρατεί τα επιπλέοντα σώματα (κλαδιά δέντρων, πλαστικά μπουκάλια και σακούλες, ξερά φύλλα κλπ) ώστε να μην εισχωρήσουν σε αυτή. Οι εσχάρες κατασκευάζονται από μεταλλικές ράβδους ή ακόμη και από ράβδους από πλαστικό, το πλεονέκτημα των οποίων είναι η διαμόρφωση των ακμών τους έτσι ώστε να παρουσιάζουν μικρότερες υδραυλικές απώλειες. Το διάκενο μεταξύ των ράβδων είναι της τάξης των 12[mm] για μικρούς υδροστροβίλους Pelton και φτάνει τα 150[mm] προκειμένου για έργα μικρού ύψους πτώσης με υδροστροβίλους αξονικής ροής. Η καθαρή διατομή της εσχάρας (ολική διατομή μείον τη διατομή των ράβδων της εσχάρας) υπολογίζεται έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα όχι μεγαλύτερη του  $0.75 \left[ \frac{m}{s} \right]$  για πολύ μικρές παροχές ή του  $1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$  για μεγαλύτερες παροχές. Οι εσχάρες βιδώνονται στο πλαίσιο σκυροδέματος με ανοξείδωτες βίδες ή τοποθετούνται συρταρωτά σε αντίστοιχη υποδοχή που διαμορφώνεται στο σκυρόδεμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις υδατορεμάτων ομαλής ροής η συγκράτηση των επιπλεόντων σωμάτων μπορεί να επιτευχθεί με φράγμα πλωτήρων που τοποθετείται καθόλο το πλάτος του υδατορέματος ανάντη του υπερχειλιστή.

Η παρεμβολή της εσχάρας καθαρισμού στη ροή έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη υδραυλικών απωλειών οι οποίες εκδηλώνονται ως μία μεταβολή κατά  $\delta h_E$  μεταξύ της στάθμης ανάντη και κατάντη της εσχάρας. Η πτώση  $\delta h_E$  εκφράζεται ως:







$$\delta h_E = \zeta_r \frac{v^2}{2g} \quad (4.12)$$

Στην οποία με  $v$  συμβολίζεται η μέση ταχύτητα της ροής και με  $\zeta_r$  ο συντελεστής απωλειών της εσχάρας η τιμή του οποίου εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη διάταξη της εσχάρας και εκφράζεται ως:

$$\zeta_r = \beta \left( \frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin a \quad (4.13)$$

Στην οποία με  $s$  συμβολίζεται το πάχος ή διάμετρος των ράβδων της εσχάρας, με  $b$  το καθαρό διάκενο μεταξύ δύο διαδοχικών ράβδων, με  $a$  η κλίση της εσχάρας ως προς την οριζόντιο, και με  $\beta$  συντελεστής μορφής των ράβδων της εσχάρας, η τιμή του οποίου λαμβάνεται από τον πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Συντελεστής σχήματος ράβδων εσχάρας (Παπαντώνης, 2008).

Διατομή ράβδου εσχάρας						
$\beta$	2.42	1.83	1.67	0.92	0.76	1

Ο καθαρισμός της εσχάρας γίνεται με το χέρι και κατάλληλο εργαλείο εάν το βύθισμά της δεν είναι μεγαλύτερο των 4[m] ή μέσω ειδικού μηχανικού συστήματος όταν κατά περιόδους η ποσότητα των φερτών υλικών είναι σημαντική. Ιδιαίτερο πρόβλημα δημιουργείται το φθινόπωρο σε περιοχές με πολλά φυλλοβόλα δέντρα, καθώς τα ξερά φύλλα πολύ γρήγορα φράζουν εντελώς τη διατομή διέλευσης του νερού. Ο καθαρισμός της εσχάρας διευκολύνεται εάν αυτή είναι κεκλιμένη (συνήθης κλίση της τάξεως των 60° ως προς την οριζόντιο).

#### Αναβαθμός πυθμένα

Η μη εισχώρηση των φερτών υλών στη διώρυγα υδροληψίας επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διαμόρφωση της εισόδου του νερού σε αυτή, συνήθως με την κατασκευή αναβαθμού. Συγκεκριμένα ο πυθμένας της διώρυγας υδροληψίας διαμορφώνεται κατά 1-2[m] υψηλότερα από τον αρχικό πυθμένα της λεκάνης. Πιο αποτελεσματικός στη συγκράτηση των φερτών θεωρείται ο αναβαθμός με προέκταση μορφής προβόλου.

Οι φερτές ύλες που συσσωρεύονται ανάντη του αναβαθμού θα πρέπει περιοδικά να απομακρύνονται πριν η στάθμη τους φτάσει αυτή της διώρυγας οπότε στη συνέχεια κινδυνεύουν να παρασυρθούν προς τη διώρυγα υδροληψίας. Για το λόγο αυτό, ανάντη του αναβαθμού και μεταξύ του εκχειλιστή και της διώρυγας υδροληψίας, διαμορφώνεται διώρυγα έκπλυσης. Με το άνοιγμα θυροφράγματος σχηματίζεται ροή υψηλής ταχύτητας, η οποία συμπαρασύρει τις φερτές ύλες κατάντη του υπερχειλιστή.

#### Ορεινή υδροληψία

Μία μορφή υδροληψίας κατάλληλη για ορεινές περιοχές με μεγάλη στερεοπαροχή και απότομες μεταβολές της παροχής του υδατορέματος είναι η λεγόμενη ορεινή υδροληψία (ή Τυρολέζικη). Έχει τη μορφή υπερχειλιστή στο πάνω μέρος του οποίου τοποθετείται εσχάρα με τις λάμες διατεταγμένες κατά τη φορά της ροής ή διάτρητο έλασμα. Η παροχή του υδατορέματος υπερχειλίζει την όλη κατασκευή και μέρος ή το σύνολό της διέρχεται από τα διάκενα της εσχάρας (ή τις οπές του διάτρητου ελάσματος) προς τη συλλεκτήρια διώρυγα, διαμορφωμένη κατά το πλάτος του υπερχειλιστή. Από τη συλλεκτήρια διώρυγα η προς αξιοποίηση παροχή οδηγείται στη διάταξη του αμμοκράτη (εάν απαιτείται) και στη συνέχεια στη διώρυγα ή τον αγωγό προσαγωγής.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της ορεινής υδροληψίας είναι η απλότητα της κατασκευής, η αποτελεσματικότητά της στην αποφυγή εισόδου φερτών υλών μεγάλου μεγέθους στην προσαγωγή και η εύκολη συντήρηση.

Στην περίπτωση μεγάλων παροχών η κατακράτηση της άμμου μπορεί να βελτιωθεί με τη διαμόρφωση, στον πυθμένα και ανάντη της υδροληψίας, ενός καμπυλωμένου ή ευθύγραμμου αναβαθμού το ύψος του οποίου πρέπει να είναι της τάξεως 0.5-0.7 του βάθους του νερού. Η ροή που διέρχεται πάνω από τον αναβαθμό οδηγείται στην ορεινή υδροληψία απαλλαγμένη φερτών υλών. Η λεκάνη ανάντη του αναβαθμού καθαρίζεται περιοδικά μέσω των θυροφραγμάτων έκπλυσης που βρίσκονται στο άλλο άκρο της διάταξης.

Για την κατασκευή της εσχάρας χρησιμοποιούνται λάμες ορθογωνικής, τραπεζοειδούς ή κυκλικής διατομής. Αν αντί για εσχάρα τοποθετηθεί διάτρητο έλασμα, θα πρέπει οι οπές του να έχουν διάμετρο της τάξεως των 6-12[mm]. Αν και η τιμή του συντελεστή εισροής του διάτρητου ελάσματος είναι μικρότερη από αυτή της εσχάρας με λάμες (δηλαδή για την ίδια παροχή απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια της υδροληψίας), η τοποθέτηση διάτρητου ελάσματος παρουσιάζει πολύ μικρότερο κίνδυνο απόφραξης από τα διερχόμενα στερεά, κυρίως λόγω της υψηλότερης οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας, η οποία τα συμπαρασύρει. Επιπλέον η απόφραξη σε μία θέση της εσχάρας έχει τάση να εξαπλώνεται σε όλο το πλάτος της οπότε σταδιακά η τιμή του συντελεστή εισροής τείνει στο 0 (εάν η εσχάρα δεν καθαριστεί στο ενδιάμεσο). Η εσχάρα κατασκευάζεται συνήθως ως ένα πλαίσιο το οποίο βιδώνεται και ενσωματώνεται στη στέψη ή κατάντη της στέψης του υπερχειλιστή.

Η κλίση της εσχάρας ως προς την οριζόντιο είναι της τάξης του  $I=0-0.2$  αν και έχουν κατασκευαστεί εσχάρες με κλίση έως και  $I=0.5$  (γωνία  $27^\circ$ ). Όσο αυξάνεται η κλίση της εσχάρας μειώνεται η τιμή του συντελεστή εισροής, όμως βελτιώνεται σημαντικά η ικανότητα αυτοκαθαρισμού της.

Ο υπολογισμός της ροής που εισρέει από την εσχάρα ή το διάτρητο έλασμα είναι πολύπλοκος λόγω της ανομοιομορφίας των συνθηκών της ροής κατά το πλάτος της. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται σχέσεις που έχουν εμπειρικό χαρακτήρα. Η παροχή  $Q_v$  που εισρέει στην υδροληψία με εσχάρα από λάμες υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_v = C \cdot s' \cdot L \cdot B \sqrt{2g \cdot H_o} \quad (4.14)$$

Στην οποία με  $C$  συμβολίζεται ο συντελεστής εισροής,  $B$  το πλάτος της εσχάρας,  $L$  το μήκος της και  $H_o$  η ολική ενέργεια του νερού ανάντη και  $s'$  ο συντελεστής μορφής της εσχάρας.

Η τιμή του ύψους  $H_o$  υπολογίζεται από τη εφαρμογή της σχέσης παροχής ύψους σε εκχειλιστή ευρείας στέψης δηλαδή:

$$Q = C \cdot L \cdot H_o \sqrt{2g \cdot H_o} = L \cdot M \cdot H_o^{3/2} \quad (4.15)$$

Στην οποία  $C=0.33-0.77$  οπότε  $M=1.46-1.64$ . Λόγω της εισερχόμενης παροχής η τιμή του ύψους  $H_o$  που προκύπτει από την εξίσωση 4.15 πρέπει να μειωθεί κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 6-10%.

Οι τιμές του συντελεστή εισροής  $C$  λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.4 συναρτήσει της κλίσης της εσχάρας και της τιμής του συντελεστή μορφής  $s'$ .

Πίνακας 4.4: Συντελεστής εισροής εσχάρας ορεινής Υδροληψίας (Παπαντώνης, 2008).

Μορφή λάμας	Κλίση εσχάρας	Συντελεστής μορφής εσχάρας $s'$			
		0.3	0.4	0.5	0.6
Τραπεζοειδής	0.0	0.52	0.48	0.44	0.4
	0.2	0.48	0.44	0.4	0.38
Ορθογωνική	0.0	0.46	0.42	0.39	0.36
	0.2	0.44	0.4	0.36	0.34

Στην περίπτωση διάτρητου ελάσματος ο υπολογισμός της παροχής  $Q_v$  που εισρέει υπολογίζεται υποθέτοντας ότι το ύψος του νερού πάνω από το έλασμα μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των τιμών κατά το πλάτος  $B$  του ελάσματος οπότε:

$$Q_v = \frac{2}{3} C \cdot A_n \sqrt{2g} \frac{h_1^{3/2} - h_2^{3/2}}{h_1 - h_2} \quad (4.16)$$

Στην οποία με  $A_n$  συμβολίζεται η οριζόντια προβολή της συνολικής επιφάνειας των οπών και με  $C$  παριστάνεται ο συντελεστής εισροής η τιμή του οποίου είναι ίση προς (Παπαντώνης, 2008):

Πίνακας 4.5: Συντελεστής εισροής διάτρητου ελάσματος (Παπαντώνης, 2008).

Κλίση I	Οπές κωνικές	Οπές κυλινδρικές
0.0	0.5	0.47
0.2	0.48	0.46

Οι τιμές του ύψους  $h_1$  και  $h_2$  συνδέονται με τις αντίστοιχες τιμές του κρίσιμου ύψους της ροής μέσω των σχέσεων:

$$h_1 = \sigma_1 \cdot y_{cr1} = \sigma_1 \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q_1^2}{g}} \quad \text{και} \quad h_2 = \sigma_2 \cdot y_{cr2} = \sigma_2 \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q_2^2}{g}} \quad (4.17)$$

Στις οποίες λαμβάνεται  $\alpha \approx 1$  ενώ οι τιμές των συντελεστών  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  λαμβάνονται ίσες προς (Παπαντώνης, 2008):

Κλίση I	$\sigma_1$	$\sigma_2$
0.0	0.88	0.6
0.2	0.76	0.45

Η συλλεκτήρια διώρυγα στην οποία καταλήγει η παροχή που διέρχεται από την εσχάρα ή το διάτρητο έλασμα έχει διατομή ορθογωνική ή τραπεζοειδή με σταθερό πλάτος στο άνω μέρος. Η κλίση του πυθμένα της είναι ομοιόμορφη ή αυξάνεται προοδευτικά προς τη πλευρά της διώρυγας προσαρμογής. Η ροή στη συλλεκτήρια διώρυγα μοιάζει με αυτή σε πλευρικό εκχειλιστή με τη διαφορά ότι είναι υποκρίσιμη. Ο καθορισμός του πλάτους της συλλεκτήριας διώρυγας και της στάθμης του πυθμένα γίνεται ξεκινώντας από το άκρο στο οποίο συγκεντρώνεται το σύνολο της παροχής  $Q$ , όπου το ύψος της ροής τίθεται ίσο προς το 0.90-0.95 του ύψους της αντίστοιχης κρίσιμης ροής. Το ύψος της ροής στην αρχή της συλλεκτήριας διώρυγας καθορίζεται από το ότι η μέση ταχύτητα της ροής θα πρέπει να είναι της τάξεως του  $1.5 - 2 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Στη συλλεκτήρια διώρυγα, μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του νερού και της εσχάρας ή του διάτρητου ελάσματος, πρέπει να διατηρείται διάκενο με αέρα το ύψος του οποίου στην αρχή της διώρυγας πρέπει να είναι τουλάχιστο ίσο προς 0.2[m], έτσι ώστε ο αεραγωγός που διαμορφώνεται στη θέση αυτή να είναι ελεύθερος.

#### 4.5.4 Εξαμμωτής

Σκοπός του εξαμμωτή είναι η αφαίρεση των αιωρούμενων σωματιδίων από τη ροή του νερού πριν αυτή οδηγηθεί στη διώρυγα ή τον αγωγό προσαγωγής. Πρόκειται για κόκκους άμμου σε ποσότητα και μέγεθος που εξαρτώνται από την ανάντη κλίση του υδατορέματος (άρα της ταχύτητας της ροής) και στη γεωλογική φύση της λεκάνης απορροής. Οι κόκκοι αυτοί, εάν συμπαρασυρθούν προς τον υδροστρόβιλο μέσω του συστήματος προσαγωγής, θα προξενήσουν διάβρωση, η οποία είναι τόσο πιο έντονη, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της ροής (δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος πτώσεως) και όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του νερού σε αυτά.

Εάν η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο νερό είναι υψηλή (ακόμη και σε χαμηλές παροχές του υδατορέματος), δηλαδή της τάξεως των  $5 - 10 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ , είναι απαραίτητη η απομάκρυνση μέχρι ενός βαθμού (εξάμμωση) έτσι ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη φθορά στα περιεόμενα μηχανικά μέρη (βάνες, θυροφράγματα, αγωγός προσαγωγής, υδροστρόβιλο). Από οικονομοτεχνική άποψη θεωρείται αποδεκτή αφαίρεση των κόκκων άμμου διαμέτρου μέχρι 0.3[mm] αφού η απομάκρυνση κόκκων διαμέτρου μικρότερης των 0.3[mm] μπορεί να γίνει με μεγάλη δυσκολία ενώ οριακά είναι σχεδόν αδύνατη η αφαίρεση κόκκων διαμέτρου μικρότερης των 0.1[mm] τουλάχιστο για τις πρακτικές εφαρμογές ενός μΥΗΕ.

Οι ανάγκες εξάμμωσης εξαρτώνται κύρια από την τιμή της υδραυλικής πτώσης και τον τύπο του υδροστροβίλου. Συγκεκριμένα, οι υδροστροβίλοι Francis είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στη φθορά από μηχανική διάβρωση, τόσο στις ακμές των πτερυγίων του δρομέα όμως κυρίως στους λαβυρίνθους, η αύξηση του διακένου των οποίων συνεπάγεται αύξηση των ογκομετρικών απωλειών και άρα μείωση του βαθμού απόδοσης. Στους υδροστροβίλους τύπου Pelton η φθορά εντοπίζεται στις ζώνες υψηλής ταχύτητας και συγκεκριμένα στο άκρο της βελόνης του ακροφυσίου (γι' αυτόν το λόγο προβλέπεται η εύκολη αντικατάστασή του) και στη διαχωριστική ακμή των σκαφιδίων. Στην κοινή περιοχή επιλογής μεταξύ υδροστροβίλων Francis και Pelton ένα κριτήριο υπέρ των υδροστροβίλων Pelton είναι ακριβώς η μικρότερη και περισσότερο ελεγχόμενη φθορά από μηχανική διάβρωση και η μεγαλύτερη ευκολία στην πρόσβαση τόσο για έλεγχο, όσο και για την αντικατάσταση των φθαρμένων εξαρτημάτων.

Τα στοιχεία που αφορούν την κοκκομετρική σύνθεση των φερτών και τη σύστασή τους θα πρέπει να τίθενται υπόψιν του κατασκευαστή του υδροστροβίλου, ώστε να διαμορφώσει κατάλληλα τα εξαρτήματα φθοράς (δακτύλιοι φθοράς), καθώς και το υλικό τους. Οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να γίνονται σε διάφορες εποχές και παροχές του υδατορέματος.

Η υδραυλική πτώση είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας. Συγκεκριμένα για τιμές υψηλότερες των 400[m] τα στερεά σωματίδια γίνονται έντονα διαβρωτικά, ακόμη και σε διάμετρο κόκκου της τάξης του 0.1[mm], ενώ αιωρούμενα σωματίδια χαλαζιακής άμμου (quartz) έχουν έντονη διαβρωτική δράση για διάμετρο ακόμη και 0.05[mm], λόγω της μεγάλης σκληρότητας του υλικού και του ακανόνιστου σχήματός του.

Αρχή λειτουργίας της εξάμμωσης

Ένας κόκκος στερεού υλικού που αιωρείται σε ακίνητο υγρό κατακαθίζει με μία ταχύτητα  $w_k$  η οποία οφείλεται στην επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας, υδροδυναμικών δυνάμεων αντίστασης και δυνάμεων επιφανειακής τάσης. Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας κατακάθισης κόκκων άμμου σε ακίνητο νερό θερμοκρασίας 25[°C] δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί συναρτήσει της διαμέτρου του κόκκου. Η ταχύτητα κατακάθισης μειώνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία του νερού.

*Πίνακας 4.6: Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας κατακάθισης κόκκων άμμου σε ακίνητο νερό θερμοκρασίας 25[°C] (Παπαντώνης, 2008).*

$d$ [mm]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$w_c$ [cm/s]	0.7	2	3.5	5	6	7	8	8.5	9	10

Εάν το νερό είναι σε κίνηση, τότε λόγω της τύρβης και των μικροστροβιλισμών που αναπτύσσονται στη ροή, ο κόκκος του στερεού υφίσταται τυχαίες ωθήσεις που τον διατηρούν περισσότερο διάστημα σε αιώρηση, ενώ, αν το επίπεδο της τύρβης αυξηθεί σημαντικά, τότε οι στερεοί κόκκοι δεν κατακαθίζουν και διατηρούνται σε αιώρηση. Δεδομένου ότι το επίπεδο τύρβης εξαρτάται άμεσα από τη μέση ταχύτητα της ροής προκύπτει ότι η μέση ταχύτητα της ροής  $v$  είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή  $v_{cr}$ , τότε ο στερεός κόκκος δεν κατακάθεται, δηλαδή παραμένει σε αιώρηση. Αποδεικνύεται ότι η κρίσιμη αυτή ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$v_{cr} = 10w_k \cdot R^{1/6} \quad (4.18)$$

Στην οποία με  $R$  συμβολίζεται η υδραυλική ακτίνα της διατομής της ροής. Σύμφωνα με τα προηγούμενα η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας  $v_{cr}$  εξαρτάται από τη διάμετρο του μικρότερου κόκκου του οποίου επιδιώκεται η κατακράτηση, και όσο μικρότερη είναι η διάμετρος αυτή, τόσο μικρότερη μέση ταχύτητα της ροής απαιτείται, άρα τόσο μεγαλύτερη πρέπει να διαμορφώνεται η εγκάρσια διατομή της δεξαμενής για δεδομένη παροχή λειτουργίας.

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η πραγματική ταχύτητα κατακάθισης είναι μικρότερη από τη  $w_k$  (που αντιστοιχεί στο ακίνητο νερό) κατά την ταχύτητα τριβής  $u^*$ , η οποία εκφράζει το επίπεδο τύρβης της ροής. Στην περίπτωση μόνιμης και ομοιόμορφης ροής με ελεύθερη επιφάνεια τη ταχύτητα τριβής  $u^*$  εκφράζεται ως:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = v \cdot n \sqrt{\frac{g}{R^{1/3}}} = 3.1 \cdot v \cdot n \frac{1}{R^{1/6}} \quad (4.19)$$

Όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $n$  ο συντελεστής Manning.

Από την προηγούμενη ανάλυση προκύπτει η μέθοδος αφαίρεσης των στερεών κόκκων μέχρι ενός μεγέθους και άνω: η ροή οδηγείται σε μία δεξαμενή, τη δεξαμενή εξάμμοσης μήκους  $L$  και διατομής  $A$  έτσι ώστε η μέση ταχύτητα της ροής  $v = \frac{Q}{A}$  να είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα  $v_{cr}$ . Το στερεό σωματίδιο που εισέρχεται στη δεξαμενή από το δυσμενέστερο (το υψηλότερο σημείο της ροής κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια που χαρακτηρίζεται από το βάθος  $h$ ) αρχίζει να κατακάθεται με τη μέση ταχύτητα  $w_k - u^*$ , άρα θα διατρέξει πτώση κατά  $h$ , δηλαδή θα πέσει στον πυθμένα της δεξαμενής σε χρονικό διάστημα  $t_k = \frac{h}{w_k - u^*}$ . Κατά τη διάρκεια του χρονικού αυτού διαστήματος το στερεό σωματίδιο θα έχει διατρέξει οριζόντια διαδρομή (με τη μέση ταχύτητα της ροής) ίση προς:

$$L_k = v \cdot t_k = \frac{v \cdot h}{w_k - u^*} \quad (4.20)$$

Για να είναι επαρκές το μήκος  $L$  της δεξαμενής εξάμμοσης ώστε να κατακαθίζονται στον πυθμένα της σωματίδια μέχρι διάμετρο  $d$  θα πρέπει να είναι  $L > L_k$ . Οι κόκκοι μεγέθους μεγαλύτερου από τη διάμετρο  $d$  συσσωρεύονται στον πυθμένα σε απόσταση μικρότερη του  $L_k$ . Οι κόκκοι που συσσωρεύονται στον πυθμένα μέσω έκπλυσης μόνιμης ή περιοδικής και οδηγούνται στην κοίτη του υδατορέματος κατάντη του εκχειλιστή.

Διαμόρφωση του εξαμμοτή

Η ταχύτητα στη διώρυγα που τροφοδοτεί τον εξαμμοτή πρέπει να είναι υψηλή έτσι ώστε να μην κατακάθονται σε αυτή οι αιωρούμενοι κόκκοι, δηλαδή της τάξης του  $1.5 - 2 \left[ \frac{m}{s} \right]$ . Η επιβράδυνση της ροής από την τιμή αυτή στη μέση ταχύτητα της ροής στη δεξαμενή εξάμμοσης, της τάξης του  $0.1 - 0.3 \left[ \frac{m}{s} \right]$  (σε κάθε περίπτωση μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα κατακάθισης) πρέπει να γίνει με τρόπο ομοιόμορφο.

Ο πυθμένας του εξαμμοτή πρέπει να έχει κλίση προς τα κατάντη της τάξης του 2.5% εάν η τοπογραφία της περιοχής το επιτρέπει, και φέρει αναβαθμούς (ένα ή περισσότερους ανάντη των οποίων διαμορφώνεται θυρόφραγμα έκπλυσης. Η έκπλυση της άμμου από τον πυθμένα μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής. Στην περίπτωση συνεχούς έκπλυσης η απαιτούμενη παροχή είναι της τάξης του 10% της παροχής της υδροληψίας, γεγονός που αντιστοιχεί σε απώλεια ποσότητας νερού και άρα ενέργειας. Για το λόγο αυτό στα μικρά ΥΗΕ προτιμάται η ασυνεχής έκπλυση, εκτός και εάν η παροχή συνεχούς έκπλυσης συνδυαστεί με την υποχρέωση διάθεσης της παροχής συντήρησης.

Στον εξαμμοτή ασυνεχούς ή διακοπώμενης έκπλυσης, η άμμος κατακαθίζει στον πυθμένα από όπου απομακρύνεται μέσω της διαδικασίας έκπλυσης η οποία ενεργοποιείται αυτόματα ή χειροκίνητα. Η έκπλυση επιτυγχάνεται με το άνοιγμα των πλευρικών θυροφραγμάτων ανάντη των αναβαθμών του πυθμένα και οι κυλινδρικών θυροφραγμάτων που τοποθετούνται στον πυθμένα.

Η ροή μέσω των θυροφραγμάτων ή των βανών του πυθμένα συμπαρασύρει την άμμο που έχει κατακαθίσει στον πυθμένα και την οδηγεί κατάντη του υπερχειλιστή της υδροληψίας.

Από το άκρο του εξαμωτή τροφοδοτείται στη συνέχεια η διώρυγα προσαγωγής ή αγωγός πτώσης. Στην τελευταία αυτή περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται η μη εισχώρηση αέρα στον αγωγό πτώσης τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας όσο και κατά τη διάρκεια της έκπλυσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση υπερχειλιστή του οποίου η στάθμη της στέψης είναι 1.5[m] περίπου υψηλότερη από την άνω στάθμη του αγωγού πτώσης.

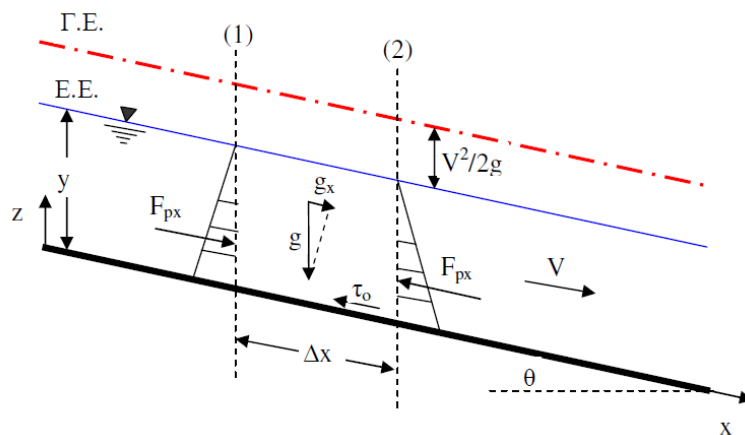
Σε όλες τις περιπτώσεις η διώρυγα του εξαμωτή, φέρει πλευρικό υπερχειλιστή προς τη πλευρά του υδατορέματος (συνήθως η ροή υπερχειλίσσης οδηγείται στη δεξιάμενη ηρεμίας του κυρίως υπερχειλιστή) έτσι ώστε η στάθμη να μην ξεπεράσει μια προκαθορισμένη μέγιστη τιμή όπως συχνά συμβαίνει στις αλλαγές του σημείου λειτουργίας της εγκατάστασης.

## 4.6 Διώρυγα

### 4.6.1 Στοιχεία μόνιμης ομοιόμορφης ροής σε διώρυγα

Ομοιόμορφη χαρακτηρίζεται η μόνιμη ροή στην οποία οι γραμμές ροής είναι παράλληλες με τον αγωγό και επομένως πραγματοποιήσιμη μόνο σε πρισματικούς αγωγούς. Το βάθος ροής είναι σταθερό (δηλαδή η ελεύθερη επιφάνεια είναι παράλληλη με τον πυθμένα), καθώς επίσης και η μέση ταχύτητα είναι ίδια σε κάθε διατομή του αγωγού. Επομένως η επιτάχυνση κατά μήκος του αγωγού είναι μηδενική. Ισχύει δηλαδή η σχέση:

$$J_E \left( = -\frac{dH}{dx} \right) = J_o \left( = -\frac{dz}{dx} = \sin \theta \right) = J \left( = -\frac{d(z+y)}{dx} \right)$$



Σχήμα 4.14: Αγωγός με ελεύθερη επιφάνεια σε ομοιόμορφη ροή (Παπανικολάου, 2016).

Η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Και θεωρώντας ότι η διατομή δεν μεταβάλλεται μέσα στο τμήμα  $\Delta x$  δηλαδή  $A_1=A_2$  προκύπτει  $V_1=V_2=V$ .



Επειδή η ροή δεν επιταχύνεται, η εξίσωση ορμής (ποσότητας της κίνησης) στον ολοκληρωματικό όγκο συνιστά μια εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων, δηλαδή

$$\sum F_x = F_{gx} + F_{\tau x} + F_{px} = \rho Q(V_2 - V_1) = 0$$

Όπου η δύναμη της βαρύτητας είναι

$$F_{gx} = \rho \cdot g_x \cdot A \cdot \Delta x = \rho \cdot g \cdot \sin \theta \cdot A \cdot \Delta x$$

Η δύναμη λόγω τριβών είναι

$$F_{\tau x} = -\tau_o \cdot P \cdot \Delta x$$

Και η συνισταμένη δύναμη λόγω πίεσης είναι μηδενική αφού στο διάστημα  $\Delta x$  το βάθος ροής θεωρείται σταθερό.

$$F_{px} = 0$$

Επομένως από την ισορροπία των δυνάμεων προκύπτει ότι

$$\tau_o P(\Delta x) = \rho g \sin \theta A(\Delta x) = \rho g A(\Delta x) J_o$$

Διαιρώντας με  $\Delta x$

$$\tau_o = \rho \cdot g \cdot \frac{A}{P} \cdot J_o$$

όπου  $\tau_o$  είναι η μέση διατμητική τάση των τοιχωμάτων,  $A$  είναι το εμβαδόν της υγρής επιφάνειας της διατομής, και  $P$  η βρεχόμενη περίμετρος. Κατ' αναλογία με τους αγωγούς υπό πίεση, η μέση διατμητική τάση το στα τοιχώματα του αγωγού μπορεί να γραφτεί

$$\tau_o = c_f \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} = \frac{f}{4} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις εξισώνοντας τη μέση διατμητική τάση  $\tau_o$  στο όριο και δεδομένης της σχέσης των Darcy-Weisbach

$$J_o = \frac{f}{4 \cdot R} \cdot \frac{V^2}{2g} = J_E$$

προκύπτει η σχέση

$$V = \sqrt{\frac{8}{f} \cdot g \cdot \sqrt{R \cdot J_E}} = C \cdot \sqrt{R \cdot J_E} \quad (4.21)$$

όπου  $R$  είναι η υδραυλική ακτίνα ( $R=A/P$ ) του αγωγού. Η παραπάνω σχέση των Darcy - Weisbach μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το διάγραμμα Moody, για κλειστούς αγωγούς μικρού μεγέθους, ορίζοντας  $R = \frac{\pi \frac{D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4}$ .

Για αγωγούς μεγαλύτερων διαστάσεων και φυσικά υδατορέματα, οι εμπειρικές σχέσεις δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό των απωλειών με βάση τη σχέση των Darcy –

Weisbach και την εξίσωση προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας σε σωλήνες (διάγραμμα Moody). Η περισσότερο χρησιμοποιημένη εμπειρική σχέση είναι η σχέση του Manning.

Οι Manning (1885) και Strickler δουλεύοντας ανεξάρτητα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής  $C$  δεν είναι δυνατόν να είναι ανεξάρτητος του βάθους ροής και συγκεκριμένα πρότειναν τη σχέση μεταβολής του  $C$  σαν συνάρτηση της υδραυλικής ακτίνας

$$C = \frac{R^{1/6}}{n}$$

όπου  $n$  είναι μια σταθερά που εκφράζει την τραχύτητα της διατομής. Αντικαθιστώντας στην 4.21 και εκτελώντας τις πράξεις

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (4.22)$$

Η παραπάνω σχέση ονομάζεται εξίσωση του Manning και ο συντελεστής  $n$  συντελεστής Manning, προς τιμήν του ερευνητή που την πρότεινε. Ο Ven Te Chow έχει κατηγοριοποιήσει το συντελεστή τραχύτητας  $n$  – Manning για αγωγούς από διάφορα υλικά. Για να ισχύει η παραπάνω σχέση, η υδραυλική ακτίνα  $R$  πρέπει δίδεται σε [m], η δε ταχύτητα ροής  $V$  που προκύπτει είναι σε  $\left[\frac{m}{s}\right]$  επειδή δεν έχει διαστατική ομογένεια, και επομένως δεν είναι ανεξάρτητη του συστήματος μονάδων που χρησιμοποιούμε.

Παρατίθεται στη συνέχεια ο τρόπος υπολογισμού του βάθους της ομοιόμορφης ροής σε τραπεζοειδούς διατομής αγωγό με τη χρήση της σχέσης του Manning.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} J^{1/2} \Rightarrow A = \left[\frac{Qn}{J^{1/2}} P^{2/3}\right]^{3/5} \quad (4.23)$$

Για τραπεζοειδή διατομή με πλάτος πυθμένα  $b$  και διαφορετική κλίση των πρανών  $\frac{v}{\pi}|_i = \frac{1}{z_i}$  είναι:

$$A = [2b + (z_1 + z_2)y] \frac{y}{2}, P = b + y \left( \sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right) \quad (4.24)$$

Και αξιοποιώντας την εξίσωση 4.18 προκύπτει:

$$\begin{aligned} [2b + (z_1 + z_2)y] \frac{y}{2} &= \left[ \frac{Q \cdot n}{J^{1/2}} \left[ b + y \left( \sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right) \right]^{2/3} \right]^{3/5} \\ \Rightarrow y_i &= \frac{2}{2b + (z_1 + z_2)y_{i-1}} \left[ \frac{Q \cdot n}{J^{1/2}} \left[ b + y_{i-1} \left( \sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right) \right]^{2/3} \right]^{3/5} \end{aligned} \quad (4.25)$$

η οποία λύνεται με επαναληπτική διαδικασία και συγκλίνει ανεξάρτητα από την αρχική τιμή δοκιμής που επιλέγεται. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μια τιμή του  $y_{i-1}$  στο δεξιό μέρος της 4.25 και

υπολογίζεται το  $y_i$ . Εάν  $y_i = y_{i-1}$  σταματά ο υπολογισμός, διαφορετικά με τη νέα τιμή  $y_i$  από την 4.25 υπολογίζεται η τιμή  $y_{i+1}$ , κ.ο.κ. έως ότου ταυτισθούν οι δύο τιμές του  $y$ .

Προφανώς αν στην 4.27 τεθεί  $z_1=z_2=0$  προκύπτει:

$$y_i = \frac{1}{b} \left[ \frac{Qn}{J^{1/2}} [b + 2y_{i-1}]^{2/3} \right]^{3/5} \quad (4.26)$$

Που είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση για τον προσδιορισμό του ομοιόμορφου βάθους σε ορθογωνικό αγωγό πλάτους  $b$ .

Υπολογισμός κρίσιμου βάθους ροής

Ορίζεται η ειδική ενέργεια  $E$  μιας διατομής, ως το ύψος της ενέργειας στη διατομή πάνω από το υψόμετρο του πυθμένα  $z$ , δηλαδή το άθροισμα των έργων πίεσης και κινητικής ενέργειας

$$E = y + a \frac{V^2}{2g} \quad (4.27)$$

Για δεδομένη την παροχή του αγωγού  $Q$ , τότε η μέση ταχύτητα στη διατομή δίνεται από τη σχέση  $V = \frac{Q}{A}$  επομένως η ειδική ενέργεια γράφεται

$$E = y + a \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Για να βρεθεί το βάθος ροής  $y$  όπου η ειδική ενέργεια παίρνει την ελάχιστη τιμή της, γίνεται παραγωγή

$$\frac{dE}{dy} = 0 \Rightarrow 1 + \frac{d}{dy} \left( a \frac{Q^2}{2gA^2} \right) = 0 \Rightarrow 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = 0$$

Για την ισοδύναμη ορθογωνική διατομή που ορίζεται για κάθε διατομή ισχύει  $\frac{dA}{dy} = T$  όπου  $T$  το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας

$$1 - \frac{Q^2 T}{gA^3} = 0 \Rightarrow 1 - \frac{V^2}{g \frac{A}{T}} = 0 \Rightarrow 1 - \frac{V^2}{gD} = 0 \Rightarrow 1 - Fr^2 = 0 \Rightarrow Fr = 1 \quad (4.28)$$

Στην παραπάνω σχέση  $D$  ορίζεται το βάθος της ισοδύναμης ορθογωνικής διατομής πλάτους  $T$ , δηλαδή διατομής ορθογωνικής εμβαδού  $A$ .

Το βάθος ροής  $y$  για το οποίο η ειδική ενέργεια  $E$  παίρνει την ελάχιστη τιμή της  $E=E_{min}$  ονομάζεται κρίσιμο βάθος ροής και συμβολίζεται  $y_{cr}$ . Για το κρίσιμο βάθος ροής ισχύει  $Fr=1$ . Με όμοιο τρόπο αποδεικνύεται ότι για  $y=y_{cr}$  η ειδική δύναμη  $M$

$$M = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \quad (4.29)$$

παίρνει επίσης την ελάχιστη τιμή της δηλαδή  $M=M_{min}$ .

Όταν  $y > y_{cr}$ , η ροή ονομάζεται υποκρίσιμη και ισχύει ότι  $Fr < 1$ . Όταν  $y < y_{cr}$ , η ροή ονομάζεται υπερκρίσιμη και ισχύει ότι  $Fr > 1$ .

Ξεκινώντας από τη συνθήκη  $Fr=1$  και με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που υπολογίστηκε παραπάνω το ομοιόμορφο βάθος ροής στον αγωγό τραπεζοειδούς διατομής, υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος ροής από τη σχέση:

$$y_{cr,i} = \frac{2}{2b + (z_1 + z_2)y_{cr,i-1}} \left[ \frac{Q^2}{g} (b + (z_1 + z_2)y_{cr,i-1}) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.30)$$

η οποία λύνεται με επαναληπτική διαδικασία και συγκλίνει ανεξάρτητα από την αρχική τιμή δοκιμής που επιλέγεται. Συγκεκριμένα, επιλέγεται μια τιμή του  $y_{cr,i-1}$  στο δεξί μέρος της 4.30 και υπολογίζεται το  $y_{cr,i}$ . Εάν  $y_{cr,i} = y_{cr,i-1}$  σταματά ο υπολογισμός, διαφορετικά με τη νέα τιμή  $y_{cr,i}$  από την 4.30 υπολογίζεται η τιμή  $y_{cr,i+1}$ , κ.ο.κ. έως ότου ταυτισθούν οι δύο τιμές του  $y_{cr}$ .

Προφανώς αν στην 4.30 τεθεί  $z_1=z_2=0$  και εκτελεστούν οι πράξεις προκύπτει:

$$y_{cr} = \left[ \frac{Q^2}{b^2 g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.31)$$

που είναι η ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου βάθους ροής σε ορθογωνικό αγωγό πλάτους  $b$  και η οποία μάλιστα είναι κλειστής μορφής.

Υδραυλικά βέλτιστη διατομή

Η αρχή της υδραυλικά βέλτιστης διατομής εφαρμόζεται μόνο για επενδυμένες πρισματικές διώρυγες. Όταν η υδραυλική ακτίνα  $R$  αυξάνεται, τότε η παροχή  $Q$  αυξάνεται, ενώ όταν η βρεχόμενη περίμετρος  $P$  μειώνεται η παροχή  $Q$  αυξάνεται. Για δεδομένο εμβαδόν διατομής  $A$ , η διατομή με την ελάχιστη βρεχόμενη περίμετρο  $P$  που έχει τη μέγιστη παροχεταιυτικότητα (παροχή σχεδιασμού  $Q$ ) ονομάζεται βέλτιστη διατομή. Μια διατομή πρέπει μεν να σχεδιάζεται σαν βέλτιστη, αλλά και να τροποποιείται για πρακτικούς λόγους. Για δεδομένη την παροχή  $Q$ , η βέλτιστη διατομή δίνει την ελάχιστη επιφάνεια, όχι όμως και την ελάχιστη εκσκαφή (που εξαρτάται από το πλάτος επιφάνειας της διώρυγας στο έδαφος).

Για δεδομένο γεωμετρικό σχήμα της διατομής το εμβαδόν και η βρεχόμενη περίμετρος σαν συνάρτηση της γεωμετρίας της διατομής γράφονται ως

$$A = A(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4.32)$$

$$P = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

όπου  $x_1, x_2, \dots, x_n$  είναι ανεξάρτητες μεταβλητές (παράμετροι της διατομής). Η βρεχόμενη περίμετρος  $P$  ελαχιστοποιείται για δεδομένο εμβαδόν υγρής διατομής όταν  $dP=0$  δηλαδή

$$dP = 0 \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial P}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial P}{\partial x_n} dx_n = 0 \quad (4.33)$$

Επίσης επειδή το εμβαδό  $A = A_0$  είναι δεδομένο (δεδομένη παροχή και μέση ταχύτητα ροής),  $dA=0$ , δηλαδή:

$$dA = 0 \Rightarrow \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial A}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial A}{\partial x_n} dx_n = 0 \quad (4.34)$$

Πολλαπλασιάζοντας τη δεύτερη εξίσωση επί  $\lambda$  (Lagrange) και αφαιρώντας την από την πρώτη καταλήγει κανείς στην εξίσωση

$$dP - \lambda dA = 0 \Rightarrow \left( \frac{\partial P}{\partial x_1} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_1} \right) dx_1 + \left( \frac{\partial P}{\partial x_2} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_2} \right) dx_2 + \dots + \left( \frac{\partial P}{\partial x_n} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_n} \right) dx_n = 0 \quad (4.35)$$

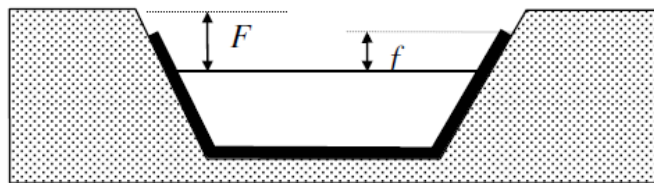
Επειδή όμως  $dx_i \neq 0$ , προκύπτει το σύστημα  $n+1$  εξισώσεων με  $n+1$  αγνώστους τους  $x_1, x_2, \dots, x_n$  και  $\lambda$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x_1} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial P}{\partial x_2} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_2} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial P}{\partial x_n} - \lambda \frac{\partial A}{\partial x_n} = 0 \\ A - A_0 = 0 \end{array} \right. \quad (4.36)$$

Η παράμετρος  $\lambda$  ορίζεται από μια από τις παραπάνω εξισώσεις όπου  $\partial A / \partial x_k \neq 0$ . Στη συνέχεια απαλείφοντας τον πολλαπλασιαστή Lagrange  $\lambda$ , προκύπτουν οι σχέσεις που συνδέουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές  $x_1, x_2, \dots$  και  $x_n$ . Ως βέλτιστη ορθογωνική διατομή προκύπτει αυτή με λόγο πλάτους προς βάθος ροής 2:1, ενώ η βέλτιστη κυκλική είναι το ημικύκλιο (Παπανικολάου, 2016).

Το ελεύθερο ύψος και το ύψος επένδυσης

Το ελεύθερο ύψος  $F$  είναι η απόσταση από την κορυφή της διώρυγας ως την ελεύθερη επιφάνεια. Πρέπει να επαρκεί για τις διακυμάνσεις της στάθμης ώστε να αποφεύγονται οι υπερχειλίσεις. Το ύψος επένδυσης  $f$  είναι η απόσταση του ανώτερου σημείου επένδυσης από την ελεύθερη επιφάνεια.



Σχήμα 4.15: Σχηματική απεικόνιση επενδεδυμένης διώρυγας (Παπανικολάου, 2016).

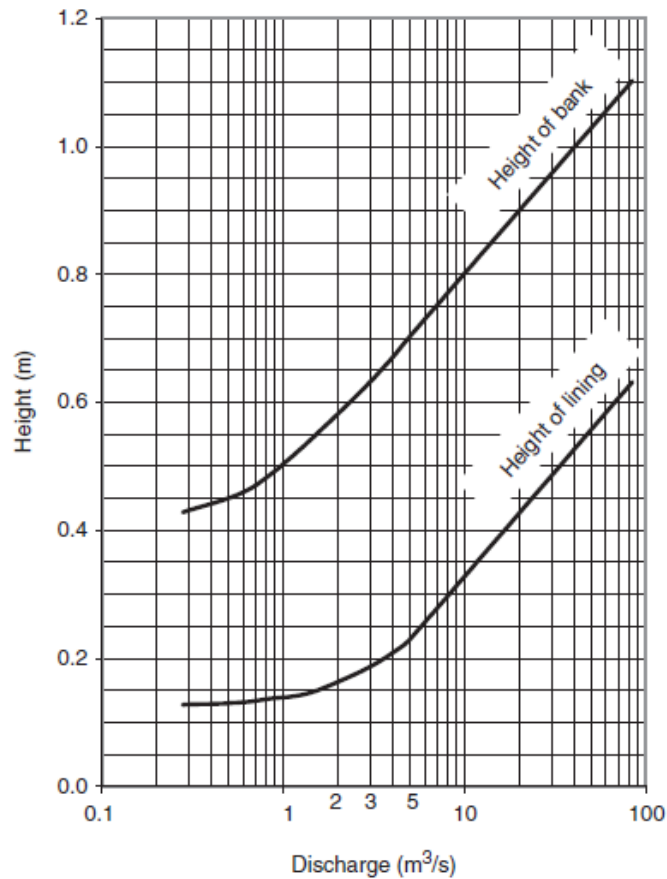
Εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το μέγεθος της διώρυγας, οι διακυμάνσεις της στάθμης που οφείλονται σε κυματισμούς ή σε ρυθμιστές ροής κλπ. Σαν οδηγός για τον σχεδιασμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σχήμα 4.16 του US Bureau of Reclamation, που είναι απόρροια

μεγάλης εμπειρίας κατασκευών στις ΗΠΑ και δίνει τα μεγέθη  $F$  και  $f$  σαν συνάρτηση της παροχής  $Q$ .

Στο σύστημα μονάδων SI το διάγραμμα του σχήματος δίνει τις ακόλουθες σχέσεις (Παπανικολάου, 2016):

$$F = \begin{cases} 0.4 \div 0.5[m] & Q < 1 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \\ 0.145 \ln Q + 0.484 & 1 \left[ \frac{m^3}{s} \right] < Q < 70 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \end{cases} \quad (4.37)$$

$$f = \begin{cases} 0.022 \ln Q + 0.15 & Q < 5 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \\ 0.163 \ln Q + 0.074 & 5 \left[ \frac{m^3}{s} \right] < Q < 70 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \end{cases} \quad (4.38)$$



Σχήμα 4.16: Προτεινόμενες τιμές για το Ελεύθερο ύψος  $F$  και το Ύψος Επένδυσης  $f$  (U.S. Bureau of Reclamation).

#### 4.6.2 Κατασκευαστικά και σχεδιαστικά στοιχεία διώρυγας

Η διώρυγα προσαγωγής μικρού ΥΗΕ προσάγει την παροχή του νερού από την υδροληψία στη δεξαμενή φόρτισης, από την οποία τροφοδοτείται ο αγωγός πτώσης. Η διώρυγα είναι πάντοτε επενδεδυμένη ώστε να μην παρασύρονται φερτές ύλες από τα τοιχώματα της. Συμβολίζοντας με  $z_Y$  τη στάθμη του νερού στην αρχή της διώρυγας και με  $z_E$  τη στάθμη του νερού στην άκρη της διώρυγας (και η οποία είναι ίση προς τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή φόρτισης), η υψομετρική διαφορά  $\delta z = z_Y - z_E$  εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του νερού που δαπανάται στις υδραυλικές απώλειες της ροής στη διώρυγα και θα είναι ίση προς:

$$\delta z = z_Y - z_E = L \cdot J \quad (4.39)$$

Όπου  $L$  το ανεπτυγμένο μήκος της διώρυγας και με  $J$  τη μέση κλίση της διώρυγας. Άρα η υδραυλική πτώση  $h$  του ΥΗΕ είναι ίση προς

$$h = z_E - z_A - \delta h_E = z_Y - z_A - LJ - \delta h_E \quad (4.40)$$

Στην οποία με  $\delta h_E$  συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες της ροής στη δεξαμενή φόρτισης και οι οποίες οφείλονται κυρίως στην εσχάρα ανάντη του στομίου εισόδου στην αγωγό πτώσης.

Επομένως, με δεδομένη τη διαφορά  $z_Y - z_A$  και το ανεπτυγμένο μήκος  $L$  της διώρυγας, η υδραυλική πτώση  $h$  αυξάνεται όσο μειώνεται η κλίση  $J$  της διώρυγας. Για το λόγο αυτό η κλίση  $J$  πρέπει να είναι μικρή ( $J=1-2 \cdot 10^{-3}$ ) όμως μικρή κλίση της διώρυγας αντιστοιχεί σε μικρή μέση ταχύτητα της ροής. Άρα αυξάνεται η απαιτούμενη διατομή και το κόστος της διώρυγας, όμως αυξάνεται η υδραυλική πτώση και άρα η παραγωγή ενέργειας. Σύμφωνα με τα προηγούμενα ο καθορισμός της κλίσης της διώρυγας είναι πρόβλημα οικονομοτεχνικό.

Ένα άλλο κριτήριο για τον καθορισμό της κλίσης  $J$  της διώρυγας προκύπτει από το ότι η μέση ταχύτητα της ροής δεν πρέπει να είναι μικρότερη των  $0.3 \div 0.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$  έτσι ώστε να μην κατακάθονται στον πυθμένα της τα αιωρούμενα σωματίδια που διέφυγαν από τον εξαμμωτή της υδροληψίας και τα οποία θα πρέπει να παγιδευτούν στη δεξαμενή φόρτισης.

Η υψηλή μέση ταχύτητα της ροής στη διώρυγα προκαλεί μηχανική διάβρωση των διαβρεχόμενων τοιχωμάτων. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της μέσης ταχύτητας εξαρτάται από το υλικό επένδυσης της διώρυγας και τη φύση των αιωρούμενων σωματιδίων. Συγκεκριμένα για διώρυγα από σκυρόδεμα και καθαρό νερό η μέση ταχύτητα της ροής είναι της τάξεως των  $2 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , ενώ για νερό με αιωρούμενη σκληρή άμμο η μέγιστη ταχύτητα είναι της τάξεως των  $1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$ . Σε διώρυγα με χωμάτινα τοιχώματα η ταχύτητα της ροής δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $0.7 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Στην περίπτωση των μικρών ΥΗΕ η διώρυγα προσαγωγής κατασκευάζεται από σκυρόδεμα (με ενίσχυση από χαλύβδινο πλέγμα) ανά τμήματα μεταξύ των οποίων διαμορφώνεται στεγανός αρμός διαστολής. Το πάχος των τοιχωμάτων είναι της τάξης των 12-25[cm]. Η διώρυγα τοποθετείται σε εκσκαφή, τα προϊόντα της οποίας σχηματίζουν ανάχωμα η διαμόρφωση του οποίου ενισχύει την ευστάθεια της κατασκευής. Τα πλευρικά τοιχώματα πρέπει να είναι υπερυψωμένα κατά 10-15[cm] ως προς τη στάθμη του νερού που αντιστοιχεί στη μέγιστη παροχή λειτουργίας, ώστε να υπερκαλύπτεται η αύξηση της στάθμης λόγω κατακαθίσεων, μεταβατικών

καταστάσεων και ανάπτυξης κυματισμού. Στις καμπύλες της διώρυγας και στα σημεία αλλαγής της διατομής η στάθμη του νερού μεταβάλλεται και θα πρέπει η ανύψωση αυτή να λαμβάνεται υπόψιν στην απαραίτητη υπερύψωση των πλευρικών τοιχωμάτων.

#### 4.7 Δεξαμενή φόρτισης

Η δεξαμενή φόρτισης διαμορφώνεται στο άκρο της διώρυγας προσαγωγής και από αυτή τροφοδοτείται ο αγωγός πτώσης. Η θέση κατασκευής της δεξαμενής φόρτισης επιλέγεται έτσι ώστε το μήκος του αγωγού πτώσης να είναι το μικρότερο δυνατό για να μειώνεται το κόστος του αγωγού και να μειώνεται η ένταση των μεταβατικών φαινομένων (υδραυλικό πλήγμα).

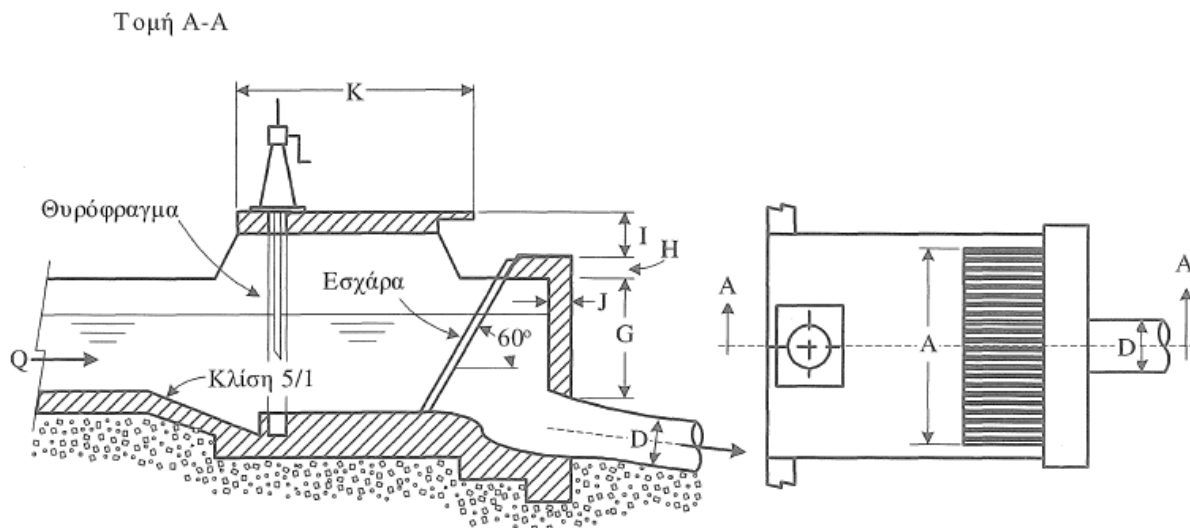
Ο βασικός ρόλος της δεξαμενής φόρτισης είναι η απρόσκοπτη τροφοδοσία του αγωγού πτώσεως και των υδροστροβίλων κατά τη φάση της εκκίνησης των μονάδων. Το βασικό πλεονέκτημα των υδροστροβίλων είναι ο μικρός χρόνος εκκίνησης, της τάξης των 5[s] για τις μικρές μονάδες και των 10[s] για τις μεγάλες. Στο μικρό αυτό χρονικό διάστημα ο αγωγός δεν θα μπορούσε να τροφοδοτηθεί από τη διώρυγα με αποτέλεσμα την είσοδο αέρα στον αγωγό πτώσης και τη μη ομαλή εξέλιξη της λειτουργίας της μονάδας.

Πίνακας 4.7: Κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης μΥΗΕ συναρτήσει της παροχής σχεδιασμού (Παπαντώνης, 2008).

Q [m <sup>3</sup> /s]	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0
A [m]	1.90	2.30	2.50	2.90	3.50	4.20	4.60
D [m]	1.00	1.20	1.30	1.50	1.90	2.30	2.40
G [m]	1.50	1.70	1.90	2.10	2.40	2.80	3.30
H [m]	0.40	0.50	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90
I [m]	0.90	1.10	1.30	1.50	1.70	1.90	2.00
J [m]	0.35	0.40	0.45	0.50	0.53	0.57	0.60
K [m]	1.60	1.80	1.90	2.00	2.20	2.30	2.40
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

Λόγω του σχετικά μεγάλου όγκου της δεξαμενής φόρτισης, η ταχύτητα της ροής σε αυτή είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να κατακάθονται τα αιωρούμενα, δηλαδή η δεξαμενή φόρτισης παίζει το ρόλο τελικού εξαμμωτή. Η λειτουργία αυτή γίνεται αποτελεσματική με την κατάλληλη σχεδίαση της δεξαμενής φόρτισης ώστε να μην ευνοείται ο σχηματισμός ανακυκλοφορίας της ροής και στροβιλισμών. Επιπλέον στον πυθμένα της διαμορφώνεται αναβαθμός και θυρόφραγμα έκπλυσης. Επίσης η δεξαμενή φόρτισης θα πρέπει να φέρει υπερχειλιστή ώστε να διοχετεύεται από αυτή η υπερβάλλουσα παροχή, κυρίως κατά το απότομο σταμάτημα των υδροστροβίλων.





Σχήμα 4.17: Τυπική διαμόρφωση και κύριες διαστάσεις δεξαμενής φόρτισης μΥΗΕ (Παπαντώνης, 2008).

Στο άκρο της διώρυγας και στην είσοδο της δεξαμενής φόρτισης τοποθετείται θυρόφραγμα για τις ανάγκες συντήρησης. Ανάντη της εισόδου του αγωγού πτώσης τοποθετείται μεταλλική εσχάρα η οποία συγκρατεί τα επιπλέοντα σώματα. Η εσχάρα αυτή, όταν τα υλικά που συσσωρεύονται είναι πολλά σε όγκο, παραδείγματος χάρη ξερά φύλλα το φθινόπωρο, εξοπλίζεται με μηχανισμό καθαρισμού της. Οι υδραυλικές απώλειες της ροής στην εσχάρα υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρονται στην παράγραφο 4.5.3 και εκφράζουν την μεταβολή της στάθμης της ροής ανάντη και κατάντη της εσχάρας. Το άνω σημείο του αγωγού πτώσης πρέπει να έχει επαρκές βύθισμα ως προς τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή φόρτισης, ώστε να αποτρέπεται ο σχηματισμός δινών και η αναρρόφηση αέρα στον αγωγό.

## 4.8 Αγωγός πτώσης

### 4.8.1 Υλικό του αγωγού πτώσης

Για την κατασκευή του αγωγού πτώσης μικρών ΥΗΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες διαφόρων τύπων ανάλογα με την παροχή και την υδραυλική πτώση  $h$ , όπως χαλυβδοσωλήνες, πλαστικοί σωλήνες, σωλήνες από ελατοχυτοσίδηρο, ή ακόμη και σωλήνες από οπλισμένο σκυρόδεμα (ολόσωμος και όχι προκατασκευασμένα τμήματα).

Πλαστικοί σωλήνες από εύκαμπτο πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο ή PVC χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές παροχές, μέχρι  $0.03 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  και υδραυλική πτώση μικρότερη των 100-150[m]. Έχουν το πλεονέκτημα του μικρού βάρους, του μικρού κόστους και ευκολία στην κατασκευή του αγωγού πτώσης ακόμη και σε απόκρημνο έδαφος. Το βασικό μειονέκτημα είναι η γήρανση του υλικού όταν εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, οπότε αυτό γίνεται εύθραυστο. Για το λόγο αυτό οι πλαστικοί σωλήνες συνήθως τοποθετούνται υπόγειοι, εκτός αν προβλεφθεί επιφανειακή προστασία έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ο αγωγός πτώσης τόσο σε μικρά, όσο και στα μεγάλα ΥΗΕ κατασκευάζεται από χαλυβδοσωλήνες λόγω της δυνατότητας συγκόλλησης και διαμόρφωσης των διαφόρων τμημάτων, της υψηλής αντοχής και ελαστικότητας που τους καθιστούν κατάλληλους σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών (από πολύ μικρές έως πολύ μεγάλες πιέσεις) και επίσης λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητάς τους.

Οι χαλυβδοσωλήνες ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους διακρίνονται σε σωλήνες εξέλασης χωρίς ραφή και στους σωλήνες με ραφή. Οι τελευταίοι διακρίνονται στους σωλήνες με καταμήκος ραφή και στους σωλήνες ελικοειδούς ραφής. Χρησιμοποιούνται όμως συνήθως σωλήνες με καταμήκος ραφή.

Πίνακας 4.8: Τυποποιημένες ονομαστικές διάμετροι χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων (Παπαντώνης, 2008).

D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]	D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]	D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]
8	13.5	2.75	125	139.7	7.35	1000	1016	8
10	17.2	3.6	150	168.3	9.15	1200	1220	10
15	21.3	3.15	200	219.1	9.55	1400	1420	10
20	26.9	3.45	250	273	11.5	1600	1620	10
25	33.7	4.35	300	323.9	11.95	1800	1820	10
32	42.4	5.2	350	355.6	2.8	2000	2020	10
40	48.3	4.15	400	406.4	3.2	2200	2220	10
50	60.3	5.15	500	508	4	2400	2420	10
65	76.1	5.55	600	609.6	4.8	2600	2620	10
80	88.9	4.45	700	711.2	5.6	2800	2820	10
100	114.3	7.15	800	812.8	6.4	3000	3020	10

Ο ελατός χυτοσίδηρος σε αντίθεση με το φαιό χυτοσίδηρο είναι υλικό υψηλής αντοχής, και δεν παρουσιάζει ρηγματώσεις. Αμφότεροι όμως δεν είναι δυνατό να συγκολληθούν και για το λόγο αυτό τα διάφορα τμήματα προσαρμόζονται μέσω συνδέσμων, ενώ τα όργανα διακοπής ή άλλα εξαρτήματα προσαρμόζονται μέσω τυποποιημένων φλαντζών. Το πλεονέκτημα της σύνδεσης μέσω συνδέσμων είναι η ταχύτητα της εγκατάστασης (αφού δεν απαιτούνται επιτόπου συγκολλήσεις), ενώ για την εγκατάσταση δεν απαιτούνται ειδικά μηχανήματα ή εργαλεία και επιπλέον είναι οικονομική και η επίχωσή του. Οι σωλήνες αυτοί είναι τυποποιημένες και προσφέρονται για διάμετρο από 60-2000[mm]. Προσφέρονται σε τεμάχια μήκους 6[m] για ονομαστική διάμετρο μέχρι 600[mm] ή μεγαλύτερα για τα μεγαλύτερα μεγέθη.

Οι σωλήνες από περιτυλιγμένες ίνες γυαλιού (Glass Reinforced Plastic – GRP) κατασκευάζονται περιτυλίγοντας ίνες γυαλιού σε σπειροειδή μορφή γύρω από ένα στερεό κυλινδρικό πυρήνα σε διάφορες στρώσεις και διαφορετικές κατευθύνσεις έτσι ώστε να αυξάνεται η αντοχή σε αξονική και περιφερειακή φόρτιση. Μετά τη σκλήρυνση του υλικού προκύπτει ένας σωλήνας ομοιόμορφης και λείας εσωτερικής επιφάνειας με πολύ καλές ιδιότητες τόσο όσον αφορά την αντοχή, όσο και τις υδραυλικές απώλειες. Οι σωλήνες αυτοί, σε τμήματα των 6[m] μήκους συνήθως συνδέονται μεταξύ τους μέσω συνδέσμων μορφής χιτωνίου στους οποίους η στεγανότητα εξασφαλίζεται από δακτυλίους ή μέσω ελεύθερων φλαντζών που συνοδεύονται από

περιλαΐμα του ίδιου υλικού. Βασικά πλεονεκτήματα των σωλήνων GRP είναι το πολύ μικρό βάρος, το μικρότερο κόστος, η ευκολία και η ταχύτητα της εγκατάστασης, η ανθεκτικότητα στην διάβρωση τουλάχιστο για υγρά, όπως το νερό ή τα λήμματα. Ως μειονέκτημα θα πρέπει να αναφερθεί η μικρή αντοχή σε εξωτερικά φορτία και η ανάγκη προσεκτικής επίχωσης (για σωληνώσεις υπόγειες τοποθετημένες σε χαντάκι), η μικρή ακαμψία και το περιορισμένο εύρος εφαρμογών όσον αφορά την πίεση λειτουργίας. Προσφέρονται τυποποιημένες για πίεση λειτουργίας PN 6, 10 και 16 [bar] σε διαμέτρους  $100 \div 2400$ [mm] και μήκη 6, 12 και 18[m]. Το μήκος του χιτωνίου σύνδεσης είναι της τάξης των 150[mm] για ονομαστική διάμετρο μέχρι 200[mm] και 330[mm] για διάμετρο μεγαλύτερη των 600[mm].

Οι σωλήνες από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (High Density PolyEthylene Pipe – HDPE) κατασκευάζονται από πολυαιθυλένιο πυκνότητας  $\rho = 940 - 965 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  και όριο της τάξης των 220[bar]. Πρόκειται για θερμοπλαστικό υλικό (δηλαδή υλικό που θερμαινόμενο μορφοποιείται και επαναστερεοποιείται οσεςδήποτε φορές), το οποίο είναι κατάλληλο και για πόσιμο νερό. Η σύνδεση των HDPE σωλήνων γίνεται είτε με ειδικά εξαρτήματα τύπου Gibault είτε με συγκόλληση δεδομένου ότι το PE συγκολλείται αυτογενώς. Οι HDPE σωλήνες 3ης γενιάς κατασκευάζονται τυποποιημένες για ονομαστική πίεση 6, 10, 12.5, 16, 20, 25 και 32 [bar] και σε διαμέτρους από 25-630[mm]. Οι σωλήνες ονομαστικής διαμέτρου μέχρι 125[mm] διατίθενται σε κουλούρα των 100[m], ενώ οι μεγαλύτερης διαμέτρου σε ευθύγραμμα τμήματα μήκους μέχρι 12[m].

#### 4.8.2 Επιλογή της διαμέτρου του αγωγού πτώσης

Η επιλογή της διαμέτρου του αγωγού πτώσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέση ταχύτητα της ροής που αντιστοιχεί στην παροχή λειτουργίας της μονάδας. Η τιμή της μέσης ταχύτητας της ροής επιλέγεται έτσι ώστε να μην είναι μεγαλύτερη από μια μέγιστη τιμή που λαμβάνεται από πίνακες, ανάλογα με την εξεταζόμενη περίπτωση (υλικό του αγωγού και της επένδυσής του, διακινούμενο υγρό, περιεκτικότητά του σε στερεά κλπ.). Για την περίπτωση χαλυβδοσωλήνα και νερού που περιέχει πυριτική άμμο η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα της ροής είναι της τάξης των  $4 \left[ \frac{m}{s} \right]$ . Ακόμη, η μέγιστη ταχύτητα της ροής σχετίζεται με τις επιτρεπόμενες υπερπίεσεις και υποπίεσεις που αναπτύσσονται κατά τα μεταβατικά φαινόμενα.

Ένα δεύτερο κριτήριο είναι να ικανοποιούνται οικονομοτεχνικά κριτήρια από τα οποία προκύπτει μια βέλτιστη τιμή της διαμέτρου της σωλήνωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές απώλειες και το κόστος κατασκευής. Συγκεκριμένα οι υδραυλικές απώλειες μειώνουν το διαθέσιμο ύψος πτώσης  $H$  και άρα μειώνεται η ισχύς και η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή αντιστοιχούν σε απώλεια εσόδων. Η απώλεια ισχύος αντιστοιχεί σε μία οικονομική δαπάνη που είναι ανάλογη του χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης και άρα μπορεί να θεωρηθεί ως λειτουργικό κόστος. Είναι φανερό ότι, για την ίδια παροχή, όσο μικρότερη είναι η ονομαστική διάμετρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια ισχύος και η δαπάνη που αντιστοιχεί σε αυτή και αντίστροφα. Το κόστος της σωλήνωσης (υλικά και κατασκευή – εγκατάσταση) το οποίο είναι τόσο μικρότερο, όσο μικρότερη είναι η ονομαστική διάμετρος της σωλήνωσης και αντίστροφα. Η δαπάνη αυτή καταβάλλεται κατά την κατασκευή της εγκατάστασης και η ετήσια επιβάρυνση του έργου σχετίζεται με το κόστος απόσβεσης για τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, στο οποίο

σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή των επιτοκίων (μέγεθος μακροοικονομικό). Η συνολική δαπάνη είναι το άθροισμα των λειτουργικών δαπανών και της δαπάνης απόσβεσης, ανηγμένες στην περίοδο έναρξης της χρηματοδότησης (παρούσα αξία), οπότε η βέλτιστη τιμή της διαμέτρου θα αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή παρούσας αξίας.

Ένα ακόμη κριτήριο είναι να μην αναπτύσσονται υπερβολικές υπερπίεσεις και υποπίεσεις κατά την εξέλιξη των μεταβατικών φαινομένων και κυρίως κατά την πλήρη απόρριψη φορτίου. Συμβολίζοντας με  $L_\sigma$  το μήκος του αγωγού πτώσης και με  $h$  την υδραυλική πτώση αποδεικνύεται ότι για  $\frac{L_\sigma}{h} < 2$  κατά κανόνα δεν υπάρχει πρόβλημα υπερπίεσεων, κριτήριο το οποίο όμως συνήθως δεν τηρείται.

Στην περίπτωση ΥΗΕ με περισσότερους από έναν υδροστροβίλους που λειτουργούν παράλληλα είναι δυνατή η επιλογή ενός αγωγού πτώσης για όλους τους υδροστροβίλους ο οποίος διακλαδίζεται αμέσως ανάντη του ΥΗΣ ή ενός αγωγού πτώσης ανά υδροστρόβιλο. Η συμφερότερη λύση θα προκύψει από την οικονομοτεχνική σύγκριση των δύο αυτών περιπτώσεων. Κατά κανόνα, σε ΥΗΕ μεσαίας ή μεγάλης υδραυλικής πτώσης (οπότε το μήκος του αγωγού πτώσης είναι σημαντικό) προκύπτει συμφερότερη η κατασκευή ενός κοινού αγωγού πτώσης για όλους τους υδροστροβίλους, παρά το σημαντικό κόστος της διακλάδωσης.

Ένα πρακτικό κριτήριο για τον καθορισμό της διαμέτρου του αγωγού πτώσης προκύπτει από τον περιορισμό των υδραυλικών απωλειών σε ποσοστό μεταξύ του 3-5% του ύψους πτώσης  $h$  (Παπαντώνης, 2008).

Η διάμετρος του αγωγού εκτιμάται αρχικά θεωρώντας μέση ταχύτητα της ροής, στο κανονικό σημείο λειτουργίας, ίση με  $v_{start} = 4 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Δεδομένου του κανονικού σημείου λειτουργίας και της σχέσης  $Q_N = v_{start} A_{wet}$ , λύνοντας προς τη διάμετρο του αγωγού προκύπτει η θεωρητική τιμή της διαμέτρου.

Δεδομένου του ύψους πτώσης και των πιέσεων που δημιουργούνται επιλέγεται ο επιθυμητός τύπος σωλήνα για το έργο. Από τον τύπο αυτό σωλήνα επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη εσωτερική διάμετρος από αυτή που υπολογίστηκε.

Για τη νέα εσωτερική διάμετρο και για την ίδια παροχή λειτουργίας υπολογίζεται η νέα ταχύτητα στον αγωγό και κατόπιν οι υδραυλικές απώλειές του (άθροισμα γραμμικών και τοπικών)  $\Sigma \delta h$ .

Εφαρμόζεται το ακόλουθο εμπειρικό κριτήριο για το αν είναι αποδεκτή η διατομή που επιλέχτηκε  $\frac{\Sigma \delta h}{h} < 0.03 \div 0.05$  ή ακόμη 0.1 σε ακραίες περιπτώσεις κάνοντας κανείς τους υπολογισμούς.

Αν το κριτήριο επαληθευτεί, η επιλογή της διαμέτρου είναι αποδεκτή αλλιώς επιλέγεται η επόμενη μεγαλύτερη διάμετρος μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο.

#### 4.8.3 Υπολογισμός πάχους

Το απαιτούμενο πάχος του σωλήνα υπολογίζεται κατ' αρχή σε αντοχή ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση λόγω της εσωτερικής (μέγιστης) υπερπίεσης να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τάση του υλικού του σωλήνα. Κατά κανόνα η μέγιστη πίεση στον αγωγό πτώσης λαμβάνει χώρα κατά την εξέλιξη των μεταβατικών φαινομένων (υδραυλικό πλήγμα) και συγκεκριμένα κατά τη

φάση της απόρριψης φορτίου. Η μέγιστη πίεση  $p_{max}$  για τον υπολογισμό είναι η πίεση της κανονικής λειτουργίας προσαυξημένη κατά τον όρο  $\delta p$  που οφείλεται στο μεταβατικό φαινόμενο:

$$\delta p = \rho g \Delta H \quad (4.41)$$

Όσον αφορά τα εξαρτήματα του αγωγού (βάνες, φλάντζες κλπ), δηλαδή εξαρτήματα των οποίων ο έλεγχος σε αντοχή δεν είναι εύκολος, θα πρέπει να επιλεγούν αυτά που πιστοποιημένα έχουν την κατάλληλη αντοχή, ό,τι δηλαδή η ονομαστική πίεση λειτουργίας τους (Pressure Nominale –  $P_N$ ) είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη  $p_{max}$ . Το ίδιο ισχύει και για την επιλογή των σωλήνων των οποίων το υλικό δεν έχει ισότροπη συμπεριφορά (π.χ. GRP). Σε αυτούς δεν γίνεται υπολογισμός της αντοχής, για την επιλογή του πάχους αλλά επιλέγονται από τον κατάλογο που πιστοποιεί την αντοχή τους.

Δε συμβαίνει το ίδιο με τους χαλυβδοσωλήνες λόγω της μεγάλης ποικιλίας υλικών και μεγάλης ποικιλίας στα τυποποιημένα πάχη. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός του πάχους γίνεται ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση  $\sigma$  να είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη του υλικού. Υπολογίζεται έτσι το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος, οπότε επιλέγεται στη συνέχεια το αμέσως μεγαλύτερο τυποποιημένο πάχος. Στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη η μειωμένη αντοχή κατά τη ραφή συγκόλλησης των σωλήνων (στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται σωλήνες με ραφή είτε διαμήκη, είτε ελικοειδή) μέσω ενός συντελεστή. Τέλος η τιμή που προκύπτει προσαυξάνεται ώστε να ληφθεί υπόψιν ενδεχόμενη διάβρωση του σωλήνα, ανάλογα με την εφαρμογή, τη φύση του διακινούμενου υγρού, τη διάρκεια ζωής και τη δυνατότητα προσπέλασης για επίσκεψη και συντήρηση. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η ενδεχόμενη ιδιαίτερη καταπόνησή του κατά τη φάση της μεταφοράς και εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα το απαιτούμενο πάχος του σωλήνα όταν υπόκειται σε εσωτερική στατική πίεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e = e_0 + e_1 + e_2 \quad (4.42)$$

Στην οποία  $e_0$  είναι το ελάχιστο πάχος που απαιτείται ώστε η αναπτυσσόμενη ορθή τάση λόγω της εσωτερικής υπερπίεσης να μην υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση  $\sigma_{επ}$  του υλικού του σωλήνα, λαμβάνοντας υπόψιν συντελεστή ασφαλείας  $k_1=1.7$ . Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν συντελεστής ασφαλείας  $k_2$  ο οποίος εκφράζει την αντοχή της ραφής (για συγκολλητικούς σωλήνες  $k_2=0.7 \div 0.9$  ενώ για σωλήνες χωρίς ραφή  $k_2=1$ ). Προκύπτει:

$$e_0 = \frac{d_2 p}{2 k_2 \frac{\sigma_{επ}}{k_1}} \quad (4.43)$$

Όπου  $d_2$  η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα και  $p$  η εσωτερική πίεση ως προς την εξωτερική. Η επιτρεπόμενη τάση του χάλυβα ανάλογα με την ποιότητά του, λαμβάνεται από τον αντίστοιχο πίνακα. Η προηγούμενη σχέση δεν ισχύει στην περίπτωση κατά την οποία η εσωτερική πίεση είναι μικρότερη της εξωτερικής.

Πίνακας 4.9: Χάλυβες κατάλληλοι για την κατασκευή σωλήνων (Παπαντώνης, 2008).

Τύπος	$\sigma_B \left[ \frac{kp}{mm^2} \right]$	$\sigma_{\varepsilon\pi} = \sigma_{0.2} \left[ \frac{kp}{mm^2} \right]$
St 35.8	35-45	23
St 45.8	45-55	26
St 52	45-58	36
15 Mo 3	45-58	29
13CrMo44	45-58	30
10CrMo9 10	45-60	27

Με  $e_1$  συμβολίζεται η ανοχή για την ανομοιομορφία του πάχους του ελάσματος από το οποίο κατασκευάζεται ο σωλήνας και  $e_2$  η ανοχή για την ενδεχόμενη φθορά ή διάβρωση. Συνήθως λαμβάνεται  $e_2=1$ [mm].

Εάν στη μηκοτομή του αγωγού χαραχθεί η πιεζομετρική γραμμή, η διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές γραμμές αντιστοιχεί στη στατική πίεση που αναπτύσσεται σε κάθε θέση  $x$  του αγωγού εκφρασμένη σε [m] στήλης του υγρού, δηλαδή την τιμή του  $\frac{p(x)}{\rho g}$ , συμβολίζοντας με  $p$  την πυκνότητα του υγρού. Η τιμή της πίεσης  $p$  που εισάγεται είναι η μέγιστη τιμή της στατικής πίεσης που φορτίζει το τμήμα της σωλήνωσης που εξετάζεται, αφού ληφθεί υπόψιν προσαύξηση που λαμβάνει υπόψη την υπερπίεση που αναπτύσσεται κατά τα μεταβατικά φαινόμενα.

Στην περίπτωση ΥΗΕ μεγάλου ύψους πτώσης προκύπτει οικονομικά ασύμφορη η κατασκευή του αγωγού πτώσης με ενιαίο πάχος καθ' όλο το μήκος, αυτό δηλαδή που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της πίεσης και η οποία αναπτύσσεται στη θέση του υδροστροβίλου. Αποδεικνύεται εύκολα ότι πλέον οικονομοτεχνικά συμφέρουσα επιλογή είναι αυτή στην οποία αντιστοιχεί μεγαλύτερη διάμετρος στα ανάντη, όπου η πίεση είναι μικρότερη και μικρότερης διαμέτρου προς την πλευρά του υδροστροβίλου όπου η πίεση είναι υψηλότερη. Πριν την οριστικοποίηση του πάχους, και της διάταξης της σωλήνωσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι εξωτερικές καταπονήσεις της σωλήνωσης που οφείλονται στις αλλαγές της διεύθυνσης της ροής, στις θερμικές διαστολές, ιδιαίτερα έντονες σε εξωτερικό αγωγό, ο οποίος δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, και τις δυνάμεις λόγω ιδίου βάρους του και του περιεχομένου του στην περίπτωση υπέργειου αγωγού που εδράζεται σε στηρίγματα ή τις πιέσεις του εδάφους για την περίπτωση υπόγειου αγωγού.

#### 4.8.4 Δυνάμεις και στηρίγματα

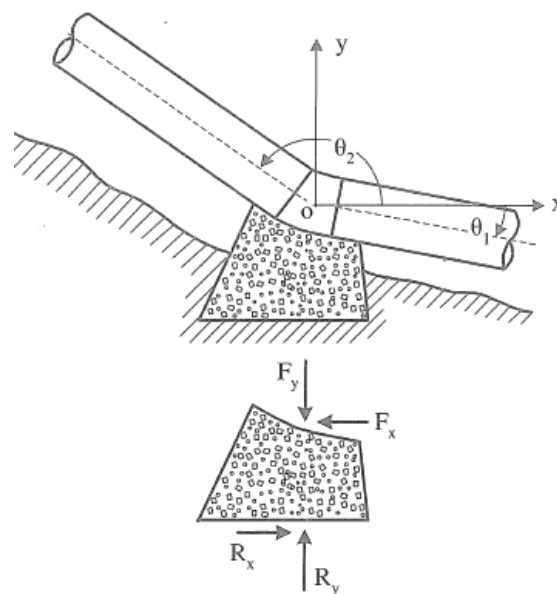
Ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε μία σωλήνωση, σκοπό έχει τον έλεγχο της αντοχής του αγωγού στη δυσμενέστερα φορτιζόμενη διατομή και των δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται στα σημεία στήριξης. Οι δυνάμεις και ροπές παραλαμβάνονται από τα στηρίγματα και τις αγκυρώσεις του αγωγού οπότε τα στοιχεία αυτά θα πρέπει να διαστασιολογηθούν κατάλληλα.

Για τον υπολογισμό της φόρτισης του αγωγού λαμβάνονται υπόψιν το ίδιο βάρος του αγωγού και του περιεχομένου υγρού σε αυτόν, καθώς και η φόρτιση που οφείλεται στην εσωτερική πίεση και στις θερμοκρασιακές διαφορές. Η πλήρης ανάλυση τάσεων και δυνάμεων σε αγωγό πολύπλοκης

μορφής γίνεται με την εφαρμογή αριθμητικών προγραμμάτων που βασίζονται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια δίνεται η αρχή υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις καμπύλες της σωλήνωσης και των δυνάμεων που οφείλονται στις θερμοκρασιακές διαφορές.

#### Δυνάμεις σε αλλαγή της κλίσης

Σε κάθε αλλαγή κλίσης αναπτύσσονται δυνάμεις που οφείλονται στην εσωτερική πίεση και την αλλαγή της ορμής του υγρού. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται εφαρμόζοντας το θεώρημα της ορμής σε επιφάνεια αναφοράς που περιβάλλει την καμπύλη. Η κλίση των δύο τμημάτων του αγωγού που συμβάλλουν στην εξεταζόμενη καμπύλη χαρακτηρίζονται από τις γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$ , οι οποίες μετρούνται αλγεβρικά στο σύστημα συντεταγμένων  $xOy$  (στο επίπεδο που ορίζουν τα δύο συμβαλλόμενα τμήματα του αγωγού.)



Σχήμα 4.18: Δυνάμεις λόγω της εσωτερικής πίεσης σε αλλαγή κλίσης (Παπαντώνης, 2008).

Οι δύο συνιστώσες της δύναμης που οφείλεται στην εσωτερική πίεση του αγωγού, δίνονται από τις σχέσεις

$$F_{px} = -pA(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4.44)$$

$$F_{py} = -pA(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (4.45)$$

Στις οποίες με  $p$  συμβολίζεται η εσωτερική πίεση του αγωγού ως προς την εξωτερική πίεση (συνήθως η ατμοσφαιρική) και με  $A$  η εσωτερική διατομή του αγωγού.

Οι συνιστώσες της δύναμης στο σημείο αλλαγής διεύθυνσης του αγωγού οι οποίες οφείλονται στη μεταβολή της ορμής του υγρού υπολογίζονται εφαρμόζοντας το θεώρημα της ορμής και προκύπτουν ίσες προς:

$$F_{mx} = \rho Q(c_{x1} - c_{x2}) = \rho Q^2 \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{A} \quad (4.46)$$

$$F_{my} = \rho Q(c_{y1} - c_{y2}) = \rho Q^2 \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{A} \quad (4.47)$$

Όπου με  $\rho$  συμβολίζεται η πυκνότητα του διακινούμενου ρευστού,  $Q$  η παροχή όγκου και  $c_x, c_y$  οι συνιστώσες της ταχύτητας της ροής κατά τους άξονες  $x$  και  $y$  στο ανάντη και κατάντη τμήμα.

Αντίστοιχα με την προηγούμενη ανάλυση υπολογίζονται οι δυνάμεις που οφείλονται στην εσωτερική στατική πίεση και τη μεταβολή της ορμής που αναπτύσσονται σε αλλαγή της διατομής αγωγού (συστολή), σε διακλάδωση, σε βάνια, καθώς και στον ίδιο τον υδροστρόβιλο. Συνήθως οι δυνάμεις που οφείλονται στην εσωτερική πίεση του αγωγού είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που οφείλονται στη μεταβολή της ορμής του υγρού.

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αλλαγή κλίσεις ή άλλη διαμόρφωση του αγωγού (πχ σε μια συστολή) είτε παραλαμβάνονται από τις ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στα τοιχώματα του αγωγού, καταπονώντας τον αγωγό και ενδεχόμενα παραμορφώνοντας τη γεωμετρία της σωλήνωσης, είτε παραλαμβάνονται από στηρίγματα στα οποία αναπτύσσεται ίση και αντίθετη αντίδραση. Στην περίπτωση κατά την οποία οι πρόσθετες ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στον αγωγό, γίνονται οριακές για την αντοχή του ή όταν οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται σε εξοπλισμό που δεν αντέχει να τις παραλάβει, π.χ. στο στόμιο του υδροστρόβιλου, τότε θα πρέπει να προβλεφθεί η παραλαβή τους από κατάλληλα διαστασιολογημένα στηρίγματα.

Δυνάμεις λόγω θερμικών διαστολών

Η αλλαγή της θερμοκρασίας του αγωγού, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, του διακινούμενου ρευστού, ή της ακτινοβολίας του ήλιου (για αγωγούς εκτεθειμένους) προκαλεί γραμμικές διαστολές. Σε περίπτωση αγωγού ευθύγραμμου, μήκους  $L$  που υπόκειται σε μεταβολή της θερμοκρασίας του κατά  $\delta\theta$ , η μεταβολή του μήκους του είναι ίση προς:

$$\delta L = a \cdot L \cdot \delta\theta \quad (4.48)$$

Στην οποία με  $a$  συμβολίζεται ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού του αγωγού. Για χάλυβα είναι  $a = 12 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{mK} \right]$ .

Στην περίπτωση που τα δύο άκρα του αγωγού είναι πακτωμένα, η μη δυνατότητα διαστολής του αγωγού αντιστοιχεί σε ανάπτυξη ορθής θλιπτικής τάσης ίσης προς:

$$\sigma = E \frac{\delta L}{L} = E \cdot a \cdot \delta\theta \quad (4.49)$$

Στην οποία με  $E$  συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του αγωγού. Για την περίπτωση χάλυβα  $E=210$ [GPa], για υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο HDPE  $E=0.8$ [GPa], για περιτυλιγμένες ίνες γυαλιού GPR  $E=17.2$ [GPa].



Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε σωλήνωση ως αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών, μειώνονται σημαντικά αν η σωλήνωση αποκτήσει τη δυνατότητα απορρόφησης των θερμικών διαστολών είτε μέσω κατάλληλων συνδέσμων, είτε με την αύξηση της ελαστικότητας της σωλήνωσης. Η ελαστικότητα της σωλήνωσης αυξάνεται όσο περισσότερες αλλαγές διεύθυνσης έχει, και ιδιαίτερα αν έχει καμπύλες σε τρεις διαστάσεις. Δεδομένου ότι οι δυνάμεις λόγω θερμικών διαστολών είναι ανάλογες της θερμοκρασιακής διαφοράς, από την άποψη αυτή, είναι περισσότερο ευνοϊκή η κατασκευή της σωλήνωσης υπόγεια (οπότε η θερμοκρασιακή διαφορά είναι της τάξης των 5-10[°C]) παρά επίγεια ή υπέργεια (οπότε η θερμοκρασιακή διαφορά ως αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι της τάξης των 20-30[°C]). Σημειώνεται ότι η δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία η σωλήνωση είναι κενή ή δεν διαρρέεται από παροχή γεγονός το οποίο μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια επιθεώρησης και συντήρησης. Όσο στο εσωτερικό της σωλήνωσης ρέει νερό, λόγω της μεγάλης του θερμοχωρητικότητας και των φαινομένων μεταφοράς, η θερμοκρασία του υλικού του αγωγού είναι ουσιαστικά ίση προς τη θερμοκρασία του νερού, δηλαδή δεν αναπτύσσονται σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές.

### Στηρίγματα

Τα στηρίγματα του αγωγού σκοπό έχουν να παραλάβουν τα φορτία που αναπτύσσονται σε αυτόν από το ίδιο βάρος, το βάρος του περιεχόμενου υγρού, την εσωτερική πίεση και τις δυνάμεις λόγω μεταβολής της ορμής, από τις θερμικές διαστολές, τον πλευρικό άνεμο (περίπτωση υπέργειων αγωγών μεγάλης διαμέτρου), τη σεισμική δραστηριότητα, την άνοση για αγωγούς που στηρίζονται στον πυθμένα ή το βυθό της θάλασσας ή λίμνης κλπ. Διακρίνονται σε απλά στηρίγματα και σε αγκυρώσεις. Τα απλά στηρίγματα επιτρέπουν στον αγωγό να αλλάξει κλίση και ουσιαστικά περιορίζουν τις μετατοπίσεις κάθετα προς τον άξονά του. Αντίθετα οι αγκυρώσεις, εκτός των δυνάμεων, παραλαμβάνουν και ροπές μη επιτρέποντας ουδεμία περιστροφή ή μετακίνηση του αγωγού. Τοποθετούνται οπωσδήποτε σε σημεία αλλαγής της κλίσης του αγωγού και στα άκρα όπου συνδέεται με στοιχεία, όπως η δεξαμενή φόρτισης, το έργο υδροληψίας, τους υδροστροβίλους κλπ., έτσι ώστε να μη μεταφέρουν δυνάμεις και ροπές σε αυτά. Οι αγκυρώσεις και τα απλά στηρίγματα, μεταφέρουν τις δυνάμεις και τις ροπές στο έδαφος μέσω της έδρασης τους μορφής πέδιλου από σκυρόδεμα. Στην περίπτωση χαλύβδινων αγωγών γεμάτων με νερό, ένας πρακτικός κανόνας για τον καθορισμό των αποστάσεων  $l_s$  [m] μεταξύ διαδοχικών στηριγμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$l_s \approx 16\sqrt{D_N} \quad (4.50)$$

Στην οποία με  $D_N$  συμβολίζεται η ονομαστική διάμετρος του αγωγού σε μέτρα.

### 4.8.5 Υδραυλικές απώλειες

Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται στις γραμμικές και τις τοπικές, οι οποίες αναπτύσσονται στις διάφορες διαμορφώσεις, εξαρτήματα και όργανα των σωληνώσεων.

Σε σωλήνα ευθύ, κυκλικής διατομής εσωτερικής διαμέτρου  $D$ , ο οποίος πληρούται από το διακινούμενο υγρό πυκνότητας  $\rho$ , οι γραμμικές απώλειες που αναπτύσσονται σε μήκος  $L$  υπολογίζονται από τη σχέση των Darcy-Weisbach, η οποία εκφράζεται ως:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (4.51)$$

όπου με  $f$  συμβολίζεται ο αδιάστατος συντελεστής γραμμικών απωλειών, η τιμή του οποίου εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds και από τη σχετική τραχύτητα των τοιχωμάτων του σωλήνα. Ο αριθμός Reynolds της ροής χαρακτηρίζει το δυναμικό χαρακτήρα της και ορίζεται ως:

$$Re = \frac{V \cdot D_H}{k_v} \quad (4.52)$$

στην οποία με  $k_v$  συμβολίζεται η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού και με  $D_H$  η υδραυλική διάμετρος της διατομής του αγωγού και η οποία ορίζεται ως:

$$D_H = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (4.53)$$

όπου  $A$  η διατομή του αγωγού και  $P$  η βρεχόμενη περίμετρος. Στην περίπτωση αγωγού κυκλικής διατομής είναι προφανώς:

$$D_{H,\phi} = \frac{4A}{P} = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D \quad (4.54)$$

Η σχετική τραχύτητα  $\varepsilon_s$  των βρεχόμενων επιφανειών του αγωγού ορίζεται ως ο λόγος της μέσης τραχύτητας  $\varepsilon$  των τοιχωμάτων του προς την εσωτερική διάμετρο  $D$ , δηλαδή  $\varepsilon_s = \frac{\varepsilon}{D}$

Η τιμή του  $f$  συναρτήσει του αριθμού Reynolds της ροής και με παράμετρο τη σχετική τραχύτητα  $\varepsilon_s$  του αγωγού δίνεται από το διάγραμμα Moody, το οποίο είναι εποπτικό, όμως δεν είναι ιδιαίτερα εύχρηστο. Για το λόγο αυτό έχουν διατυπωθεί διάφορες συσχετίσεις οι οποίες έχουν προκύψει από την επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων. Οι σχέσεις αυτές δίνουν ακριβείς τιμές και μπορούν να εισαχθούν σε ένα υπολογιστικό κώδικα.

Για τυρβώδη ροή ( $Re > 4000$ ) οι Colebrook και White διατύπωσαν την ακόλουθη σχέση η οποία ισχύει χωρίς περιορισμό όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της επιφάνειας ως υδραυλικά λείας ή όχι:

$$f_i = \left[ -2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f_{i-1}}} + \frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D} \right) \right]^{-2} \quad (4.55)$$

Όπου  $Re$  ο αριθμός Reynolds της ροής που δίνεται από τη σχέση 4.54.

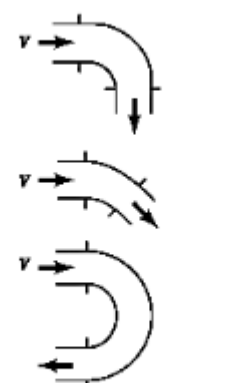
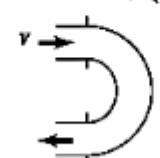
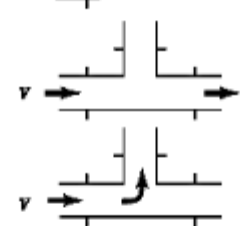
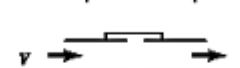
Η σχέση των Colebrook-White είναι πεπλεγμένη και για την επίλυσή της απαιτείται η εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία όμως δεν αποτελεί ιδιαίτερη δυσκολία εάν η επίλυση γίνεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μια καλή τιμή για την εκκίνηση των δοκιμών είναι  $f_0=0.02$ .

Οι υδραυλικές απώλειες που προκαλούνται από ειδικές διαμορφώσεις σε σωλήνες ή από τα εξαρτήματα (βάνες, σύνδεσμοι κλπ) ονομάζονται εντοπισμένες αντιστάσεις και εκφράζονται σε mΣΥ από σχέση:

$$h_l = k_l \frac{V^2}{2g} \quad (4.56)$$

όπου  $V$  [m/s] η μέση ταχύτητα της ροής στο σωλήνα στον οποίο αναφέρεται το εξάρτημα και  $k_l$  ο συντελεστής απωλειών της τοπικής αντίστασης.

Στη συνέχεια δίνονται τιμές του συντελεστή  $k_f$  για μερικές από τις συνηθέστερες διαμορφώσεις και εξαρτήματα.

Component	$K_L$		
<b>a. Elbows</b>			
Regular 90°, flanged	0.3		
Regular 90°, threaded	1.5		
Long radius 90°, flanged	0.2		
Long radius 90°, threaded	0.7		
Long radius 45°, flanged	0.2		
Regular 45°, threaded	0.4		
<b>b. 180° return bends</b>			
180° return bend, flanged	0.2		
180° return bend, threaded	1.5		
<b>c. Tees</b>			
Line flow, flanged	0.2		
Line flow, threaded	0.9		
Branch flow, flanged	1.0		
Branch flow, threaded	2.0		
<b>d. Union, threaded</b>			
	0.08		
<b>e. Valves</b>			
Globe, fully open	10		
Angle, fully open	2		
Gate, fully open	0.15		
Gate, 1/2 closed	0.26		
Gate, 1/4 closed	2.1		
Gate, 3/4 closed	17		
Swing check, forward flow	2		
Swing check, backward flow	∞		
Ball valve, fully open	0.05		
Ball valve, 1/2 closed	5.5		
Ball valve, 3/4 closed	210		

Σχήμα 4.19: Συντελεστής τοπικών απωλειών για συνηθισμένα εξαρτήματα και διαμορφώσεις (Παπανικολάου, 2016).

#### 4.8.6 Εξαρτήματα αγωγού πτώσης

Οι χαλυβδосωλήνες διατίθενται τυποποιημένοι σε ευθύγραμμα τμήματα μήκους 4-6[m] ανάλογα με την ονομαστική τους διάμετρο. Ο αγωγός προσαγωγής κατασκευάζεται από τμήματα σωλήνων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ηλεκτροσυγκόλληση για την περίπτωση χαλυβδосωλήνων ή μέσω ειδικών συνδέσμων ανάλογα με το είδος των σωλήνων. Οι ειδικοί σύνδεσμοι έχουν επιπλέον τη δυνατότητα παραλαβής μικρής αξονικής μετατόπισης (της τάξης 5-10[mm]) και γωνιακής απόκλισης (μέχρι 6°) με αποτέλεσμα η κατασκευή της σωλήνωσης να γίνεται εύκολη. Ενδεικτικά

αναφέρονται οι σύνδεσμοι τύπου Gibault και Johnson για χαλυβδοσωλήνες ή σωλήνες από σκληρό PVC. Η στεγανότητα επιτυγχάνεται μέσω της συμπίεσης 2 ελαστικών στεγανωτικών δακτυλίων ανάμεσα σε ένα κεντρικό χιτώνιο και 2 στεφάνες, οι οποίες συσφίγγονται με εξωτερικούς κοχλίες (ντίξες). Οι σύνδεσμοι αυτού του τύπου κατασκευάζονται τυποποιημένοι για ονομαστική διάμετρο από 50-2000[mm] κατά ονομαστική πίεση  $16 \left[ \frac{kp}{cm^2} \right]$ . Το υλικό των στεγανωτικών δακτυλίων επιλέγεται ανάλογα με τη φύση του διακινούμενου υγρού και τη θερμοκρασία του. Η σύνδεση όλων των τμημάτων με ειδικούς συνδέσμους προκύπτει αντικοινομική και για το λόγο αυτό η χρήση τους συνήθως περιορίζεται στα σημεία όπου απαιτείται η απορρόφηση θερμικών διαστολών ή γωνιακών αποκλίσεων. Για τον ίδιο λόγο η σύνδεση με φλάντζα εφαρμόζεται μόνο στις θέσεις όπου προβλέπεται σύνδεση με όργανο που θα πρέπει να αφαιρείται (π.χ. βάνα).

Οι αλλαγές κλίσης του αγωγού προσαγωγής επιτυγχάνονται είτε με την παρεμβολή τόξου τυποποιημένης καμπύλης μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων, είτε με τη συγκόλληση των τμημάτων με φάλτσο κόψιμο. Η χρησιμοποίηση τόξου τυποποιημένης καμπύλης έχει το πλεονέκτημα μεγαλύτερης στιβαρότητας και μικρότερων υδραυλικών απωλειών, όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα του υψηλότερου κόστους, ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές της ονομαστικής διαμέτρου και για το λόγο αυτό αποφεύγεται για αλλαγή κλίσης μικρότερης των 15° περίπου. Η αλλαγή κλίσης μεγαλύτερης των 15° με τη μέθοδο του φάλτσου κοψίματος καλό είναι να επιτυγχάνεται με περισσότερες από μία φέτες.

Στα ειδικά εξαρτήματα των αγωγών προσαγωγής θα πρέπει να αναφερθούν και τα εξαρτήματα εξάρμωσης, τα οποία έχουν τη δυνατότητα μεταβολής του μήκους τους. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται στο άκρο του αγωγού προσαγωγής στο σημείο σύνδεσης με τη βάνα και ενδεχόμενα ανάντη της διατομής εισόδου του υδροστροβίλου. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η εγκατάσταση ή η αφαίρεση της βάνας σε σωληνώσεις μεγάλης διαμέτρου (οι οποίες έχουν ελάχιστη ελαστικότητα). Κατασκευάζονται τυποποιημένα για ονομαστικές διαμέτρους από 40-1600[mm] και ονομαστικές πιέσεις 10,16 και 25[bar].

Η διαδικασία ηλεκτροσυγκόλλησης χαλυβδοσωλήνων πρέπει να ακολουθεί αυστηρά τις σχετικές προδιαγραφές (κατάλληλες συνθήκες και προεργασία, εκτέλεση από ειδικευμένους ηλεκτροσυγκολλητές, πλήρης ραδιογράφιση των συγκολλήσεων κλπ.).

#### 4.8.7 Διάταξη αγωγού πτώσης

Για μικρές διαμέτρους ο αγωγός πτώσης μπορεί να τοποθετηθεί υπέργειος. Η διάταξη όμως αυτή παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα: υποβαθμίζει το τοπίο, δημιουργεί δουλείες, είναι εκτεθειμένος σε κατολισθήσεις βράχων, είναι εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία και εξαιτίας αυτής σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές και θερμικές διαστολές που έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών δυνάμεων στα στηρίγματα και τις πακτώσεις. Για τους λόγους αυτούς οι αγωγοί προσαγωγής, μεσαίας και μεγάλης διαμέτρου κατασκευάζονται συνήθως υπόγειοι μέσα σε όρυγμα έτσι ώστε να αποφεύγονται όλα τα προηγούμενα μειονεκτήματα.

Ο υπόγειος αγωγός πτώσης επικάθεται σε στρώμα άμμου, το οποίο διαμορφώνεται στον πυθμένα του ορύγματος, έτσι ώστε οι μεγάλοι μεγέθους πέτρες να μην καταπονούν τα τοιχώματα του

σωλήνα. Μετά την εγκατάσταση του αγωγού, το όρυγμα επιχωματώνεται προσεκτικά με το υλικό της εκσκαφής από το οποίο έχουν αφαιρεθεί πέτρες. Το βάθος του άνω σημείου της διατομής του αγωγού από την επιφάνεια του εδάφους είναι της τάξης των 0.5-0.9[m] και αυξάνεται στα 1.2-1.3[m] στα σημεία όπου διέρχονται βαρέα οχήματα στην επιφάνεια. Για μεγαλύτερα βάθη ή για πολύ μεγάλα φορτία απαιτείται η ενίσχυση του αγωγού με περίβλημα από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Στις θέσεις όπου θα γίνει η ηλεκτροσυγκόλληση διαδοχικών σωλήνων το όρυγμα διαμορφώνεται με κατάλληλο πλάτος και βάθος ώστε να διευκολύνεται η εργασία, εκτός και αν ο αγωγός δεν είναι σημαντικού μήκους οπότε τοποθετείται στο όρυγμα μετά την ολοκλήρωση των συγκολλήσεων.

Στην περίπτωση χαλύβδινου αγωγού θα πρέπει να προβλεφθεί η κατάλληλη επιφανειακή προστασία του τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά. Σύμφωνα με τις νεότερες προδιαγραφές, η εξωτερική επιφανειακή προστασία επιτυγχάνεται με τρεις στρώσεις πολυαιθυλενίου και η εσωτερική με εποξειδικές ρητίνες. Το πάχος των στρώσεων πολυαιθυλενίου είναι κατ' ελάχιστο ίσο προς 3.7[mm] για σωλήνα διαμέτρου μεγαλύτερης των 800[mm], ενώ το πάχος της στρώσης των εποξειδικών ρητινών είναι της τάξης των 250[μm]. Η επιφανειακή προστασία των σωλήνων γίνεται συνήθως στο εργοστάσιο κατασκευής τους. Τα άκρα των σωλήνων και σε μήκος 15[cm] δεν έχουν επιφανειακή προστασία ώστε να διευκολύνεται η ηλεκτροσυγκόλληση ή η προσαρμογή εξαρτημάτων.

#### Δοκιμή στεγανότητας

Μετά την ολοκλήρωση του αγωγού, την τελική του τοποθέτηση στο όρυγμα και πριν την επίχωση, την κατασκευή των εδράσεων και αγκυρώσεων, και τη σύνδεση των ειδικών εξαρτημάτων θα πρέπει να διεξαχθεί η δοκιμή στεγανότητας. Η δοκιμή διεξάγεται αρχικά σε τμήματα του αγωγού μήκους της τάξης των 1000[m], αφού προηγουμένως αυτά ταπωθούν στα άκρα τους. Η πίεση στο υπό έλεγχο τμήμα του αγωγού αυξάνει σταδιακά μέχρι να φτάσει στην πίεση δοκιμής που είναι ίση προς 150% της ονομαστικής πίεσης των σωλήνων και των εξαρτημάτων. Κατά τη σταδιακή αύξηση της πίεσης ελέγχεται ο αγωγός για ενδεχόμενη μετατόπιση των τμημάτων του, εμφανή διαρροή νερού. Το υπό δοκιμή τμήμα παραμένει υπό πίεση επί 12[hrs] τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των οποίων δεν επιτρέπεται καμία εργασία στο όρυγμα. Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής αν δεν παρατηρηθεί πτώση πίεσης μεγαλύτερη του 0.1[bar] και δεν παρατηρηθεί καμία εμφανής παραμόρφωση του αγωγού ή εξαρτήματός του. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να επισκευαστεί το σημείο στο οποίο συνέβη η διαρροή και θα πρέπει να επαναληφθεί η δοκιμή.

Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής σε ένα τμήμα του αγωγού γίνεται επίχωση του τμήματος αυτού, αφού όμως αφηθεί ελεύθερο το τμήμα σύνδεσής του με το επόμενο. Μετά την επιτυχή δοκιμή, και του τελευταίου τμήματος του αγωγού, πραγματοποιείται δοκιμή ολόκληρου του αγωγού με την ίδια διαδικασία.

#### 4.8.8 Κοστολόγηση αγωγού πτώσης

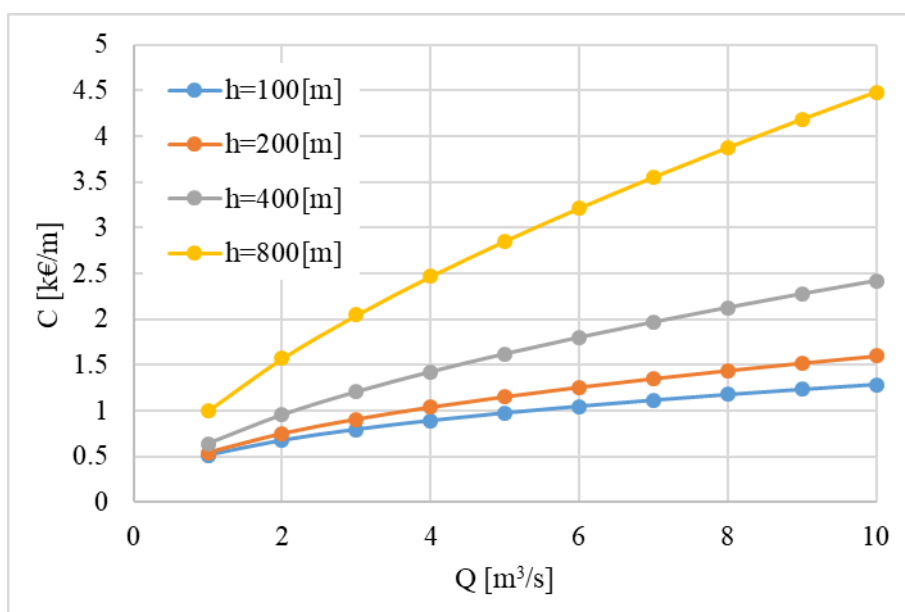
Ο αγωγός πτώσεως θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένος από χαλυβοσωλήνα, μεταβλητού πάχους ανάλογα με την πίεση που υφίσταται κάθε τμήμα. Το κόστος  $C$  του αγωγού πτώσεως, ανά μέτρο μήκους, συσχετίζεται με την υδραυλική πτώση  $h$ [m] και την ονομαστική παροχή  $Q$ [m<sup>3</sup>/s] του μικρού ΥΗΕ και δίνεται από την σχέση:

$$C = aQ^n \quad (4.57)$$

όπου  $a=0.0007h^2+0.0662h+497.6$  και  $n=-6 \cdot 10^{-7}h^2+0.0009h+0.316$ ,  $h>100[m]$ .

Η σχέση 4.59 θεωρείται ενδεικτική, καθώς ο υπολογισμός του κόστους του αγωγού προσαγωγής θα πρέπει να γίνεται αναλύοντας τις 3 συνιστώσες του κόστους και συγκεκριμένα το κόστος του υλικού, το κόστος επιφανειακής προστασίας (όταν απαιτείται από τη φύση του υλικού) και το κόστος εγκατάστασης και δοκιμών. Για την περίπτωση αγωγού από χαλυβιδωτήρα το κόστος του υλικού είναι της τάξεως του 0.70[€/kg], το κόστος της επιφανειακής προστασίας της τάξεως των 25[€/m<sup>2</sup>] εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού και το κόστος εγκατάστασης και δοκιμών της τάξεως των 1050[€/m] διαμέτρου και ραφή (αντιστοιχεί περίπου 1 ραφή ανά 6[m] αγωγού).

Η σχέση αυτή παριστάνεται από το διάγραμμα του σχήματος 4.17 συναρτήσει της παροχής Q για διάφορες ενδεικτικές τιμές της υδραυλικής πτώσης h. Από το σχήμα 4.17 γίνεται φανερό η πολύ γρήγορη αύξηση του κόστους όσο αυξάνεται η υδραυλική πτώση h, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση του πάχους του αγωγού.



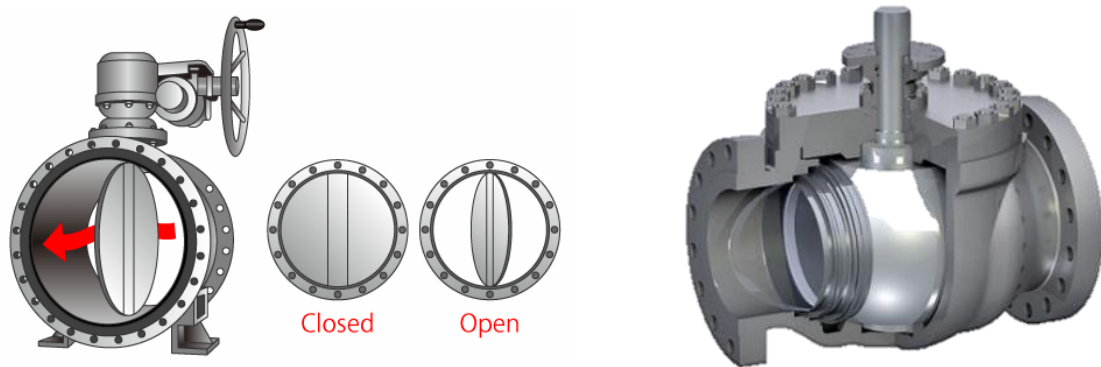
Σχήμα 4.20: Κόστος αγωγού πτώσης συναρτήσει της ονομαστικής παροχής με παράμετρο το ύψος πτώσης.

## 4.9 Όργανα διακοπής

Ως όργανα διακοπής της ροής εννοούνται τα θυροφράγματα στην περίπτωση διάρρυγας με ελεύθερη επιφάνεια ή δεξαμενής και οι δικλείδες (ή βάνες) στην περίπτωση κλειστών αγωγών. Ο ρόλος των οργάνων αυτών μπορεί να είναι ρυθμιστικός της ροής ή η λειτουργία τους να είναι τύπου on-off (δηλαδή να βρίσκονται είτε στην πλήρως ανοιχτή ή την πλήρως κλειστή θέση).

### Δικλείδες (βάνες)

Σε ένα μικρό ΥΗΕ βάνα τοποθετείται στον αγωγό πτώσης, ακριβώς ανάντη του κάθε υδροστροβίλου. Η βάνα αυτή είναι πάντοτε πλήρως ανοιχτή όσο λειτουργεί ο υδροστροβίλος και κλείνει μετά το σταμάτημα της μονάδας. Ο ρόλος της είναι να διακόπτει πλήρως τη ροή όταν ο υδροστροβίλος είναι εκτός λειτουργίας ώστε να γίνεται δυνατή η συντήρηση του υδροστροβίλου.



Σχήμα 4.21: Βάνα πεταλούδας (αριστερά) και σφαιρική βάνα (δεξιά) (Παπανικολάου, 2016).

Ο τύπος της βάνας εξαρτάται από τη στατική πίεση, δηλαδή την τιμή της υδραυλικής πτώσης  $h$ . Συγκεκριμένα για υδραυλική πτώση μικρότερη των 150[m] περίπου προτιμάται η εγκατάσταση βάνας πεταλούδας λόγω του μικρού όγκου, βάρους, άρα και μικρού κόστους. Για μεγαλύτερες τιμές της υδραυλικής πτώσης, τοποθετείται σφαιρική βάνα. Οι βάνες πεταλούδες είναι τυποποιημένες για ονομαστική διάμετρο μέχρι 4[m] και πίεση λειτουργίας μέχρι 200[mΣΥ] ενώ οι σφαιρικές βάνες για ονομαστική διάμετρο μέχρι 3.5[m] και πίεση λειτουργίας μέχρι 500[mΣΥ] ή ονομαστική διάμετρο 2[m] και πίεση λειτουργίας μέχρι 1000[mΣΥ]. Σε σύγκριση με τις σφαιρικές βάνες, οι βάνες πεταλούδας στη θέση πλήρως ανοικτή, παρουσιάζουν 10 φορές περίπου υψηλότερες υδραυλικές απώλειες λόγω της παρεμβολής στη ροή του περιστρεφόμενου δίσκου.

Το άνοιγμα της βάνας επιτυγχάνεται με υδραυλικό έμβολο το οποίο τροφοδοτείται από τη μονάδα ισχύος του ρυθμιστή στροφών. Το κλείσιμο της βάνας επιτυγχάνεται με τη δράση αντίβαρου το οποίο ελευθερώνεται όταν δοθεί η αντίστοιχη εντολή. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται το πλήρες κλείσιμο ακόμη και σε περίπτωση απώλειας της υδραυλικής ή ηλεκτρικής ισχύος η οποία εξασφαλίζει το άνοιγμα της. Η εντολή για την απελευθέρωση του αντίβαρου και το κλείσιμο της βάνας δίνεται από τον ρυθμιστή στροφών πριν από την εκκίνηση της μονάδας, με το πλήρες σταμάτημά της (μετά το πλήρες κλείσιμο των ρυθμιστικών πτερυγίων) ή και σε έκτακτες περιπτώσεις όπως στην απώλεια πίεσης κατάντη ή την υπερβολική ταχύτητα της ροής στον αγωγό πτώσης.

#### Θυροφράγματα

Ο ρόλος των θυροφραγμάτων είναι η διακοπή ή ρύθμιση της παροχής στη διώρυγα προσαγωγής, στην είσοδο της διάταξης υδροληψίας, στην είσοδο της δεξαμενής φόρτισης. Επίσης θυρόφραγμα τοποθετείται στην είσοδο του αγωγού απαγωγής του υδροστροβίλου, όταν αυτός είναι τοποθετημένος χαμηλότερα από τη στάθμη απαγωγής έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίσκεψη και συντήρησή του.

Τα θυροφράγματα για τις προηγούμενες λειτουργίες είναι επίπεδα, κατασκευασμένα από χαλυβοέλασμα που φέρει τις απαραίτητες ενισχύσεις ανάλογα με το μέγεθός τους και τις πιέσεις. Συρταρώνουν σε ορθογωνικές εσοχές στα πλευρικά τοιχώματα της διώρυγας ή του ανοίγματος της δεξαμενής, ενώ η στεγανότητα κατά την περίμετρο εξασφαλίζεται με την τοποθέτηση διατομής από ελαστικό (συνθετικό ή καουτσούκ) ή ξύλο.

Για την ανύψωση του θυροφράγματος απαιτείται η εφαρμογή δύναμης που να υπερνικά το ίδιο βάρος και τη δύναμη τριβής. Η ανύψωση αυτή γίνεται χειροκίνητα μέσω μηχανισμού γραναζιών και καστανίας για τα μικρού μεγέθους θυροφράγματα ή μέσω ηλεκτροκινητήρα ή υδραυλικών εμβόλων για τα θυροφράγματα μεγαλύτερου μεγέθους.

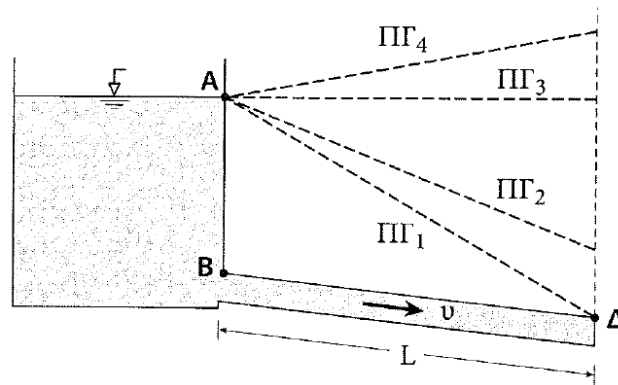
Στις περιπτώσεις τις οποίες απαιτείται η πλήρης διακοπή της ροής, σε αραιά χρονικά διαστήματα (παραδείγματος χάρη στη διατομή απαγωγής του υδροστροβίλου όταν πρέπει να γίνει επίβλεψη ή συντήρηση) χρησιμοποιούνται συνήθως δοκοί έμφραξης (δηλαδή δοκοί μεταλλικές, ξύλινες ή από ωπλισμένο σκυρόδεμα) που συρταρώνουν σε κατακόρυφες πλευρικές εγκοπές και οι οποίες τοποθετούνται ή αφαιρούνται μέσω γερανού ή βαρούλκου. Οι ξύλινες δοκοί έμφραξης έχουν συνήθως πλάτος όχι μεγαλύτερο των 4-5[m] (σπανιότερα μπορεί να φτάσουν 5-6[m]), ενώ οι χαλύβδινες μπορεί να φτάσουν μέχρι 30[m] φυσικά με τις κατάλληλες ενισχύσεις.

## 4.10 Το πρόβλημα του υδραυλικού πλήγματος

### 4.10.1 Γενικά

Αν υπάρχει μια δεξαμενή γεμάτη με νερό, που στο κατώτερο σημείο της έχει σωλήνα απορροής με μια δικλείδα  $\Delta$  για τη ρύθμιση της παροχής, τότε, όταν η δικλείδα είναι ανοιχτή, η πιεζομετρική γραμμή ΠΓ 1 περνάει από το σημείο εκροής  $\Delta$ . Όταν η δικλείδα δεν είναι ανοιχτή εντελώς, τότε υπάρχει φορτίο επάνω από το  $\Delta$  και η Π.Γ. παίρνει τη μορφή ΠΓ2. Αν η δικλείδα είναι κλειστή, τότε η πιεζομετρική γραμμή είναι προέκταση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Αν η δικλείδα για έναν οποιοδήποτε λόγο κλείσει απότομα, τότε η κατάσταση ροής αλλάζει και η κινητική ενέργεια της κινούμενης μάζας του νερού μετατρέπεται απότομα σε θλιπτική με απότομη αύξηση της πίεσης στο σωλήνα ΒΔ και μετατροπή της ΠΓ από την ΠΓ1 στη θέση ΠΓ4. Η αύξηση της πίεσης εξαιτίας της απότομης διακοπής της ροής του νερού στο σωλήνα ΒΔ, με πολύ απλά λόγια αποτελεί το υδραυλικό πλήγμα. Η αύξηση της πίεσης, που μεταδίδεται από το  $\Delta$  προς το Β με μορφή κύματος, ανυψώνει τη στάθμη Α και επιστρέφει στο  $\Delta$  για να ξαναεπιστρέψει στο Α με μειωμένη ένταση και να συνεχίσει μέχρι να μηδενιστεί (φθίνουσα ταλάντωση). Η αυξομείωση της στάθμης του νερού στο Α εξαρτάται από το μήκος L του σωλήνα εκροής, την ταχύτητα και τον τρόπο (απότομο ή όχι) του κλεισίματος της δικλείδας. Η αύξηση της πίεσης κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές και για το λόγο αυτό πρέπει πάντα να υπολογίζεται και να ελέγχεται η διαστασιολόγηση και η αντοχή του υλικού του σωλήνα. Η υπερπίεση αντιστοιχεί σε ένα μέγιστο πιεζομετρικό φορτίο ΠΓ4, στο οποίο πρέπει να υπολογίζεται η σωλήνωση, για να αντέχει κάθε σημείο της τις μεγάλες θετικές πιέσεις του υδραυλικού πλήγματος αλλά και τις αρνητικές που ακολουθούν. Σε περιπτώσεις που ακολουθείται το φυσικό έδαφος με ανυψώσεις και καταπτώσεις, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, ώστε ο αγωγός να μη βρίσκεται υψηλότερα από την ΠΓ, γιατί υπάρχει κίνδυνος, κατά τη διάρκεια των υποπίεσεων, δημιουργίας κενών και καταστροφής του σωλήνα.





Σχήμα 4.22: Διαμορφώσεις της πιεζομετρικής γραμμής ανάλογα με τη λειτουργία της δικλείδας. ΠΓ<sub>1</sub> η δικλείδα ανοιχτή, ΠΓ<sub>2</sub> η δικλείδα εν μέρει ανοιχτή, ΠΓ<sub>3</sub> η δικλείδα κλειστή, ΠΓ<sub>4</sub> η δικλείδα κλείνει απότομα (πιεζομετρικό φορτίο αυξημένο κατά το ωστικό κύμα) (Τσόγκας, 2018).

#### 4.10.2 Βασικές εξισώσεις υδραυλικού πλήγματος & επίλυση

Όπως αναφέρθηκε, κατά το κλείσιμο ή άνοιγμα της δικλείδας λαμβάνει χώρα μετατροπή της μιας μορφής ενέργειας σε άλλη. Αν υποθεθεί ότι το νερό είναι ασυμπίεστο και τα τοιχώματα του προσαγωγού σωλήνα χωρίς ελαστικότητα, τότε η αύξηση ή μείωση της πίεσης  $\Delta H$  που θα αναπτυχθεί εξαιτίας του φαινομένου θα είναι κατά το δεύτερο νόμο του Newton

$$\begin{aligned} \gamma A \Delta H &= -\gamma \frac{A L_{\sigma}}{g} \frac{dv}{dt} \\ \Rightarrow \Delta H &= -\frac{L_{\sigma}}{g} \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (4.58)$$

όπου  $A$  [m<sup>2</sup>] το εμβαδό της διατομής του αγωγού,  $L_{\sigma}$  [m] το μήκος του αγωγού,  $v$  [ $\frac{m}{s}$ ] η ταχύτητα ροής στον αγωγό και  $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού. Αν  $T$  [s] ο χρόνος κλεισίματος της δικλείδας και υποθεθεί γραμμική επιβράδυνση της ταχύτητας στο σωλήνα από  $v_0$  σε 0 σε χρόνο  $T$ , τότε ισχύει

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v_0}{T}$$

και η εξίσωση 4.60 γράφεται

$$\Delta H = \frac{L_{\sigma}}{g} \frac{v_0}{T} \quad (4.59)$$

Η πίεση  $\Delta H$  (αύξηση ή μείωση) αυτή, προστίθεται στο πιεζομετρικό φορτίο  $H$ , μειωμένο κατά τις γραμμικές απώλειες.

Όπως αναφέρθηκε, το νερό και τα τοιχώματα των σωλήνων θεωρούνται ασυμπίεστα. Στην πραγματικότητα όμως αυτό δεν συμβαίνει. Οι σωλήνες συστέλλονται και διαστέλλονται παρακολουθώντας τις ταλαντώσεις του κυματισμού. Έτσι στους υπολογισμούς μπαίνουν και οι συντελεστές ελαστικότητας. Ο υπολογισμός με τον τρόπο αυτό γίνεται πολύπλοκος και έχουν διατυπωθεί πολλές λύσεις από μελετητές.

Ο χρόνος  $T_S = \frac{2L}{C_S}$  λέγεται περίοδος του υδραυλικού κύματος και από πειράματα που έγιναν βρέθηκε ότι η ταχύτητα μετάδοσης  $C_S$  του κύματος, πλησιάζει την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου μέσα στο νερό, που είναι  $1425 \left[ \frac{m}{s} \right]$  σε θερμοκρασία  $10 [^{\circ}C]$ . Συγκρίνοντας την τιμή αυτή  $T_S$  με το χρόνο κλεισίματος  $T$  της δικλείδας διακρίνονται δύο περιπτώσεις.

Η πρώτη αφορά  $T < T_S$  δηλαδή ο χρόνος κλεισίματος της δικλείδας είναι μικρότερος από τον χρόνο μετάδοσης και επιστροφής του κύματος, πράγμα σπάνιο στην πράξη, τότε η αύξηση της πίεσης εξαιτίας του υδραυλικού πλήγματος είναι

$$\Delta H = \frac{\Delta v}{g} C_S \quad (4.60)$$

όπου  $\Delta v$  η μεταβολή της ταχύτητας του νερού στο σωλήνα, ενώ η ταχύτητα  $C_S$  δίνεται από τη σχέση

$$C_S = \sqrt{\frac{g}{\gamma} + \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{k} + \frac{D}{d}}} \quad (4.61)$$

όπου  $D$  η διάμετρος του αγωγού,  $k$  το μέτρο ελαστικότητας του σωλήνα,  $\varepsilon$  το μέτρο ελαστικότητας του νερού και  $d$  το πάχος των τοιχωμάτων του σωλήνα.

Η δεύτερη αφορά  $T > T_S$  δηλαδή ο χρόνος κλεισίματος της δικλείδας είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο μετάδοσης και επιστροφής του κύματος, που είναι και η πιο συνηθισμένη, στην πράξη αλλά και πιο σύνθετη, γιατί με την επιστροφή του κύματος δεν έχει συμπληρωθεί το κλείσιμο της δικλείδας. Ο Allievi, για την περίπτωση αυτή και χωρίς να λάβει υπόψη του τις τριβές που προκαλούνται από τη μείωση της ταχύτητας, δίνει για ομοιόμορφο κλείσιμο της δικλείδας τη σχέση:

$$H_A = \left( \frac{n}{2} + \sqrt{\left( \frac{n}{2} \right)^2 + n} \right) H \quad (4.62)$$

όπου  $H$  το αρχικό φορτίο στη δικλείδα, και  $n$  από τη σχέση:

$$n = \left( \frac{L_{\sigma} V}{g T H} \right)^2 \quad (4.63)$$

Οι τιμές που λαμβάνονται από τη σχέση αυτή θεωρούνται ικανοποιητικές για το στάδιο προκαταρκτικής μελέτης αλλά οικονομικά ασύμφορες.

(Τσακίρης, 2015)

Το νερό αν και στις περισσότερες εφαρμογές θεωρείται ασυμπίεστο ρευστό, στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής σε κυκλικούς αγωγούς με απότομες αλλαγές της ροής, θεωρείται συμπίεστο. Οπότε ο όγκος ελέγχου στην περίπτωση αυτή θα έχει μήκος  $dx$ , αλλά μη σταθερή διατομή δεδομένου ότι η μεταβολή της μάζας δημιουργεί έναν μη αμελητέο πια όρο στην εξίσωση. Με βάση τη διατήρηση της μάζας και τη διατήρηση της ορμής προκύπτει το σύστημα των εξισώσεων:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} \right) + C_s^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2gD} + \frac{1}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \end{array} \right\}$$

Αντικαθιστώντας την πίεση με τη διαφορά της πιεζομετρικής γραμμής με την υψομετρική θέση, δηλαδή  $p = \gamma(H - z)$ , και εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων του υδραυλικού πλήγματος ως συνάρτηση του ύψους  $H$  της πιεζομετρικής γραμμής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + V \sin \theta \right) + C_s^2 \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2gD} + \frac{1}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \end{array} \right\}$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα φαινόμενα του υδραυλικού πλήγματος διαρκούν πολύ λίγο χρόνο, ενώ αναπτύσσονται μικρές ταχύτητες ροής. Κατά συνέπεια οι μη γραμμικοί όροι  $V \frac{\partial V}{\partial x}$  και  $V \frac{\partial H}{\partial x}$  θεωρούνται αμελητέοι σε σχέση με τις αντίστοιχες μερικές παραγώγους ως προς το χρόνο. Επομένως με βάση την παραδοχή αυτή το παραπάνω σύστημα εξισώσεων γράφεται:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} + C_s^2 \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2gD} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \end{array} \right\} \quad (4.64)$$

Τέλος, αμελώντας και για μια πρώτη προσέγγιση τις γραμμικές απώλειες λόγω τριβών, το παραπάνω σύστημα γράφεται:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial t} + C_s^2 \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \end{array} \right\} \quad (4.65)$$

Η λύση του συστήματος αυτού των εξισώσεων δίνει:

$$H_{tx} - H_0 = F \left( t - \frac{x}{C_s} \right) + f \left( t + \frac{x}{C_s} \right) \quad (4.66)$$

Και

$$V_{tx} - V_0 = -\frac{g}{C_s} \left[ F \left( t - \frac{x}{C_s} \right) - f \left( t + \frac{x}{C_s} \right) \right] \quad (4.67)$$

Στις εξισώσεις αυτές  $+x$  είναι η διεύθυνση από τη δικλείδα προς τον ταμιευτήρα.

#### 4.10.3 Υπολογισμός υδραυλικού πλήγματος σε οποιοδήποτε χρόνο και σημείο του αγωγού

Για να μειωθούν οι υπολογισμοί στο ελάχιστο, τα χρονικά βήματα λαμβάνονται όσο πιο μεγάλα γίνεται χωρίς όμως να υπερβαίνουν την περίοδο του υδραυλικού πλήγματος. Αυτό ισχύει για την πίεση στη δικλείδα. Για οποιοδήποτε άλλο σημείο, το μέγιστο χρονικό βήμα είναι ο πιο σύντομος χρόνος παλινδρόμησης από το θεωρούμενο σημείο μέχρι το σημείο ανάκλασης του κύματος.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4.68 και 4.69 προκύπτει

$$C_t = \frac{C_d E_G}{E} \sqrt{2g} \quad (4.68)$$

$$H - H_0 = F - f \quad (4.69)$$

$$\frac{C_s}{g} (V - V_0) = F - f \quad (4.70)$$

$$V_t = C_t \sqrt{H_t} \quad (4.71)$$

$$V_t = \frac{-\frac{C_s C_t^2}{2g} + \frac{C_t}{2} \sqrt{\left(\frac{C_s C_t}{g}\right)^2 + 4(1 + C_t^2 b) \left(H_0 + \frac{C_s V_0}{g} + 2f\right)}}{1 + C_t^2 b} \quad (4.72)$$

$$\text{όπου } b = \left(\frac{1}{2g} + \frac{\lambda d}{2gD}\right)$$

#### 4.10.4 Δεξαμενές ανάπαλσης

Οι τεράστιες θετικές και αρνητικές πιέσεις πρέπει να αποφεύγονται λόγω των κινδύνων που μπορεί να προκαλέσουν σε έναν αγωγό. Οι μεγάλες αρνητικές πιέσεις είναι επικίνδυνες λόγω σπηλαίωσης και λόγω διαχωρισμού. Αυτοί οι λόγοι μπορούν να ελεγχθούν με την αλλαγή του σχεδιασμού του συστήματος και την κατασκευή διατάξεων αντιπληγματικής προστασίας.

Οι αλλαγές στο βασικό σχεδιασμό περιλαμβάνουν την αύξηση του χρόνου ανοίγματος-κλεισίματος της δικλείδας, τη μείωση της παροχής (γεγονός μόνο θεωρητικό, αφού σε όλες σχεδόν τις υδροδυναμικές εγκαταστάσεις, η παροχή διατηρείται σταθερή), την αύξηση της διαμέτρου του αγωγού (που αποτελεί μάλλον αρνητικό παράγοντα, αφού συνδέεται άμεσα με την αύξηση του κόστους του έργου), και τέλος τη μείωση του μήκους του αγωγού (γεγονός μάλλον αδύνατο ή εξαιρετικά δύσκολο).

Οι διατάξεις αντιπληγματικής προστασίας γενικά περιλαμβάνουν βαλβίδες αντεπιστροφής (εμποδίζουν την αντιστροφή της ροής), βαλβίδες εκτόνωσης της πίεσης, βαλβίδες αερο-

εισαγωγής, συστήματα By-pass, αεροφυλάκια, δεξαμενές ανάπαλσης, ακόμη και τη χρήση βοηθητικών ταμιευτήρων. Οι τέσσερις πρώτες διατάξεις εφαρμόζονται κυρίως στα δίκτυα ύδρευσης και άρδευσης, ενώ στα υδροδυναμικά έργα εφαρμόζονται οι τρεις τελευταίες διατάξεις.

Τόσο τα αεροφυλάκια, όσο και οι δεξαμενές ανάπαλσης και οι βοηθητικοί ταμιευτήρες αποσβένουν γρήγορα τα κύματα αυξημένης πίεσης, που αντικαθίστανται από μία ταλάντωση της μάζας, προστατεύοντας το ανάντη τμήμα του αγωγού. Οι βοηθητικοί ταμιευτήρες, οι οποίοι έχουν πολύ μικρότερη επιφάνεια σε σχέση με τις δεξαμενές ανάπαλσης, έχουν βαλβίδα αντεπιστροφής που δεν επιτρέπει την επιστροφή του νερού στον ταμιευτήρα, αλλά η εφαρμογή τους είναι πολύ περιορισμένη.

Τα αεροφυλάκια και οι δεξαμενές ανάπαλσης τοποθετούνται συνήθως κοντά στο σημείο ελέγχου (στρόβιλοι) ή στο ψηλότερο σημείο της χάραξης. Διαθέτουν τις απαραίτητες ποσότητες του νερού, όταν ανοίγουν οι δικλείδες για να αρχίσουν να δουλεύουν οι τουρμπίνες και αποδέχονται το πλεονάζον νερό όταν κλείνουν οι δικλείδες και οι τουρμπίνες σταματούν τη λειτουργία τους. Συνήθως η παροχή από τον αγωγό προς το θάλαμο του τεχνικού στραγγαλίζεται από μια διάταξη στένωσης και αφήνει πιο ελεύθερη τη ροή από το θάλαμο προς τον αγωγό. Τα αεροφυλάκια είναι σχετικά φτηνή λύση, απαιτούν όμως συνεχή συντήρηση και έλεγχο λειτουργίας. Η κατασκευή δεξαμενών ανάπαλσης συνήθως περιορίζεται σε περιπτώσεις μεγάλων υψομετρικών διαφορών, είναι δαπανηρές, αλλά δεν απαιτούν συντήρηση.

Η κατασκευή μιας δεξαμενής ανάπαλσης στοχεύει στην εκμηδένιση ή ελαχιστοποίηση των πιέσεων του υδραυλικού πλήγματος στη σήραγγα προσαγωγής και στη μείωση των πιέσεων στον αγωγό πτώσης σε συνδυασμό με το χρόνο κλεισίματος και την παροχή της απαιτούμενης ποσότητας νερού, σε περίπτωση ξαφνικής έναρξης λειτουργίας.

Συνήθη μορφή δεξαμενών ανάπαλσης αποτελούσαν οι κυλινδρικής διατομής πύργοι, που για λόγους εξοικονόμησης χώρου αλλά και λειτουργίας, έδωσαν νέες μορφές στη διαμόρφωση των δεξαμενών.

Το νερό στον αγωγό θα επιταχύνεται ή θα επιβραδύνεται, όσο γρηγορότερα ή αργότερα μεταβάλλεται η πίεση στη βάση της δεξαμενής. Ταυτόχρονα όμως το μέγιστο ύψος του νερού στη δεξαμενή πρέπει να περιορίζεται για λόγους οικονομίας, ενώ το ελάχιστο ύψος του νερού δεν πρέπει με κανένα τρόπο να επιτρέπει την είσοδο αέρα μέσα στον αγωγό μεταφοράς. Η ελάχιστη δηλαδή στάθμη πρέπει να είναι ψηλότερα κατά 1 m τουλάχιστον από τη βάση της δεξαμενής.

Οι περιορισμοί αυτοί οδηγούν σε δεξαμενές που πρέπει να έχουν:

Στη βάση τους διατάξεις στραγγαλισμού της ροής από τον αγωγό προς τη δεξαμενή και αντίστροφα, συνδυασμό θαλάμων με μεγάλη διατομή στη βάση ή στην κορυφή της δεξαμενής, υπερχειλίση στην κορυφή ή συνδυασμό λύσεων με επιλογή διάφορων μορφών.

Οι βασικές σκέψεις για το σχεδιασμό μιας δεξαμενής ανάπαλσης είναι η επιλογή της θέσης (που προσδιορίζεται από το κόστος, τη μέθοδο κατασκευής και τα επιθυμητά αποτελέσματα αντιμετώπισης του πλήγματος), το μέγεθος και την περιοχή κατασκευής (που εξαρτάται πέρα από τους πιο πάνω παράγοντες και από την ευστάθεια του συστήματος), το ύψος της δεξαμενής (που πρέπει να είναι ικανό να παραλάβει το μέγιστο ύψος ανόδου του νερού χωρίς να υπάρχει υπερχειλίση, εκτός και αν αυτό είναι επιθυμητό), αποφυγή εισροής αέρα στον αγωγό πτώσης (με

κατασκευή τέτοια, που η κατώτερη στάθμη να μην φτάνει μέχρι τη διάταξη στραγγαλισμού, ούτε να δημιουργείται δίνη – vortex), το εύρος μεταξύ ανώτατης και κατώτατης στάθμης να μην είναι μεγάλο (προκαλεί δυσκολίες και προβλήματα ρύθμισης της λειτουργίας των στροβίλων), το άνοιγμα ή το κλείσιμο πρέπει να γίνεται μετά τη σταθεροποίηση της στάθμης του νερού στη δεξαμενή.

Η εισροή ή εκροή σε μια δεξαμενή ανάπαλσης καθώς και το ύψος του νερού μέσα σ' αυτήν, εξαρτώνται από την κίνηση της δικλείδας (κλείσιμο ή άνοιγμα) και τις άλλες παραμέτρους της εγκατάστασης.

Αν θεωρηθεί ένα μικρό χρονικό βήμα  $\Delta t$  κατά τη διάρκεια του οποίου οι αλλαγές στην παροχή και το ύψος μπορούν να θεωρηθούν γραμμικές. Για δεξαμενές σταθερής διατομής, ο όγκος του νερού που μπαίνει στη δεξαμενή στη βάση B είναι:

$$\Delta V = E_{\delta} \Delta h = \frac{Q_{\delta,t} + Q_{\delta,t+\Delta t}}{2} \Delta t \quad (4.73)$$

Υποθέτοντας ότι ο σταθμός παραγωγής δεν λειτουργεί (οι τουρμπίνες είναι σταματημένες), δηλαδή δεν υφίσταται ροή του νερού. Τότε η στάθμη στη δεξαμενή ανάπαλσης θα βρίσκεται στο ίδιο ύψος με τη στάθμη του ταμιευτήρα (στάθμη υδροστατικής ισορροπίας).

Υποθέτοντας τώρα ότι η δικλείδα των υδροστροβίλων ανοίγει και παροχή  $Q_p$  ρέει προς αυτούς. Η στάθμη τότε στη δεξαμενή ανάπαλσης θα είναι χαμηλότερη από ό,τι πριν, εξαιτίας των απωλειών, σε μια στάθμη που λέγεται στάθμη υδροδυναμικής ισορροπίας.

## 4.11 Λοιπά στοιχεία

### 4.11.1 Γέφυρα ανόδου ψαριών

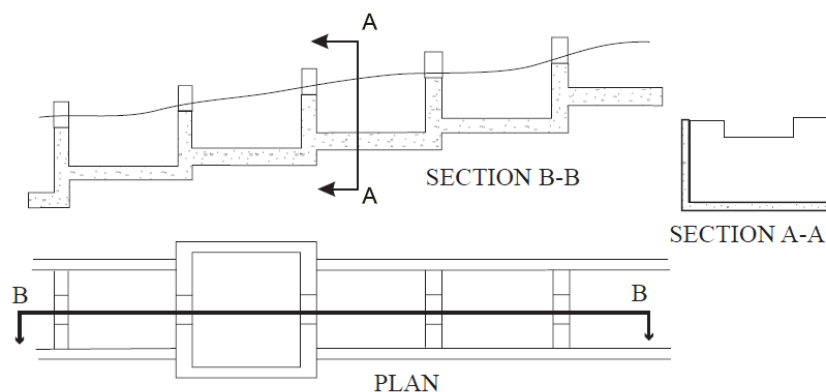
Τα ανάδρομα ψάρια είναι εκείνα που αναπαράγονται στο γλυκό νερό, αλλά ζουν το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους στους ωκεανούς. Τα κατάδρομα ψάρια είναι εκείνα που αναπαράγονται στους ωκεανούς, αλλά μεγαλώνουν στα γλυκά νερά και είναι αυτά που αναζητούν διαδρομές στα φράγματα και στους υπερχειλιστές. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για περάσματα ψαριών οι οποίες εξαρτώνται από τα είδη των ψαριών που θέλουν να εξυπηρετηθούν αλλιώς τα ψάρια των γλυκών νερών έχουν περιορισμένη δυνατότητα μετακίνησης.

Οι τεχνολογίες για περάσματα των ψαριών προς τα ανάντη του ρού των ποταμών θεωρούνται καλώς ανεπτυγμένες και κατανοητές για συγκεκριμένα είδη ψαριών περιλαμβανομένου και του σολομού. Σύμφωνα με το Office of Technology Assessment in the U.S.A. 1995, δεν υπάρχει μοναδική λύση στο σχεδιασμό ενός συστήματος μετακίνησης ψαριών προς τα ανάντη. Ο αποδοτικός σχεδιασμός ενός τέτοιου περάσματος σε συγκεκριμένο έργο, απαιτεί καλή επικοινωνία μεταξύ μηχανικών και βιολόγων, και βαθιά κατανόηση των χαρακτηριστικών της τοποθεσίας. Οι αποτυχίες των συστημάτων αυτών οφείλονται στην έλλειψη προσοχής στην λειτουργία και συντήρηση των εγκαταστάσεων.

Τα «περάσματα» ανόδου ψαριών παρέχονται με διάφορες τεχνικές: ιχθυόσκαλες, ανελκυστήρες, αντλίες και συστήματα μεταφοράς. Οι αντλίες είναι αποτελούν μια αμφιλεγόμενη μέθοδο. Τα

συστήματα μεταφοράς συνδυάζονται συνήθως με ψηλά φράγματα και λόγω της ιδιαίτερης τεχνικής που απαιτείται συνήθως δεν εφαρμόζονται σε μΥΗΕ. Στα μΥΗΕ συνήθως εφαρμόζονται συστήματα παράκαμψης bypass αλλά η καταλληλότητα της λύσης εξαρτάται από τις συνθήκες της τοποθεσίας, τα χαρακτηριστικά των ψαριών που μας ενδιαφέρουν καθώς και από οικονομοτεχνικά κριτήρια. Τα συστήματα παράκαμψης (τεχνητό ρυάκι χωρίς σκαλοπάτια, τύπου «pool and weir», πέρασμα τύπου «Denil», κατακόρυφες σχισμές, υβριδικά κ.λ.π) μπορούν να σχεδιαστούν να φιλοξενήσουν ψάρια που κολυμπάνε τόσο στο βυθό όσο και αυτά που κολυμπάνε επιφανειακά.

Η πιο συνηθισμένη διάταξη ανόδου ψαριών είναι το σύστημα των δεξαμενών που υπερχειλίζουν. Πρόκειται για μια σειρά δεξαμενών όπου το νερό υπερχειλίζει από τη μία στην άλλη μέσω ορθογωνικών υπερχειλιστών. Οι δεξαμενές αυτές παίζουν διπλό ρόλο: αφενός παρέχουν χώρους ξεκούρασης για τα ψάρια ενώ καταναλίσκουν υδραυλική ενέργεια από το νερό που μειώνεται μέσω της σκάλας. Το μέγεθος και το ύψος των δεξαμενών σχεδιάζονται συναρτήσει των ψαριών που θα εξυπηρετηθούν. Στα διαχωριστικά των δεξαμενών εκτός των ορθογωνικών εντομών μπορούν να προστεθούν ακόμη και τμήματα με κατακόρυφα κενά ώστε εκτός από τα ψάρια να διέρχονται και φερτές ύλες. Παράλληλα με τους ορθογωνικούς υπερχειλιστές μπορούν να σχεδιαστούν ανοίγματα στον πυθμένα για ψάρια που κολυμπούν κοντά στον πυθμένα, καθώς επίσης και συνδυασμός των παραπάνω. Δεξαμενές με τομές μόνο στον πυθμένα δεν εμφανίζουν πρακτικό ενδιαφέρον καθότι απευθύνονται μόνο σε ψάρια που κολυμπούν στο βυθό. Το σύστημα των ορθογωνικών υπερχειλιστών είναι το παλαιότερο, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι η μεταβολή της ανάντη στάθμης επηρεάζει την διέλευση των ψαριών. Το πλάτος των δεξαμενών για μήκη 1.8÷3[m] ποικίλει από 1.2÷2.4[m]. Η πτώση μεταξύ των δεξαμενών είναι της τάξης των 20÷30[cm].

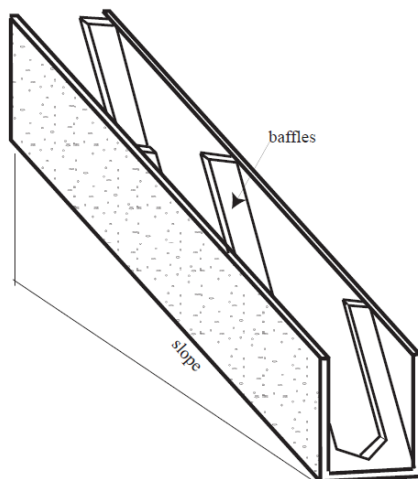


Σχήμα 4.23: Συστοιχία ορθογωνικών υπερχειλιστών (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).

Η χρήση κατακόρυφων θυρίδων είναι πολύ συνηθισμένη στις Η.Π.Α. αλλά όχι τόσο διαδεδομένη στην Ευρώπη. Μέσω της κατακόρυφης εντομής περνάνε τόσο ψάρια, όσο και φερτά. Ένα τυπικό σύστημα έχει δεξαμενές πλάτους 2.5[m], μήκους 3.3[m] με μια εντομή καθολική καθ' ύψος και πλάτους 30[cm]. Οι υποστηρικτές της διάταξης αυτής εξυμνούν την προσαρμοστικότητα της σε παροχές με μεγάλη διακύμανση.

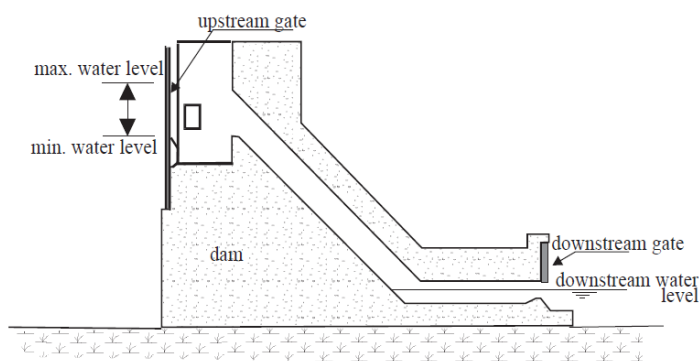
Η διάταξη τύπου «Denil» είναι απότομη και αποτελείται από στενά κανάλια (chutes) με χωρίσματα στο κάτω μέρος και στα πλαϊνά που σκοπό έχουν την απορρόφηση ενέργειας

δημιουργώντας συνθήκες ροής χαμηλής ταχύτητας τις οποίες τα ψάρια μπορούν να νικήσουν και να κολυπήσουν ανάποδα. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει στη διάταξη αυτή να χρησιμοποιείται με κλίσεις έως 1:5. Επίσης δημιουργούν τυρβώδεις συνθήκες πολύ ευμενέστερες για πολλά είδη ψαριών σε σχέση με το σύστημα των δεξαμενών, ενώ μπορούν να αντιμετωπίσουν μεταβολές στο βάθος ροής. Το σύστημα πρέπει να έχει δεξαμενή ηρεμίας κάθε 2[m] υψομετρικής διαφοράς της ελεύθερης επιφάνειας.



Σχήμα 4.24: Σύστημα τύπου «Denil» (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).

Το σύστημα Borland (Borland lock) είναι μια σχετικά φθηνή λύση για μεταφορά ψαριών από τα κατάντη σε ταμειυτήρα φράγματος μεσαίου ύψους. Τα ψάρια κολυμπούν μια κοντή ιχθυόσκαλα προς την κάτω δεξαμενή. Τότε η κατάντη πόρτα της κάτω δεξαμενής κλείνει, ενώ ανοίγει η ανάντη πόρτα της δεξαμενής αυτής η οποία τώρα πληρώνεται με νερό από τον ταμειυτήρα. Έτσι, τα ψάρια που τώρα έχουν φτάσει κοντά στον ταμειυτήρα, μπορούν να κολυπήσουν προς αυτόν.



Σχήμα 4.25: Τομή συστήματος «Borland» (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).

Σε ψηλότερα φράγματα, η καλύτερη λύση είναι η εγκατάσταση ενός ανελκυστήρα ειδικά σχεδιασμένο για το σκοπό. Εναλλακτική λύση είναι η παγίδευση των ψαριών στα κατάντη και η ασφαλής μεταφορά τους στα ανάντη με χρήση κατάλληλων τελεφερίκ.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για ένα επιτυχημένο σύστημα μετακίνησης ψαριών είναι η διάταξη για την προσέλκυση των ψαριών. Η διάταξη αυτή πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται την τάση των μεταναστευτικών ψαριών να αναζητούν δυνατά ρεύματα, ενώ παράλληλα τα αποφεύγουν αν είναι πολύ δυνατά. Οι ταχύτητες ροής στην είσοδο ποικίλλουν για



κάθε είδος ψαριού, για παράδειγμα για το σολομό τιμή  $2\div 3$ [m/s] είναι αποδεκτή. Η απουσία καλών συνθηκών προσέλκυσης ψαριών μπορεί να οδηγήσει στην καθυστέρηση της μετακίνησης των ψαριών αφού τα ψάρια μπερδεύονται και μετακινούνται άτακτα ψάχνοντας την είσοδο. Εάν παραστεί ανάγκη, πρέπει να αντλείται νερό μέσα στο σύστημα ανόδου από τα κατάντη, ενώ πολλές φορές προτιμάται το νερό αυτό να λαμβάνεται από τα ανάντη και με φυσικό τρόπο να φτάνει στη βάση του συστήματος ανόδου. Η βέλτιστη ταχύτητα ροής εξαρτάται από τη θερμοκρασία, δεδομένου ότι για πολύ κρύο ( $T < 8^{\circ}\text{C}$ ) ή πολύ ζεστό ( $T > 22^{\circ}\text{C}$ ) νερό, τα ψάρια τείνουν να μειώνουν την κινητικότητά τους και απαιτείται μειωμένη ταχύτητα.

Η (κατάντη) είσοδος του συστήματος ανόδου προτιμάται να βρίσκεται κοντά στον υπερχειλιστή αφού πολλά ψάρια τείνουν να αναζητούν την είσοδο πηγαίνοντας γύρω γύρω στα τοιχώματα. Σε φράγματα χαμηλού ύψους η είσοδος συνιστάται να βρίσκεται προς την όχθη του σταθμού παραγωγής. Η (ανάντη) έξοδος του συστήματος δεν θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στον υπερχειλιστή καθότι υπάρχει ο κίνδυνος τα ψάρια να ξαναβρεθούν στα κατάντη, καθώς επίσης να μη βρίσκεται κοντά σε περιοχές με κυκλική ανακυκλοφορία νερού καθότι εκεί υπάρχει κίνδυνος παγίδευσης. Τέλος τα συστήματα αυτά θα πρέπει να προστατεύονται από τους ψαράδες είτε καλύπτοντάς τα με μεταλλικό πλέγμα είτε με μεταλλικές πλάκες.

#### 4.11.2 Γέφυρα καθόδου ψαριών

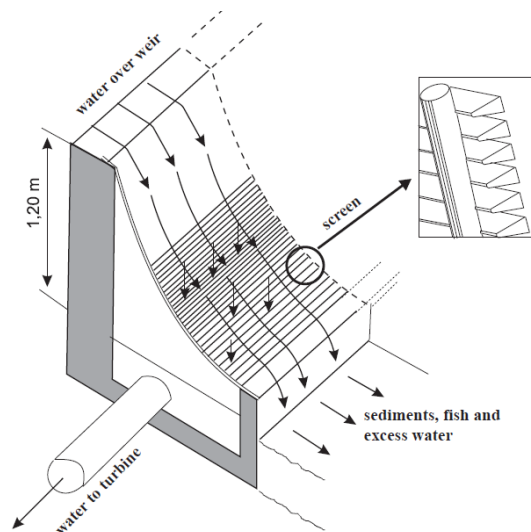
Κατά το παρελθόν η γέφυρα καθόδου ψαριών διερχόταν μέσα από το στρόβιλο. Η θνητότητα των ψαριών που αντιστοιχεί στη μέθοδο αυτή ποικίλει από ποσοστό μικρότερο του 5% έως και μεγαλύτερο του 40% ανάλογα με το σχεδιασμό του στρόβιλου και πιο συγκεκριμένα με την περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα. Χαρακτηριστικά, σε στρόβιλο τύπου Francis, αύξηση της ταχύτητας αυτής από 12[m/s] σε 30[m/s] αυξάνει τη θνησιμότητα των ψαριών από 5% σε 35%. Οι στρόβιλοι τύπου Francis λόγω των χαρακτηριστικών της κατασκευής τους προκαλούν μεγαλύτερη θνησιμότητα στα ψάρια απ' ό,τι οι στρόβιλοι Kaplan. Οι στρόβιλοι τύπου Bulb μειώνουν τη θνησιμότητα σε ποσοστό μικρότερο του 5%.

Σχετικά με την ασφάλεια των ψαριών έχει διαπιστωθεί ότι το ύψος πτώσης δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Ένας στρόβιλος που λειτουργεί με 12[m] ύψος πτώσης έχει ως αποτέλεσμα στη μέθοδο αυτή την ίδια θνησιμότητα ψαριών με έναν στρόβιλο που λειτουργεί στα 120[m]. Αντίθετα, η ανύψωση του δρομέα ως προς το νερό στα κατάντη, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ακόμη και χωρίς να ληφθεί υπόψη η περίπτωση της σπηλαίωσης. Όσο πιο αποδοτική είναι η λειτουργία του στρόβιλου, τόσο πιο μικρή είναι η θνησιμότητα που προκαλείται στα ψάρια. Ένας στρόβιλος που λειτουργεί στην μέγιστη δυναμικότητα προκαλεί μικρότερη θνησιμότητα σε σχέση με ένα που λειτουργεί με μερικό φορτίο. Οι κύριοι λόγοι θνησιμότητας αφορούν τραυματισμούς από σύγκρουση σε στερεά σώματα (βάνες, οδηγό ή πτερύγια στρόβιλων), έκθεση σε υπό-ατμοσφαιρικές πιέσεις και διατμητικά φαινόμενα στην διεπιφάνεια ροών υψηλών ταχυτήτων αντίθετης φοράς.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται για την προστασία των ψαριών μια πρωτοποριακή αυτοκαθαριζόμενη σταθερή εσχάρα, χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικού ρεύματος. Η εσχάρα αξιοποιεί το φαινόμενο Coanda, φαινόμενο που εμφανίζουν τα ρευστά καθώς τείνουν να ακολουθούν την επιφάνεια ενός στερεού που παρεμβάλλεται στη διαδρομή τους. Το νερό ρέει προς το σύστημα

συλλογής του στροβίλου μέσα από τα κενά της εσχάρας τα οποία είναι συνήθως πλάτους 1[mm]. Το 90% των αιωρούμενων στερεών των οποίων η ταχύτητα έχει αυξηθεί στην πλάκα επιτάχυνσης, περνάνε πάνω από την εσχάρα παρέχοντας έτσι μια άριστη προστασία για τον στρόβιλο.

Εμποδίζεται επίσης η είσοδος των ψαριών στο στρόβιλο μέσω των σχισμών. Συγκεκριμένα, η ομαλή επιφάνεια τις εσχάρας από ανοξείδωτο ατσάλι συνδυάζεται με μία παρακαμπτήρια οδό για τα ψάρια. Η εσχάρα αντέχει παροχή 250[L/sm]. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου της εσχάρας είναι ότι απαιτεί 1-1.2[m] πιεζομετρικού φορτίου για να περάσει το νερό πάνω από τον υπερχειλιστή τύπου ogee και μέσα στο σύστημα συλλογής. Αυτό είναι αντιοικονομικό σε συστήματα με μικρό πιεζομετρικό φορτίο. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια διάταξη Coanda.



Σχήμα 4.26: Σύστημα ορεινής υδροληψίας τύπου Coanda (Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004).

Με την ολοκλήρωση της αναφοράς στα έργα πολιτικού μηχανικού υπάρχουν όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες (παροχή σχεδιασμού από Κεφάλαιο 2, ωφέλιμο ύψος πτώσης από το παρόν) ώστε να προχωρήσει ο μελετητής στην επιλογή του μηχανολογικού εξοπλισμού, όπως αυτός αναλύεται στο κεφάλαιο 5.

## 5 Έργα Μηχανολόγου Μηχανικού

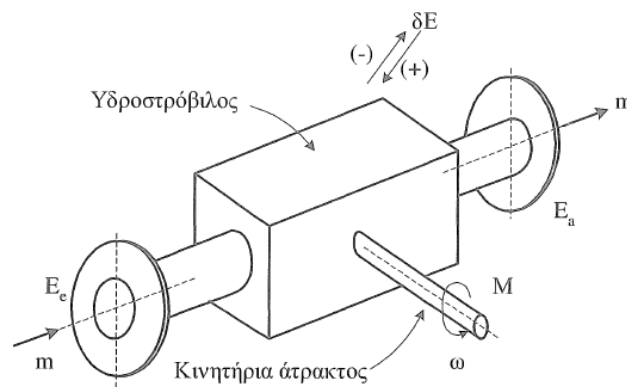
### 5.1 Αρχή Λειτουργίας Υδροστροβίλων

Οι στροβιλομηχανές ορίζονται ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού ή αντίστροφα, μέσω της συνεχούς ροής του ρευστού (είτε είναι ασυμπίεστο, όπως το νερό, ή συμπιεστό, όπως ο ατμός, τα καυσαέρια κλπ.) και της σταθερής περιστροφικής κίνησης μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της μηχανικής ενέργειας, δηλαδή της στρεπτικής ροπής  $M$  που αναπτύσσεται σε άτρακτο στροφόμενη με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$   $\left[\frac{rad}{s}\right]$ . Η μετατροπή αυτή της ενέργειας λαμβάνει χώρα σε ένα στροφόμενο τμήμα της μηχανής το οποίο ονομάζεται πτερωτή (impeller) στην περίπτωση των αντλιών και δρομέας (runner ή rotor) στην περίπτωση των στροβίλων.

Οι στροβιλομηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις εργοστροβιλομηχανές όπου επιτυγχάνεται μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια που μεταφέρεται στο ρευστό (εδώ κατατάσσονται οι αντλίες, οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες, οι στροβιλοσυμπιεστές) και τις κινητήριες στροβιλομηχανές ή στροβίλους όπου αφαιρείται ενέργεια από το διερχόμενο ρευστό η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Στην περίπτωση των εργοστροβιλομηχανών για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  θα πρέπει η κινητήρια ροπή ενός συνδεδεμένου κινητήρα να είναι ίση με τη ροπή αντίστασης της ατράκτου. Στις κινητήριες στροβιλομηχανές, για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα θα πρέπει η άτρακτος να συνδέεται με μηχανή που απορροφά τη μηχανική ενέργεια προβάλλοντας αντίσταση π.χ. με μία ηλεκτρική γεννήτρια, μέσω της οποίας μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

#### 5.1.1 Ενεργειακός Υπολογισμός

Στο σχήμα 5.1 παριστάνεται σχηματικά υδροστρόβιλος 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. Από τη μηχανή εξέρχεται η άτρακτος η οποία συνδέεται με τη μηχανή που απορροφά την ισχύ, δηλαδή την ηλεκτρική γεννήτρια.



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση του στροβίλου (Παπαντώνης, 2009).

Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούνται μηδενικές διαρροές ρευστού προς τον εξωτερικό χώρο, επομένως μεταξύ των διατομών  $e$  και  $a$  ισχύει η αρχή της συνέχειας. Εξετάζεται δε η λειτουργία της μηχανής σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή με σταθερή παροχή ρευστού και με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  της ατράκτου.

Στην άτρακτο που στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  αναπτύσσεται μηχανική ροπή  $M$ . Άρα η πραγματική μηχανική ισχύς στην άτρακτο είναι ίση προς:

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

Η ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού που μπορεί να εναλλαχθεί με μηχανική ενέργεια συμβολίζεται με  $E_{th}$  και όπως προκύπτει από τη Μηχανική των Ρευστών είναι ίση με:

$$E_{th} = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (5.2)$$

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

Συμβολίζοντας με  $E_e$  και  $E_a$  την ομοιόμορφη ανά μονάδα μάζας ενέργεια του ρευστού στις διατομές εισόδου  $e$  και εξόδου  $a$  αντίστοιχα, η ανά μονάδα μάζας μεταβολή της ολικής ενέργειας του ρευστού που δύναται να εναλλαχθεί σε μηχανική ενέργεια είναι ίση προς:

$$E_e - E_a = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \Big|_e - z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \Big|_a \quad (5.3)$$

Άρα η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εναλλάσσεται με μηχανική ενέργεια θα είναι ίση προς:

$$N_{th} = \dot{m}(E_e - E_a) \quad (5.4)$$

και χαρακτηρίζεται ως θεωρητική ισχύς  $N_{th}$ . Η εναλλαγή αυτή επιτυγχάνεται από τον κατάλληλα διαμορφωμένο δρομέα. Στην περίπτωση στροβίλου η πραγματική ισχύς που αναπτύσσεται στην άτρακτο είναι ίση προς  $N$  όπως φαίνεται από την Εξίσωση 5.1, και θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική ισχύ  $N_{th}$  της Εξίσωσης 5.4 κατά τις ενεργειακές απώλειες της ίδιας της μηχανής. Οι ενεργειακές αυτές απώλειες οφείλονται κύρια στις απώλειες λόγω τριβών της ροής διαμέσου της στροβιλομηχανής και στις απώλειες τριβής των εδράνων της ατράκτου.

Έτσι, ορίζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  του στροβίλου ως:

$$\eta = \frac{N}{N_{th}} \quad (5.5)$$

ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της δεσμευόμενης από το ρευστό ενέργειας που πράγματι μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ στην άτρακτο του στροβίλου ως προς τη διατιθέμενη υδραυλική ισχύ. Είναι προφανώς  $0 < \eta < 1$ .

Η διαφορά  $\delta N = N_{th} - N$  εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου απώλεια ενέργειας σε τριβές, στροβιλισμούς κ.λ.π. που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μηχανής. Η ενέργεια αυτή των

απωλειών μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα που προσδίνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο διακινούμενο ρευστό.

Κατά παράδοση στις υδροδυναμικές μηχανές, η ολική ενέργεια και πίεση εκφράζονται μέσω της αντίστοιχης τιμής τους σε μέτρα στήλης ύδατος [mΣΥ], από τη σχέση:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{p}{\gamma} \quad (5.6)$$

Η Εξίσωση 5.3 γράφεται:

$$E_e - E_a = g(H_{t,e} - H_{t,a}) \quad (5.7)$$

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

Στην περίπτωση των υδροστροβίλων ΥΗΕ όπου υπάρχει ροή ασυμπίεστου ρευστού ( $\rho$  σταθερό), η σταθερή παροχή μάζας  $\dot{m}$  μπορεί να αντικατασταθεί από την επίσης σταθερή αντίστοιχη τιμή της παροχής όγκου  $Q$  μέσω της σχέσης:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = g \frac{\dot{m}}{\gamma} \quad (5.8)$$

Η εξίσωση 5.4 εισάγοντας την παροχή όγκου  $Q$  και εκφράζοντας την ολική ενέργεια του υγρού ανά μονάδα μάζας μέσω των αντίστοιχων τιμών του ολικού ύψους  $H$ , διατυπώνεται ως εξής:

$$N_{th} = Q \cdot \rho \cdot g(H_{t,e} - H_{t,a}) = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_{us} \quad (5.9)$$

όπου με  $H_{us}$  συμβολίζεται το ωφέλιμο ολικό ύψος που εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που διατίθεται στον υδροστροβίλο για να τη μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια. Φυσικά λόγω των απωλειών σε τριβές και στροβιλισμούς στο εσωτερικό της μηχανής μέρος του  $H_{us}$  δε μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, αλλά σε θερμότητα που διαφεύγει αναξιοποίητη.

### 5.1.2 Εφαρμογή του Θεωρήματος της Ροπής της Ορμής - Συστροφής.

Το θεώρημα της ροπής της ορμής είναι αντίστοιχο του θεωρήματος της ορμής με τη διαφορά ότι αντί των δυνάμεων και της ορμής του ρευστού γίνεται ισορροπία των ροπών των δυνάμεων και της συστροφής ως προς άξονα. Η σημασία του θεωρήματος της συστροφής είναι ότι από την εφαρμογή του προκύπτει η ροπή που αναπτύσσεται στο εξεταζόμενο σώμα, στην περίπτωση των υδροστροβίλων στην περωτή, χωρίς κατ' ανάγκη να είναι γνωστή η ροή στο εσωτερικό της περωτής σημείο προς σημείο. Από τη διατύπωσή του είναι δυνατό να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τη διαμόρφωση της περωτής, ώστε να αναπτύσσεται η επιθυμητή τιμή της ροπής, να γίνεται δηλαδή η επιθυμητή εναλλαγή ενέργειας. Αντίστροφα, σε μία δεδομένη περωτή είναι δυνατό να υπολογισθεί, σε πρώτη προσέγγιση, η ροπή που αναπτύσσεται για δεδομένες συνθήκες εισόδου.

Ο δρομέας υδροστροβίλου (περωτή) αποτελείται από περύγια, δηλαδή φέρουσες επιφάνειες, και τουλάχιστον από μία πλήμνη (δίσκος στον οποίο είναι πακτωμένα τα περύγια και η άτρακτος).

Κατά τη διέλευση του ρευστού μεταξύ των πτερυγίων αποκαθίσταται στις επιφάνειες των πτερυγίων ένα πεδίο ταχυτήτων και κατά συνέπεια μία κατανομή στατικών πιέσεων. Η κατανομή αυτή αντιστοιχεί στην ανάπτυξη στοιχειωδών δυνάμεων στις επιφάνειες των πτερυγίων, άρα ροπών ως προς τη πλήμνη και την άτρακτο, η ολοκλήρωση των οποίων δίνει την αναπτυσσόμενη ροπή.

Η ροπή διανύσματος  $\vec{a}$  ως προς άξονα που ορίζεται από το μοναδιαίο διάνυσμα  $\vec{\omega}_0$  ορίζεται ως το εξωτερικό γινόμενο:

$$M_a = (\vec{r}_a \times \vec{a}) \cdot \vec{\omega}_0 \quad (5.10)$$

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

$\vec{a}_0$  είναι η προβολή του διανύσματος  $\vec{a}$  σε επίπεδο κάθετο προς τον άξονα  $\omega$  διερχόμενου από το σημείο Ο,

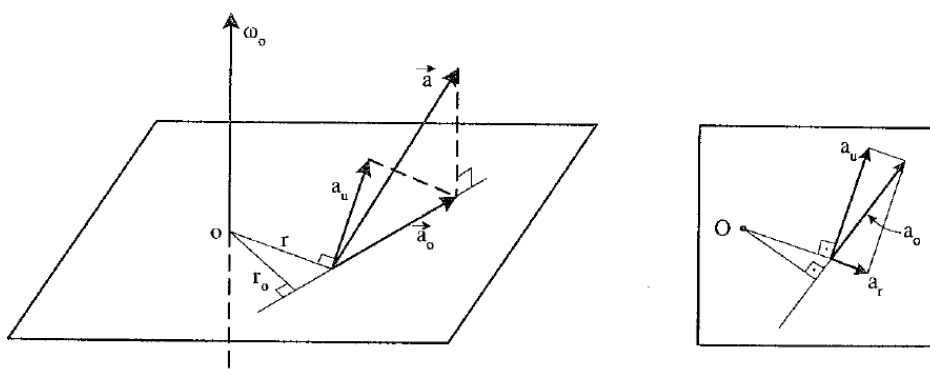
$r_0$  η απόσταση του  $\vec{a}_0$  από τον άξονα,

$r$  η απόσταση του ίχνους του  $\vec{a}$  από τον άξονα και

$a_u$  η περιφερειακή συνιστώσα του  $\vec{a}_0$  και του  $\vec{a}$ ,

τότε η ροπή  $M_a$  εκφράζεται ως:

$$M_a = r_0 \cdot a_0 = r \cdot a_u \quad (5.11)$$



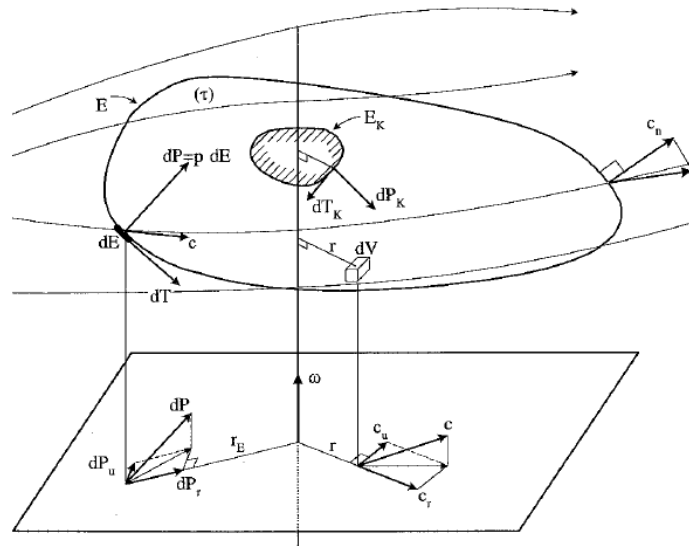
Σχήμα 5.2: Ροπή διανύσματος ως προς άξονα (Παπαντώνης, 2009).

Η Εξίσωση 5.11 εκφράζει το ότι από τις τρεις συνιστώσες του διανύσματος  $\vec{a}$  ως προς πολικό σύστημα συντεταγμένων με κέντρο τον άξονα, δηλαδή την αξονική  $a_z$ , την ακτινική  $a_r$  και την περιφερειακή  $a_u$ , μόνον η τελευταία έχει ροπή ως προς τον άξονα. Η περιφερειακή συνιστώσα  $a_u$  θεωρείται θετική όταν το σύστημα  $(\omega, a_u)$  είναι δεξιόστροφο. Άρα το διάνυσμα της ροπής του  $\vec{a}$  ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  θα εκφράζεται ως:

$$\vec{M}_a = M_a \cdot \vec{\omega}_0 \quad (5.12)$$

δηλαδή είναι συγγραμμικό προς το  $\vec{\omega}_0$ , ομόρροπο ή αντίρροπο προς το  $\vec{\omega}_0$ , οπότε η τιμή του  $M_a$  είναι αντίστοιχα θετική ή αρνητική.

Εξετάζεται η περίπτωση πεδίου ροής το οποίο περιβάλλει εξολοκλήρου στερεό σώμα  $K$  και έστω  $\vec{\omega}_0$  ο άξονας ως προς τον οποίο θα θεωρηθούν οι ροπές των δυνάμεων και της συστροφής. Το στερεό σώμα είναι δυνατό να περιστρέφεται ή όχι περί τον άξονα  $\vec{\omega}_0$ . Έστω κλειστή νοητή επιφάνεια αναφοράς  $E$  που περιβάλλει ολόκληρο το στερεό σώμα  $K$ . Τόσο η επιφάνεια  $E$ , όσο και ο άξονας  $\vec{\omega}_0$  είναι ακίνητα ως προς το σύστημα αναφοράς. Το θεώρημα της συστροφής προκύπτει διατυπώνοντας την ισορροπία των ροπών των δυνάμεων και της ροπής της ορμής ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  και από αυτό υπολογίζεται η ροπή που αναπτύσσεται στο στερεό σώμα  $K$ .



Σχήμα 5.3: Σχηματική διατύπωση του θεωρήματος της ορμής ως προς τον άξονα  $\omega_0$  (Παπαντώνης, 2009).

Το θεώρημα της ροπής της ορμής διατυπώνεται ως εξής, για κάποια χρονική στιγμή  $t$ , θεωρώντας ότι το φαινόμενο μπορεί να είναι χρονικά μη μόνιμο:

$$\Sigma(\vec{r}_{aF} \times \vec{F}) \cdot \vec{\omega}_0 = \frac{d}{dt} \Sigma(\vec{r}_a \times \delta \vec{J}_0) \cdot \vec{\omega}_0 = \frac{d}{dt} (\vec{B}_0 \times \vec{\omega}_0) \quad (5.13)$$

Το άθροισμα  $\Sigma$  νοείται στην επιφάνεια  $E$  και στο εσωτερικό της, ενώ στην Εξίσωση 5.13 συμβολίζονται με  $\delta \vec{J}_0 = \delta m \cdot \vec{v}$  η ορμή στοιχείου του ρευστού μάζας  $\delta m$ ,  $\vec{r}_{aF}$  η διανυσματική ακτίνα κάθε εξωτερικής δύναμης  $\vec{F}$ ,  $\vec{r}_a$  η διανυσματική ακτίνα τυχόντος στοιχείου του ρευστού μάζας  $\delta m$  που περικλείεται από την επιφάνεια  $E$  και  $\vec{B}_0 = \Sigma(\vec{r}_a \times \delta \vec{J}_0)$  η συστροφή ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  της μάζας του ρευστού το οποίο, τη χρονική στιγμή  $t$ , περικλείεται από την επιφάνεια  $E$ .

Χωρίς εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές ή άλλες δυνάμεις το α' μέλος της Εξίσωσης 5.13 θα είναι ίσο προς:

$$\Sigma(\vec{r}_{aF} \times \vec{F}) \cdot \vec{\omega}_0 = M_P + M_T + M_G - M_K \quad (5.14)$$

στην οποία συμβολίζονται με  $M_P$  η ροπή ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  των εξωτερικών δυνάμεων  $d\vec{P}$  λόγω στατικής πίεσης που αναπτύσσονται στην εξωτερική επιφάνεια  $E$ ,  $M_T$  η ροπή ως προς τον

άξονα  $\vec{\omega}_0$  των εξωτερικών δυνάμεων  $d\vec{T}$  λόγω συνεκτικότητας που αναπτύσσονται στην εξωτερική επιφάνεια  $E$ ,  $M_G$  η ροπή ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  των εξωτερικών δυνάμεων λόγω βαρύτητας επί του ρευστού που περιβάλλεται από την επιφάνεια  $E$ , δηλαδή στον όγκο του ρευστού και  $-M_K$  η ροπή που αναπτύσσεται στο ρευστό λόγω της παρουσίας του σώματος  $K$ .

Το β' μέλος της Εξίσωσης 5.13 που εκφράζει τη χρονική μεταβολή της συστροφής του ρευστού κατά τη χρονική στιγμή  $t$  εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{d}{dt}(\vec{B}_0 \times \vec{\omega}_0) = \frac{dB_u}{dt} + M_S \quad (5.15)$$

στην οποία με  $B_u$  συμβολίζεται η συστροφή του ρευστού ως προς τον άξονα  $\vec{\omega}_0$  που κατά τη χρονική στιγμή  $t$  ευρίσκεται στο εσωτερικό του εξεταζόμενου όγκου αναφοράς και με  $M_S$  ο ρυθμός μεταβολής της συστροφής του εισερχόμενου και εξερχόμενου ρευστού από την επιφάνεια αναφοράς  $E$  κατά τη χρονική στιγμή  $t$ .

Αρα η εξίσωση 5.13 που εκφράζει το θεώρημα της συστροφής επαναδιατυπώνεται ως εξής:

$$M_P + M_T + M_G - M_K = \frac{dB_u}{dt} + M_S \quad (5.16)$$

Η Εξίσωση 5.16 εάν εφαρμοσθεί στην περίπτωση περρωτής στροβιλομηχανής, η οποία ως περιστρεφόμενο σώμα πρέπει να είναι αξονοσυμμετρικό και να παρουσιάζει περιοδική συμμετρία ως προς άξονα περιστροφής του. Έτσι στην πρακτική περίπτωση λόγω της αξονικής συμμετρίας  $M_P=0$ , λόγω της περιοδικής συμμετρίας  $M_G=0$  και λόγω των μόνιμων συνθηκών ροής  $\frac{dB_u}{dt} = 0$ , οπότε η Εξίσωση 5.16 γράφεται:

$$M_T - M_K = M_S \quad (5.17)$$

Με εφαρμογή του θεωρήματος της συστροφής υπολογίζεται η περιφερειακή ροπή  $M_u$  που αναπτύσσεται στην περρωτή ως προς τον άξονα περιστροφής και συμμετρίας του και η οποία εκφράζεται ως:

$$M_u = \int_{E_1} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E dE - \int_{E_2} \rho \cdot c_u \cdot c_n \cdot r_E dE \quad (5.18)$$

στην οποία με  $E_1$  και  $E_2$  συμβολίζεται η διατομή εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του υγρού από τον δρομέα, με  $c_u$  και  $c_n$  η περιφερειακή και ορθή αντίστοιχα συνιστώσα της ταχύτητας του υγρού και με  $r$  η ακτίνα του εξεταζόμενου σημείου από τον άξονα περιστροφής.

Η ισχύς που αναπτύσσεται στην άτρακτο και εκφράζει το ρυθμό μετατροπής της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια ή αντίστροφα καλείται περιφερειακή ισχύς του δρομέα και είναι ίση προς:

$$N_u = M_u \cdot \omega \quad (5.19)$$



### 5.1.3 Συνιστώσες της ταχύτητας – Τρίγωνο ταχυτήτων

Λόγω της αξονοσυμμετρικής διαμόρφωσης και συνθηκών λειτουργίας στην περωτή των στροβιλομηχανών, χρησιμοποιείται πολικό σύστημα συντεταγμένων περί τον άξονα περιστροφής (και συμμετρίας) τόσο για την περιγραφή της γεωμετρίας όσο και για την ανάλυση των ταχυτήτων. Έτσι το διάνυσμα της ταχύτητας  $\vec{c}$  σε ένα σημείο του πεδίου αναλύεται στις ακόλουθες συνιστώσες: την ακτινική  $c_r$ , την αξονική  $c_z$  και την περιφερειακή  $c_u$ , με τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα ( $\vec{i}_r, \vec{i}_z, \vec{i}_u$ ). Είναι δηλαδή:

$$\vec{c} = c_r \cdot \vec{i}_r + c_z \cdot \vec{i}_z + c_u \cdot \vec{i}_u \quad (5.20)$$

Για την ανάλυση της ροής στο στρεφόμενο δρομέα εισάγεται η σχετική ταχύτητα  $\vec{w}$ , δηλαδή η ταχύτητα της ροής που θα μέτραγε ένα μετρητικό όργανο που στρέφεται μαζί με το δρομέα. Στην περίπτωση δρομέα στρεφόμενου με γωνιακή ταχύτητα  $\vec{\omega}$ , η ταχύτητα του στρεφόμενου συστήματος ως προς το απόλυτο στην εξεταζόμενη θέση με ακτίνα  $\vec{r}$  είναι ίση προς:

$$\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (5.21)$$

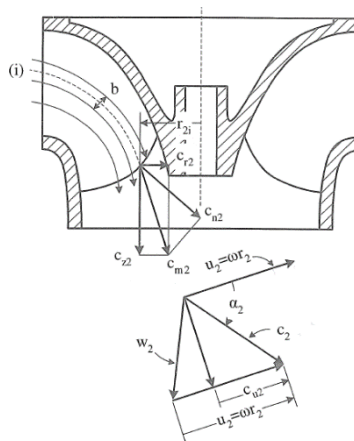
Εάν θέση αυτή η ταχύτητα του στοιχείου του υγρού ως προς το απόλυτο σύστημα είναι ίση με  $\vec{c}$ , η αντίστοιχη σχετική ταχύτητα  $\vec{w}$  προκύπτει από την ακόλουθη διανυσματική εξίσωση:

$$\vec{w} = \vec{c} - \vec{u} \quad (5.22)$$

Τρίγωνο ταχυτήτων σε μία θέση ονομάζεται το διανυσματικό τρίγωνο του οποίου οι τρεις πλευρές είναι οι  $\vec{c}$ ,  $\vec{u}$  και  $\vec{w}$ , μέσω του οποίου εκφράζεται η διανυσματική Εξίσωση 5.22.

### 5.1.4 Εφαρμογή του Θεωρήματος της Ροπής της Ορμής σε μερικό Δρομέα

Ως μερική εννοείται μία περωτή της οποίας το πλάτος  $b$  είναι μικρό σε σύγκριση με την ακτίνα  $r$ , έτσι ώστε να είναι απόλυτα αποδεκτή η υπόθεση ότι κατά το πλάτος  $b$  οι συνθήκες της ροής δεν μεταβάλλονται. Το ίδιο θα συμβαίνει και στις διατομές εισόδου  $E_1$  και εξόδου  $E_2$  κάθε μερικής περωτής.



Σχήμα 5.4: Μερικός δρομέας στροβίλου και συνιστώσες ταχυτήτων (Παπαντώνης, 2008).

Η θεωρητική ροπή που αναπτύσσεται στο δρομέα δίνεται από την Εξίσωση 5.18. Λαμβάνοντας υπόψη την ομοιομορφία των συνθηκών της ροής στις επιφάνειες  $E_1$  και  $E_2$  η Εξίσωση 5.18 γράφεται:

$$M_u = \rho_1 \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_{E1} \cdot E_1 - \rho_2 \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_{E2} \cdot E_2 \quad (5.23)$$

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

$$\dot{m}_u = \rho_1 \cdot c_{n1} \cdot E_1 = \rho_2 \cdot c_{n2} \cdot E_2 \quad (5.24)$$

οπότε η Εξίσωση 5.23 γράφεται:

$$M_u = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_{E1} - c_{u2} \cdot r_{E2}) \quad (5.25)$$

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

$$N_u = M_u \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_{E1} - c_{u2} \cdot r_{E2}) \cdot \omega = \dot{m}_u (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad (5.26)$$

Στα ΥΗΕ όπου υπάρχει ροή νερού το οποίο θεωρείται πρακτικά ασυμπίεστο  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , η παροχή μάζας  $\dot{m}_u$  εκφράζεται μέσω της αντίστοιχης παροχής όγκου  $Q_u = \frac{\dot{m}_u}{\rho}$ . Η περιφερειακή ισχύς  $N_u$  είναι δυνατό να εκφρασθεί με μορφή αντίστοιχη της Εξίσωσης 5.7, δηλαδή ως γινόμενο του ειδικού βάρους  $\gamma$ , της διερχόμενης παροχής όγκου  $Q_u$  και του θεωρητικού ύψους του δρομέα  $H_u$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_u = \gamma \cdot Q_u \cdot H_u \quad (5.27)$$

Το θεωρητικό ύψος  $H_u$  ορίζεται μέσω της εξίσωσης 5.27 και άρα εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του υγρού εκφρασμένη σε [mΣΥ] που εναλλάσσεται στο δρομέα με τη μηχανική ροπή  $M_u$ . Το θεωρητικό ύψος  $H_u$  συνδέεται με μεταβολή της ολικής ενέργειας μεταξύ εισόδου και εξόδου από το δρομέα μέσω της εξίσωσης:

$$H_u = H_{u,1} - H_{u,2} - \delta h_{f,u} \quad (5.28)$$

στην οποία με  $\delta h_{f,u}$  συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες λόγω τριβής από τη διατομή εισόδου 1 μέχρι τη διατομή εξόδου 2 του δρομέα. Η εξίσωση 5.28 εκφράζει το ότι η διαφορά ( $H_{u,1} - H_{u,2}$ ) δεν μετατρέπεται ολόκληρη σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε  $H_u$ , λόγω του ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί στις υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{f,u}$  μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία, στην περίπτωση του ασυμπίεστου ρευστού, δεν μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια.

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις 5.26 και 5.27 και επιλύοντας ως προς  $H_u$  προκύπτει:

$$H_u = \frac{1}{g} (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) \quad (5.29)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται εξίσωση Euler προς τιμή του L. Euler που πρώτος τη διατύπωσε το 1754 και αποτελεί τη θεμελιώδη εξίσωση των στροβιλομηχανών.

Λαμβάνοντας υπόψη τις κλίσεις  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  των απόλυτων ταχυτήτων  $c_{u1}$  και  $c_{u2}$  αντίστοιχα, από την εφαρμογή του νόμου των συνημιτόνων στα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και έξοδο του δρομέα, το ύψος  $H_u$  όπως εκφράζεται από την Εξίσωση 5.29 διατυπώνεται και ως εξής:

$$H_u = \frac{u_1 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1 - u_2 \cdot c_{u2} \cdot \cos \alpha_2}{g} \quad (5.30)$$

$$H_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} - \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

Από τις εξισώσεις 5.29 και 5.30 γίνεται φανερός ο ρόλος των ταχυτήτων στην ανάπτυξη της ροπής και ιδιαίτερα στη διατομή εξόδου όπου το μέγεθος και η κλίση των ταχυτήτων διαμορφώνονται από τον ίδιο το δρομέα. Άρα γίνεται φανερός ο ρόλος της μορφής του δρομέα και των πτερυγίων του στο ρυθμό εναλλαγής της ενέργειας.

### 5.1.5 Περιπτώσεις άεργης ισχύος

Ως άεργη χαρακτηρίζεται η ροή κατά την οποία δεν λαμβάνει χώρα μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας του υγρού σε μηχανική, είναι δηλαδή  $N=0$ . Όπως έχει αναφερθεί (Εξίσωση 5.1), η ισχύς είναι το γινόμενο της ροπής επί την γωνιακή ταχύτητα. Ως εκ τούτου, διακρίνονται δύο περιπτώσεις άεργης ροής. Στην πρώτη περίπτωση είναι  $M=0$ , ενώ στην δεύτερη είναι  $\omega=0$ .

Στην περίπτωση που αναπτύσσεται ροπή σε μη στρεφόμενο σώμα ( $\omega=0$ ) δεν λαμβάνει χώρα μετατροπή της ενέργειας του υγρού σε μηχανική, αλλά απλώς μετατροπή της ενέργειας του υγρού από μία μορφή σε μία άλλη υπό σταθερή ολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (θεωρώντας τις απώλειες ενέργειας ως αμελητέες).

#### 5.1.5.1 Διατήρηση της συστροφής

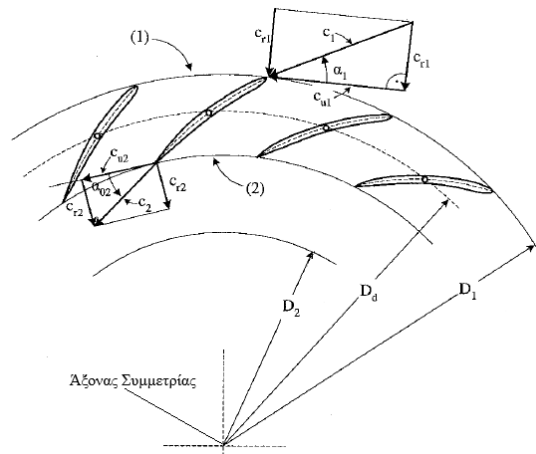
Εάν σε αξονοσυμμετρικό χώρο δεν παρεμβάλλεται στερεό σώμα, η αναπτυσσόμενη ροπή θα είναι μηδενική, τουλάχιστον σε ζώνη πλάτους  $b$  εκτός των οριακών στρωμάτων που διαμορφώνονται στα στερεά τοιχώματα. Έτσι από την εξίσωση 5.25 (εφόσον στη ζώνη αυτή ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην περίπτωση του μερικού δρομέα) προκύπτει:

$$M_u = 0 \Rightarrow \dot{m}_u (c_{u1} \cdot r_{E1} - c_{u2} \cdot r_{E2}) = 0 \Rightarrow c_{u1} \cdot r_{E1} = c_{u2} \cdot r_{E2} \quad (5.31)$$

Η Εξίσωση 5.31 εκφράζει την αρχή διατήρησης της συστροφής για την περίπτωση αξονοσυμμετρικού χωρίου μακριά από το στερεό όριο.

#### 5.1.5.2 Άεργη μεταβολή της συστροφής.

Εάν στον παραπάνω αξονοσυμμετρικό χώρο παρεμβληθεί ακίνητη ( $\omega=0$ ) κυκλικά διατεταγμένη πτερωτή, μέσω αυτής είναι δυνατή η άεργη μεταβολή της συστροφής του ρευστού. Στο σχήμα 5.5 ο αξονοσυμμετρικός χώρος περιορίζεται μεταξύ δύο επιπέδων, κάθετων προς τον άξονα συμμετρίας, η απόσταση των οποίων συμβολίζεται με  $b$ . Τα πτερύγια της ακίνητης στεφάνης έχουν γενέτετρα παράλληλα προς τον άξονα συμμετρίας.



Σχήμα 5.5: Διάταξη ακίνητης ακτινικής περωτής (Παπαντώνης, 2009).

Η ανάλυση θα γίνει στη διάταξη αυτή, επειδή είναι εύκολη η παράσταση των διαφόρων μεγεθών (ροή δισδιάστατη μακριά από τα οριακά στρώματα των δύο επιπέδων, ενώ παράλληλα η διάταξη αυτή συναντάται στην πράξη πολύ συχνά. Για τον ίδιο λόγο το ρευστό θεωρείται ως ασυμπίεστο.

Η εφαρμογή του θεωρήματος της συστροφής γίνεται ορίζοντας τους κυλίνδρους κυκλικής διατομής  $E_1$  και  $E_2$  ανάντη και κατόντη της στεφάνης ως διατομές εισόδου και εξόδου στις ακτίνες  $r_1$  και  $r_2$  αντίστοιχα. Λόγω της μορφής των διατομών εισόδου και εξόδου  $E_1$  και  $E_2$  σε αυτές θα ισχύει:  $c_n = c_r$ , οπότε συμβολίζοντας με  $Q$  τη συνολική παροχή όγκου, από την αρχή της συνέχειας προκύπτει:

$$Q = 2\pi \cdot r_1 \cdot b \cdot c_{r1} = 2\pi \cdot r_2 \cdot b \cdot c_{r2} \quad (5.32)$$

Έστω  $c_{u1}$  η περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας στη διατομή εισόδου  $E_1$  αρκετά ανάντη της στεφάνης, προφανώς ανεξάρτητη της στεφάνης, αφού η ροή διευθύνεται προς τη στεφάνη. Εάν  $\alpha_2$  είναι η κλίση των πτερυγίων στην ακμή εκφυγής τους και υποθεθεί ότι τα πτερύγια είναι αρκετά πυκνά (μικρός λόγος βήματος προς χορδή της πτερύγωσης) είναι εύλογη η παραδοχή ότι στην ακμή εκφυγής τους η κλίση της ταχύτητας θα είναι ίση προς  $\alpha_2$ . Επομένως ισχύει:

$$\tan \alpha_2 = \frac{c_{r2}}{c_{u2}} \Rightarrow c_{u2} = \frac{c_{r2}}{\tan \alpha_2} \quad (5.33)$$

Επομένως για σταθερή παροχή  $Q$ , δηλαδή για σταθερή τη  $c_{r2}$ , η περιφερειακή συνιστώσα  $c_{u2}$  της ροής στη διατομή εξόδου εξαρτάται (σε πρώτη προσέγγιση) αποκλειστικά από την κλίση των πτερυγίων της στεφάνης. Άρα η στεφάνη προκαλεί μεταβολή της συστροφής από  $M_{S1} = \rho \cdot c_{u1} \cdot c_{n1} \cdot r_{E1} \cdot E_1$  στη διατομή εισόδου σε  $M_{S2} = \rho \cdot c_{u2} \cdot c_{n2} \cdot r_{E2} \cdot E_2$  στη διατομή εξόδου.

Σύμφωνα τώρα με το θεώρημα της συστροφής (Εξίσωση 5.23) στη στεφάνη των πτερυγίων αναπτύσσεται ροπή  $M_u$  ίση προς:

$$M_u = M_{S1} - M_{S2} \quad (5.34)$$

που οφείλεται στη μεταβολή της συστροφής του ρευστού διαμέσου της στεφάνης των πτερυγίων. Η ροπή αυτή δεν αντιστοιχεί σε μηχανικό έργο επειδή η στεφάνη είναι ακίνητη ( $\omega=0$ ) και άρα η ανά μονάδα μάζας ολική ενέργεια του ρευστού, θεωρώντας τις απώλειες τριβής ως μηδενικές, στη διατομή εξόδου  $E_2$  θα είναι ίση προς αυτήν στη διατομή εισόδου  $E_1$ :

$$H_{t1} = H_{t2} \Rightarrow \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (5.35)$$

Η ροπή  $M_u$  που αναπτύσσεται στην στεφάνη παραλαμβάνεται από την έδραση της κατασκευής. Η ακίνητη (μη περιστρεφόμενη) στεφάνη των πτερυγίων καλείται στεφάνη οδηγητικών πτερυγίων στην περίπτωση όπου τα πτερύγια έχουν σταθερή κλίση και στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων στην περίπτωση όπου τα πτερύγια έχουν δυνατότητα περιστροφής περί τον άξονα ώστε να μεταβάλλεται η κλίση  $\alpha_2$  και άρα και η συστροφή του ρευστού. Στη περίπτωση στεφάνης ρυθμιστικών πτερυγίων όλα τα πτερύγια περιστρέφονται ταυτόχρονα και ομοιόμορφα.

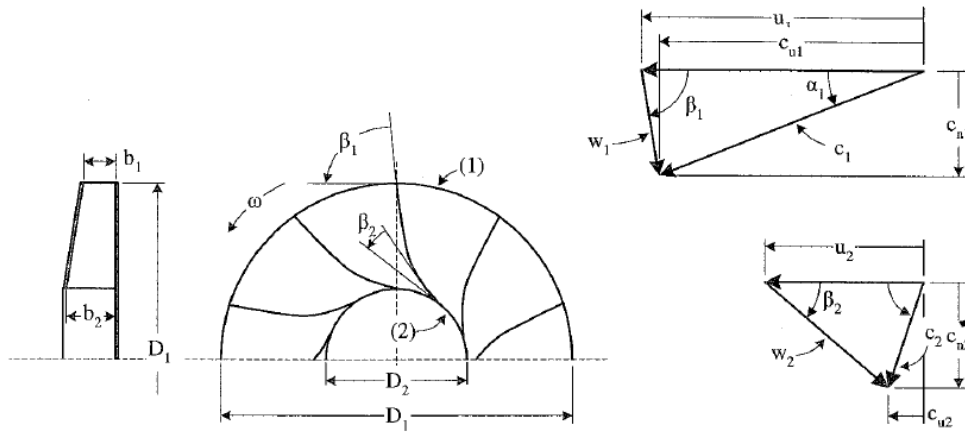
Κατάντη της διατομής εξόδου  $E_2$  όπου πλέον στη ροή δεν παρεμβάλλεται οποιαδήποτε διάταξη που θα μπορούσε να μεταβάλλει τη συστροφή του ρευστού, ισχύει η διατήρηση της συστροφής.

Στις στροβιλομηχανές αξονικής ροής η στεφάνη των οδηγητικών ή ρυθμιστικών πτερυγίων τοποθετείται είτε κατά την ακτινική διεύθυνση, είτε σε κωνική διαμόρφωση και σκοπό έχει τη μεταβολή της συστροφής του ρευστού, πρόσδοση ή αφαίρεση συστροφής όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

Το βασικό πλεονέκτημα της στεφάνης οδηγητικών πτερυγίων κατά την ακτινική διεύθυνση είναι ότι η ροή είναι ουσιαστικά δισδιάστατη, δηλαδή με πτερύγια κυλινδρικής μορφής (παράλληλες γενέτειρες), οπότε μεταβάλλεται ομοιόμορφα η συστροφή της διερχόμενης παροχής. Για το λόγο αυτό στους υδροστρόβιλους αξονικής ροής τύπου Kaplan η στεφάνη των οδηγητικών και ρυθμιστικών πτερυγίων είναι καθαρά ακτινικής ροής. Αντίθετα σε μία στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων αξονικής ή κωνικής μορφής η μεταβολή της συστροφής μεταξύ εισόδου και εξόδου δεν είναι η ίδια κατά το πλάτος των πτερυγίων, εκτός ενδεχόμενα από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας. Επιπλέον τα πτερύγια δεν έχουν παράλληλες γενέτειρες και άρα είναι δυσκολότερη η κατασκευή τους.

#### 5.1.6 Διερεύνηση θεμελιώδους εξίσωσης στροβιλομηχανών

Πραγματοποιείται μία αρχική συσχέτιση της γεωμετρίας των πτερυγίων της περωτής με την ενέργεια που εναλλάσσεται μέσω αυτής. Η αρχική αυτή διερεύνηση θα γίνει σε περωτή πλήρως ακτινικής ροής, καθώς στην περίπτωση αυτή είναι εύκολη η παράσταση των διαφόρων μεγεθών και των ταχυτήτων τόσο στην όψη, όσο και στη μεσημβρινή προβολή, χωρίς όμως να περιορίζεται η γενικότητα των παρατηρήσεων και των συμπερασμάτων. Επίσης λόγω του μικρού πλάτους  $b$  της περωτής σε σύγκριση με τις διαμέτρους ολόκληρη η περωτή θεωρείται ως μία μερική περωτή.



Σχήμα 5.6: Δρομέας και Τρίγωνα Ταχυτήτων Στροβίλου Ακτινικής Ροής (Παπαντώνης, 2009).

Έστω δρομέας στροβίλου ακτινικής ροής που στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που μετατρέπεται στο δρομέα από ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια δίνεται από την Εξίσωση Euler 5.29. Εάν οι απώλειες της ροής στο εσωτερικό του δρομέα θεωρηθούν ως αμελητέες ( $\delta h_{f12} = 0$ ), τότε η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$H_u = \frac{1}{g} (c_{u1} \cdot u_1 - c_{u2} \cdot u_2) = H_{t1} - H_{t2} \quad (5.36)$$

Από την Εξίσωση 5.36 προκύπτει ότι η μετατροπή ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια είναι τόσο επιτυχής, όσο πιο μικρή είναι η ολική ενέργεια  $H_{t2}$  με την οποία εξέρχεται το ρευστό από το δρομέα. Ένας όρος της  $H_{t2}$  είναι η κινητική ενέργεια  $\frac{c_2^2}{2g}$  του ρευστού η οποία, δεδομένου ότι για δρομέα ακτινικής ροής ισχύει  $c_z \approx 0$ , είναι ίση προς:

$$\frac{c_2^2}{2g} = \frac{c_{r2}^2 + c_{u2}^2}{2g} \quad (5.37)$$

Από τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας η ακτινική  $c_r$  συνδέεται με την αρχή της συνέχειας, ώστε να εξασφαλίζεται η διερχόμενη παροχή ενώ η  $c_{u2}$  αυξάνει τις απώλειες της ροής κατάντη του δρομέα και αποτελεί μία μορφή ενέργειας που διαφεύγει ανεκμετάλλευτη. Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται, τουλάχιστον στο κανονικό σημείο λειτουργίας, το ρευστό να εξέρχεται από το δρομέα χωρίς συστροφή, δηλαδή με  $c_{u2}=0$ , οπότε η Εξίσωση 5.36 γράφεται:

$$H_{u,d} = \frac{1}{g} c_{u1} \cdot u_1 \quad (5.38)$$

στην οποία ο δείκτης  $d$  χαρακτηρίζει το κανονικό σημείο λειτουργίας (design point).

Η συνθήκη  $c_{u2}=0$  είναι δυνατό να επιτευχθεί σε ένα μόνο σημείο λειτουργίας (ενώ στα υπόλοιπα θα είναι  $c_{u2} \neq 0$ ).

Σύμφωνα με την Εξίσωση 5.38 η επιθυμητή τιμή της ανά μονάδα μάζας ενέργειας του υγρού που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή δεδομένη τιμή του  $H_u$  μπορεί να επιτευχθεί είτε με μεγάλη τιμή της  $u_1 = \omega \cdot \frac{D_1}{2}$  και μικρή τιμή της  $c_{u1}$ , είτε αντίστροφα με μικρή  $u_1$  και μεγάλη  $c_{u1}$ .

Η πρώτη λύση είναι προτιμότερη, γιατί αντιστοιχεί σε μικρές τιμές της απόλυτης ταχύτητας  $c_{11}$ , άρα μικρότερες τιμές της ταχύτητας διαμέσου του δρομέα και άρα μικρότερες απώλειες της ροής  $dh_{f12}$ . Για το λόγο αυτό, στους σύγχρονους δρομείς υδροστροβίλων η διατομή εισόδου στο δρομέα είναι η εξωτερική (μεγάλη διάμετρος), οπότε η ροή διευθύνεται από την περιφέρεια προς τον άξονα περιστροφής.

Ανακεφαλαιώνοντας η τεχνικοοικονομικά αποδεκτή λύση για σχεδίαση υδροστροβίλου πρέπει να βασίζεται στην ακόλουθη αρχή: το υγρό προσάγεται στο δρομέα με συστροφή, δηλαδή με περιφερειακή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας, την  $c_{u1}$ , την οποία θα πρέπει να τη δώσει στη στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων. Ο δρομέας αφαιρεί τη συστροφή του υγρού, το οποίο στο κανονικό σημείο λειτουργίας, εξέρχεται χωρίς συστροφή, δηλαδή με  $c_{u2}=0$ . Σύμφωνα με το θεώρημα της συστροφής στο στρεφόμενο δρομέα αναπτύσσεται ροπή  $M_u$  και μηχανική ισχύς  $N_u$  δηλαδή επιτυγχάνεται μετατροπή της ενέργειας του υγρού σε μηχανική ενέργεια. Στη στεφάνη ρυθμιστικών πτερυγίων που βρίσκεται ανάντη του δρομέα αναπτύσσεται επίσης ροπή, ίση προς  $-M_u$  όμως πρόκειται για άεργη ροή δεδομένου ότι η στεφάνη των πτερυγίων είναι ακίνητη. Η ροπή  $-M_u$  στη στεφάνη μεταφέρεται και παραλαμβάνεται από την έδραση της μηχανής.

Σε δεδομένο δρομέα και σημείο λειτουργίας, δηλαδή με δεδομένα  $Q_u$ ,  $H_u$  και  $\omega$  είναι δυνατή η χάραξη των τριγώνων ταχυτήτων. Για το τρίγωνο εισόδου είναι γνωστή η  $u_1$ , η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας  $c_{r1} = \frac{Q_u}{\pi \cdot b_1 \cdot D_1}$ , η περιφερειακή συνιστώσα της  $\vec{c}_1$  δηλαδή η  $c_{u1}$  (προκύπτει από την Εξίσωση 5.38) επομένως είναι γνωστή η  $\vec{c}_1$  ως υποτείνουσα των  $c_{r1}$  και  $c_{u1}$ . Από την εφαρμογή της Εξίσωσης 5.22 προκύπτει η σχετική ταχύτητα  $\vec{w}_1$  στη διατομή εισόδου, η κλίση της οποίας είναι  $\beta_1$ . Άρα ως προς το στρεφόμενο δρομέα το υγρό εισέρχεται σε αυτόν με την ταχύτητα  $w_1$  υπό κλίση  $\beta_1$ . Με σκοπό την είσοδο του υγρού στο δρομέα χωρίς πρόσθετες απώλειες κρούσεως θα πρέπει η κλίση των πτερυγίων του δρομέα στη διατομή εισόδου να είναι ίση προς  $\beta_1$ .

Για το τρίγωνο εξόδου είναι γνωστά τα ακόλουθα μεγέθη: η περιφερειακή ταχύτητα  $u_2$ , η ακτινική συνιστώσα  $c_{r2} = \frac{Q_u}{\pi \cdot b_2 \cdot D_2}$ , ενώ για μηδενική περιφερειακή συνιστώσα  $c_{u2}$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας, θα είναι  $c_2=c_{r2}$ , δηλαδή το τρίγωνο εξόδου είναι ορθογώνιο. Από την Εξίσωση 5.22 προκύπτει η αντίστοιχη σχετική ταχύτητα εξόδου  $\vec{w}_2$  της οποίας η κλίση είναι η  $\beta_2$ . Θεωρώντας ότι, σε πρώτη προσέγγιση, το υγρό εξέρχεται από το δρομέα εφαπτόμενα προς τα πτερύγια θα πρέπει η κλίση των πτερυγίων στη διατομή εξόδου να είναι  $\beta_2$ .

Σύμφωνα με τα προηγούμενα είναι δυνατή μία αρχική χάραξη των πτερυγίων του δρομέα του υδροστροβίλου και έτσι γίνεται φανερή η συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ της γεωμετρίας του δρομέα και του σημείου λειτουργίας.

Από την Εξίσωση 5.38 στο κανονικό σημείο λειτουργίας του υδροστροβίλου γίνεται φανερός ο ρόλος της περιφερειακής ταχύτητας  $u$  στην εξωτερική περίμετρο της πτερωτής διαμέτρου  $D$ :  $u = \omega \frac{D}{2}$  όπου  $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$ , με  $\omega \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$  και  $n$  [RPM] (Rotations Per Minute).

Είναι προφανές ότι η εξωτερική διάμετρος  $D$  της πτερωτής είναι ενδεικτική του μεγέθους και άρα του κόστους της μηχανής. Άρα η ίδια ενεργειακή μεταβολή είναι δυνατό να επιτευχθεί είτε επιλέγοντας μεγάλη τιμή της ταχύτητας περιστροφής  $n$  [RPM], οπότε η διάμετρος της πτερωτής  $D$  θα είναι μικρή και άρα η μηχανή είναι μικρότερη σε μέγεθος και σε κόστος ή το αντίστροφο. Η

επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού ταχύτητας περιστροφής και διαμέτρου της περωτής επηρεάζει επίσης τη μορφή της περωτής, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι αποτέλεσμα οικονομοτεχνικής επιλογής.

### 5.1.7 Διαμόρφωση υδροστροβίλων

Εφαρμόζοντας τις προηγούμενες αρχές γίνεται σχεδόν αυτονόητη η διαμόρφωση των σύγχρονων υδροστροβίλων οι οποίοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους υδροστροβίλους ολικής προσβολής και τους υδροστροβίλους μερικής προσβολής. Στους πρώτους η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική και για το λόγο αυτό το τμήμα εισόδου πρέπει να περιβάλλει το δρομέα εξασφαλίζοντας αξονοσυμμετρικές συνθήκες της ροής στη διατομή εισόδου του δρομέα. Αντίθετα στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο ένα τμήμα του δρομέα τροφοδοτείται και συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας.

Οι υδροστροβίλοι ολικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως υδροστροβίλοι αντιδράσεως καθώς η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού. Οι υδροστροβίλοι μερικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως υδροστροβίλοι δράσεως δεδομένου ότι ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο ομοιόμορφης στατικής πίεσης οπότε ο βαθμός αντιδράσεως είναι μηδενικός.

Στους υδροστροβίλους αντιδράσεως κατατάσσονται οι υδροστροβίλοι ακτινικής και μικτής ροής τύπου Francis και οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής όπως οι τύπου Kaplan ή άλλες παραλλαγές, όπως σωληνωτός, βολβοειδής κλπ. Χαρακτηριστικοί τύποι υδροστροβίλων δράσεως είναι ο υδροστροβίλος τύπου Pelton και ο υδροστροβίλος τύπου Turgo.

## 5.2 Καμπύλες λειτουργίας και βαθμοί απόδοσης υδροστροβίλων

### 5.2.1 Θεωρητική χαρακτηριστική

Θεωρητική χαρακτηριστική υδροστροβίλου ονομάζεται η καμπύλη μεταβολής του θεωρητικού ύψους  $H_u$  όπως δίνεται από την Εξίσωση 5.36, συναρτήσει της διακινούμενης παροχής  $Q$  και με παράμετρο το άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών περυγίων. Για σταθερό άνοιγμα των ρυθμιστικών περυγίων η κλίση  $a_1$  της ταχύτητας  $c_1$  στη διατομή εισόδου του δρομέα είναι σταθερή, οπότε από τα τρίγωνα ταχυτήτων η Εξίσωση 5.36 παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$H_u = Q \left( \frac{C}{t \cdot g \cdot a_1} + B \right) - \frac{u_2^2}{g} \quad (5.39)$$

στην οποία τα  $B$  και  $C$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη γεωμετρία του δρομέα, ενώ με  $u_2 = \omega \frac{D_2}{2}$  συμβολίζεται η περιφερειακή ταχύτητα στη διατομή εξόδου του υδροστροβίλου. Σύμφωνα με την Εξίσωση 5.39 οι θεωρητικές χαρακτηριστικές του υδροστροβίλου είναι ευθείες γραμμές



με κοινό σημείο εκκίνησης το σημείο:  $(Q=0, H_u = -\frac{u_2^2}{g})$ . Επίσης, όσο αυξάνεται το άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων, αυξάνεται και η κλίση  $\alpha_1$ , οπότε η θεωρητική χαρακτηριστική έχει μικρότερη κλίση, δηλαδή για την ίδια τιμή του  $H_u$ , όσο αυξάνεται το άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων αυξάνεται και η διακινούμενη παροχή.

Για κάθε τιμή  $A$  του ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων η  $H_u = f(Q)$  τέμνει τον άξονα  $H_u=0$  στο σημείο  $M$ , το οποίο αντιστοιχεί σε παροχή  $Q_M$ . Για  $Q < Q_M$  είναι  $H_u < 0$ , δηλαδή ο δρομέας δεν λειτουργεί ως δρομέας στροβίλου μετατρέποντας την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική, αλλά αντίθετα, για τη διατήρηση της (θετικής) παροχής απαιτείται η πρόσδοση ενέργειας στο υγρό (για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα), λειτουργία που αντιστοιχεί σε αυτή της ρυθμιζόμενης αντίστασης.

### 5.2.2 Απώλειες και βαθμοί απόδοσης

Η ροή διαμέσου του υδροστροβίλου και η λειτουργία της μηχανής δεν είναι απαλλαγμένη απωλειών που έχουν ως τελικό αποτέλεσμα τη μειωμένη αξιοποίηση της διαθέσιμης στη μηχανή υδραυλικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό η παραγόμενη μηχανική ισχύς  $N$  (Εξίσωση 5.1) είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη υδραυλική ισχύ  $N_{th}$  (Εξίσωση 5.4), οπότε η διαφορά  $N_{th}-N$  είναι ίση με το άθροισμα των διαφόρων απωλειών και οι οποίες διακρίνονται σε υδραυλικές, ογκομετρικές και μηχανικές. Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε παραπάνω (Εξίσωση 5.5), ο ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  ορίζεται ως ο λόγος  $\eta = \frac{N}{N_{th}}$ .

Στην περίπτωση υδροστροβίλου η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$  εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού σε μέτρα στήλης του υγρού) που διατίθεται στον υδροστροβίλο ώστε να τη μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, ενώ η κινητική του ενέργεια στη διατομή εξόδου  $\frac{c_{out}^2}{2g}$  διαφεύγει της ενεργειακής μετατροπής.

Το θεωρητικό ύψος  $H_u$  του δρομέα, όπως προέκυψε από την εφαρμογή του θεωρήματος της ροής της ορμής (Εξίσωση 5.20) εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια από το δρομέα. Για τη συσχέτιση μεταξύ  $H$  και  $H_u$  εφαρμόζεται η γενικευμένη εξίσωση Bernoulli μεταξύ της διατομής εισόδου  $e$  της μηχανής μέχρι τη διατομή 1 εισόδου του δρομέα:

$$H_{t1} = H_1 + z_1 + \frac{c_1^2}{2g} = H_{te} - \delta h_{fe1} \quad (5.40)$$

Αντίστοιχα μεταξύ της διατομής εξόδου 2 του δρομέα μέχρι τη διατομή  $a$  εξόδου από τη μηχανή θα ισχύει:

$$H_{t2} = H_2 + z_2 + \frac{c_2^2}{2g} = H_{ta} - \delta h_{f2a} \quad (5.41)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις Εξισώσεις 5.40 και 5.41 και σχηματίζοντας την Εξίσωση 5.28 προκύπτει:

$$\begin{aligned}
H_u &= H_{t1} - H_{t1} - \delta h_{f,12} = H_{te} - \delta h_{fe1} - H_{te} - \delta h_{fe1} - \delta h_{f,12} \\
&= H_{te} - H_{ta} - (\delta h_{fe1} + \delta h_{f2a} + \delta h_{f,12}) \\
&= H_{te} - H_{ta} - \delta h_{fea}
\end{aligned} \tag{5.42}$$

στην οποία με  $\delta h_{fea}$  συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες της ροής από τη διατομή εισόδου  $e$  μέχρι τη διατομή εξόδου  $a$  της μηχανής. Η διαφορά  $H_{te}-H_{ta}$  είναι το θεωρητικό ωφέλιμο ύψος πτώσης του υδροστροβίλου αν αφαιρεθεί από αυτό η κινητική ενέργεια που έχει παραμείνει στο νερό όταν αυτό εξέρχεται από το στρόβιλο δηλαδή  $\frac{c_a^2}{2g}$ . Έτσι η Εξίσωση 5.42 γράφεται:

$$H_u = H - \frac{c_a^2}{2g} - \delta h_{fea} \tag{5.43}$$

που εκφράζει το ότι η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια από το δρομέα, δηλαδή η  $H_u$  είναι ίση με τη διαθέσιμη από την εγκατάσταση ενέργεια  $H$  εάν αφαιρεθούν οι απώλειες  $\delta h_{fea}$  της ροής στο εσωτερικό της μηχανής και η ενέργεια που διαφεύγει αναξιοποίητη, δηλαδή η κινητική ενέργεια που έχει το νερό εξερχόμενο της μηχανής.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης  $\eta_h$  του υδροστροβίλου ορίζεται ως ο λόγος:

$$\eta_h = \frac{H_u}{H} = \frac{H - \frac{c_a^2}{2g} - \delta h_{fea}}{H} \tag{5.44}$$

Η ταχύτητα  $c_a$  στη διατομή εξόδου του υδροστροβίλου αναλύεται σε μεσημβρινή και περιφερειακή συνιστώσα,  $c_{ma}$  και  $c_{ua}$  αντίστοιχα. Η μεσημβρινή συνιστώσα είναι ανάλογη της διερχόμενης παροχής  $Q$ . Η περιφερειακή συνδέεται με την περιφερειακή συνιστώσα  $c_{u2}$  στη διατομή εξόδου του δρομέα καθώς κατά μήκος κάθε γραμμής ροής θα ισχύει η αρχή της διατήρησης της συστροφής που εκφράζεται μέσω της Εξίσωσης 5.31. Η τιμή της  $c_{u2}$ , άρα και αυτή της  $c_{ua}$  εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας και γι' αυτό η σχεδίαση του δρομέα όπως έχει αναφερθεί παραπάνω γίνεται έτσι ώστε η συστροφή στην έξοδο του δρομέα να είναι μηδενική στη γειτονία του κανονικού σημείου λειτουργίας.

Οι υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fea}$  εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας και διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής  $\delta h_\tau$  και σε απώλειες κρούσης  $\delta h_a$ , δηλαδή  $\delta h_{fea} = \delta h_\tau + \delta h_a$ .

Οι υδραυλικές απώλειες τριβής  $\delta h_\tau$  κατά μήκος των γραμμών ροής, από τη διατομή εισόδου  $e$  μέχρι τη διατομή εξόδου  $a$ , διακρίνονται σε γραμμικές και τοπικές και εκφράζονται μέσω μίας σχέσης της μορφής:

$$\delta h_\tau = \zeta_\tau \cdot Q^2 \tag{5.45}$$

στην οποία ο συντελεστής  $\zeta_\tau$  είναι σταθερός για την περιοχή της πλήρως τυρβώδους ροής και αυξάνεται όσο μειώνεται η τιμή του αριθμού Reynolds της ροής στη μεταβατική και στρωτή περιοχή της ροής. Για το λόγο αυτό όσο αυξάνεται το μέγεθος της μηχανής αυξάνεται και ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης (μεγαλύτερη υδραυλική διάμετρος και αριθμός Reynolds στην πλήρως τυρβώδη περιοχή).

Οι υδραυλικές απώλειες κρούσης οφείλονται στη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της ροής και των πτερυγίων του δρομέα στη διατομή εισόδου. Οι απώλειες κρούσεως στα ρυθμιστικά πτερύγια δεν είναι σημαντικές, επειδή στην περιοχή αυτή η ροή είναι έντονα επιταχυνόμενη. Οι απώλειες κρούσεως διατομή εισόδου του δρομέα εκφράζονται ως:

$$\delta h_a = \zeta_a \left(1 - \frac{Q_u}{Q_{uA}}\right)^2 \frac{u_1^2}{2g} \quad (5.46)$$

έτσι ώστε να μηδενίζονται για  $Q_u=Q_{uA}$ , δηλαδή για την παροχή στην οποία η γωνία πρόσπτωσης είναι μηδενική. Η παροχή  $Q_{uA}$  για είσοδο χωρίς κρούση είναι διαφορετική για κάθε τιμή της κλίσεως  $\alpha_I$ , δηλαδή του ανοίγματος  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων.

β) Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Η παροχή  $Q_u$  που διέρχεται μέσω του δρομέα (και αποδίδει την ενέργεια) είναι μικρότερη από την παροχή  $Q$  που διέρχεται από τη διατομή εισόδου και εξόδου της μηχανής κατά την παροχή  $\delta Q$  η οποία, λόγω της θετικής διαφοράς της στατικής πίεσης  $\rho g(H_1-H_2)$ , ρέει από τη διατομή εισόδου 1 προς τη διατομή εξόδου 2 μέσω του διακένου που σχηματίζεται μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της στεφάνης και την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού κελύφους της μηχανής. Η παροχή αυτή  $\delta Q$  χαρακτηρίζεται ως ογκομετρικές απώλειες. Θα είναι:

$$Q_u = Q - \delta Q \quad (5.47)$$

οπότε ο ογκομετρικός βαθμός απόδοσης  $\eta_Q$  ορίζεται ως ο λόγος:

$$\eta_Q = \frac{Q_u}{Q} = 1 - \frac{\delta Q}{Q} \quad (5.48)$$

Η τιμή των ογκομετρικών απωλειών διατηρείται χαμηλή μέσω της διαμόρφωσης λαβυρίνθου. Προδιαγράφοντας την τιμή των ογκομετρικών απωλειών με βάση οικονομοτεχνικά κριτήρια, υπολογίζεται η παροχή  $\delta Q$  των ογκομετρικών απωλειών και στη συνέχεια υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του λαβυρίνθου.

Στην περίπτωση υδροστροβίλων αξονικής ροής οι ογκομετρικές απώλειες εκδηλώνονται μεταξύ των ακροπτερυγίων του δρομέα και του εξωτερικού κελύφους, οπότε ο μόνος τρόπος μείωσης των είναι η διαμόρφωση του ακτινικού διακένου στη μικρότερη δυνατή τιμή, της τάξεως του 0.1% της εξωτερικής διαμέτρου του δρομέα.

Φυσικά στην περίπτωση των υδροστροβίλων αντιδράσεως, λόγω της ισόθλιπτης ροής στο δρομέα, δεν εκδηλώνονται ογκομετρικές απώλειες, οπότε είναι  $\eta_Q=1$ .

Μηχανικός βαθμός απόδοσης

Οι μηχανικές απώλειες εκφράζουν απώλεια υπό μορφή μηχανικής ισχύος, της  $N_m$ , που διακρίνεται στις απώλειες των εδράνων  $N_E$  και τις απώλειες στρεφομένου δίσκου  $N_S$ , είναι δηλαδή  $N_m = N_E + N_S$ .

Επομένως η πραγματική μηχανική ισχύς  $N$  που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα είναι ίση προς:

$$N = N_u - N_m \quad (5.49)$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης  $\eta_m$  ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής μηχανικής ισχύος  $N$  που αποδίδεται στην άτρακτο του δρομέα προς τη θεωρητική ισχύ  $N_u$  που αναπτύσσεται στο δρομέα, δηλαδή:

$$\eta_m = \frac{N}{N_u} = 1 - \frac{N_m}{N_u} \quad (5.50)$$

Οι απώλειες στρεφομένου δίσκου οφείλονται στην τριβή του υγρού στις εξωτερικές επιφάνειες της πλήμνης και της στεφάνης του δρομέα (στην περίπτωση δρομέα αξονικής ροής δεν υπάρχει στεφάνη). Από την ανάλυση του φαινομένου προκύπτει ότι  $N_m = f(D^5, n^3)$ , δηλαδή η ισχύς των μηχανικών απωλειών στρεφομένου δίσκου μεταβάλλεται με την 5η δύναμη της διαμέτρου του δρομέα και την 3η δύναμη της ταχύτητας περιστροφής.

Στην περίπτωση δρομέα στροβίλου δράσεως, π.χ. Pelton, δεν υπάρχουν απώλειες στρεφομένου δίσκου, όμως αντ' αυτών αναπτύσσονται απώλειες αερισμού που οφείλονται στην κίνηση που προκαλείται στον περιβάλλοντα αέρα από την περιστροφή του δρομέα.

δ) Ολικός βαθμός απόδοσης

Η πραγματική μηχανική ισχύς  $N$  που αποδίδεται στην άτρακτο του υδροστροβίλου προκύπτει από τις εξισώσεις ορισμού των βαθμών απόδοσης. Είναι λοιπόν:

$$\begin{aligned} N &= \eta_m \cdot N_u = \eta_m \cdot \gamma \cdot H_u \cdot Q_u = \eta_m \cdot \gamma \cdot \eta_h \cdot H \cdot \eta_Q \cdot Q = \\ &= (\eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_Q) \cdot \gamma \cdot H \cdot Q = \eta \cdot \gamma \cdot H \cdot Q = \eta \cdot N_{th} \end{aligned} \quad (5.51)$$

οπότε συνάγεται ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  του υδροστροβίλου είναι ίσος προς το γινόμενο του μηχανικού  $\eta_m$ , του ογκομετρικού  $\eta_Q$  και του υδραυλικού  $\eta_h$ , δηλαδή

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_h \cdot \eta_Q \quad (5.52)$$

Από τους τρεις αυτούς βαθμούς απόδοσης την μικρότερη τιμή έχει ο υδραυλικός  $\eta_h$  ο οποίος καθορίζει και την τάξη μεγέθους του ολικού βαθμού απόδοσης. Ενδεικτικές τιμές των βαθμών απόδοσης για υδροστροβίλο Francis μικρής ισχύος έχουν ως εξής (Παπαντώνης, 2008):

$\eta_m=0.985$ ,  $\eta_Q=0.975$ ,  $\eta_h=0.93$  και συνολικά  $\eta=0.893$ .

### 5.2.3 Καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλων

Ως χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου εννοούνται οι καμπύλες μεταβολής της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  συναρτήσει της παροχής  $Q$  με παράμετρο το άνοιγμα  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων και για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ( $H, Q$ ), για μία τιμή του ανοίγματος  $A$  των ρυθμιστικών πτερυγίων, προκύπτει από την αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη ( $H_u, Q$ ), η οποία είναι μια ευθεία γραμμή με θετική κλίση, προσθέτοντας τις υδραυλικές απώλειες  $\delta h_{fea}$  και την κινητική ενέργεια  $\frac{c_a^2}{2g}$  στη

διατομή εξόδου. Άρα οι χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστροβίλου έχουν τη μορφή πλέγματος καμπυλών με θετική κλίση. Στο ίδιο διάγραμμα χαράσσονται και οι καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης, οι οποίες έχουν μορφή κλειστών ισοϋψών καμπυλών. Στην κορυφή τους αντιστοιχεί το κανονικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή το σημείο του μέγιστου ολικού βαθμού απόδοσης. Το κανονικό σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή του ανοίγματος των ρυθμιστικών περυγίων και σε μία τιμή της παροχής και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  για τα οποία ικανοποιούνται και οι δύο συνθήκες: η ροή στην είσοδο του δρομέα γίνεται χωρίς κρούση, ενώ παράλληλα η συστροφή του υγρού στην έξοδο του δρομέα είναι σχεδόν μηδενική.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστροβίλου χαράσσονται εργαστηριακά σε γεωμετρικά όμοιο μοντέλο σύμφωνα με τους νόμους της ομοιότητας.

Στην περίπτωση υδροστροβίλων αξονικής ροής (Kaplan, bulb κλπ) ή διαγώνιας ροής (Deriaz) με διπλή ρύθμιση, δηλαδή δυνατότητα ρύθμισης τόσο της κλίσεως των ρυθμιστικών περυγίων, όσο και αυτής των περυγίων του δρομέα, οι χαρακτηριστικές καμπύλες γίνονται πολύπλοκες, καθώς θα υπάρχουν δύο παράμετροι, η κλίση των περυγίων του δρομέα και η κλίση των ρυθμιστικών περυγίων. Όμως για την επίτευξη της ισχύος εξόδου  $N$  υπό δεδομένη τιμή της υδραυλικής πτώσης  $H$  δεν είναι σκόπιμη η επιλογή της κλίσης των περυγίων του δρομέα ανεξάρτητα από την κλίση των ρυθμιστικών περυγίων, θα πρέπει να επιλέγεται ο συνδυασμός αυτός (κλίσης των ρυθμιστικών περυγίων και κλίσης των περυγίων του δρομέα) με τον οποίο επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης.

Σε κάθε σημείο λειτουργίας η ταχύτητα περιστροφής του ζεύγους υδροστροβίλου-γεννήτριας διατηρείται σταθερή λόγω του ότι η ισχύς που παράγεται από τον υδροστρόβιλο απορροφάται από την ηλεκτρική γεννήτρια.

Στην περίπτωση κατά την οποία η γεννήτρια τεθεί εκτός δικτύου λόγω ηλεκτρικού σφάλματος, η μηχανική ενέργεια που παράγεται από τον υδροστρόβιλο δεν απορροφάται πλέον από τη γεννήτρια, με αποτέλεσμα αυτή να μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των στρεφομένων μαζών (της ατράκτου, του δρομέα του υδροστροβίλου και του ρότορα της γεννήτριας) και να επιταχύνει τις στρεφόμενες μάζες μέχρι μία ταχύτητα περιστροφής που χαρακτηρίζεται ως ταχύτητα φυγής  $n_e$ . Στην ταχύτητα  $n_e$ , η παραγόμενη από τον υδροστρόβιλο μηχανική ισχύς μηδενίζεται, καθώς η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$  καταναλώνεται εξολοκλήρου στις υδραυλικές απώλειες στο εσωτερικό της μηχανής. Για το λόγο αυτό οι περιστρεφόμενες μάζες δεν επιταχύνονται περισσότερο από την ταχύτητα φυγής  $n_e$ . Η ταχύτητα φυγής είναι της τάξης του:

$$n_e \cong 2.5 \cdot n \quad \text{για τους υδροστροβίλους αξονικής ροής}$$

$$n_e \cong 1.8 \cdot n \quad \text{για τους υδροστροβίλους Pelton}$$

$$n_e \cong 2 \cdot n \quad \text{για τους υδροστρόβιλους Francis χαμηλού ειδικού αριθμού στροφών}$$

#### 5.2.4 Νόμοι ομοιότητας και αναγωγής του βαθμού απόδοσης

Το ενδιαφέρον της εφαρμογής της ομοιότητας στην περίπτωση των υδροστροβίλων έγκειται στη δυνατότητα εργαστηριακού προσδιορισμού των λειτουργικών χαρακτηριστικών των υδροστροβίλων σε γεωμετρικά όμοιο μοντέλο (πρότυπο). Εάν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά δεν είναι τα επιθυμητά, είναι δυνατή η διόρθωση της χάραξης των στοιχείων του υδροστροβίλου, για παράδειγμα των πτερυγίων και επανεξέταση της διάταξης.

Η τεχνική της κατασκευής του μοντέλου και εργαστηριακής δοκιμής του είναι δαπανηρή, όμως δικαιολογείται από τη δυνατότητα βελτίωσης και εξασφάλισης των επιθυμητών λειτουργικών χαρακτηριστικών. Μετά την ολοκλήρωση των εργαστηριακών δοκιμών στο μοντέλο κατασκευάζεται ο πρότυπος υδροστροβίλος, γεωμετρικά όμοιος προς το μοντέλο. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του πρωτότυπου συνδέονται με αυτά του μοντέλου του μέσω των νόμων ομοιότητας.

Στην περίπτωση των μικρών τυποποιημένων υδροστροβίλων οι νόμοι ομοιότητας εφαρμόζονται για τη δημιουργία μίας σειράς όμοιων υδροστροβίλων με γνωστά λειτουργικά χαρακτηριστικά, αυτά του γεωμετρικά όμοιου μοντέλου τους. Με τον τρόπο αυτό ο κάθε κατασκευαστής μικρών υδροστροβίλων κατανέμει το κόστος σχεδίασης και μελέτης στους υδροστροβίλους της ίδιας σειράς επιτυγχάνοντας μείωση του κόστους τους.

Οι νόμοι ομοιότητας που ισχύουν μεταξύ γεωμετρικά όμοιων υδροστροβίλων σε αντίστοιχα σημεία λειτουργίας (αυτά στα οποία τα αντίστοιχα τρίγωνα ταχυτήτων είναι όμοια μεταξύ τους) και για ροή στην πλήρως τυρβώδη περιοχή διατυπώνονται ως εξής:

$$\frac{Q'}{Q''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^3 \frac{n'}{n''} \quad (5.53)$$

$$\frac{H'}{H''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^2 \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 \quad (5.54)$$

$$\frac{N'}{N''} = \left(\frac{D'}{D''}\right)^5 \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 \frac{\eta'}{\eta''} \quad (5.55)$$

στις οποίες με  $D'$  και  $D''$  παριστάνεται η διάμετρος του δρομέα των γεωμετρικά όμοιων μηχανών, οπότε ο λόγος  $\lambda = \frac{D'}{D''}$  θα είναι ο γεωμετρικός λόγος ομοιότητας, όλων των αντίστοιχων γεωμετρικών μεγεθών, των δύο όμοιων μηχανών.

Στην Εξίσωση 5.55 εισάγεται και ο λόγος των ολικών βαθμών απόδοσης  $\frac{\eta'}{\eta''}$ , ο οποίος θα είναι ίσος προς τη μονάδα στην περίπτωση όπου ισχύει ατελής (τουλάχιστον) δυναμική ομοιότητα της ροής μεταξύ των γεωμετρικά όμοιων μηχανών και η γεωμετρική ομοιότητα φτάνει μέχρι και την επιφανειακή τραχύτητα, οπότε μεταξύ μοντέλου (δείκτης «M») και πρωτοτύπου ισχύει:  $\frac{\varepsilon}{D} = \frac{\varepsilon_M}{D_M}$ .

Όμως η επιφανειακή τραχύτητα του πρωτοτύπου είναι ήδη πολύ μικρή και στην καλύτερη περίπτωση θα είναι  $\varepsilon_M = \varepsilon$ , οπότε  $\frac{\varepsilon_M}{D_M} > \frac{\varepsilon}{D}$ . Επομένως όσο αυξάνεται το μέγεθος του υδροστροβίλου, η σχετική τραχύτητα μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση των υδραυλικών απωλειών τριβής και την αύξηση του υδραυλικού βαθμού απόδοσης  $\eta_h$ .

Με σκοπό την ποσοτική εκτίμηση της μεταβολής του υδραυλικού (και κατά συνέπεια του ολικού βαθμού) απόδοσης με τη μεταβολή του μεγέθους του υδροστροβίλου έχουν αναπτυχθεί οι ονομαζόμενες σχέσεις αναγωγής οι οποίες βασίζονται σε αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους.

Σύμφωνα με την έκδοση προδιαγραφών της International Electrotechnical Commission No 995 ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  του πρωτότυπου εκτιμάται από τον αντίστοιχο του γεωμετρικά όμοιου μοντέλου  $\eta_M$  μέσω της διόρθωσης  $\Delta\eta$ , δηλαδή:

$$\eta = \eta_M + \Delta\eta \quad (5.56)$$

όπου η διόρθωση  $\Delta\eta$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Delta\eta = \frac{1 - \eta_M}{\left(\frac{Re_r}{Re_M}\right)^{0.16} + \frac{1 - q}{q}} \left[ \left(\frac{Re_r}{Re_M}\right)^{0.16} - \left(\frac{Re_r}{Re}\right)^{0.16} \right] \quad (5.57)$$

στην οποία  $Re_r = 7 \cdot 10^6$  η τιμή του αριθμού Reynolds αναφοράς,  $Re$  η τιμή του αριθμού Reynolds του πρωτότυπου,  $Re_M$  η αντίστοιχη τιμή του μοντέλου, ενώ η τιμή  $q$  λαμβάνεται ίση προς:

$$q = 0.7 \quad \text{για υδροστροβίλους Francis ή έλικας (σταθερά πτερύγια)}$$

$$q = 0.8 \quad \text{για υδροστροβίλους με πτερύγια του δρομέα ρυθμιζόμενης κλίσης (Kaplan, βολβοειδείς, σωληνωτούς, Deriaz)}$$

Για υδροστροβίλους Pelton δεν γίνεται καμία διόρθωση, δηλαδή  $\eta = \eta_M$ .

### 5.2.5 Αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας υδροστροβίλων

Κάνοντας χρήση των σχέσεων 5.53-5.55 που εκφράζουν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας γεωμετρικά όμοιων υδροστροβίλων σε αντίστοιχα σημεία λειτουργίας είναι δυνατή η εισαγωγή αδιάστατων παραμέτρων λειτουργίας έτσι ώστε οι χαρακτηριστικές καμπύλες μίας σειράς γεωμετρικά όμοιων υδροστροβίλων, σε οποιαδήποτε ταχύτητα περιστροφής, να παριστάνονται από το ίδιο διάγραμμα.

Οι πιο συνηθισμένες αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το δείκτη 11 (μοναδιαίες παράμετροι) και οι παράμετροι παροχής και ύψους  $\Phi$  και  $\Psi$  αντίστοιχα.

Οι αδιάστατες παράμετροι με δείκτη 11 αντιστοιχούν σε ιδεατό υδροστροβίλο, γεωμετρικά όμοιο προς τον εξεταζόμενο, με διάμετρο δρομέα  $D' = 1[m]$  και διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H' = 1[m]$ . Εισάγοντας τις τιμές αυτές στις Εξισώσεις 5.53-5.55 για τον υδροστροβίλο διαμέτρου δρομέα  $D$ , στο σημείο λειτουργίας με υδραυλική πτώση  $H$ , παροχή  $Q$ , ροπή  $M$ , ισχύ  $N$  στην ταχύτητα περιστροφής  $n$ , προκύπτουν τα ακόλουθα μεγέθη του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου στο αντίστοιχο σημείο λειτουργίας:

$$n_{11} = n \frac{D}{H^{1/2}} \quad (5.58)$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot H^{1/2}}$$

$$M_{11} = \frac{M}{D^3 \cdot H}$$

$$N_{11} = \frac{N}{D^2 \cdot H^{3/2}}$$

Οι αδιάστατες παράμετροι παροχής  $\Phi$  και ύψους  $\Psi$  οι οποίες, στην περίπτωση των υδροστροβίλων, ορίζονται ως:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\frac{Q}{\pi}}{R_{2e}^2 \cdot u_{2e}} \\ \Psi &= \frac{2g \cdot H}{u_{2e}^2} \end{aligned} \quad (5.59)$$

όπου  $R_{2e}$  και  $u_{2e}$  ο αριθμός Reynolds και η ταχύτητα στη διατομή εξόδου  $D_{2e}$  του δρομέα.

### 5.2.6 Ειδικός αριθμός στροφών

Η έννοια του ειδικού αριθμού στροφών εισάγεται ως ένα αριθμητικό μέγεθος που είναι ενδεικτικό της μορφής (της μεσημβρινής τομής) των υδροστροβίλων. Άρα οι γεωμετρικά όμοιοι υδροστροβίλοι θα πρέπει να χαρακτηρίζονται με την ίδια τιμή του ειδικού αριθμού στροφών.

Έστω υδροστροβίλος του οποίου στο κανονικό σημείο λειτουργίας η παροχή είναι ίση προς  $Q_k$ , το ύψος πτώσεως  $H_k$  και η ισχύς  $N_k$  με ταχύτητα περιστροφής  $n$ . Ως ειδικός αριθμός στροφών ως προς παροχή  $n_q$  του υδροστροβίλου ορίζεται η ταχύτητα περιστροφής· ιδεατού γεωμετρικά όμοιου προς αυτόν υδροστροβίλου ο οποίος στο κανονικό σημείο λειτουργίας του θα έχει  $Q'_k = 1$  και  $H'_k = 1$ . Απαλείφοντας από τις Εξισώσεις 5.53 και 5.54 τον γεωμετρικό λόγο ομοιότητας προκύπτει η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών ως προς παροχή η οποία εκφράζεται ως εξής:

$$n_q = n \frac{Q_k^{1/2}}{H_k^{3/4}} \quad (5.60)$$

Η τιμή του ειδικού αυτού αριθμού στροφών δεν είναι ανεξάρτητη των χρησιμοποιούμενων μονάδων οι οποίες θα πρέπει πάντοτε να αναφέρονται. Στην περίπτωση υδροστροβίλων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μονάδες:  $n$  [RPM],  $Q$   $\left[\frac{m^3}{s}\right]$  και  $H$  σε [mΣΥ].

Παραδοσιακά στους υδροστροβίλους χρησιμοποιείται και ο ειδικός αριθμός στροφών ως προς ισχύ  $n_s$  και ο οποίος εκφράζει την ταχύτητα περιστροφής του γεωμετρικά όμοιου υδροστροβίλου του οποίου το κανονικό σημείο λειτουργίας είναι το ακόλουθο:  $H_s=1$  (υδραυλικής πτώσης) και  $N_s=1$  (μονάδα ισχύος). Θέτοντας στις Εξισώσεις 5.53 και 5.55  $H_s=1$  και  $N_s=1$  (για  $\eta=\eta_s$ ) και απαλείφοντας το λόγο των διαμέτρων προκύπτει η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  ως προς την ισχύ:



$$n_s = n \frac{N_\kappa^{1/2}}{H_\kappa^{5/4}} \quad (5.61)$$

Όπως και για τον  $n_q$  η τιμή του  $n_s$  δεν είναι ανεξάρτητη των χρησιμοποιούμενων μονάδων.

Ο ειδικός αριθμός στροφών έχει επίδραση στα χαρακτηριστικά και στις διαστάσεις του υδροστροβίλου. Για παράδειγμα, για δεδομένο υδραυλικό ύψος η τιμή της περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας  $U$  εξαρτάται λίγο από τον ειδικό αριθμό στροφών. Όταν η ταχύτητα  $U$  μένει σταθερή, οι στροφές του υδροστροβίλου είναι προσεγγιστικά αντιστρόφως ανάλογες του δρομέα του υδροστροβίλου. Συνεπώς μικρός ειδικός αριθμός στροφών σημαίνει μικρότερος δρομέας, μικρότερο έργο άρα μικρότερο κόστος.

Ο βαθμός απόδοσης αυξάνει όσο αυξάνει ο ειδικός αριθμός στροφών. Αρχικά, είναι μειωμένος λόγω των ογκομετρικών απωλειών λαβυρίνθου και των απωλειών στρεφόμενου δίσκου. Στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη δυνατή τιμή και μετά μειώνεται αυξανόμενου του  $n_s$  για τις υδραυλικές απώλειες στον δρομέα και τον αγωγό απαγωγής.

Ο ειδικός αριθμός στροφών επηρεάζει και το ύψος τοποθέτησης δεδομένου ότι για υδροστροβίλους αντίδρασης όσο αυτός αυξάνεται, αυξάνει και το βάθος τοποθέτησης προς αποφυγή της σπηλαιώσης. Η επίδραση του ειδικού αριθμού στροφών στην ταχύτητα φυγής είναι πολύ μεγάλη. Όσο μεγαλύτερη τιμή λαμβάνει, τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα φυγής αναπτύσσεται. Αυτό δημιουργεί αυξημένη τάση στον ρότορα της γεννήτριας και κατά επέκταση αυξημένο κόστος για την εξασφάλιση μηχανικής αντοχής. Τέλος, σε ό,τι αφορά το εύρος λειτουργίας, ο ειδικός αριθμός στροφών επηρεάζει τη δυνατότητα προσαρμογής του στροβίλου σε μεταβολές παροχής και υδραυλικού ύψους.

### 5.2.7 Επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου, του ειδικού αριθμού στροφών και ταχύτητας περιστροφής

Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικής πτώσης, της μορφής και τύπου του δρομέα

Από τον ορισμό των ειδικών αριθμών στροφών  $n_q$  και  $n_s$  προκύπτει ότι για την ίδια ταχύτητα περιστροφής  $n$ , όσο αυξάνεται η παροχή  $Q$  σε σχέση με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$ , τόσο αυξάνεται η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης  $\eta_\kappa$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας, για καλά σχεδιασμένους υδροστροβίλους και ανεξάρτητα του τύπου του δρομέα του, είναι περίπου σταθερός και κυμαίνεται μεταξύ 0.85 (για υδροστροβίλο μικρού μεγέθους) και 0.945 (για υδροστροβίλο μεγάλου μεγέθους).

Θεωρώντας μία τιμή  $\eta_{h\kappa} \cong 0.9$  από την Εξίσωση 5.36 προκύπτει:

$$u_1 \cdot c_{u1\kappa} = \eta_{h\kappa} \cdot g \cdot H \quad (5.62)$$

Η περιφερειακή ταχύτητα  $u_1$  καθορίζεται στη μέγιστη δυνατή τιμή της που επιτρέπει η αντοχή του υλικού του δρομέα δεδομένου ότι οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις είναι ανάλογες του  $u_1^2$ . Έτσι η  $u_1$  δεν ξεπερνά τα  $50 - 60 \left[ \frac{m}{s} \right]$  για τα συνήθη κράματα από τα οποία κατασκευάζονται οι δρομείς

των υδροστροβίλων και εάν φυσικά δεν τίθεται περιορισμός από την ανάπτυξη σπηλαίωσης. Άρα, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.61, όσο αυξάνεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$ , με σταθερή περίπου την  $u_1$  και ανεξάρτητα του τύπου της μηχανής, θα πρέπει να αυξάνεται η  $c_{u1k}$  και να μετασχηματίζεται σταδιακά το τρίγωνο ταχυτήτων εισόδου, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι η ορθή συνιστώσα  $c_{n1}$  της ταχύτητας είναι μικρή και ότι δεν μεταβάλλεται σημαντικά για τους διάφορους τύπους υδροστροβίλων.

Σημειώνεται ότι μεγάλη τιμή της  $c_{n1}$  συνεπάγεται μικρή διατομή εισόδου και άρα μικρή υδραυλική διάμετρο (μικρό πλάτος  $b_1$  του δρομέα για δεδομένη διάμετρο  $D_1$ ) με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών τριβής και τη δυσκολία κατασκευής του δρομέα. Για το λόγο αυτό η αντίστοιχη παράμετρος της ορθής ταχύτητας λαμβάνεται, ανεξάρτητα του τύπου του δρομέα, της τάξης του:

$$C_{n1} = \frac{c_{n1}}{\sqrt{2gH}} \quad (5.63)$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα και την Εξίσωση 5.62, για πολύ μεγάλες τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ , η  $c_{u1}$  θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την  $u_1$  και το τρίγωνο εισόδου θα είναι αμβλυγώνιο, όπως στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton το τρίγωνο εισόδου του οποίου είναι  $\beta_1=180^\circ$ . Για μικρότερες τιμές του  $H$ , η τιμή του  $\beta_1 = 80 - 100^\circ$  (περίπτωση υδροστροβίλου Francis), ενώ για μικρές τιμές του  $H$ , όπου η γωνία  $\beta_1$  γίνεται αρκετά μικρότερη των  $90^\circ$ , το τρίγωνο εισόδου γίνεται οξυγώνιο (περίπτωση υδροστροβίλου αξονικής ροής).

Από την προηγούμενη διερεύνηση γίνεται φανερή η σημασία της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης στη διαμόρφωση του τριγώνου εισόδου και κατά συνέπεια στη μορφή του δρομέα και στην τιμή του ειδικού αριθμού στροφών που αντιστοιχεί σε αυτή. Η επιλογή της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών  $n_q$  (ή  $n_s$ ) υδροστροβίλου γίνεται κατ' αρχή συναρτήσει της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας, έτσι ώστε η σχεδίαση να αντιστοιχεί σε οικονομοτεχνικά βιώσιμη κατασκευή.

Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικής πτώσης, ειδικού αριθμού στροφών και βαθμού απόδοσης.

Ως αποτέλεσμα της συσχέτισης μεταξύ του ειδικού αριθμού στροφών και της μορφής του δρομέα και ολόκληρης της μηχανής αναμένεται ότι θα συσχετίζεται ο ειδικός αριθμός στροφών με διανομή των υδραυλικών και λοιπών απωλειών και άρα με μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή του βαθμού απόδοσης στο κανονικό σημείο λειτουργίας.

Η κατ' αρχήν επιλογή της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  είναι δυνατό να γίνει από συσχετίσεις ως συνάρτηση της υδραυλικής πτώσης  $H$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας και οι οποίες έχουν προκύψει από την ανάλυση μεγάλου αριθμού υδροστροβίλων. Επιδίωξη φυσικά είναι η επιλογή της μεγαλύτερης δυνατής τιμής του  $n_q$  που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής  $n$  και άρα στο μικρότερο μέγεθος (για σταθερό  $u_1$ ) και κόστος μηχανής. Όμως η επιδίωξη αυτή μπορεί να έχει παρενέργειες όπως χαμηλό βαθμό απόδοσης, αστάθεια λειτουργίας, υπερβολικές εκσκαφές για ασφαλή λειτουργία έναντι σπηλαίωσης κ.λ.π..

## Υπολογισμός - επιλογή της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής

Στα υδροηλεκτρικά έργα οι ηλεκτρικές γεννήτριες είναι σύγχρονες ή ασύγχρονες στην περίπτωση μικρής ισχύος (<1.5-2 [MW]). Στην πρώτη περίπτωση η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι η σύγχρονη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι λίγο μεγαλύτερη από τη σύγχρονη. Άρα ο υδροστρόβιλος θα πρέπει να στρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, εκτός και εάν για λόγους οικονομικούς, μεταξύ υδροστρόβιλου και γεννήτριας παρεμβάλλεται κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών ή μετάδοση μέσω ιμάντων. Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής  $n_\sigma$  των ηλεκτρικών γεννητριών δίνεται από τη σχέση:

$$n_\sigma = \frac{60f}{p} \quad (5.64)$$

στην οποία με  $f$  [Hz] συμβολίζεται η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και  $p$  το πλήθος των ζευγών των πόλων της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η συχνότητα  $f$  του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ίση προς 50[Hz] στην Ευρώπη.

Ο καθορισμός της ταχύτητας περιστροφής υδροστρόβιλου με δεδομένα τα  $H$  και  $Q$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας γίνεται ως εξής:

- Από την τιμή του  $H_k$  επιλέγεται μία τιμή του  $n_q$ .
- Από την Εξίσωση 5.60 ορισμού του  $n_q$  προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής  $n$  [RPM] που θα πρέπει να επιλεγεί. Η ταχύτητα πρέπει να είναι σύγχρονη και να ικανοποιεί την Εξίσωση 5.64. Το πιο πιθανό είναι ότι η τιμή του  $n$  που θα προκύψει από την επίλυση της Εξίσωσης 5.60 βρίσκεται μεταξύ δύο σύγχρονων τιμών, οπότε ο μελετητής θα έχει να επιλέξει την υψηλότερη είτε τη χαμηλότερη και με αυτή θα υπολογίσει την τελική τιμή  $n_q$ .

Είναι προφανές ότι η υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλο και γεννήτρια μικρότερου μεγέθους και κόστους και σε μικρότερα έργα πολιτικού μηχανικού. Όμως με την αύξηση του ειδικού αριθμού στροφών, η λειτουργία του υδροστρόβιλου γίνεται περισσότερο ευαίσθητη στη σπηλαιώση που για να αντιμετωπισθεί θα πρέπει ο υδροστρόβιλος να τοποθετηθεί σε χαμηλότερη στάθμη, δηλαδή να γίνει υπόγειος (μεγαλύτερες εκσκαφές). Τελικά η επιλογή μεταξύ των δύο ταχυτήτων περιστροφής γίνεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους υπεισέρχονται.

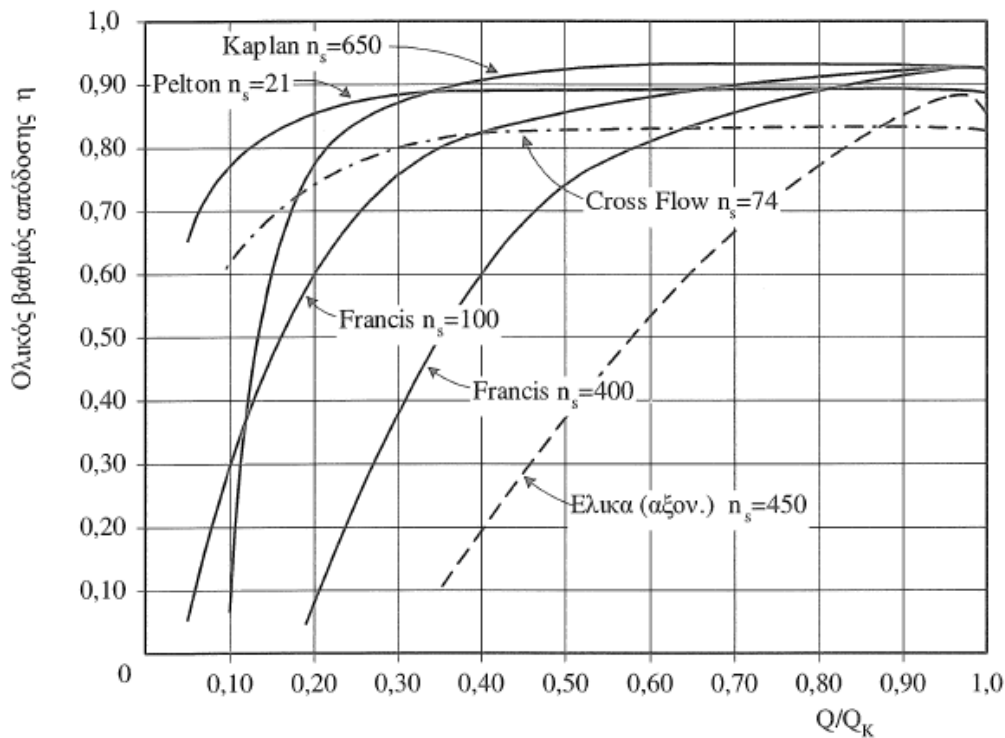
## Καμπύλη μεταβολής βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου

Στο σχήμα 5.7 δίνεται ενδεικτικά η μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστρόβιλων διαφόρων τύπων και ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  συναρτήσει του φορτίου, της παροχής  $Q$  ως προς την παροχή  $Q_k$  στο κανονικό σημείο λειτουργίας.

Σημειώνεται ότι, για  $H$ =σταθ., η μεταβολή της παροχής και του βαθμού απόδοσης είναι ενδεικτική της ισχύος εξόδου.

Από το διάγραμμα του σχήματος 5.7 προκύπτει ότι οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton και Kaplan παρουσιάζουν το πλεονέκτημα, σε σύγκριση με τον υδροστρόβιλο Francis ότι διατηρούν υψηλό

βαθμό απόδοσης ακόμη και σε μερικά φορτία, δηλαδή η καμπύλη  $(\eta, Q)$  είναι επίπεδη σε μεγάλο τμήμα της.



Σχήμα 5.7: Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης υδροστροβίλων συναρτήσει του φορτίου τους (Παπαντώνης, 2008).

Στους υδροστροβίλους τύπου Pelton το γεγονός αυτό οφείλεται ότι με τη μεταβολή του φορτίου μεταβάλλεται η διάμετρος της δέσμης και όχι η ταχύτητά της με αποτέλεσμα οι σχετικές ταχύτητες να μένουν αμετάβλητες.

Οι υδροστροβίλοι Kaplan οφείλουν το πλεονέκτημα της σχετικά επίπεδης καμπύλης στη δυνατότητα περιστροφής των πτερυγίων του δρομέα έτσι ώστε να επιλέγεται κάθε φορά ο βέλτιστος σχεδιασμός της κλίσης των πτερυγίων του δρομέα και των ρυθμιστικών πτερυγίων. Το πλεονέκτημα των υδροστροβίλων διπλής ρύθμισης γίνεται φανερό συγκρίνοντας στο σχήμα 5.7 τη μεταβολή  $\eta = f\left(\frac{Q}{Q_{\kappa}}\right)$  για υδροστροβίλο Kaplan και για υδροστροβίλο τύπου έλικας, δηλαδή αξονικής ροής με σταθερά τα πτερύγια του δρομέα: η καμπύλη μεταβολής του ολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου είναι πολύ μυτερή για τον υδροστροβίλο τύπου έλικας, δηλαδή ο υδροστροβίλος αυτός είναι κατάλληλος για λειτουργία μόνο σε στενή περιοχή μεταβολής της παροχής και της ισχύος εξόδου. Αντίθετα ο υδροστροβίλος Pelton είναι ευαίσθητος στις μεταβολές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης  $H$ , δηλαδή ο ολικός βαθμός μειώνεται έντονα για τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες της κανονικής τιμής  $H_{\kappa}$ .

#### Κριτήρια επιλογής του τύπου του υδροστροβίλου

Σε πολλές περιπτώσεις για τη δεδομένη υδραυλική πτώση  $H$  και ονομαστική ισχύ  $N$  του υδροστροβίλου, η επιλογή του τύπου του υδροστροβίλου δεν είναι μονοσήμαντη. Στις

περιπτώσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη και άλλα κριτήρια, όπως το κόστος του υδροστροβίλου και το κόστος του αντίστοιχου ΥΗΣ, το εύρος λειτουργίας, η στιβαρότητα, η ροπή αδράνειας κλπ.

Για παράδειγμα, όταν η υδραυλική πτώση είναι της τάξης των 40[m] είναι δυνατή η επιλογή υδροστροβίλου τόσο τύπου Francis, όσο και Kaplan ή εν γένει αξονικής ροής. Για την ίδια ονομαστική ισχύ, ο υδροστροβίλος Francis έχει σημαντικά μικρότερες διαστάσεις και κόστος. Επιπρόσθετα έχει καλύτερη συμπεριφορά έναντι σπηλαιώσης και γι' αυτό η στάθμη τοποθέτησης του είναι ψηλότερη από του Kaplan, ζητώντας έτσι λιγότερες εκσκαφές. Αντίθετα όμως ο υδροστροβίλος Kaplan έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας και μάλιστα με υψηλές τιμές του ολικού βαθμού απόδοσης οπότε προσφέρεται για περιπτώσεις που η λειτουργία θα υπόκειται σε έντονες διακυμάνσεις.

Αντίστοιχα όταν η υδραυλική πτώση είναι της τάξης των 200-300[m] είναι δυνατή η επιλογή υδροστροβίλου τόσο τύπου Francis όσο και Pelton. Για την ίδια ονομαστική ισχύ, οι διαστάσεις και ο όγκος που καταλαμβάνει ο Pelton είναι μεγαλύτερες από αυτές του αντίστοιχου Francis. Η ταχύτητα περιστροφής του Francis είναι υψηλότερη από αυτή του Pelton. Κατά συνέπεια, το κόστος του υδροστροβίλου, της γεννήτριας και του ΥΗΣ είναι μικρότερα στον Francis παρά στον Pelton. Αντίθετα, η καμπύλη του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου Pelton είναι επίπεδη με αποτέλεσμα να έχει μεγάλο εύρος λειτουργίας και να αξιοποιεί καλύτερα παροχές με έντονη διακύμανση. Επιπλέον ο υδροστροβίλος Pelton είναι πιο στιβαρή μηχανή από τον αντίστοιχο Francis, δεν αναπτύσσονται σε αυτόν αξονικά φορτία, οπότε δεν φέρει ωστικό έδρανο, ενώ επίσης παρέχει τη δυνατότητα ευκολότερης επισκευής.

#### 5.2.8 Λειτουργία υδροστροβίλου με μεταβλητές στροφές

Μία τεχνική η οποία τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται όλο και περισσότερο χάρη στην εξέλιξη και τυποποίηση των ηλεκτρονικών ισχύος είναι αυτή της λειτουργίας μικρών υδροστροβίλων υπό μεταβλητές στροφές, αν και τροφοδοτούν ηλεκτρικό δίκτυο σταθερής συχνότητας. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον στην περίπτωση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων όπου και εφαρμόστηκε πρώτα. Με τον τρόπο αυτό προσαρμόζεται το σημείο λειτουργίας των αναστρέψιμων μηχανών (υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής για τη λειτουργία ως αντλίας και χαμηλότερη για λειτουργία ως υδροστροβίλου). Αναστρέψιμα μικρά υδροηλεκτρικά έργα δεν έχουν ενδιαφέρον εκτός και εάν αποτελούν μέρος ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος, π.χ. σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκές κυψέλες. Η τεχνική της λειτουργίας υπό μεταβλητές στροφές εφαρμόζεται με επιτυχία στην περίπτωση των ανεμογεννητριών λόγω της έντονης διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου.

Το ενδιαφέρον λειτουργίας μικρών υδροστροβίλων με μεταβλητές στροφές περιορίζεται στην περίπτωση υδροστροβίλων αξονικής ροής, όταν ο δρομέας έχει σταθερά πτερύγια ή όταν η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται το εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου ο οποίος είναι απλούστερος (στη λειτουργία και συντήρηση) και μικρότερου κόστους λόγω της απλής ρύθμισης που διαθέτει. Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία η διαθέσιμη υδραυλική πτώση παρουσιάζει έντονη διακύμανση (όπως συμβαίνει σε τεχνητές δεξαμενές ρύθμισης της πλημμυρικής παροχής) ο αξονικής ροής

υδροστροβίλος, ακόμη και διπλής ρύθμισης, θα λειτουργεί επί μεγάλα χρονικά διαστήματα σε περιοχές μικρού βαθμού απόδοσης, άρα με μειωμένη παραγωγή ενέργειας. Με την υιοθέτηση της τεχνικής λειτουργίας με μεταβλητές στροφές (μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για μεγαλύτερες τιμές της υδραυλικής πτώσης) η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου συνεχώς προσαρμόζεται στην τιμή της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης, ώστε να λειτουργεί υπό τη μέγιστη κάθε φορά τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης. Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας υπερκαλύπτεται από την αύξηση του κόστους του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Στις συνήθεις περιπτώσεις κατά τις οποίες η διακύμανση της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης είναι μικρή, με λειτουργία υπό μεταβλητές στροφές επιτυγχάνεται αύξηση της παραγόμενης ενέργειας της τάξεως του 2-3% (ανάλογα με τη μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών του υδροστροβίλου), η οποία όμως συνήθως δεν δικαιολογεί το αυξημένο κόστος της επένδυσης.

### **5.3 Εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής μικρών υδροστροβίλων**

Για την κατ' αρχήν εκτίμηση της διαμέτρου του δρομέα (ως διάστασης ενδεικτικής του μεγέθους της μηχανής) και της ταχύτητας περιστροφής μικρών υδροστροβίλων έχουν διατυπωθεί συσχετίσεις, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση μεγάλου πλήθους μικρών τυποποιημένων υδροστροβίλων (δηλ. ισχύος μικρότερης των 10 MW). Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχες συσχετίσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την κατ' αρχήν διαστασιολόγηση των μεγάλων υδροστροβίλων, εφαρμοζόμενες στην περίπτωση των μικρών υδροστροβίλων, δίνουν αποτελέσματα μη ρεαλιστικά, δηλ. πολύ μικρή διάμετρο του δρομέα και υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

Η εξήγηση έγκειται στο ότι τα κριτήρια σχεδίασης και οι συνθήκες της ροής είναι διαφορετικές στις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα στους μεγάλους υδροστροβίλους η τιμή του αριθμού Reynolds είναι ήδη πολύ υψηλή, το πάχος των οριακών στρωμάτων πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος, οι μέσες ταχύτητες της ροής μεγαλύτερες. Επίσης δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη μείωση των ήδη μεγάλων διαστάσεων της μηχανής με αντάλλαγμα όμως την εγκατάσταση του υδροστροβίλου σε στάθμη χαμηλότερη της στάθμης απαγωγής, ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Στους μικρούς υδροστροβίλους βασικό κριτήριο στην επιλογή της ταχύτητας περιστροφής και της διαμέτρου του δρομέα αποτελεί η δυνατότητα λειτουργίας του υδροστροβίλου υψηλότερα από στάθμη απαγωγής έτσι ώστε ο ΥΗΣ να μην είναι υπόγειος και να απλοποιούνται τα αντίστοιχα έργα κατασκευής του ΥΗΣ. Οι συσχετίσεις που προτείνονται για την εκτίμηση της διαμέτρου  $D$  (m) του δρομέα και της ταχύτητας περιστροφής  $n$  [RPM] των διαφόρων τύπων μικρών υδροστροβίλων δίνονται στον πίνακα 5.1.

Στις σχέσεις του πίνακα 5.1 με  $N$  [kW] συμβολίζεται η ισχύς του κανονικού σημείου και με  $H$  [mΣΥ] η αντίστοιχη τιμή της υδραυλικής πτώσης. Η τιμή της ταχύτητας περιστροφής  $n$  που προκύπτει από τις σχέσεις του πίνακα δεν είναι σύγχρονες. Πρέπει να επιλεγεί η πλησιέστερη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και να υπολογισθεί η νέα τιμή της διαμέτρου  $D$  του δρομέα που αντιστοιχεί σε αυτή.

Πίνακας 5.1: Εκτίμηση της διαμέτρου  $D$  και της ταχύτητας περιστροφής  $n$  μικρών υδροστροβίλων (Παπαντώνης, 2008).

Τύπος μικρού Υδροστροβίλου	Διάμετρος Δρομέα $D$ [m]	Ταχύτητα περιστροφής $n$ [RPM]
Francis	$D = 0.160 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.471}$	$n = 110.133 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{0.809}$
Karlan	$D = 0.157 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.489}$	$n = 156.662 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{0.922}$
Βολβοειδής	$D = 0.183 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.446}$	$n = 156.662 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{0.922}$
Σωληνωτός	$D = 0.143 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.512}$	$n = 156.193 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{0.890}$
Pelton	$D = 0.315 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.483}$	$n = 32.549 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{1.079}$
Cross Flow	$D = 0.329 \cdot \left(\frac{N}{H}\right)^{0.275}$	$n = 38.451 \cdot \left(\frac{H^{0.5}}{D}\right)^{1.032}$

#### 5.4 Το πρόβλημα της σπηλαίωσης και η στάθμη τοποθέτησης του υδροστροβίλου

Σπηλαίωση ονομάζεται το φαινόμενο ατμοποίησης του νερού το οποίο αναπτύσσεται σε θέσεις όπου η στατική πίεση του υγρού τείνει να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης  $p_s$  του υγρού (και η οποία εξαρτάται από τη φύση και τη θερμοκρασία του). Για το λόγο αυτό η πλέον πιθανή περιοχή ανάπτυξης του φαινομένου της σπηλαίωσης σε δρομέα υδροστροβίλου αντιδράσεως είναι η περιοχή εξόδου του δρομέα όπου η μέση στατική πίεση είναι χαμηλή.

Κατά τη σπηλαίωση αναπτύσσεται θύλακας ατμού. Στο θύλακα ατμού διατηρείται πίεση ίση με τη πίεση ατμοποίησης και μοναδική μεταβλητή παραμένει η θερμοκρασία του υγρού. Η παρουσία αυτή των φυσαλίδων ατμού καταργεί τοπικά τη συνέχεια του μέσου μεταβάλλοντας τη γεωμετρία των γραμμών ροής. Οι φυσαλίδες μεταφερόμενες από τη ροή σε περιοχές μεγαλύτερης πίεσης, καταστρέφονται απότομα (το περιβάλλον υγρό καταλαμβάνει αμέσως τη θέση τους) εκλύοντας μεγάλες τάσεις συμπίεσης (η πίεση στιγμιαία φτάνει τιμές 100-1000[bar]) με αποτέλεσμα την άσκηση συνεχών κρούσεων μεγάλης έντασης στα γειτονικά στερεά όρια. Το φαινόμενο αυτό συνοδεύεται από θόρυβο (σαν να κινούνται στο σύστημα πέτρες που χτυπάνε τα τοιχώματα) και κραδασμό. Τα στερεά όρια αποκτούν με την πάροδο του χρόνου σπογγώδη υφή και τελικά καταστρέφονται λόγω κόπωσης από τις επαναλαμβανόμενες κρούσεις.

Η ανάπτυξη σπηλαίωσης προκαλεί σημαντική διάβρωση στις επιφάνειες των πτερυγίων λόγω των πολύ υψηλών υπερπίεσεων που αναπτύσσονται. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός φθοράς καταπονεί κρουστικά την επιφάνεια της υποπίεσης του υδροστροβίλου. Η διάβρωση αυτή είναι περισσότερο έντονη όσο περισσότερο ανομοιόμορφη είναι η δομή του κράματος. Ως περισσότερο ανθεκτικά κράματα αποδεικνύονται οι ανοξειδωτοι χάλυβες.

Η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαίωσης στο δρομέα υδροστροβίλου είναι:

$$H_{\theta} = H_B - H_{\Pi} - H_s > H_{\kappa\rho} \quad (5.65)$$

Όπου  $H_{\theta}$  είναι το καθαρό ύψος τοποθέτησης του υδροστροβίλου και διαμορφώνει την στατική πίεση κατά κύριο λόγο,

$H_B$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η οποία εξαρτάται από τη στάθμη της εγκατάστασης ως προς στάθμη της θάλασσας,

$H_{\Pi}$  η μέση στάθμη της διατομής εξόδου του δρομέα εάν πρόκειται για υδροστρόβιλο σε κατακόρυφη διάταξη ή η άνω στάθμη της διατομής εξόδου εάν ο υδροστρόβιλος είναι οριζόντιος ως προς τη στάθμη του κάτω ταμιευτήρα ή της διώρυγας απαγωγής,

$H_s = \frac{p_s}{\rho \cdot g}$  είναι η τάση ατμοποίησης εκφρασμένη σε [mΣΥ].

$H_{\kappa\rho}$  είναι το κρίσιμο ύψος σπηλαίωσης και χαρακτηρίζεται από τη λειτουργία του υδροστροβίλου.

Ο λόγος  $\sigma = \frac{H_{\theta}}{H} = \frac{H_B - H_{\Pi} - H_s}{H}$  όπου  $H$  το διαθέσιμο υδραυλικό ύψος ονομάζεται παράμετρος Thomas ή παράμετρος σπηλαίωσης της εγκατάστασης και αφορά αποκλειστικά την εγκατάσταση του υδροστροβίλου.

Επομένως η συνθήκη μη ανάπτυξης σπηλαίωση μπορεί να γραφεί και ως

$$\sigma > \sigma_{\kappa\rho} \quad (5.66)$$

όπου  $\sigma_{\kappa\rho}$  η παράμετρος σπηλαίωσης του υδροστροβίλου. Η τιμή αυτή προσδιορίζεται εργαστηριακά όμως, για καλά σχεδιασμένους υδροστροβίλους, θα πρέπει να συσχετίζεται με την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$  ή  $n_q$  δεδομένου ότι το  $H_{\kappa\rho}$  διαμορφώνεται από τα τρίγωνα ταχυτήτων.

Μια εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου σπηλαίωσης  $\sigma_{\kappa\rho}$  συναρτήσει της τιμής του ειδικού αριθμού στροφών  $n_s$ , μπορεί να γίνει από τις σχέσεις που ακολουθούν και οι οποίες έχουν προκύψει από την ανάλυση μεγάλου αριθμού κατασκευασμένων υδροστροβίλων μεγάλου μεγέθους.

$$\text{Francis} \quad \sigma_{\kappa\rho} = 7.54 \cdot 10^{-5} \cdot n_s^{1.41} \quad (5.67)$$

$$\text{Kaplan} \quad \sigma_{\kappa\rho} = 6.4 \cdot 10^{-5} \cdot n_s^{1.46} \quad (5.68)$$

Στην περίπτωση των μικρών ΥΗΕ, όπου οι υδροστρόβιλοι είναι ήδη μικροί, το βασικότερο κριτήριο στη σχεδιάσή τους δεν είναι το μέγεθός τους το οποίο γίνεται αναλογικά μεγαλύτερο από του αντίστοιχου μεγάλου υδροστροβίλου, οπότε έχουν μικρότερη τιμή του ειδικού αριθμού



στροφών οπότε βελτιώνεται ταυτόχρονα η συμπεριφορά τους ως προς τη σπηλαίωση. Για το λόγο αυτό οι τιμές της παραμέτρου σπηλαίωσης των μικρών υδροστροβίλων είναι κατά κανόνα μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από συσχετίσεις που ισχύουν για μεγάλους υδροστροβίλους

Για το ίδιο κανονικό σημείο λειτουργίας ενός υδροστροβίλου η επιλογή μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή του ειδικού αριθμού στροφών και σε μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου σπηλαίωσης. Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αντιστοιχεί σε υδροστροβίλο μικρότερου μεγέθους και κόστους. Όμως η αύξηση της παραμέτρου σπηλαίωσης απαιτεί την τοποθέτηση του στροβίλου σε χαμηλότερη στάθμη ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλέστερη έναντι σπηλαίωσης, γεγονός που απαιτεί αυξημένο κόστος εγκατάστασης και κατασκευής του ΥΗΣ.

Η φθορά που προκαλείται από ένα σε δρομέα διαμέτρου  $D$  λόγω σπηλαίωσης μετριέται από την ποσοστιαία απώλεια μάζας των πτερυγίων μετά από ένα μεγάλο διάστημα λειτουργίας, της τάξης των 5000-10000 ωρών. Το επιτρεπόμενο όριο απώλειας μάζας λόγω σπηλαίωσης καθορίζεται στη σύμβαση παραγγελίας του στροβίλου και μια συνήθης εκτίμηση είναι:  $max \left[ \frac{kg}{h} \right] = 1.22 \frac{D^2}{10000}$ .

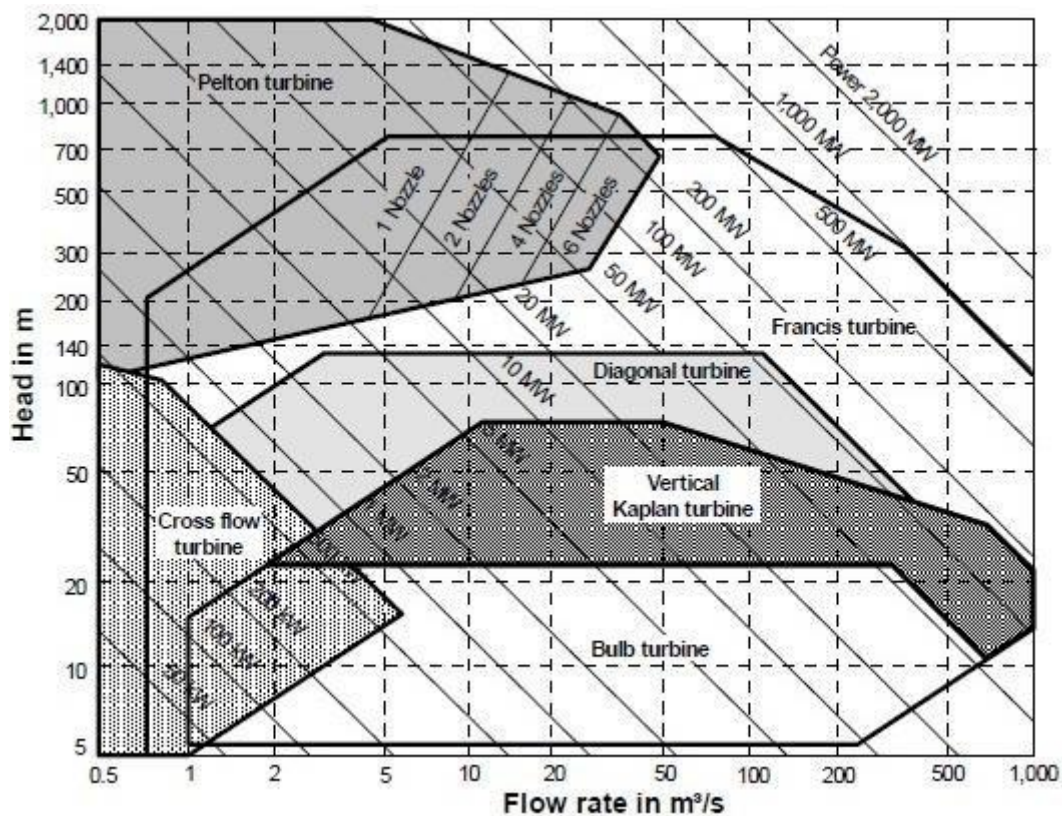
## 5.5 Τυποποίηση μικρών υδροστροβίλων

### 5.5.1 Γενικά

Το βασικό πλεονέκτημα της τυποποίησης έγκειται στη μείωση του κόστους καθώς τα έξοδα ανάπτυξης και δοκιμών μοιράζονται σε μια σειρά υδροστροβίλων. Παράλληλα, με την τυποποίηση επιτυγχάνεται η μείωση του χρόνου παράδοσης, καθώς αυτός γίνεται ουσιαστικά ίσος με χρόνο κατασκευής δεδομένου ότι τα κατασκευαστικά σχέδια και η διαδικασία παραγωγής προϋπάρχουν. Ο χρόνος παράδοσης είναι σημαντικός από οικονομικής πλευράς, καθώς δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο κατασκευής ενός ΥΗΣ, όπου στην περίπτωση μΥΗΣ είναι της τάξεως του 1-2 έτη. Επίσης με την τυποποίηση αυξάνεται η αξιοπιστία του εξοπλισμού καθώς υφίσταται συνεχείς βελτιώσεις και είναι πιο εύκολη η παραγγελία ανταλλακτικών. Βασικό μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί η κατ' ανάγκη επιλογή μεταξύ υδροστροβίλων εκ των οποίων πιθανόν κανένας να μην ανταποκρίνεται απόλυτα στα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Κάθε κατασκευαστής μικρών υδροστροβίλων έχει ένα πρόγραμμα παραγωγής με το οποίο καλύπτει μέρος ή ολόκληρη την περιοχή των μικρών υδροστροβίλων, από μερικά kW μέχρι 10-15 MW. Η σύγχρονη τάση των κατασκευαστών τυποποιημένων υδροστροβίλων είναι να προσφέρουν μικρή δυνατότητα τροποποιήσεων, κυρίως του δρομέα, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη προσαρμογή στα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου έργου, χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση του κόστους.

Η γενική αρχή ορίζει ότι όσο αυξάνεται η υδραυλική πτώση  $H$  επιλέγεται προοδευτικά υδροστροβίλος αξονικής ροής, στη συνέχεια Francis και τέλος Pelton για τις πολύ υψηλές τιμές του  $H$ .



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα επιλογής κατάλληλου τύπου υδροστροβίλου για τις ανάγκες του έργου (Παπαντώνης, 2008).

Οι διαφορές αναφέρονται στο πεδίο εφαρμογής του κάθε τύπου υδροστροβίλου όπως για παράδειγμα στους πολύ μικρούς υδροστροβίλους (ισχύος της τάξεως των 10-20[kW]) προτείνεται υδροστροβίλος τύπου Pelton για τιμές της υδραυλικής πτώσης των 20 [mΣΥ], ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα 5.7 η εφαρμογή τύπου Pelton συνιστάται για τιμές της υδραυλικής πτώσης των 100 [mΣΥ]. Ο λόγος της εφαρμογής υδροστροβίλων τύπου Pelton σε όλο και μικρότερες τιμές της υδραυλικής πτώσης όσο μειώνεται η ισχύς είναι οικονομικός: το κόστος της κατασκευής είναι μικρότερο, ο δρομέας είναι μικρής διαμέτρου και αντιστοιχεί σε αρκετά υψηλή ταχύτητα περιστροφής που επιτρέπει την κατ' ευθεία σύζευξη με ηλεκτρική γεννήτρια χωρίς την ανάγκη παρεμβολής πολλαπλασιαστή στροφών. Φυσικά η μείωση του κόστους γίνεται εις βάρος του βαθμού απόδοσης, ο οποίος για τα μεγέθη αυτά, είναι ήδη μικρός.

### 5.5.2 Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Francis

Οι υδροστροβίλοι τύπου Francis καλύπτουν το ευρύτερο πεδίο στο διάγραμμα παροχής-υδραυλικής πτώσεως και για το λόγο αυτό η εφαρμογή τους είναι συχνότερη. Προσφέρονται σε διάφορες διαμορφώσεις και διατάξεις που αναφέρονται κυρίως στη διεύθυνση του άξονα περιστροφής και στο τμήμα εισόδου.

Η διάταξη του άξονα μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη. Στην οριζόντια διάταξη ο δρομέας του υδροστροβίλου εδράζεται συνήθως σε δικά του έδρανα. Με τον τρόπο αυτόν η ηλεκτρική

γεννήτρια είναι τυποποιημένη και απλής κατασκευής, ενώ η άτρακτος της γεννήτριας συνδέεται με αυτή του υδροστροβίλου μέσω τυποποιημένου ελαστικού συνδέσμου. Στην περίπτωση κατακόρυφης διάταξης ο δρομέας του υδροστροβίλου είναι δυνατό να εδράζεται στα έδρανα της ηλεκτρικής γεννήτριας, η οποία όμως για το λόγο αυτόν είναι ειδικής σχεδίασης. Η απουσία ελαστικού συνδέσμου μεταξύ γεννήτριας και υδροστροβίλου έχει ως πλεονέκτημα το μικρότερο χώρο που καταλαμβάνει η μονάδα, όμως απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην εγκατάσταση της μονάδας και συγκεκριμένα στην ευθυγράμμισή της.

### 5.5.3 Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι αξονικής ροής

Η βασική ιδέα για τη μείωση του όγκου του υδροστροβίλου και επακόλουθα τη μείωση του κόστους είναι η διάταξη του τμήματος εισόδου, των ρυθμιστικών πτερυγίων, του δρομέα και του αγωγού απαγωγής κατά τον άξονα περιστροφής. Όμως με τη διάταξη αυτή προκύπτει πρόβλημα με τη σύνδεση της άτρακτος του δρομέα με την ηλεκτρική γεννήτρια. Αυτό αντιμετωπίζεται με διαφορετικούς τρόπους που χαρακτηρίζουν και τον τύπο του αξονικού υδροστροβίλου.

Η κλασική διαμόρφωση υδροστροβίλου τύπου Kaplan (σπειροειδές κέλυφος και ρυθμιστικά πτερύγια σε ακτινικό επίπεδο), σπάνια προσφέρεται για μικρή ισχύ, καθώς για την περιοχή αυτή έχουν αναπτυχθεί τύποι υδροστροβίλων αξονικής ροής μικρότερου όγκου και κόστους. Από τις συνηθέστερες διαμορφώσεις υδροστροβίλων αξονικής ροής μικρής ισχύος είναι ο σωληνωτός υδροστροβίλος και ο βολβοειδής, στις διάφορες παραλλαγές τους.

Οι σωληνωτοί υδροστροβίλοι είναι απλούστεροι στην κατασκευή, εγκατάσταση και συντήρηση από ένα αντίστοιχο βολβοειδή. Επιπλέον καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο και τα έργα πολιτικού μηχανικού για την κατασκευή του ΥΗΣ είναι απλούστερα. Όμως για κατασκευαστικούς λόγους δεν προσφέρονται για ισχύ μεγαλύτερη των 5-10[MW] (ανάλογα με την κατασκευάστρια εταιρεία). Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι σωληνωτοί υδροστροβίλοι έχουν ουσιαστικά εκτοπίσει τους βολβοειδείς σε περιοχές λειτουργίας που καλύπτονται από τους σωληνωτούς, δηλαδή για ισχύ μέχρι 7[MW] περίπου. Τόσο οι σωληνωτοί υδροστροβίλοι, όσο και οι βολβοειδείς κατασκευάζονται για διαθέσιμη υδραυλική πτώση μέχρι 20[mΣΥ] ή και μικρότερη ανάλογα με τον τύπο.

### 5.5.4 Τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton

Οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton είναι κατάλληλοι για μεγάλες τιμές υδραυλικής πτώσης  $H$ . Κατασκευάζονται τυποποιημένοι για πολύ μικρή ισχύ από 50[W], για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μεμονωμένων ορεινών κατοικιών, μέχρι 10-15[MW]. Οι υδροστροβίλοι Pelton πολύ μικρής ισχύος (μέχρι περίπου 70W για ένα ακροφύσιο) κατασκευάζονται συνήθως με το άξονα κατακόρυφο, καθώς η γεννήτρια, λόγω του μικρού μεγέθους της, εδράζεται στο κέλυφος του υδροστροβίλου και έχει κοινή άτρακτο με το δρομέα. Οι μεγαλύτεροι τυποποιημένοι υδροστροβίλοι Pelton είναι οριζοντίου άξονα, διάταξη που διευκολύνει την εγκατάσταση και τη συντήρηση, όμως δεν επιτρέπει τη διάταξη περισσοτέρων από δύο ακροφυσίων. Στην περίπτωση

περισσότερων των δύο ακροφυσίων θα πρέπει ο άξονας να είναι κατακόρυφος έτσι ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυσμενής επίδραση στις δέσμες από τα απόνερα του δρομέα, αν και στις μικρής ισχύος μονάδες Pelton η διάταξη περισσότερων των δύο ακροφυσίων είναι κατά κανόνα αντικοινομική (υψηλότερο κόστος, μεγαλύτερος συνολικά χώρος). Ο δρομέας κατασκευάζεται συνήθως ολόσωμος από ανοξείδωτο χάλυβα.

#### 5.5.5 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι cross-flow

Ο υδροστρόβιλος Cross-Flow χαρακτηρίζεται συχνά και ως Mitchell ή Banki (από τα ονόματα των μηχανικών που τους ανέπτυξαν). Χαρακτηρίζεται από το δρομέα μορφής τυμπάνου ο οποίος λειτουργεί σε 2 φάσεις: η πρώτη κατά την είσοδο του νερού στο πάνω σημείο του τυμπάνου και η δεύτερη κατά την έξοδο του νερού από το τύμπανο, στη χαμηλότερη περιοχή του τυμπάνου.

Η ροή στο δρομέα είναι ουσιαστικά ισόθλιπη (δηλαδή πρόκειται για υδροστρόβιλο δράσης) και διδιάστατη. Το νερό μετά την έξοδο από το δρομέα πέφτει, χάρη στη βαρύτητα, στη διάρυγα απαγωγής και για το λόγο αυτό ο υδροστρόβιλος Cross-Flow τοποθετείται πάντοτε υψηλότερα από τη στάθμη απαγωγής. Η τροφοδοσία του δρομέα και η ρύθμιση της παροχής γίνεται από ένα ορθογωνικής διατομής ακροφύσιο εισόδου μέσω μίας διάταξης, η οποία έχει συνήθως τη μορφή πεταλούδας.

Κατασκευάζεται πάντοτε με οριζόντια την άτρακτο, γεγονός που διευκολύνει τη μεταφορά ισχύος στην ηλεκτρική γεννήτρια, είτε με κατ' ευθεία σύμπλεξη είτε μέσω μετάδοσης με γραναζωτό κιβώτιο ή με ιμάντα. Όπως και στους άλλους τύπους υδροστρόβιλων η οριζόντια διάταξη διευκολύνει την εγκατάσταση και συντήρηση όμως αυξάνει τις απαιτούμενες διαστάσεις του ΥΗΣ.

Πρόκειται για υδροστρόβιλο απλής κατασκευής ο οποίος μπορεί να κατασκευασθεί από ένα μηχανουργείο χωρίς την ανάγκη ειδικών εργαλειομηχανών, και αυτό ακριβώς είναι το πλεονέκτημά του. Επίσης απλή είναι η έδραση της ατράκτου η οποία είναι αμφιέριστη και στην οποία δεν αναπτύσσονται αξονικές δυνάμεις (άρα δεν απαιτείται ισχυρό ωστικό έδρανο). Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης δεν ξεπερνά το 84%, όμως η καμπύλη είναι αρκετά επίπεδη, δίνοντας τη δυνατότητα καλής λειτουργίας και σε μερικά φορτία. Η καμπύλη του βαθμού απόδοσης μπορεί να γίνει ακόμη πιο επίπεδη εάν το τμήμα τροφοδοσίας είναι χωρισμένο σε δύο τομείς (στο 1/3 και 2/3 του πλάτους), δίνοντας τη δυνατότητα λειτουργίας του 1/3, 2/3 και 3/3 του πλάτους του δρομέα.

#### 5.5.6 Τυποποιημένοι υδροστρόβιλοι Turgo

Πρόκειται για υδροστρόβιλο αντίδρασης ο οποίος διαφέρει από τον Pelton κυρίως στο ότι η δέσμη προσπίπτει στον δρομέα υπό κλίση της τάξεως των 20° ως προς επίπεδο κάθετο προς τον άξονα του δρομέα (η γωνία αυτή είναι μηδενική σε περίπτωση του υδροστρόβιλου Pelton στον οποίο η

δέσμη βρίσκεται στο επίπεδο το κάθετο προς τον άξονα του δρομέα). Συνέπεια αυτής της επιλογής είναι ότι η ροή και κατά συνέπεια ο δρομέας δεν είναι συμμετρικοί.

Ο δρομέας φέρει πτερύγια που περιμετρικά συγκρατούνται από στεφάνη, ενώ το πλήθος τους (περίπου 20-22) είναι παρόμοιο με αυτό των σκαφιδίων υδροστροβίλου Pelton. Όπως και στους υδροστροβίλους Pelton ο υδροστρόβιλος μπορεί να εξοπλισθεί με 1 ή 2 ακροφύσια, όχι όμως περισσότερα λόγω κυρίως έλλειψης χώρου.

### 5.5.7 Αντίστροφη λειτουργία φυγόκεντρων αντλιών

Αντιστρέφοντας τη φορά της περωτής φυγόκεντρης αντλίας καθώς και τη φορά της ροής, τα τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και έξοδο της περωτής παραμένουν αμετάβλητα και μόνο η φορά των συνιστωσών αντιστρέφεται. Άρα, για την ίδια παροχή μέσω της περωτής, το θεωρητικό σημείο λειτουργίας της περωτής στο διάγραμμα  $(H, Q)$  παραμένει το ίδιο και για την κανονική και την αντίστροφη λειτουργία, που αντιστοιχεί στη λειτουργία υδροστροβίλου.

Όμως για τη λειτουργία αντλίας (δείκτης  $P$ ), το πραγματικό ύψος  $H$  είναι ίσο προς το θεωρητικό  $H_u$  της περωτής μείον τις υδραυλικές απώλειες  $\delta h_f$  της ροής στο εσωτερικό της μηχανής:  $H_P = H_u - \delta h_f$ , ενώ για την αντίστροφη λειτουργία ως στροβίλου (δείκτης  $T$ ) είναι  $H_T = H_u + \delta h_f$ . Αντίστοιχα για την παροχή, συμβολίζοντας με  $\delta Q$  την παροχή των ογκομετρικών απωλειών και με  $Q_u$  την παροχή μέσω της περωτής, για μεν την λειτουργία αντλίας θα είναι  $Q_P = Q_u - \delta Q$  ενώ για την αντίστροφη λειτουργία ως στροβίλου  $Q_T = Q_u + \delta Q$ . Άρα για όλα τα δυνατά αντίστροφα σημεία λειτουργίας θα είναι  $Q_T > Q_P$  και  $H_T > H_P$ . Η απόκλιση αυτή των σημείων λειτουργίας στα αντίστοιχα κανονικά σημεία εκφράζεται από τις αδιάστατες παραμέτρους  $K_H = \frac{H_T}{H_P}$  και  $K_Q = \frac{Q_T}{Q_P}$  όπου  $(H_P, Q_P)$  το κανονικό σημείο λειτουργίας ως αντλία και  $(H_T, Q_T)$  το αντίστοιχο ως στροβίλος για την ίδια απόλυτη τιμή της ταχύτητας περιστροφής.

Από πειραματικές δοκιμές αποδεικνύεται ότι οι τιμές  $K_H$  και  $K_Q$  σχετίζονται με το μέγεθος της μηχανής και την τιμή του ειδικού αριθμού στροφών. Η εξήγηση της επίδρασης του μεγέθους έγκειται στο ότι όσο μικρότερη είναι η μηχανή, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές των βαθμών απόδοσης, και άρα τόσο περισσότερο απομακρύνονται μεταξύ τους τα αντίστοιχα σημεία για λειτουργία ως αντλίας και ως στροβίλου. Η συσχέτιση με τον ειδικό αριθμό στροφών έγκειται στο ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του ειδικού αριθμού στροφών, τόσο μεγαλύτερες είναι οι υδραυλικές και ογκομετρικές απώλειες, άρα τόσο μεγαλύτερες οι τιμές των παραμέτρων.

Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης κατά την αντίστροφη λειτουργία συνήθως δεν υπολείπεται αυτής που αντιστοιχεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας ως αντλίας.

Για εφαρμογές μικρής ισχύος, έως 500[kW] έχει αποδειχθεί ότι η χρησιμοποίηση φυγόκεντρης αντλίας ως στροβίλου είναι πολύ αξιόπιστη και οικονομικά συμφέρουσα λύση δεδομένου ότι το κόστος της αντλίας είναι τουλάχιστον 5 φορές μικρότερο από αυτό του αντίστοιχου υδροστροβίλου Francis. Μειονέκτημα της λύσης αυτής, εκτός από τη χαμηλή τιμή του βαθμού απόδοσης, είναι ότι ελλείπει στεφάνης ρυθμιστικών πτερυγίων, ο μόνος τρόπος μεταβολής του

σημείου λειτουργίας και άρα της ισχύος εξόδου, είναι με την καταστροφή ενέργειας με βάνα στο αγωγό πτώσης, ανάντη της μηχανής.

## 5.6 Κιβώτιο ταχυτήτων

Όταν ο στρόβιλος και η γεννήτρια λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα περιστροφής και μπορούν να τοποθετηθούν έτσι ώστε οι άξονές τους να είναι συγγραμμικοί, η απευθείας σύζευξή τους είναι η σωστή επιλογή, καθώς δεν εμφανίζονται απώλειες ενώ η απαιτούμενη συντήρηση είναι ελάχιστη. Ο κατασκευαστής του στροβίλου συνιστά τη μέθοδο σύζευξης, είτε άκαμπτη είτε εύκαμπτη αν και συνήθως προτιμάται η εύκαμπτη, ώστε να μπορεί να απορροφήσει μικροδιαφορές στην ευθυγράμμιση.

Σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χαμηλού ύψους πτώσης, η γωνιακή ταχύτητα των στροβίλων είναι της τάξης των 400[rpm], απαιτώντας έτσι έναν πολλαπλασιαστή στροφών για να φτάσει τη γωνιακή ταχύτητα της τάξης των 750-1000[rpm] των συνηθισμένων γεννητριών. Στα μεγέθη των μΥΗΕ η λύση της χρήσης μιας τέτοιας διάταξης είναι οικονομικότερη από την παραγγελία μια εξατομικευμένης γεννήτριας, παρόλο που στις μέρες μας πολλοί κατασκευαστές φτιάχνουν γεννήτριες με χαμηλότερες στροφές για απευθείας ζεύξη.

Τα κιβώτια ταχυτήτων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής των γραναζιών τους χωρίζονται σε:

- Παράλληλου άξονα χρησιμοποιώντας γρανάζια με οδοντώσεις παράλληλες μεταξύ τους και με τον άξονα περιστροφής τους και οι οποίοι προσφέρονται για εγκαταστάσεις μέσης ισχύος.
- Τεμνόμενου άξονα χρησιμοποιώντας ελικοειδείς οδοντώσεις για να επιτευχθεί μετάδοση με γωνία των αξόνων μέχρι και 90° η χρήση των οποίων περιορίζεται σε εφαρμογές μικρής ισχύος,
- Μετάδοσης με ιμάντες όπου οι άξονες είναι μεν παράλληλοι, αλλά τα γρανάζια δεν έρχονται απευθείας σε επαφή μεταξύ τους, αλλά μέσω του ελαστικού ιμάντα και οι οποίες προσφέρονται επίσης για εφαρμογές μικρής ισχύος, ενώ πλεονεκτούν λόγω της ευκολότερης συντήρησης τους λόγω της προσβασιμότητας που παρέχουν.

Το κιβώτιο ταχυτήτων σχεδιάζεται με σκοπό να εξασφαλίσει ακόμη και στις πιο δυσμενείς συνθήκες, τη σωστή στοίχιση των επιμέρους στοιχείων. Κατασκευάζονται συνήθως από συγκολλητό σίδηρο υψηλής αντοχής ώστε να αντιστέκονται στη ροπή του στροβίλου και στην υδραυλική αξονική thrust δίχως εμφανή παραμόρφωση.

Απώλεια του συγχρονισμού, απόρριψη του πλήρους φορτίου ή κάθε άλλο ατύχημα στο σύστημα μπορεί να προκαλέσει κρίσιμες εντατικές καταστάσεις στα γρανάζια. Για να προστατεύονται τα γρανάζια από τέτοια φαινόμενα, θα πρέπει το κιβώτιο ταχυτήτων να περιλαμβάνει περιοριστή ροπής (torque limiter), ώστε να παύει η σύζευξη όταν αναπτύσσεται παράλογη δύναμη.

Για να εξασφαλίζεται η απαραίτητη αξιοπιστία, είναι σημαντική η σωστή λίπανση του συστήματος. Είναι σημαντικό η ποσότητα, η ποιότητα, ο όγκος, το ιξώδες και η θερμοκρασία του

λιπαντικού να ακολουθούν τις προδιαγραφές. Η εφαρμογή συστήματος διπλής λίπανσης με δύο αντλίες και δύο φίλτρα λαδιού συνήθως αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος.

Τα κιβώτια ταχυτήτων σχεδιάζονται σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές (AGMA 2001, B88 ή DIN 3990) εφαρμόζοντας πολύ συντηρητικά κριτήρια σχεδιασμού. Τα κριτήρια αυτά έρχονται σε αντίθεση με τη μείωση του κόστους, αλλά δεν μπορεί να υπάρχει εξοικονόμηση πόρων χωρίς τη λεπτομερή ανάλυση του φαινομένου της κόπωσης, τον προσεκτικό καθαρισμό της επιφάνειας των οδοντώσεων, και την ανακούφιση των τάσεων των συγκολλημένων στοιχείων, αφού αυτές οι ενέργειες αυξάνουν την αντοχή του κιβωτίου. Μεταλλουργικοί παράγοντες περιλαμβανομένου της γνώσης των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της σκλήρυνσης μέσω αζώτωσης, βορίωσης ή επαγωγικής βαφής είναι καίριοι στη βελτιστοποίηση των κιβωτίων ταχυτήτων.

Η απόδοση όμως του ΥΗΕ δεν εξαρτάται μόνο από την επιλογή του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά και από τη σύνδεσή του με τον κατάλληλο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

## 6 Έργα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού

### 6.1 Βασική δομή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού μικρού υδροηλεκτρικού σταθμού

Σε ένα ΥΗΕ η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική, ώστε να μεταφέρεται και να καταναλώνεται εύκολα. Η βασική διάταξη για τη μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρική είναι η ηλεκτρική γεννήτρια. Εκτός από τη γεννήτρια, ένας ΥΗΣ είναι εφοδιασμένος με επιπλέον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό όπως ο μετασχηματιστής ισχύος, οι ηλεκτρικοί πίνακες, ο εξοπλισμός σύνδεσης με το δίκτυο, οι αυτοματισμοί ασφάλειας, ελέγχου και χειρισμού της μονάδας, το σύστημα γείωσης και οι ιδιοκαταναλώσεις του ΥΗΣ.

Η επιλογή του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον τρόπο λειτουργίας της μονάδας, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη εάν η μονάδα τροφοδοτεί ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο, ή ένα ηλεκτρικό δίκτυο μικρής ισχύος (στο οποίο η ισχύς της μονάδας αποτελεί σημαντικό ποσοστό της ισχύος που καταναλώνεται) ή ένα αυτόνομο δίκτυο (δίκτυο το οποίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από το μικρό ΥΗΕ). Στις δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολος ο έλεγχος του συστήματος στις απότομες μεταβολές της απορροφούμενης ηλεκτρικής ισχύος και η διατήρηση σταθερής τάσης και συχνότητας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η λειτουργία υδροστροβίλων με μεταβλητές στροφές, ενώ η γεννήτρια τροφοδοτεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο σταθερής συχνότητας  $f$ . Για την επίτευξη μεταβλητών στροφών του υδροστροβίλου και τροφοδοσία του δικτύου με σταθερή συχνότητα η πλέον συνήθης διάταξη είναι αυτή που περιλαμβάνει γεννήτρια κατ' ευθεία συνδεδεμένη με τον υδροστρόβιλο. Η συχνότητα  $f'$  του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει η γεννήτρια είναι μεταβαλλόμενη και ουσιαστικά ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας (converter) τύπου AC-DC και DC-AC μέσω του οποίου το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC) συχνότητας  $f'$  μετατρέπεται σε συνεχές (DC) και το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται και πάλι σε εναλλασσόμενο συχνότητας σταθερής ίσης προς τη συχνότητα  $f$  του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού δικτύου. Η παρεμβολή του μετατροπέα παίζει το ρόλο ηλεκτρονικού κιβωτίου συνεχούς μεταβολής των στροφών.

Η τεχνολογία αυτή είναι ώριμη καθώς ο σχετικός εξοπλισμός των ηλεκτρονικών ισχύος είναι πλέον τυποποιημένος, υψηλού βαθμού απόδοσης και προσιτού κόστους, δεν παύει όμως να αντιστοιχεί σε μία αύξηση του κόστους της επένδυσης η οποία σε ειδικές μόνο περιπτώσεις είναι οικονομοτεχνικά αποδεκτή.



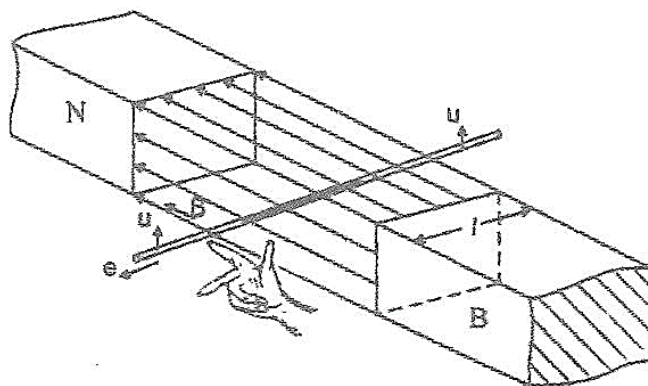
## 6.2 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά γεννητριών

### 6.2.1 Εισαγωγή

Ως ηλεκτρική γεννήτρια χαρακτηρίζεται η μηχανή η οποία μετατρέπει τη μηχανική ισχύ, δηλαδή τη ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο, σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών γεννητριών βασίζεται στο νόμο που ανακάλυψε ο Faraday σύμφωνα με τον οποίο σε κινούμενο αγωγό που τέμνει ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, ή σε σταθερό αγωγό ο οποίος τέμνει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή (Σχήμα 6.1). Το μέγεθος  $e$  [V] της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι ανάλογο της έντασης  $B$  του μαγνητικού πεδίου, του μήκους  $l$  και της ταχύτητας  $u$  του αγωγού κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο, είναι δηλαδή:

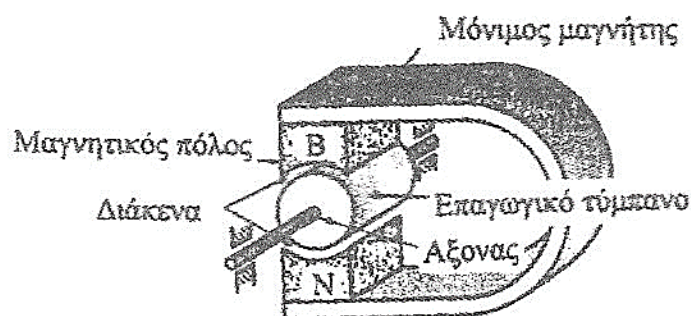
$$e = B \cdot l \cdot u \quad (6.1)$$

Η πολικότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης αλλάζει όταν αλλάξει πολικότητα του μαγνητικού πεδίου ή όταν αντιστραφεί η ταχύτητα κίνησης αγωγού.



Σχήμα 6.1: Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Παπαντώνης, 2008).

Μία στοιχειώδης γεννήτρια (Σχήμα 6.2) μπορεί να διαμορφωθεί από ένα μόνιμο πεταλοειδή μαγνήτη και ένα κυλινδρικό τύμπανο από σιδηρομαγνητικό υλικό που περιστρέφεται περί τον άξονά του μεταξύ των πόλων του μαγνήτη. Το κυλινδρικό τύμπανο μαζί με τους αγωγούς που φέρει ονομάζεται επαγωγικό τύμπανο. Η ένταση  $B$  του μαγνητικού πεδίου είναι μέγιστη στο μέσο των πόλων και μειώνεται προς την ουδέτερη ζώνη όπου και μηδενίζεται.

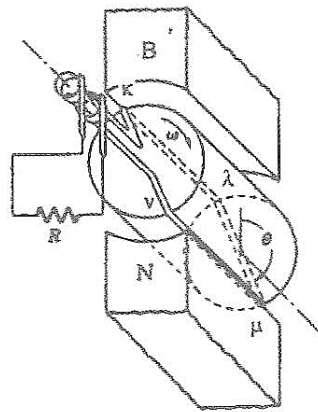


Σχήμα 6.2: Στοιχειώδης ηλεκτρική γεννήτρια (Παπαντώνης, 2008)

Δύο αγωγοί, οι  $\kappa$ - $\lambda$  και  $\nu$ - $\mu$ , τοποθετημένοι σε δύο αντιδιαμετρικές οδοντώσεις του τυμπάνου, οι οποίοι ενώνονται στο πίσω μέρος, σχηματίζουν μία σπείρα του τυλίγματος της μηχανής (Σχήμα 6.3). Καθώς το τύμπανο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , κάθε αγωγός της σπείρας τέμνει κάθετα τις μαγνητικές γραμμές του διακένου με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, η οποία σε κάθε χρονική στιγμή, είναι της ίδιας έντασης και στους δύο αγωγούς, αφού η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι η ίδια σε απόλυτη τιμή. Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις των δύο αγωγών  $\kappa$ - $\lambda$  και  $\mu$ - $\nu$  είναι αντίθετου φοράς και άρα αθροίζονται, οπότε η ηλεκτρεγερτική δύναμη της σπείρας, σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$e(t) = 2 \cdot B(t) \cdot l \cdot u \quad (6.2)$$

όπου  $u$  η περιφερειακή ταχύτητα της σπείρας  $u = \omega \cdot r$  και  $l$  το μήκος του τυμπάνου.



Σχήμα 6.3: Ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε σπείρα (Παπαντώνης, 2008)

Η χρονική μεταβολή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της σπείρας είναι αντίστοιχη της μεταβολής της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $B$  δεδομένου ότι τα  $u$  και  $l$  είναι σταθερά, δηλαδή πρόκειται για εναλλασσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Εάν τα άκρα της σπείρας συνδεθούν μέσω δακτυλιδιών και ψηκτρών μονωμένων μεταξύ τους και προς τον άξονα με ωμική αντίσταση  $R$ , η οποία αποτελεί το φορτίο, τότε θα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $i(t) = e(t)/R$ .

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μία στοιχειώδης γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, περιόδου  $T$  ίσης προς την περίοδο περιστροφής της σπείρας. Η γεννήτρια αυτή χαρακτηρίζεται ως σύγχρονη (ή εναλλακτήρας), καθώς η περίοδος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης έχει συχνότητα ίση (στην περίπτωση που εξετάστηκε) με την περίοδο μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου. Το περιστρεφόμενο στοιχείο της γεννήτριας, δηλαδή το τύμπανο, χαρακτηρίζεται ως δρομέας (ή στροφείο), ενώ το ακίνητο στοιχείο χαρακτηρίζεται ως στάτης.

Είναι γνωστό ότι σε αγωγό διαρρέομενο από ηλεκτρικό ρεύμα, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, ασκείται δύναμη. Στην περίπτωση στοιχειώδους γεννήτριας, η ασκούμενη δύναμη σε κάθε αγωγό της σπείρας είναι εφαπτομενική και αντίθετης φοράς από τη φορά

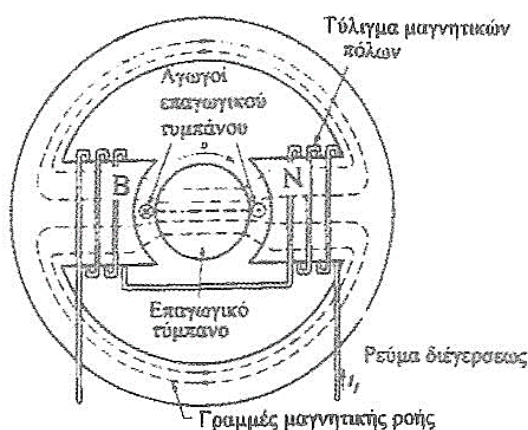
περιστροφής. Οι δυνάμεις στους δύο αγωγούς αντιστοιχούν στην ανάπτυξη ροπής  $M$  ανθιστάμενης στην περιστροφή του τυμπάνου. Το γινόμενο της ροπής  $M$  και της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  περιστροφής του τυμπάνου εκφράζει μηχανική ισχύ  $N=M\cdot\omega$  που πρέπει να εφαρμόζεται στον άξονα της στοιχειώδους γεννήτριας, ώστε το τύμπανο να περιστρέφεται με τη σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ .

Τα παραπάνω περιγράφουν την αρχή λειτουργίας της ηλεκτρικής γεννήτριας, δηλαδή της μετατροπής της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική.

Λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος, προκύπτει και αν ο ρότορας αντικατασταθεί με μαγνητικό πεδίο, για παράδειγμα σταθερού μαγνήτη, ο οποίος θα περιστρέφεται, και ο στάτης αντικατασταθεί με κλειστή σπείρα κ-λ-μ-ν, δηλαδή επαγωγικό τύμπανο. Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στα άκρα της σπείρας αναπτύσσεται στο στάτη, δηλαδή σε ακίνητο σύστημα, οπότε για την παραλαβή και μεταφορά της δεν είναι ανάγκη να παρεμβάλλονται δακτυλίδια και ψήκτρες.

Στις γεννήτριες παραγωγής το μαγνητικό πεδίο δεν δημιουργείται από μόνιμο μαγνήτη αλλά από μαγνητικούς πόλους, κάθε ένας από τους οποίους αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από λεπτά σιδερένια ελάσματα, ενώ το τύλιγμα αποτελείται από πολλές σπείρες από μονωμένο χάλκινο σύρμα που περιβάλλει τον πυρήνα. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη του αριθμού των σπειρών και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που τις διαρρέει. Εάν αντιστραφεί η φορά του ρεύματος των τυλιγμάτων, αντιστρέφεται και η πολικότητα των πόλων. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται διέγερση της μηχανής. Το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης και το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά από αυτό χαρακτηρίζεται ως ρεύμα διέγερσης. Στη γεννήτρια του σχήματος 6.4 το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται στο στάτη (εξωτερικοί πόλοι).

Οι γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος διακρίνονται σε σύγχρονες και ασύγχρονες. Στα μΥΗΕ χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι.



Σχήμα 6.4: Διέγερση διπολικής μηχανής (Παπαντώνης, 2008)

### 6.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζονται και εναλλακτήρες. Οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε αυτές με εξωτερικούς πόλους και σε αυτές με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους ως προς τη διάταξη των μαγνητικών πόλων που δημιουργούν τη διέγερση. Οι γεννήτριες με εξωτερικούς πόλους χρησιμοποιούνται για μικρές τιμές ισχύος και χαμηλές τάσεις ενώ οι γεννήτριες με εσωτερικούς πόλους, δηλαδή με τους μαγνητικούς πόλους στο δρομέα της μηχανής, χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες ισχύς και σχετικά χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (όπως στην περίπτωση των υδροηλεκτρικών έργων). Το επαγωγικό τύμπανο (στο στάτη στην περίπτωση γεννήτριας με εσωτερικούς πόλους) αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από ομοιόμορφους δίσκους από μαγνητικά ελάσματα πάχους συνήθως 0.5[mm] που έχουν επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι, ώστε να μειώνονται οι απώλειες από δινορεύματα. Οι δίσκοι φέρουν δόντια, τα οποία κατά τη συγκρότηση του πυρήνα ευθυγραμμίζονται, ώστε να σχηματίζουν αυλάκια παράλληλα προς τον άξονα της μηχανής. Στα αυλάκια αυτά τοποθετείται το τύλιγμα σε μονή ή διπλή στρώση ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής.

Οι μαγνητικοί πόλοι είναι τοποθετημένοι ακτινικά ως προς τον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα και στερεώνονται σε αυτόν. Τα τυλίγματα των πόλων τοποθετούνται πάνω στο πυρήνα και συνδέονται μεταξύ τους συνήθως εν σειρά έτσι ώστε να δημιουργούνται διαδοχικοί μαγνητικοί πόλοι με αντίθετη πολικότητα.

Η διέγερση της μηχανής επιτυγχάνεται με την τροφοδότηση των τυλιγμάτων των πόλων με συνεχές ρεύμα από τη διεγέρτρια, δηλαδή μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος η οποία συνήθως είναι συνδεδεμένη απευθείας στον άξονα της μηχανής από τον οποίο παίρνει κίνηση. Ως διεγέρτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος και στατικό σύστημα ανόρθωσης. Για τη σύνδεση της διεγέρτριας με τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων χρησιμοποιούνται δακτυλίδια και ψήκτρες στερεωμένα στον άξονα του δρομέα. Το ρεύμα διέγερσης έχει ένταση και τάση πολύ μικρότερη από αυτή του κυρίως ρεύματος που επάγεται στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου και από την άποψη αυτή η κατασκευή των γεννητριών με εσωτερικούς (περιστρεφόμενους πόλους) δεν παρουσιάζει μεγάλες δυσκολίες.

Όταν σε μια διπολική γεννήτρια ( $p=1$  το πλήθος των ζευγών των μαγνητικών πόλων) το επαγωγικό τύμπανο κάνει μια πλήρη περιστροφή (περίπτωση εξωτερικών πόλων), η ηλεκτρεγερτική δύναμη στους αγωγούς κάνει ένα πλήρη κύκλο, δηλαδή το αντίστοιχο διάνυσμα διαγράφει γωνία 360 ηλεκτρικών μοιρών. Εάν το τύμπανο φέρει  $p$  ζεύγη πόλων, ένας πλήρης κύκλος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ολοκληρώνεται σε  $\frac{360}{p}$  γεωμετρικές μοίρες, δηλαδή γωνία περιστροφής του τυμπάνου. Άρα μεταξύ της συχνότητας του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου ισχύει η εξίσωση:

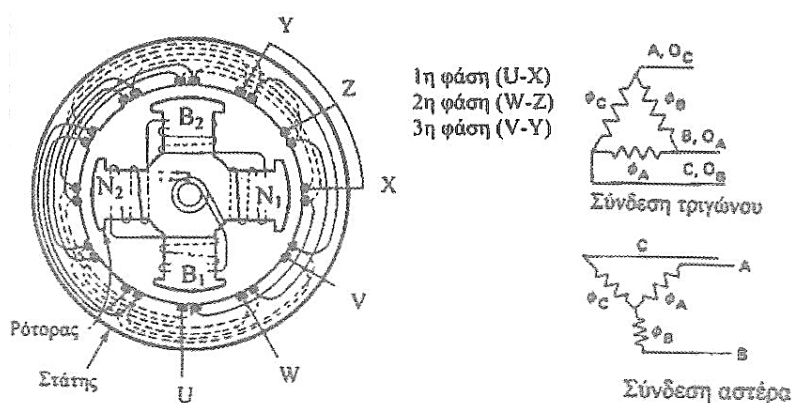
$$n_{\sigma} = \frac{60f}{p} \quad (6.3)$$

όπου  $n_\sigma$  [RPM] η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου της γεννήτριας και  $f$  [Hz] η συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Για  $f=50$  [Hz], όπως ισχύει στην Ευρώπη, η προηγούμενη γράφεται ως:

$$n_\sigma = \frac{3000}{p} \quad (6.4)$$

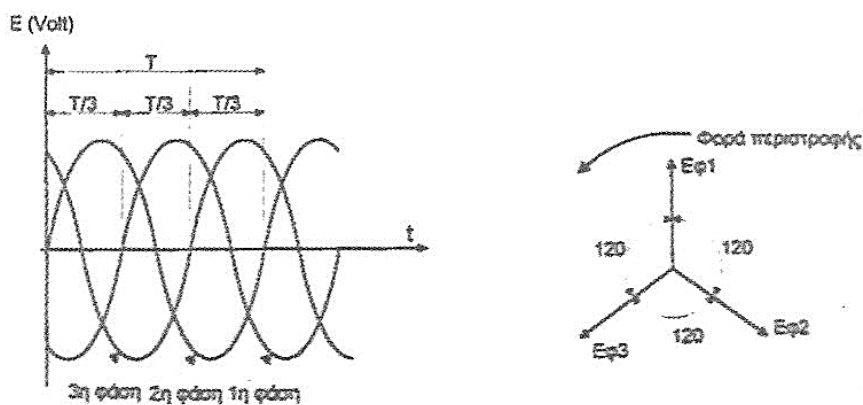
Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση γεννήτριας με εσωτερικούς πόλους στην οποία αντί να στρέφεται το επαγωγικό τύμπανο περιστρέφονται οι μαγνητικοί πόλοι και μαζί με αυτούς το μαγνητικό πεδίο. Από τα προηγούμενα συνάγεται ότι για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής συχνότητας η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα θα πρέπει να είναι σταθερή και ίση προς τη σύγχρονη που δίνεται από την Εξίσωση (6.4).

Οι τριφασικές γεννήτριες έχουν στο επαγωγικό τους τύμπανο τρία όμοια ανεξάρτητα μεταξύ τους τυλίγματα, τις τρεις φάσεις ομοιόμορφα κατανεμημένες ανά  $360/6=60^\circ$  (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Τετραπολική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια (Παπαντώνης, 2008)

Κάθε τυλίγμα έχει δύο άκρα και διακρίνονται τρεις αρχές, που συμβολίζονται ως U, V και W και τρία πέρατα που συμβολίζονται ως X, Y και Z. Επομένως, οι εναλλασσόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις τρεις φάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια συχνότητα και διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $360/3=120$  ηλεκτρικές μοίρες (Σχήμα 6.6). Η διαφορά αυτή χαρακτηρίζεται ως φασική απόκλιση.



Σχήμα 6.6: Ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις τριφασικής γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008)

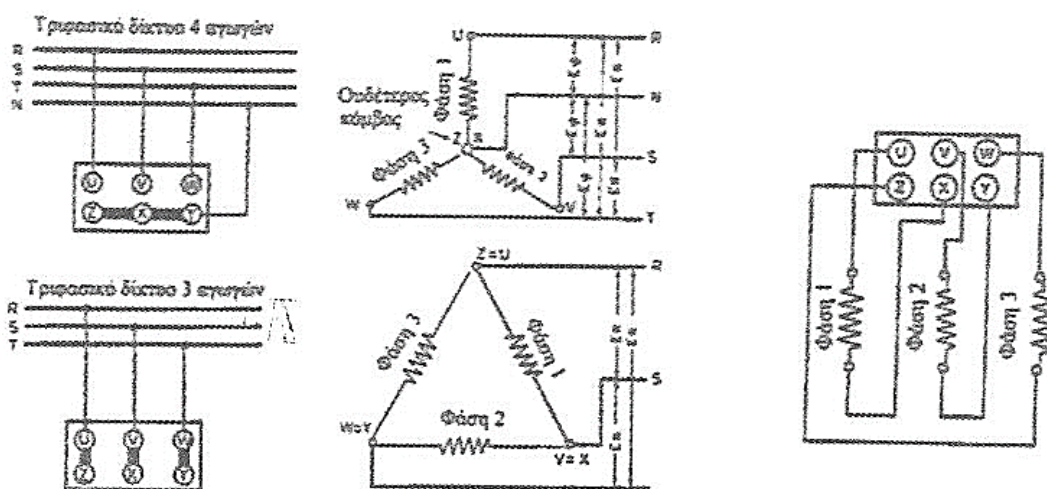
Στην πράξη τα τυλίγματα των τριών φάσεων συνδέονται μεταξύ τους στους ακροδέκτες της μηχανής με λάμες. Διακρίνονται δύο τρόποι σύνδεσης, σε αστέρα και σε τρίγωνο (Σχήμα 6.7). Στη σύνδεση αστέρα τα τρία πέρατα των τυλιγμάτων συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τον ουδέτερο κόμβο  $N$  της μηχανής, ο οποίος συνδέεται με το ουδέτερο αγωγό του δικτύου. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ του ουδέτερου κόμβου και των φάσεων ονομάζεται φασική  $E_{\phi}$ , ενώ η ηλεκτρεγερτική δύναμη μεταξύ των ακροδεκτών δύο φάσεων ονομάζεται πολική  $E_{\Pi}$ . Η σχέση που συνδέει τις δύο δυνάμεις προκύπτει από το διανυσματικό τους άθροισμα:

$$E_{\Pi} = \sqrt{3} \cdot E_{\phi} = 1.73 \cdot E_{\phi} \quad (6.5)$$

Μεταξύ των εντάσεων γραμμής  $I$  και φάσεως  $I_{\phi}$  ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

- για συνδεσμολογία αστέρα  $I = I_{\phi}$  και
- για συνδεσμολογία τριγώνου  $I = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} = 1.73 \cdot I_{\phi}$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο τυλίγμα κάθε φάσεως είναι ανάλογη του πλήθους  $p$  των ζευγών των πόλων, της ταχύτητας περιστροφής  $n$  του δρομέα, του αριθμού των αγωγών του τυλιγματος κάθε φάσεως και της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Για να μεταβληθεί η δύναμη αυτή υπάρχουν δύο δυνατότητες: είτε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής  $n$  του δρομέα, είτε μεταβολή της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Οι υπόλοιπες παράμετροι που υπεισέρχονται δεν έχουν δυνατότητα μεταβολής σε συγκεκριμένη μηχανή. Εφόσον η συχνότητα  $f$  πρέπει να είναι σταθερή και ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, προκύπτει ότι η ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (εξίσωση 6.3). Επομένως, η μόνη δυνατότητα ρύθμισης της ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι μέσω μεταβολής της μαγνητικής ροής των πόλων, δηλαδή μέσω της μεταβολής της έντασης του ρεύματος διέγερσης.

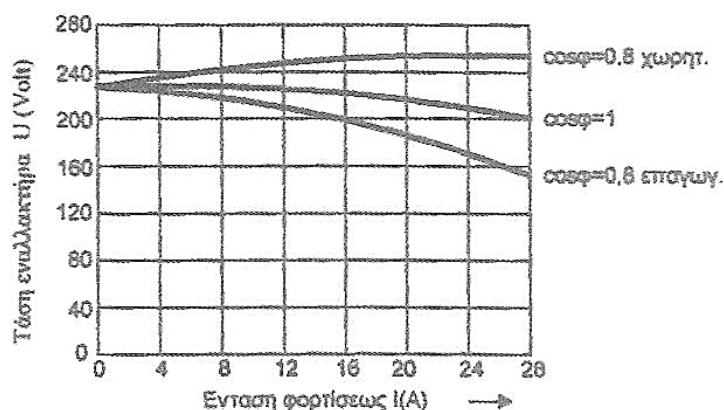


Σχήμα 6.7: Σύνδεση σε αστέρα (άνω) και σε τρίγωνο (κάτω) (Παπαντώνης, 2008)

Το ρεύμα διέγερσης παράγεται συνήθως από τη διεγέρτρια, δηλαδή τη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που παίρνει κίνηση από την άτρακτο της γεννήτριας. Η ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης γίνεται μέσω ρεοστάτη για μικρές μηχανές ή μέσω ρύθμισης της τάσεως της διεγέρτριας με τη βοήθεια ρυθμιστικής αντίστασης διεγέρσεως όπου και είναι απαραίτητη η ύπαρξη δακτυλιδιών και ψηκτρών. Η διέγερση μπορεί να γίνει και από άλλη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος το οποίο ανορθώνεται μέσω θυρίστορ. Στην περίπτωση αυτή η διεγέρτρια είναι σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος και παίρνει κίνηση από τον άξονα της κύριας γεννήτριας. Το ηλεκτρικό ρεύμα ανορθώνεται από σύστημα περιστρεφόμενο με τον άξονα και τροφοδοτεί με συνεχές ρεύμα τα τυλίγματα της διέγερσης, οπότε δεν απαιτείται πλέον η χρήση δακτυλιδιών και ψηκτρών.

Εάν η σύγχρονη γεννήτρια συνδεθεί με το φορτίο στρεφόμενη στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της και με σταθερή την ένταση διέγερσης, η πολική τάση  $U$  μεταξύ των ακροδεκτών της, δηλαδή η ηλεκτρεγερτική της δύναμη, εξαρτάται από την ένταση φορτίσεως  $I$  (ένταση ηλεκτρικού ρεύματος γραμμής) αλλά και από το συντελεστή ισχύος του φορτίου  $\cos\phi$ , δηλαδή τη γωνία μεταξύ του διανύσματος της τάσεως  $U$  και του διανύσματος της εντάσεως  $I$ . Στην περίπτωση τριφασικής γεννήτριας υποτίθεται ότι η φόρτιση είναι συμμετρική, δηλαδή και οι τρεις φάσεις έχουν την ίδια ένταση φορτίου.

Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ονομάζεται η καμπύλη μεταβολής της πολικής τάσεως συναρτήσει της έντασης φόρτισης  $I$  για σταθερή τιμή του συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ , σταθερή ένταση διέγερσης και τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται ενδεικτικά η χαρακτηριστική φορτίου σύγχρονης γεννήτριας για ωμική φόρτιση ( $\cos\phi=1$ ), επαγωγική φόρτιση με  $\cos\phi=0.8$  και χωρητική με  $\cos\phi=0.8$ . Στην περίπτωση ωμικής και επαγωγικής φόρτισης η τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η ένταση φόρτισης, ενώ στη χωρητική φόρτιση η τάση αυξάνεται. Η μεταβολή της τάσεως με τη μεταβολή του φορτίου οφείλεται στην ωμική πτώση τάσεως στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου, στην παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου των πόλων της μηχανής και σε φαινόμενα αυτεπαγωγής. Η τάση χωρίς φορτίο ( $I=0$ ) αντιστοιχεί σε όλες περιπτώσεις στην αρχική τιμή  $U_0$ .



Σχήμα 6.8: Χαρακτηριστικές φορτίου σύγχρονης γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008)

Από το σχήμα 6.8 φαίνεται ότι εάν η γεννήτρια τροφοδοτεί ωμικό ή επαγωγικό φορτίο, για να διατηρείται σταθερή η τάση  $U$  πρέπει να αυξάνεται η διέγερση (η γεννήτρια υπερδιεγείρεται) όσο

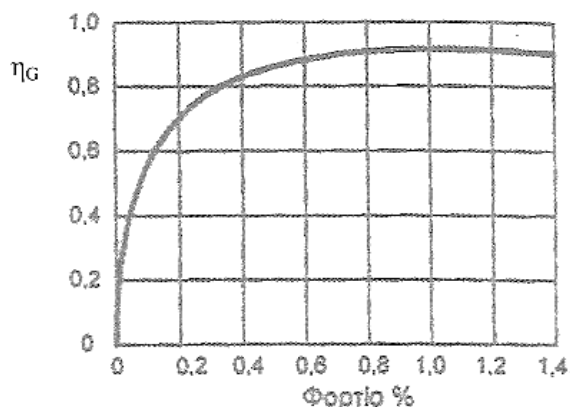
αυξάνεται η ένταση φόρτισης. Στην περίπτωση χωρητικής φόρτισης πρέπει να υποδιεγείρεται, δηλαδή να μειώνεται η ένταση διέγερσης. Για την ίδια ένταση φόρτισης η υπερδιέγερση ή υποδιέγερση είναι τόσο πιο μεγάλες, όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi$ . Για πολύ μικρές τιμές του  $\cos\varphi$  είναι πιθανό να μην υπάρχει περιθώριο αύξησης του ρεύματος διέγερσης οπότε δεν είναι και δυνατό να διατηρηθεί η ονομαστική τάση  $U_N$  του δικτύου στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Ο ρυθμιστής τάσεως προσαρμόζει αυτόματα την ένταση διέγερσης ώστε να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής και η τάση του δικτύου. Η φόρτιση της γεννήτριας θα πρέπει να είναι κατά το δυνατό συμμετρική, δηλαδή οι εντάσεις των τριών φάσεων να είναι κατά το δυνατόν ίσες μεταξύ τους και να διαφέρουν κατά  $120^\circ$  ως κυματομορφές, γεγονός που επιτυγχάνεται με την κατάλληλη κατανομή του φορτίου. Η συνθήκη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση τροφοδοσίας ανεξάρτητου αυτόνομου δικτύου.

Κατά τη λειτουργία μίας γεννήτριας, όπως και κάθε άλλης μηχανής, αναπτύσσονται απώλειες που διακρίνονται σε (α) ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου και τους μαγνητικούς πόλους, (β) σε μηχανικές απώλειες και (γ) σε απώλειες του πυρήνα. Οι ωμικές απώλειες αυξάνονται παραβολικά με την αύξηση του φορτίου. Οι μηχανικές απώλειες αφορούν τις απώλειες των εδράνων και τις απώλειες ανεμισμού, δηλαδή της ενέργειας που απορροφάται από τον αέρα που συμπαρασύρεται κατά την περιστροφή του δρομέα. Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορεύματα που αναπτύσσονται στον πυρήνα και τα μεταλλικά μέρη της μηχανής. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα σε πρώτη προσέγγιση θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου.

Συμβολίζοντας με  $\delta N$  το άθροισμα των προηγούμενων απωλειών σε ένα σημείο λειτουργίας της γεννήτριας, ως ολικός βαθμός απόδοσης  $\eta_G$  της γεννήτριας ορίζεται ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος  $N_e$  προς τη μηχανική ισχύ που προσδίδεται στην άτρακτο της μηχανής και η οποία είναι ίση προς  $N=M\cdot\omega$ , όπου με  $M$  συμβολίζεται η ανθιστάμενη ροπή. Εφόσον για τριφασικό δίκτυο η ηλεκτρική ισχύς προκύπτει ίση προς  $N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$  ο ολικός βαθμός απόδοσης προκύπτει ως:

$$\eta_G = \frac{N_e}{N} = \frac{N - \delta N}{N} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi}{M \cdot \omega} \quad (6.6)$$

Το σχήμα 6.9 δίνει μία ενδεικτική καμπύλη του βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει του φορτίου της.



Σχήμα 6.9: Ενδεικτική καμπύλη βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας (Παπαντώνης, 2008)



Ο ολικός βαθμός απόδοσης των σύγχρονων γεννητριών αυξάνεται με το μέγεθος. Ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονων γεννητριών  $\eta_{GM}$  (%) συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος  $N_G$  [kVA] και για πλήθος ζευγών πόλων  $p > 5$  ( $n < 600$  RPM) δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονων γεννητριών  $\eta_{GM}$  (%) συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος (Παπαντώνης, 2008)

$N_G$ [kVA]	500	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000
$\eta_{GM}$ [%]	0.965	0.9664	0.9702	0.9724	0.974	0.975	0.9775	0.9786

Οι διάφορες απώλειες της μηχανής μετατρέπονται σε θερμότητα με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των διαφόρων μερών της. Τελικά η θερμοκρασία ισορροπεί σε μία τιμή στην οποία η απαγωγή θερμότητας προς τον περιβάλλοντα χώρο γίνεται ίση με την προσδιδόμενη από τις απώλειες. Η απαγωγή της θερμότητας γίνεται μέσω βεβιασμένου αερισμού από ανεμιστήρα που παίρνει συνήθως κίνηση από την άτρακτο της μηχανής, ώστε να μην τίθενται σε κίνδυνο οι μονώσεις και τα λοιπά στοιχεία της μηχανής.

Στις γεννήτριες των μικρών ΥΗΕ (εκτός και εάν αυτά είναι πολύ μικρής ισχύος) ο ζεστός αέρας από την έξοδο της μηχανής οδηγείται στον εξωτερικό χώρο μέσω αεραγωγού για να μην αυξηθεί σταδιακά η θερμοκρασία στο εσωτερικό του ΥΗΣ. Για τον υπολογισμό της διατομής του αεραγωγού του αέρα ψύξης λαμβάνεται υπόψη ότι η μέση ταχύτητα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη 2.5 [m/s]. Για τον ίδιο σκοπό θα πρέπει στο κτίριο του ΥΗΣ να προβλέπονται στόμια εισόδου του αέρα από το περιβάλλον, κατάλληλων διαστάσεων. Ο αεραγωγός στο εξωτερικό του στόμιο πρέπει να φέρει περσίδες που κλείνουν αυτόματα ή περιστρεφόμενη θυρίδα (damper) έτσι ώστε να αποτρέπεται η είσοδος μικρών ζώων ή πουλιών καθώς επίσης σκόνης και υγρασίας. Το μειονέκτημα αυτού του ανοικτού κυκλώματος ψύξεως είναι ότι η σκόνη που συμπαρασύρεται από την ατμόσφαιρα επικάθεται σταδιακά εσωτερικά τοιχώματα της ηλεκτρικής μηχανής. Για να αποφευχθεί αυτό, στις γεννήτριες μεγάλης ισχύος προβλέπεται κλειστό κύκλωμα υδρογόνου το οποίο περιλαμβάνει ψυγείο και εναλλάκτη θερμότητας.

Σχετικά με την εκκίνηση της σύγχρονης γεννήτριας, γίνεται εν κενώ, δηλαδή αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο. Αρχικά τίθεται σε κίνηση η κινητήρια μηχανή, ο υδροστρόβιλος στην περίπτωση των μικρών ΥΗΕ, μέχρι να επιτευχθεί η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Το τύλιγμα της διέγερσης δεν τροφοδοτείται και έτσι δεν αναπτύσσεται τάση στους ακροδέκτες της μηχανής. Μετά την επίτευξη της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής, η διέγερση ρυθμίζεται ώστε να παράγει τάση και να τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης μέχρι να επιτευχθεί η ονομαστική τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας και να ολοκληρωθεί η διαδικασία παραλληλισμού. Στην συνέχεια κλείνει ο διακόπτης που συνδέει τη γεννήτρια με το δίκτυο, οπότε αρχίζει η γεννήτρια να φορτίζεται. Η ένταση διέγερσης ρυθμίζεται συνεχώς ώστε η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας να διατηρείται ίση προς την ονομαστική παρά τις μεταβολές του φορτίου.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η διαδικασία του παραλληλισμού (συγχρονισμού στις σύγχρονες γεννήτριες), δηλαδή η εξίσωση των στιγμιαίων τιμών των τάσεων της γεννήτριας και του δικτύου

(ή της άλλης γεννήτριας), η οποία πρέπει να διατηρηθεί και μετά το κλείσιμο του διακόπτη παραλληλισμού. Συγκεκριμένα, πρέπει να εξασφαλισθεί η ισότητα των τάσεων, η ισότητα της συχνότητας, η ίδια διαδοχή και ο μηδενισμός της φασικής απόκλισης μεταξύ των τάσεων των αντιστοίχων φάσεων. Εάν δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία παραλληλισμού όταν κλείσει ο διακόπτης σύνδεσης, υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης μεγάλων εντάσεων ηλεκτρικού ρεύματος. Η μεταβολή της τάσης της γεννήτριας εξαρτάται και από την ταχύτητα περιστροφής δεδομένου ότι επηρεάζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας και την τάση της διεγέρτριας, άρα και την ένταση διέγερσης.

Η κράτηση της γεννήτριας επιτυγχάνεται ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία, δηλαδή αποφορτίζεται η γεννήτρια με σταδιακό άνοιγμα των διακοπών των φορτίων μέχρι το μηδενισμό τους, ενώ παράλληλα διατηρείται σταθερή η τάση της γεννήτριας. Στη συνέχεια ανοίγει ο διακόπτης σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο και μηδενίζεται η τάση της. Το πλήρες κλείσιμο των ρυθμιστικών περυγίων και ο μηδενισμός της διακινούμενης παροχής μπορούν να σταματήσουν τη λειτουργία της κινητήριας μηχανή, δηλαδή του υδροστροβίλου. Μετά το μηδενισμό της παροχής και της πρόσδοσης ενέργειας στο σύστημα, τα στρεφόμενα τμήματα της μονάδας, δηλαδή ο δρομέας του υδροστροβίλου, ο δρομέας της γεννήτριας και η άτρακτος, συνεχίζουν να περιστρέφονται με επιβραδυνόμενο ρυθμό λόγω μηχανικών απωλειών. Επειδή οι μηχανικές απώλειες είναι αναλογικά πολύ μικρές (υψηλοί μηχανικοί βαθμοί απόδοσης) η επιβράδυνση των στρεφόμενων μαζών είναι πολύ μικρή. Με σκοπό την αποφυγή της εν κενώ περιστροφής της μονάδας επί μεγάλο χρονικό διάστημα, το σύστημα εξοπλίζεται με μηχανικό φρένο, το οποίο επενεργεί αυτόματα μετά το πλήρες κλείσιμο των ρυθμιστικών περυγίων.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα περιστροφής σχετίζεται με την αντοχή της γεννήτριας στις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται στο δρομέα και τα περιστρεφόμενα πηνία. Στα ΥΗΕ η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του συστήματος (άρα και της γεννήτριας) μπορεί να είναι η ταχύτητα φυγής του υδροστροβίλου (τάξεως του 1.7 έως 2.2 της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής). Επομένως, η γεννήτρια θα πρέπει να είναι ικανή να λειτουργήσει σε αυτή τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής επί μικρό χρονικό διάστημα, δηλαδή να είναι περισσότερο στιβαρή από τις τυποποιημένες γεννήτριες γενικής χρήσεως. Η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής μπορεί να περιορισθεί στο 1.6 της ονομαστικής εάν παρέμβει έγκαιρα ο μηχανισμός ρύθμισης του υδροστροβίλου με κλείσιμο των ρυθμιστικών περυγίων.

### 6.2.3 Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι ασύγχρονες γεννήτριες, όπως και οι ασύγχρονοι κινητήρες, έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως απλότητα κατασκευής και συντήρησης λόγω έλλειψης δακτυλιδιών και ψηκτρών (τουλάχιστον στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα τύπου κλωβού). Όμως τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους δεν είναι ίδια με αυτά των σύγχρονων γεννητριών. Οι ασύγχρονες γεννήτριες εξοπλίζουν τα μικρά ΥΗΕ όταν η ονομαστική ισχύς των μονάδων είναι μικρότερη του 1 MW περίπου. Η χρήση των ασύγχρονων γεννητριών δεν ήταν πολύ διαδεδομένη πριν λίγες δεκαετίες. Τα τελευταία χρόνια όμως, κυρίως με την ανάπτυξη της χρήσης ανεμογεννητριών ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ασύγχρονων γεννητριών είναι ότι δεν μπορούν να παράγουν άεργη ισχύ. Αντίθετα καταναλώνουν άεργη ισχύ, γι' αυτό για τη λειτουργία τους απαιτείται μια εξωτερική πηγή άεργης ισχύος μόνιμα συνδεδεμένης. Αυτή η εξωτερική πηγή είναι εκείνη που θα ρυθμίσει και τη τάση στην έξοδο της γεννήτριας καθώς λόγω έλλειψης ρεύματος διέγερσης αυτό είναι αδύνατο να το καταφέρει από μόνη της η γεννήτρια. Συνεπώς οι εξωτερικοί πυκνωτές είναι αυτοί που θα παράγουν το ρεύμα μαγνήτισης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη γεννήτρια. Επίσης, ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που παρατηρείται είναι το ότι η τάση στα άκρα της έχει άμεση και μεγάλη εξάρτηση από το φορτίο και όταν αυτό έχει ισχυρό επαγωγικό χαρακτήρα μπορεί να έχουμε μεγάλη πτώση στην τάση της γεννήτριας. Αυτός είναι και ο λόγος της δυσκολίας εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα από ασύγχρονη γεννήτρια. Γενικά η ασύγχρονη γεννήτρια επιδεινώνει το συντελεστή ισχύος του δικτύου και προκαλεί μεγάλες πτώσεις τάσης.

Παρόλα τα μειονεκτήματα της η ασύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Αυτό είναι η απλότητα της, η οποία έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης και ότι δεν χρειάζεται να κινείται συνεχώς με την ίδια ταχύτητα, κάτι που φανερά ευνοεί τη λειτουργία των ανεμογεννητριών και των μΥΗΕ. Έτσι όσο μεγαλύτερη ροπή εφαρμόζεται στον άξονα (δρομέα) τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς στην έξοδο.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε δύο είδη, με τις ίδιες όμως αρχές λειτουργίας:

α) γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage induction generator)

β) γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction generator)

Υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία ασύγχρονης γεννήτριας, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (double fed induction generator). Αυτή κατασκευαστικά δε διαφέρει πολύ από τη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, αλλά η ανάλυση της λειτουργίας της παρουσιάζει ενδιαφέρον.

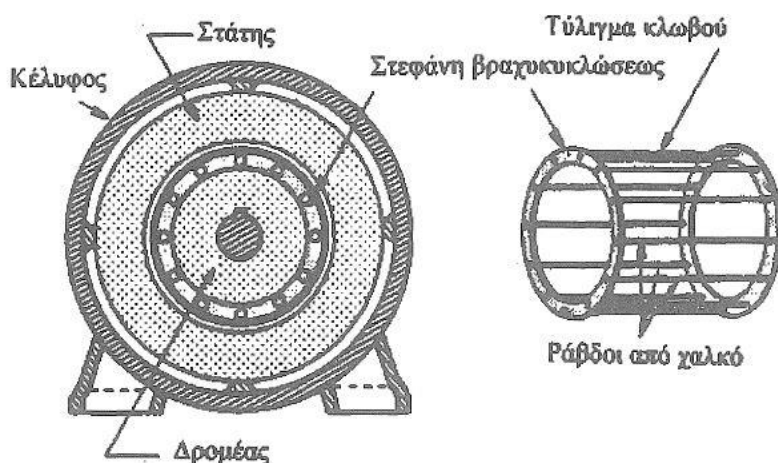
Στη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο κλωβός αποτελείται από μπάρες χαλκού λίγο μεγαλύτερες σε μήκος από το δρομέα που τοποθετούνται μέσα στις εγκοπές του κλωβού, ενώ οι άκρες των μπαρών συγκολλούνται σε δυο χάλκινους ακροδακτύλιους, έτσι ώστε όλες οι μπάρες να είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Η όλη κατασκευή (μπάρες και ακροδακτύλιοι) θυμίζει κλειστό κλουβί, εκ του οποίου προήλθε και η ονομασία βραχυκυκλωμένος κλωβός.

Στη μηχανή επαγωγής ο στάτης είναι ουσιαστικά ο ίδιος με αυτόν της σύγχρονης μηχανής (με εσωτερικούς πόλους), δηλαδή ο πυρήνας του στάτη τοποθετείται μέσα στο κέλυφος και αποτελείται από λεπτά μαγνητικά ελάσματα με οδοντώσεις. Στα αυλάκια που σχηματίζονται τοποθετείται το τριφασικό τύλιγμα, τα έξι άκρα του οποίου καταλήγουν στους ακροδέκτες της μηχανής έτσι ώστε οι τρεις φάσεις να μπορούν να συνδεθούν σε διάταξη αστέρα ή τριγώνου.

Ο δρομέας των μηχανών επαγωγής φέρει πυρήνα στερεωμένο στον άξονα, έχει τη μορφή κυλινδρικού τυμπάνου και αποτελείται από λεπτά μαγνητικά ελάσματα (ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από δινορεύματα) με οδοντώσεις, ώστε να σχηματίζονται αυλάκια κατά τις γενέτειρες του κυλίνδρου. Μέσα στα αυλάκια τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο χωρίς μόνωση και συγκολλούνται, ώστε να σχηματίζεται ένας κλωβός (Σχήμα 6.10). Οι μηχανές επαγωγής τύπου κλωβού δε φέρουν ψήκτρες εκτός από περιπτώσεις που το τύλιγμα του δρομέα των μηχανών επαγωγής είναι όμοιο με αυτό του στάτη, δηλαδή τριφασικό συμμετρικό συνδεδεμένο σε αστέρα, οπότε η μηχανή φέρει 3 δακτυλίδια και ψήκτρες στον άξονα.

Η μηχανή επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γενικευμένος μετασχηματιστής στον οποίο το μαγνητικό πεδίο του στάτη επάγεται στο δρομέα μέσω του διακένου αέρα (το οποίο λειτουργεί ως πυρήνας) μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων. Όταν το τύλιγμα του στάτη συνδέεται με συμμετρική τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, αναπτύσσεται στο διάκενο μαγνητικό πεδίο περιστρεφόμενο με σύγχρονη ταχύτητα και φορά περιστροφής που καθορίζεται από τη διαδοχή των φάσεων. Όταν οι αγωγοί του κλωβού βρεθούν σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, θα αναπτυχθεί στα άκρα τους ηλεκτρεγερτική δύναμη και ρεύμα αντίθετης φοράς σε δύο αντιδιαμετρικούς αγωγούς.

Όταν η ταχύτητα περιστροφής  $n$  του δρομέα (κατά φορά του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου) είναι μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$  περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος αντιστοιχεί στην ανάπτυξη κινητήριας ροπής και η μηχανή λειτουργεί ως επαγωγικός κινητήρας. Στην περίπτωση όπου η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα γίνει ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη ως προς τους αγωγούς του δρομέα είναι μηδενική και δεν αναπτύσσεται σε αυτούς ηλεκτρεγερτική δύναμη, ηλεκτρικό ρεύμα και άρα ροπή. Στην περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα γίνει μεγαλύτερη από σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη ως προς τους αγωγούς του δρομέα είναι αρνητική, η φορά της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, του ηλεκτρικού ρεύματος και της αναπτυσσόμενης ροπής αντιστρέφεται και η λειτουργία της μηχανής αντιστοιχεί σε γεννήτρια. Μια ασύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί σε υπερσύγχρονες στροφές και στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, η ταχύτητα περιστροφής της δεν είναι μεγαλύτερη του 5% της σύγχρονης ταχύτητας.



Σχήμα 6.10: Βραχυκυκλωμένος δρομέας τύπου κλωβού (Παπαντώνης, 2008)

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη  $n_s$ , δηλαδή της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής, χαρακτηρίζεται από την τιμή του συντελεστή ολίσθησης  $s$  ο οποίος ορίζεται ως:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (6.7)$$

και ο οποίος έχει θετικές τιμές για λειτουργία ως κινητήρα και αρνητικές για λειτουργία ως γεννήτριας επαγωγής. Για  $s=0$  είναι  $n=n_s$  και ο δρομέας περιστρέφεται χωρίς να αναπτύσσεται σε αυτόν ροπή, δηλαδή αντιστοιχεί σε λειτουργία χωρίς φορτίο.

Προκύπτει ποιοτικά ότι η λειτουργία μίας ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής για σταθερή τάση στους ακροδέκτες θα πρέπει να είναι σχεδόν συμμετρική, τουλάχιστον στην περιοχή μικρών τιμών του συντελεστή ολίσθησης  $s$  και με αντιστρεφόμενα τα πρόσημα της ροπής, θα αλλάζει η λειτουργία από κινητήρα σε γεννήτρια.

Για μικρές τιμές του συντελεστή ολίσθησης, η σχέση μεταξύ ολίσθησης και ροπής είναι σχεδόν γραμμική. Καθώς αυξάνει η ολίσθηση (σε απόλυτη τιμή) αυξάνεται η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δρομέα και κατά συνέπεια το ρεύμα που το διαρρέει. Όμως παράλληλα αυξάνεται η επαγωγική και η σύνθετη αντίσταση του δρομέα λόγω της αύξησης της επαγωγής σκεδάσεως με αποτέλεσμα, πέραν μίας τιμής της ολίσθησης, να μην είναι πλέον θετική η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και η ροπή που αναπτύσσεται σε αυτόν. Η χρήσιμη και ευσταθής περιοχή λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής περιορίζεται μεταξύ της μηδενικής ροπής (σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής) και της μέγιστης τιμής της ροπής (σε απόλυτη τιμή).

Όσο η τιμή του συντελεστή ολίσθησης αυξάνεται (σε απόλυτη τιμή), αυξάνεται και η διαφορά ταχύτητας μεταξύ περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη και των αγωγών του δρομέα με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος που διαρρέει το δρομέα και του μαγνητικού πεδίου που αυτό επάγει. Κατά συνέπεια αυξάνεται η επαγωγική αντίσταση τόσο στα τυλίγματα του στάτη, όσο και στο δρομέα, με συνέπεια την ταχύτερη μείωση έντασης του ρεύματος, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Μια μηχανή επαγωγής απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται (τη συνιστώσα του ρεύματος που δεν είναι συγγραμμική με την τάση) για τις ανάγκες μαγνήτισης. Η ανάγκη αυτή αποτελεί και ένα σημαντικό μειονέκτημα των ασύγχρονων γεννητριών το οποίο μπορεί να διορθωθεί με την παράλληλη τοποθέτηση συστοιχίας πυκνωτών (με τη χωρητική φόρτιση που επιβάλλουν, αυξάνουν την τιμή του συντελεστή ισχύος). Επομένως, για να λειτουργήσει μία ασύγχρονη γεννήτρια πρέπει να συνδεθεί σε ένα δίκτυο, το οποίο δεν είναι αυτόνομο (δηλαδή δεν τροφοδοτείται μόνο από συγκεκριμένη γεννήτρια) έτσι, ώστε να απορροφήσει την άεργο ισχύ. Η κατανάλωση άεργου ισχύος τιμολογείται τις περισσότερες φορές από την εταιρεία του διασυνδεδεμένου δικτύου (πχ. του ΔΕΔΔΗΕ) η οποία την παρέχει ή επιβάλλεται ελάχιστη τιμή του συντελεστή ισχύος ώστε να επιτραπεί η σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η μεταβολή της ροπής συναρτήσεται της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, δηλαδή του συντελεστή ολίσθησης, έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία των μηχανών επαγωγής σε όχι απόλυτα σταθερή ταχύτητα περιστροφής, καθώς μεταβάλλεται το φορτίο τους.

Κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική (ή το ανάποδο) αναπτύσσονται απώλειες, οι οποίες διακρίνονται σε μηχανικές (απώλειες εδράνων και αερισμού), απώλειες σιδήρου (δινορευμάτων) και απώλειες χαλκού (απώλειες από τις ωμικές αντιστάσεις στα τυλίγματα της μηχανής). Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες σιδήρου πολύ μικρότερες των απωλειών χαλκού, οι οποίες μεταβάλλονται με το τετράγωνο του διαρρεόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας επαγωγής σε κάθε σημείο λειτουργίας ορίζεται ως

ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος  $N_e$  που προσδίδεται στο δίκτυο προς τη μηχανική ισχύ  $N$  που απορροφάται από την κινητήρια μηχανή. Όπως σε όλων των ειδών τις μηχανές ο ολικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με το μέγεθος.

Στον πίνακα 6.2 δίνονται ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης ασύγχρονων γεννητριών  $\eta_{GM}$  (%) συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος  $N_G$  [KVA] και του πλήθους  $p$  των ζευγών των πόλων.

Πίνακας 6.2: Ενδεικτικές τιμές της μέγιστης τιμής του ολικού βαθμού απόδοσης ασύγχρονων γεννητριών  $\eta_{GM}$  συναρτήσει της ονομαστικής τους ισχύος και του πλήθους  $p$  των ζευγών των πόλων (Παπαντώνης, 2008).

$N_G$ [kVA]	400	500	700	1000	2000	3000	4000	5000
$p=3-4$	0.920	0.927	0.933	0.940	0.950	0.954	0.956	0.957
$p=6$	0.875	0.900	0.913	0.925	0.940	0.948	0.951	0.952

#### 6.2.4 Σύγκριση γεννητριών

Από τα προηγούμενα είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών όσον αφορά λειτουργικά και κατασκευαστικά στοιχεία. Οι κύριες διαφορές συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.3 που ακολουθεί. Παρά το μικρότερο κόστος των ασύγχρονων γεννητριών και τις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης σε σχέση με τις σύγχρονες, για ονομαστικές ισχύεις μεγαλύτερες των 600-1000[kW] προτιμούνται οι σύγχρονες γεννήτριες στην περίπτωση λειτουργίας σε διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Πίνακας 6.3: Σύγκριση Σύγχρονων και Ασύγχρονων γεννητριών (Παπαντώνης, 2008).

Χαρακτηριστικά	Σύγχρονη γεννήτρια	Ασύγχρονη γεννήτρια
Συντελεστής ισχύος – Άεργη Ισχύς	Καθορίζεται από τη ρύθμιση διέγερσης.	Άεργη ισχύς από το δίκτυο είναι απαραίτητη. Ο συντελεστής ισχύος ενός δικτύου μειώνεται λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς. Συνήθως απαιτείται διόρθωση του συντελεστή ισχύος με συστοιχία πυκνωτών.
Βαθμός απόδοσης	Καμία διαφορά	Καμία διαφορά.
Ρύθμιση τάσης	Ρυθμιζόμενη μέσω ρύθμισης της διέγερσης	Μη ρυθμιζόμενη. Καθορίζεται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο.
Παραλληλισμός με το δίκτυο	Απαιτείται εξοπλισμός για τον παραλληλισμό της τάσης, της συχνότητας και της διαδοχής των φάσεων με το προς σύνδεση δίκτυο.	Δεν απαιτείται διαδικασία παραλληλισμού (μόνο σωστή διαδοχή των φάσεων για τη φορά της ταχύτητας περιστροφής)

Μεταβατικά φαινόμενα κατά τη σύνδεση στο δίκτυο	Δεν εμφανίζονται	Κατά την εν κενώ σύνδεση με το δίκτυο με τη σχεδόν σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής αναπτύσσονται έντονες διακυμάνσεις του ρεύματος, οπότε απαιτείται έλεγχος ευστάθειας του δικτύου.
Κατασκευή	Πολύπλοκη κατασκευή κυρίως λόγω της ανάγκης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων των στρεφόμενων πόλων (δακτυλίδια, ψήκτρες, διεγέρτρια)	Απλή και συμπαγής κατασκευή στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα τύπου κλωβού.
Διαστάσεις και βάρος	Μεγαλύτερες διαστάσεις και βάρος λόγω του εξοπλισμού διέγερσης.	Συμπαγής κατασκευή μικρότερου βάρους
Επέμβαση ρυθμιστή υδροστροβίλου	Είναι απαραίτητη στην περίπτωση τροφοδοσίας αυτόνομου δικτύου	Δεν απαιτείται καθότι η ταχύτητα περιστροφής, η τάση και η συχνότητα εξαρτώνται από το δίκτυο.
Συντήρηση	Αυξημένη λόγω της παρουσίας του συστήματος διέγερσης, των ψηκτρών και της διάταξης παραλληλισμού	Εύκολη
Κόστος	Μεγαλύτερο	Μικρότερο

### 6.2.5 Τυποποίηση γεννητριών

Στα μικρά ΥΗΕ πρέπει να επιδιώκεται η επιλογή, τυποποιημένης γεννήτριας η οποία όμως να μπορεί να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις και ιδιαίτερα στη μέγιστη υπερτάχυνση, ώστε να μειωθεί ο χρόνος παράδοσης και το κόστος. Για να υπάρχει δυνατότητα επιλογής τυποποιημένης γεννήτριας αποφεύγεται η κατ' ευθεία σύζευξη υδροστροβίλου και γεννήτριας στην περίπτωση κατά την οποία η ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου είναι μικρότερη των 500 [RPM] και παρεμβάλλεται γραναζωτός πολλαπλασιαστής στροφών. Με τον τρόπο αυτό η γεννήτρια είναι ταχύστροφη, άρα μικρότερη σε μέγεθος και κόστος (η μείωση του κόστους της γεννήτριας υπερκαλύπτει το κόστος του πολλαπλασιαστή στροφών), όμως θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες του πολλαπλασιαστή στροφών (βαθμός απόδοσης της τάξεως του 98%) και η επίδραση της μικρότερης ροπής αδρανείας των στρεφόμενων μαζών στην ευστάθεια του συστήματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι γεννήτριες των μικρών ΥΗΕ πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένες ώστε να αντέχουν σε υπερταχύσεις της τάξεως του 60% της ονομαστικής ταχύτητες

περιστροφής. Οι τυποποιημένες γεννήτριες γενικής χρήσεως είναι σχεδιασμένες για υπερταχύνσεις της τάξεως του 25-50% και για το λόγο αυτό κατά κανόνα δεν είναι κατάλληλες για να εξοπλίσουν ένα μικρό ΥΗΕ.

### 6.3 Μετασχηματιστές Ισχύος

Η τάση των γεννητριών είναι συνήθως η χαμηλή των 400 [V] για σχετικά μικρές ισχύς ή η μέση (3.15 ή 6.3 [kV]) για μεγαλύτερες ισχύς. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια, καθώς μία γεννήτρια μέσης τάσης έχει μικρότερες διαστάσεις από μία ισοδύναμη χαμηλής τάσης, όμως οι απαιτήσεις μόνωσης των τυλιγμάτων είναι πιο αυστηρές. Από την άλλη πλευρά, μικρή σε μέγεθος γεννήτρια αντιστοιχεί και σε μικρή ροπή αδρανείας, γεγονός που δεν είναι ευνοϊκό για την ευστάθεια λειτουργίας της μονάδας και την ένταση των μεταβατικών φαινομένων.

Εάν η ισχύς του μΥΗΕ είναι μικρότερη των 100 [kW], η μονάδα μπορεί, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, να συνδεθεί κατ' ευθεία στο δίκτυο χαμηλής τάσης (ΧΤ), διαφορετικά η σύνδεση πρέπει να γίνει στο δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ), δηλαδή των 15 ή 20 [kV]. Άρα μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου θα πρέπει να παρεμβληθεί τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος, ο οποίος εξασφαλίζει τον κατάλληλο αναβιβασμό της τάσης.

Το πλήθος των μετασχηματιστών ισχύος με το οποίο εξοπλίζεται ένας ΥΗΣ με περισσότερους του ενός υδροστροβίλους αποτελεί αντικείμενο οικονομοτεχνικής ανάλυσης: ένας μετασχηματιστής για όλες τις μονάδες θα λειτουργεί σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε μερικά φορτία, άρα με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, ενώ επιπλέον καταλαμβάνει μικρότερο χώρο και είναι φθηνότερος από δύο ή τρεις μετασχηματιστές ισοδύναμης ισχύος (το κόστος ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι περίπου ανάλογο της ισχύος του σε [kVA] στη δύναμη 0.7). Από την άλλη πλευρά, βλάβη ή συντήρηση του μετασχηματιστή θέτει εκτός λειτουργίας ολόκληρο τον ΥΗΣ μειώνοντας έτσι την ευελιξία και αξιοπιστία του έργου. Κατά γενικό κανόνα σε ένα μΥΗΣ προκύπτει ως πλέον συμφέρουσα η εγκατάσταση ενός μετασχηματιστή ισχύος ανά 2 ή 3 μονάδες υδροστροβίλου - γεννήτριας.

Στα μικρά ΥΗΕ χρησιμοποιούνται συνήθως μετασχηματιστές ελαίου με ψύξη μέσω φυσικού εξαερισμού, κατάλληλοι για εσωτερική ή υπαίθρια εγκατάσταση. Στο δάπεδο κάτω από το μετασχηματιστή διαμορφώνεται ελαιολεκάνη και πλέγμα γείωσης για την προστασία από βηματικές τάσεις. Στην περίπτωση εσωτερικής εγκατάστασης ο χώρος του μετασχηματιστή πρέπει να εξαερίζεται με τη διαμόρφωση αεραγωγών με περσίδες στο εξωτερικό στόμιο, ώστε να απάγεται η θερμότητα που αντιστοιχεί στις απώλειες του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής είναι εξοπλισμένος με τα κατάλληλα όργανα για τους χειρισμούς, την ασφάλεια και έλεγχο της λειτουργίας του (όπως πηνίο Bucholz, δείκτη στάθμης λαδιού, θερμόμετρο θερμοκρασίας λαδιού, βάνα εξαέρωσης, βάνα δείγματος λαδιού, δοχείο διαστολής, δοχείο υγροσκοπικής ουσίας, ακροδέκτες γείωσης, αναρτήρες ανύψωσης).

Στον πίνακα 6.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές του βαθμού απόδοσης  $\eta_M$  τυποποιημένων μετασχηματιστών ισχύος με τάση εξόδου 24[kV] για σύνδεση στο δίκτυο ΜΤ 20[kV] καθώς και οι κύριες διαστάσεις, συναρτήσεως της ονομαστικής ισχύος και του φορτίου για συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi = 0.9$ .



Πίνακας 6.4: Βαθμός απόδοσης και κύριες διαστάσεις τυποποιημένων μετασχηματιστών ισχύος με τάση εξόδου 24 kV (Παπαντώνης, 2008).

[kVA]	$\eta M (\cos\phi=90^\circ)$			L [mm]	W [mm]	H [mm]
	1	0.75	0.5			
100	0.9764	0.9792	0.9803	1300	660	1150
200	0.9807	0.9831	0.9841	1470	735	1270
250	0.982	0.9842	0.9852	1480	740	1390
400	0.9843	0.9863	0.9872	1570	880	1600
500	0.9854	0.9872	0.9879	1600	880	1650
630	0.9867	0.9883	0.989	1640	890	1740
800	0.9875	0.989	0.9897	1700	910	1900
1000	0.988	0.9895	0.9901	1750	1020	2050
1250	0.9888	0.9902	0.9908	1820	1040	2150
1600	0.9892	0.9906	0.9913	1900	1050	2420
2000	0.9899	0.9911	0.9914	2050	1270	2500
2500	0.9903	0.9914	0.9917	2200	1270	2600
3150	0.9914	0.9923	0.9924	2350	1300	2650
4000	0.9927	0.9934	0.9935	2600	1350	2700
5000	0.9935	0.9941	0.9941	2800	1400	2750

#### 6.4 Εσωτερικές καταναλώσεις & λοιπά βοηθητικά συστήματα

Στους ηλεκτρικούς πίνακες χαμηλής τάσης του ΥΗΣ στεγάζεται ο ακόλουθος εξοπλισμός:

- οι αυτόματοι διακόπτες χαμηλής τάσης από τις γεννήτριες προς το μετασχηματιστή ισχύος. Η σύνδεση αυτή γίνεται συνήθως με χάλκινες μπάρες λόγω των μεγάλων διατομών που απαιτούνται. Οι διακόπτες είναι εξοπλισμένοι με ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου των υπερεντάσεων φάσεων και ουδετέρου με ρύθμιση για ακαριαία απόξεση ή με ρυθμιζόμενη χρονική καθυστέρηση.
- τους μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως μετρήσεων και προστασίας
- μετρητικά όργανα όπως αμπερόμετρα ανά φάση, κιλοβατώμετρο για μέτρηση της ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας, όργανο μέτρησης του συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$  και ηλεκτρονόμο για τη διαπίστωση αντιστροφής της ροής ενεργού ισχύος (στην περίπτωση σύνδεσης με το δίκτυο μέσης τάσης μέσω μετασχηματιστή για την κάλυψη των εσωτερικών καταναλώσεων)
- τη συστοιχία πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$  για κάθε γεννήτρια
- την αναχώρηση προς τις εσωτερικές καταναλώσεις του ΥΗΣ

Οι εσωτερικές καταναλώσεις τροφοδοτούνται είτε από την έξοδο των γεννητριών του ΥΗΣ, είτε μέσω μετασχηματιστή από το διασυνδεδεμένο δίκτυο μέσης τάσης. Για λόγους ευελιξίας είναι δυνατό να προβλέπονται και οι δύο συνδέσεις.

Καλύπτουν τις ανάγκες του ΥΗΣ για φωτισμό, φωτισμό ασφαλείας, τροφοδοσία γερανογέφυρας, τροφοδοσία ρυθμιστή υδροστροβίλων, ανιχνευτές, ρευματοδότες (μονοφασικούς και τριφασικούς κατάλληλους για συσκευή ηλεκτροσυγκόλλησης), φόρτιση των μπαταριών, αεροσυμπιεστή, ανορθωτικά συστήματα 24 VDC κ.λ.π..

Από τις εσωτερικές καταναλώσεις του ΥΗΣ τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα η δεξαμενή φόρτισης και η υδροληψία, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες φωτισμού, κίνησης (πχ. των συστημάτων καθαρισμού της εσχάρας ή του συστήματος ελέγχου του ανοίγματος των θυροφραγμάτων), καθώς και για την τροφοδοσία των μετρητικών οργάνων (πχ. σταθμήμετρου).

Από ενεργειακής πλευράς οι εσωτερικές καταναλώσεις του ΥΗΣ αντιστοιχούν στο 1-3% της παραγόμενης ενέργειας. Το ποσοστό 3% αντιστοιχεί σε πολύ μικρές τιμές της ονομαστικής ισχύος της μονάδας (μικρότερης των 500 [kW]) και το 1% σε ισχείς από 5 [MW] περίπου.

Ο ΥΗΣ διαθέτει δίκτυο θεμελιακής γείωσης στο οποίο συνδέεται όλος ο εξοπλισμός του ΥΗΣ, κατασκευασμένο σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

## **6.5 Διακοπτικό υλικό πινάκων**

Υπάρχουν πολλοί κανονισμοί με βάση τους οποίους ο ανεξάρτητος παραγωγός πρέπει να λειτουργεί τον ΥΗΣ, ώστε να εξασφαλίζονται συνθήκες ασφάλειας και ποιότητας δικτύου. Για το λόγο αυτό υπάρχουν συσκευές, συμπεριλαμβανομένου του διακοπτικού υλικού, που πρέπει να βρίσκονται μέσα στο σταθμό παραγωγής ενέργειας και να προστατεύουν τον εξοπλισμό.

Το διακοπτικό υλικό πρέπει να εγκαθίσταται σε γεννήτριες και στη σύνδεση τους με το δίκτυο ή με ένα μεμονωμένο καταναλωτή, ώστε να προστατεύονται οι γεννήτριες και οι μετασχηματιστές. Το διακοπτικό υλικό μπορεί να είναι είτε αέρας, είτε μονωτικό αέριο, είτε κενό αέρος και χρησιμοποιείται για τη σύνδεση και αποσύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο. Ο εξοπλισμός ελέγχου της γεννήτριας είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του διακοπτικού υλικού. Η ασύγχρονη προστασία γεννήτριας πρέπει να περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, ρελέ αντιστροφής ισχύος, διαφορικά ρελέ για την προστασία από εσωτερικές βλάβες, ρελέ γείωσης, κλπ.

Ο παραγωγός είναι υπεύθυνος για τη γείωση των συστημάτων του σε συνεργασία με τις τοπικές υπηρεσίες κοινής ωφέλειας. Το σύστημα γείωσης εξαρτάται από το πλήθος των μονάδων, τον τρόπο λειτουργίας και την εκάστοτε διαμόρφωση. Παράλληλα, μετρητικός εξοπλισμός πρέπει να είναι τοποθετημένος στη σύνδεση με το δίκτυο για να λαμβάνει μετρήσεις ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

## **6.6 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου**

Η ανάπτυξη των υπολογιστών και των δικτύων τηλεπικοινωνιών έχει επιτρέψει την αξιόπιστη, γρήγορη και οικονομική επιτήρηση ενός μΥΗΕ ώστε αυτό να λειτουργεί αυτόματα και με ασφάλεια σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα. Για το σκοπό αυτό απαιτείται ένα σύστημα συλλογής - επεξεργασίας των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος και εξαγωγής των κατάλληλων εντολών (DAM- Data Acquisition and Monitoring). Το σύστημα αυτό για λόγους ασφαλείας θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί και με βοηθητική πηγή ενέργειας (συστοιχία μπαταριών).

Για τη λειτουργία του συστήματος οι απαραίτητες παράμετροι λειτουργίας της μονάδας πρέπει να μετρούνται και να εισάγονται στο σύστημα επεξεργασίας υπό μορφή ηλεκτρικού σήματος. Το πλήθος των μετρούμενων παραμέτρων εξαρτάται από τη σημασία και την εγκατεστημένη ισχύ του μΥΗΕ. Στη συνέχεια καταγράφονται αυτές που θεωρούνται περισσότερο απαραίτητες: στάθμη στην υδροληψία ή στη δεξαμενή φόρτισης, στατική πίεση στην είσοδο του υδροστροβίλου, θέση της βάνας εισόδου (πλήρως ανοικτή ή πλήρως κλειστή), θέση των ρυθμιστικών περυνγιών, θερμοκρασίες τυλιγμάτων και εδράνων γεννήτριας, ταχύτητα περιστροφής, καθώς και οι ενδείξεις των ηλεκτρικών οργάνων χαμηλής και μέσης τάσης (ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, τάση, συντελεστής ισχύος  $\cos\varphi$ , ενεργός ηλεκτρική ισχύς).

Ο αυτοματισμός της λειτουργίας ενός μικρού ΥΗΕ αναφέρεται στα 3 βασικά συστήματα του υδροηλεκτρικού σταθμού και συγκεκριμένα:

- στη ροή της υδραυλικής ενέργειας και της λειτουργίας των μονάδων όπως ο αυτοματισμός εκκίνησης και κράτησης, η αυτόματη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών, οι προστασίες έναντι της ανάπτυξης υδραυλικού πλήγματος ή λειτουργίας με σπηλαίωση (σύστημα αναρρόφησης ή έγχυσης πεπιεσμένου αέρα στον κώνο της πλήμνης για τη μείωση του όγκου και των επιπτώσεων από την ανάπτυξη στήλης σπηλαίωσης)
- στο ηλεκτρολογικό τμήμα όπως το σύστημα συγχρονισμού (περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας κατά τη φάση της εκκίνησης), το σύστημα ρύθμισης της διέγερσης και τους αυτοματισμούς προστασίας έναντι αύξησης της θερμοκρασίας των εδράνων και τυλιγμάτων.
- στην επιτήρηση και αυτοματισμό του βοηθητικού εξοπλισμού, όπως τη φόρτιση των μπαταριών, την πίεση στο κύκλωμα λαδιού του ρυθμιστή στροφών, του συστήματος ανίχνευσης και προστασίας έναντι πυρκαγιάς.

Το σύστημα ελέγχου και επιτήρησης μπορεί εύκολα να συμπληρωθεί από μιμικό διάγραμμα της λειτουργίας (συνήθως στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή) με πολλαπλά επίπεδα και σκληρό δίσκο για την καταγραφή της εξέλιξης των βασικών λειτουργικών παραμέτρων, καθώς και των σφαλμάτων που λαμβάνουν χώρα.

Η επίβλεψη της λειτουργίας γίνεται από την οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή από τον οποίο δίνονται και οι εντολές χειρισμού μέσω συστήματος SCADA. Με τον τρόπο αυτό οι διάφορες μετατροπές στη διαδοχή των φάσεων και η αλλαγή των λειτουργικών παραμέτρων (settings) μπορεί να γίνει γρήγορα και χωρίς επιπλέον κόστος. Παράλληλα όλα τα στοιχεία της λειτουργίας καθώς και το ιστορικό της εξέλιξης των διαφόρων λειτουργικών μεγεθών μπορούν να παρασταθούν και επεξεργασθούν μέσω των εφαρμογών σε περιβάλλον Windows.

Οι βασικές εντολές λειτουργίας ενός μικρού ΥΗΕ μπορεί να δίνονται επί τόπου (local control) ή εξ' αποστάσεως (remote control), δηλαδή μέσω συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου. Στα μικρά ΥΗΕ είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η εφαρμογή συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου έτσι ώστε να μην απαιτείται η παρουσία τεχνικού προσωπικού όλο το 24ώρο. Κατά συνέπεια το επιπλέον κόστος του απαραίτητου εξοπλισμού αποσβένεται πολύ γρήγορα λόγω της σημαντικής μείωσης των λειτουργικών δαπανών. Απαιτείται όμως η γνώση της κατάστασης λειτουργίας των μονάδων έτσι ώστε στην περίπτωση κατά την οποία το σύστημα έχει τεθεί εκτός λειτουργίας ύστερα από την επέμβαση ενός αυτοματισμού, αυτό να γίνει γρήγορα αντιληπτό, ώστε να γίνει η παρέμβαση

ή η συντήρηση που απαιτείται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας, με συνέπεια τη συσσώρευση διαφυγόντων εσόδων.

Ο αυτοματισμός που περιγράφηκε παραπάνω είναι δυνατό να μεταφερθεί μέσω τηλεχειρισμού και σε θέση μακριά από τον ΥΗΣ μέσω τηλεφωνικής γραμμής, οπότε ο υπολογιστής στη θέση ελέγχου μπορεί να έχει τις ίδιες δυνατότητες με αυτόν που βρίσκεται στον ΥΗΣ.

## **6.7 Διασύνδεση υδροηλεκτρικού σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας**

### **6.7.1 Διασύνδεση υδροηλεκτρικού σταθμού σε δίκτυο**

Η σύνδεση του ΥΗΣ πρέπει να γίνεται με κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια τόσο του δικτύου όσο και του εξοπλισμού της μονάδας και του προσωπικού. Για το λόγο αυτό πρέπει να ακολουθούνται οι αντίστοιχες οδηγίες του ιδιοκτήτη του διασυνδεδεμένου δικτύου (στην Ελλάδα του ΔΕΔΔΗΕ για μέση τάση και του ΑΔΜΗΕ για υψηλή τάση).

Σύμφωνα με την ισχύουσα οδηγία του ΔΕΔΔΗΕ (αρχική Οδηγία Διανομής της ΔΕΗ Νο 129) ένας αυτοπαραγωγός επιτρέπεται να συνδέεται στο δίκτυο χαμηλής τάσεως (ΧΤ) εάν η συνολική ισχύς είναι μέχρι 100[kW]. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια θα είναι ασύγχρονη με συστοιχία πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστή ισχύος. Για ισχύ μεγαλύτερη των 100 [kW] η σύνδεση θα πρέπει να γίνει στο δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ) και οι γεννήτριες μπορεί να είναι ασύγχρονες με διόρθωση συντελεστή ισχύος ή σύγχρονες. Τα αιτήματα χορήγησης Προσφοράς Σύνδεσης για σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ισχύος έως και 8 [MW] υποβάλλονται από τους ενδιαφερόμενους στο Διαχειριστή του Δικτύου (ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ) ενώ τα αιτήματα για σταθμούς ισχύος άνω των 8 [MW] υποβάλλονται από τους ενδιαφερόμενους στο Διαχειριστή του Συστήματος (ΑΔΜΗΕ ΑΕ).

Η σύνδεση της εξόδου του μετασχηματιστή ισχύος με το δίκτυο ΜΤ γίνεται μέσω διακοπτικού στοιχείου που είναι είτε ασφαλειοαποξεύκτης είτε αυτόματος διακόπτης. Στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει να εγκατασταθεί αυτόματος διακόπτης προς την πλευρά του δικτύου του ΔΕΔΔΗΕ, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αυτό δεν είναι απαραίτητο. Το πηνίο εργασίας του αυτόματου διακόπτη ενεργοποιείται από τα συστήματα προστασίας του μετασχηματιστή και από όργανο δευτερογενούς προστασίας που ελέγχει τα ρεύματα υπερεντάσεως φάσεων (βραχείας και μακράς διάρκειας) και του ουδετέρου. Επίσης ελέγχεται το ρεύμα διαρροής του ουδετέρου κόμβου του μετασχηματιστή. Ο εξοπλισμός σύνδεσης με το δίκτυο συμπληρώνεται με τα όργανα μέτρησης ενεργής και άεργης ισχύος (εισερχόμενη και εξερχόμενη), ωρομετρητή, αμπερομέτρων και κιλοβατόμετρων.

Επίσης ειδικοί ηλεκτρονόμοι επιτηρούν τις υπέρ-υπό τάσεις, τάση ουδετέρου, υπέρ-υπό συχνότητες (ώστε να επενεργούν στο διακόπτη της μονάδας όταν τα μεγέθη αυτά ξεπεράσουν τα επιτρεπτά από το ΔΕΔΔΗΕ όρια για σύνδεση στη μέση τάση. Ο ηλεκτρονόμος που ελέγχει την υπερένταση αφορά την περίπτωση σύγχρονης γεννήτριας.

Το σύνολο του εξοπλισμού αυτού τοποθετείται σε ηλεκτρικούς μεταλλικούς πίνακες τύπου πεδίου, κατασκευασμένους σύμφωνα με τις προδιαγραφές, με σκοπό την ασφάλεια του προσωπικού και φέρουν τις απαραίτητες ενδείξεις ύπαρξης τάσης. Οι πίνακες μέσης τάσης στεγάζονται σύμφωνα με τους κανονισμούς σε ιδιαίτερο χώρο απ' ό,τι οι πίνακες χαμηλής τάσης.

Τα όργανα για μέτρηση της εισερχόμενης ή εξερχόμενης ενέργειας στο δίκτυο του ΔΕΔΔΗΕ (και βάση της οποίας γίνεται η καταμέτρηση και τιμολόγηση) εγκαθίστανται στη μέση τάση, αποτελούν ιδιοκτησία του ΔΕΔΔΗΕ, και τοποθετούνται σε ελεγχόμενο από αυτή χώρο. Τα μετρητικά όργανα, η συνδεσμολογία τους και οι μετασχηματιστές τάσης και έντασης πρέπει να είναι σύμφωνα με την οδηγία του ΔΕΔΔΗΕ ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ.

Από το σημείο αυτό γίνεται η σύνδεση με το δίκτυο διανομής μέσω γραμμής μέσης τάσης σύμφωνα με μελέτη που εκπονείται από την αρμόδια διεύθυνση της ΔΕΗ. Την κατασκευή αναλαμβάνει ο ΔΕΔΔΗΕ αλλά το αντίστοιχο κόστος επιβαρύνει τον προϋπολογισμό του μΥΗΕ. Επίσης θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη ώστε το προσωπικό του ΔΕΔΔΗΕ να μπορεί να απομονώσει τον ΥΗΣ από το δίκτυο σε περίπτωση ανάγκης.

Το δίκτυο ηλεκτρισμού της χώρας αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα και από το Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (Αυτόνομο Δίκτυο). Τη σπονδυλική στήλη του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 [kV], που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, κυρίως από το σπουδαιότερο για την Ελλάδα ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Στη περιοχή αυτή, παράγεται περίπου το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας που στη συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, που καταναλώνεται περίπου το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας. Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400 [kV] καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150 [kV] που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 [kV].

Τα περισσότερα νησιά σήμερα στην Ελλάδα (κυρίως στο Αιγαίο) ηλεκτροδοτούνται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο, βαρύ (μαζούτ) ή και ελαφρύ (ντίζελ), και τους σταθμούς ΑΠΕ. Τα νησιά αυτά δεν έχουν διασυνδεθεί μέχρι σήμερα με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα, λόγω κυρίως τεχνικών και τεχνολογικών δυσκολιών, αλλά και λόγω οικονομικών δυσκολιών καθότι η διασύνδεση είναι έργο που απαιτεί μεγάλο κεφάλαιο. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ) αποτελείται από τριάντα δύο (32) αυτόνομα συστήματα. Ορισμένα εξ αυτών αποτελούνται από περισσότερα νησιά (συμπλέγματα νησιών), και η Λειτουργία και Διαχείριση της Αγοράς των ΜΔΝ γίνεται από τον ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ. Η αιχμή ζήτησης των αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων της χώρας ποικίλει: δεκαεννέα έχουν αιχμή ζήτησης έως 10 [MW], έντεκα (11) έχουν αιχμή ζήτησης από 10 - 100 [MW], δύο έχουν αιχμή ζήτησης μεγαλύτερη των 100 [MW].

Προκειμένου να συνδεθεί ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα, πρέπει να ελέγχεται η τρέχουσα δυνατότητα του Δικτύου για απορρόφηση ισχύος από σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ ανά γεωγραφική περιοχή. Η δυνατότητα

αυτή περιγράφεται με αριθμητικά δεδομένα στην ιστοσελίδα του ΔΕΔΔΗΕ και καθορίζεται από τη ΡΑΕ. Οι κύριες παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη είναι οι εξής:

- Τα περιθώρια απορρόφησης ισχύος υπολογίζονται με κριτήριο την ονομαστική ισχύ κάθε μετασχηματιστή υψηλής τάσης προς μέση τάση (διαθέσιμο περιθώριο έναντι του θερμικού ορίου) και τη συνολική ικανότητα συμβολής μονάδων παραγωγής στη στάθμη βραχυκύκλωσης του αντίστοιχου ζυγού μέσης τάσης (διαθέσιμο περιθώριο έναντι της στάθμης σχεδιασμού). Τυχόν περιορισμοί που προκύπτουν από τη λειτουργία του Συστήματος Μεταφοράς δε λαμβάνονται υπόψη.
- Τα περιθώρια απορρόφησης ισχύος προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τους σταθμούς που δεσμεύουν ισχύ στο Δίκτυο, δηλαδή τους σταθμούς σε λειτουργία, τους σταθμούς με σύμβαση σύνδεσης και με οριστική προσφορά σύνδεσης σε ισχύ.
- Δε λαμβάνονται υπόψη τα αιτήματα για τα οποία έχει εκδοθεί μη δεσμευτική προσφορά σύνδεσης καθώς και εκείνα που βρίσκονται στο στάδιο επεξεργασίας της αίτησης.
- Τα περιθώρια δίδονται ανά υποσταθμό και μετασχηματιστή υψηλής τάσης προς μέση τάση και απεικονίζονται με χρωματική σήμανση ανάλογα με το ύψος τους.
- Η ύπαρξη περιθωρίου ισχύος στο επίπεδο υποσταθμού ή μετασχηματιστή υψηλής τάσης προς μέση τάση δεν ισοδυναμεί με δυνατότητα σύνδεσης δυναμικού παραγωγής σε κάθε γραμμή μέσης τάσης που αναχωρεί από αυτόν, δεδομένου ότι ενδέχεται να υπεισέρχονται κατά περίπτωση άλλοι τεχνικοί περιορισμοί.
- Τα δεδομένα επικαιροποιούνται σε ημερήσια βάση, με άντληση των στοιχείων από την μηχανογραφική εφαρμογή διαχείρισης των αιτημάτων σύνδεσης σταθμών ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ που έχει αναπτύξει ο Διαχειριστής του Δικτύου.

#### 6.7.2 Αυτόνομη λειτουργία υδροηλεκτρικού σταθμού

Στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας υδροηλεκτρικού σταθμού θα πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά το σχεδιασμό σε ζητήματα, όπως η ευστάθεια της συχνότητας, ζητήματα που πρακτικά δεν υφίστανται στη διασύνδεση με ένα ισχυρό, πρακτικά άπειρο σύστημα.

Η ευστάθεια της συχνότητας ισοδυναμεί με γρήγορη επαναφορά της ταχύτητας περιστροφής του συστήματος στη σύγχρονη ταχύτητα, μετά από κάποια απότομη μεταβολή του φορτίου, έργο που αναλαμβάνει ο ρυθμιστής.

Η ευστάθεια του συστήματος ρύθμισης επιτυγχάνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Με αύξηση της ροπής αδράνειας των στρεφόμενων μαζών, επί παραδείγματι με την προσθήκη σφονδύλου. Αύξηση της ροπής αδράνειας ισοδυναμεί με βραχυχρόνια αποθήκευση μηχανικής ενέργειας.
- Με μείωση του χαρακτηριστικού χρόνου του αγωγού πτώσης, με μείωση του μήκους του ή με αύξηση της διαμέτρου του.
- Με εγκατάσταση βοηθητικών εξαρτημάτων στο σύστημα προσαγωγής, όπως αντιπληγματικές βαλβίδες, βαλβίδες εκτόνωσης, αγωγό by-pass κλπ

Ως βοηθητικό μέσο μπορεί να συνδεθεί παράλληλα συστοιχία αντιστάσεων, ούτως ώστε κατά την απόρριψη φορτίου, μέρος της μηχανικής/ ηλεκτρικής ενέργειας να μετατρέπεται σε θερμική. Ακόμα καλύτερη λύση είναι η παράλληλη σύνδεση συστήματος αποθήκευσης, ούτως ώστε αμφίδρομα η ενέργεια να μεταφέρεται όπου χρειάζεται σε περίπτωση απόρριψης φορτίου ή σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης. Τέτοια συστήματα είναι η παράλληλη σύνδεση συστοιχίας συσσωρευτών, ή η δημιουργία δύο ταμιευτήρων και μεταφορά του νερού από τον έναν στον άλλον μέσω αντλίας η φυσικά, αναλόγως τη ροή ενέργειας.

Για τη σύνδεση σε ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο (δίκτυο ΔΕΔΔΗΕ) θα πρέπει να ακολουθούνται οι οδηγίες που εκδίδει ο εκάστοτε διαχειριστής προκειμένου να εξασφαλίσει την προστασία του δικτύου. Δεν υπάρχουν, εν τούτοις ζητήματα ευστάθειας πρακτικά, καθώς το άπειρο ΣΗΕ ισοδυναμεί με έναν μεγάλο συσσωρευτή.

### 6.7.3 Ζητήματα Ποιότητας Ισχύος

Οι διαταραχές που προκαλούνται είναι όμοιες με τις αυτές που προκαλούν τα συνήθη φορτία, τα οποία αναφέρονται στα σημεία σύνδεσης με το δίκτυο διανομής. Αυτές οι διαταραχές διαχωρίζονται στις παρακάτω περιπτώσεις ανεξαρτήτως των σημείων σύνδεσης με το δίκτυο :

- (α) Διαταραχές κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας οι οποίες έχουν επιπτώσεις στη σταθερότητα της τάσης του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές διακρίνονται στις εξής :
- Σε αργές μεταβολές της τάσης που συμβαίνουν σε στοιχεία πριν το στρόβιλο, όπως μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς κλπ, οι οποίες οφείλονται σε αλλαγές στην παρεχόμενη ισχύ από την παροχή του ποταμού. Σε αυτήν την περίπτωση ο υπολογισμός της πτώσης τάσεων των ακτινικών δικτύων υπολογίζεται όπως όταν υπάρχουν αρνητικά φορτία.
  - Σε ταχείες μεταβολές της τάσης, οι οποίες διαρκούν μικρό χρονικό διάστημα, κάποια δευτερόλεπτα, όπως κατά τη ζεύξη και την απόζευξη του υδροστροβίλου στο δίκτυο.
  - Σε διακυμάνσεις της τάσης που οφείλονται στη συνεχή και γρήγορη μεταβολή της παραγόμενης τάσης λόγω πιθανών των μεταβολών της παροχής του υδατορέματος. Αυτές οι διακυμάνσεις της τάσης έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ανωμαλιών στη λειτουργία των φωτιστικών σωμάτων, φαινόμενο flicker, και των ευαίσθητων ηλεκτρικών συσκευών.
  - Σε διαταραχές που οφείλονται στην παραγωγή αρμονικών ή συνιστωσών αντιστρόφου τάσεως από τους υδροστροβίλους, όπως συμβαίνει και στους κινητήρες.
- (β) Σε διαταραχές που συμβαίνουν κατά τη μη ομαλή λειτουργία του δικτύου όπως στην περίπτωση που υπάρχει βραχυκύκλωμα.
- Μη ορθή λειτουργία των προστασιών του δικτύου, αν έχουν σχεδιαστεί με συνθήκες ακτινικής λειτουργίας.
  - Υπερβολικές καταπονήσεις των στοιχείων του δικτύου, αφού κατά το βραχυκύκλωμα τροφοδοτούνται και από το μΥΗΕ.

- Δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων εξαιτίας απομονωμένης λειτουργίας του τμήματος του δικτύου, το οποίο τροφοδοτείται μόνο από μΥΗΕ με τάση και συχνότητα που μπορεί να διαφέρουν πολύ από τις αντίστοιχες του δικτύου- αυτοδιέγερση. Πρόκειται για το πρόβλημα της «νησιδοποίησης» όπου μπορούν να προκληθούν ατυχήματα στο προσωπικό που εργάζεται για την αποκατάσταση της βλάβης ή ακόμη και ζημιές στις συσκευές των καταναλωτών.

Με την επιλογή και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός της μΥΗΕ. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση ενός μΥΗΕ.



## 7 Επίδραση των Υδροηλεκτρικών Σταθμών στο Περιβάλλον

### 7.1 Εισαγωγή

Όπως κάθε τεχνικό έργο, ένα μικρό ΥΗΕ αποτελεί μία παρέμβαση στο περιβάλλον, τόσο στο φυσικό, όσο και κοινωνικό και πολιτιστικό. Η παρέμβαση αυτή λαμβάνει χώρα τόσο κατά τη φάση της κατασκευής και όσο και της λειτουργίας του. Σε ορισμένες περιπτώσεις η έκταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορεί να μετριασθεί και το έργο να γίνει αποδεκτό με επεμβάσεις που επιβαρύνουν τον προϋπολογισμό και ενδεχόμενα επηρεάζουν σημαντικά την οικονομική απόδοση του έργου.

Για το λόγο αυτό οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός μικρού ΥΗΕ πρέπει να εξετάζονται ήδη κατά τις αρχικές φάσεις διαμόρφωσης του έργου ώστε να μην κινδυνεύσει στη συνέχεια να ματαιωθεί το έργο είτε λόγω των σοβαρών επιπτώσεων που θα προκαλεί, είτε λόγω της σοβαρής επιβάρυνσης του κόστους από τις πρόσθετες επεμβάσεις που θα απαιτηθούν. Οι Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί ΥΗΣ στην Ελλάδα αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρουσιάζουν δε, σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την αξιοποίηση συμβατικών μορφών ενέργειας (λιγνίτη, πετρέλαιο κ.ά). Παρά ταύτα, δεν είναι λίγες οι φορές που οργανώσεις ή η τοπική κοινωνία αντιτίθεται στην κατασκευή των ΜΥΗΣ εξαιτίας κάποιων ενδεχόμενων αρνητικών περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Τα ΥΗΕ έργα δεν έχουν μόνο αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά και θετικές, όπως για παράδειγμα το συνδυασμό τους σε ορισμένες περιπτώσεις με άλλες χρήσεις και διευθετήσεις του νερού (ύδρευση, άρδευση), τον έλεγχο της στάθμης κατά διάρκεια πλημμυρών, δημιουργία χώρων αναψυχής και τουρισμού, την κατασκευή έργων υποδομής σε απομακρυσμένες περιοχές (δρόμων, γεφυρών κλπ).

Επίσης δεν πρέπει να παραληφθεί ότι η παραγωγή 6000 [MWh] ετησίως από υδροηλεκτρικό έργο εγκατεστημένης ισχύος 1.35 [MW] περίπου, αποτρέπει την εκπομπή στην ατμόσφαιρα 4000 [tn] CO<sub>2</sub> ετησίως, για την περίπτωση κατά την οποία η ίδια ποσότητα ενέργειας θα παραγόταν από λιγνιτικό θερμοηλεκτρικό σταθμό.

Η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός μικρού ΥΗΕ είναι απαραίτητη κατά τη φάση αδειοδότησης του έργου σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και συγκεκριμένα κατά τη διαδικασία προέγκρισης χωροθέτησης και έγκρισης περιβαλλοντικών όρων. Εκπονείται από ειδικευμένους επιστήμονες οι οποίοι εκτός από την καταγραφή των επιπτώσεων, προτείνουν και μέτρα για το περιορισμό τους.

Η δυσκολία στην αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έγκειται στο ότι οι περισσότερες από αυτές δεν είναι δυνατό να αποδοθούν ποσοτικά, αλλά χαρακτηρίζονται ποιοτικά από μία κλίμακα, όπως: σημαντική, μέτρια ή αμελητέα – μηδενική επίδραση. Επίσης δεν υπάρχει μία γενικά αποδεκτή μέθοδος συνολικής περιβαλλοντικής αξιολόγησης έτσι ώστε όταν η τιμή ενός

δείκτη περιβαλλοντικής επιβάρυνσης υπερβαίνει μία δεδομένη τιμή να ματαιώνεται η κατασκευή του έργου. Σε ορισμένες περιπτώσεις η επίπτωση στο περιβάλλον μπορεί να είναι τόσο προφανής, ώστε να αποτρέπει κάθε δυνατότητα συνέχισης της μελέτης του έργου, όπως για παράδειγμα εάν συντρέχουν λόγοι αλλοίωσης της θέας ιδιαίτερου φυσικού κάλλους (π.χ. καταρράκτη) ή καταστροφής αρχαιοτήτων. Η μόνη γνωστή μέθοδος που βασίζεται στην ποσοτικοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι αυτή του εξωτερικού κόστους, όμως και σε αυτή πολλές συνιστώσες του εξωτερικού κόστους δεν μπορούν να αποτιμηθούν αντικειμενικά.

## 7.2 Καταγραφή περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στη συνέχεια αναφέρονται οι συνηθέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός ΥΗΕ, θετικές ή αρνητικές, χωρίς να γίνεται καμία αναφορά στη βαρύτητα ή τον τρόπο αντιμετώπισης τους (Παπαντώνης, 2008).

Επιπτώσεις στο 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

Επιπτώσεις στο πολιτιστικό και κοινωνικό περιβάλλον

Κοινωνικές	αλλοίωση φυσικού κάλλους, 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	δασικών εκτάσεων, αγροτεμαχίων, οικιών
Υποδομές	κατασκευή δρόμων, διάθεση υλικών εκσκαφών
Αναψυχή	αλιεία, τουρισμός κλπ.

Δεν υπάρχει γενικά αποδεκτή μέθοδος συνολικής αποτίμησης και ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός μΥΗΕ, ή ενός τεχνικού έργου γενικότερα. Για το λόγο αυτό η κάθε περιβαλλοντική επίπτωση χαρακτηρίζεται ποιοτικά (ως σημαντική, μέτρια ή αμελητέα) ή βαθμολογείται σύμφωνα με μία υποκειμενική κλίμακα με βαθμολογία από -10 (πολύ αρνητική επίπτωση) έως +10 (πολύ θετική επίπτωση).

Στη συνέχεια περιγράφονται μέθοδοι αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

## Μέθοδος μητρώου

Πρόκειται για την απλούστερη μέθοδο καταγραφής των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε μορφή πίνακα. Κάθε μία από τις αυτές σχολιάζεται και χαρακτηρίζεται ποιοτικά (ως σημαντική, μη σημαντική, αμελητέα ή ανύπαρκτη).

## Μέθοδος βαθμολογίας

Σύμφωνα με μέθοδο αυτή κάθε περιβαλλοντική επίπτωση βαθμολογείται σύμφωνα με μία υποκειμενική κλίμακα μεταξύ του -10 (πολύ αρνητική επίπτωση) έως +10 (πολύ θετική επίπτωση) συμπληρώνοντας ένα ραβδόγραμμα. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η γρήγορη οπτική απεικόνιση του συνόλου των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός έργου.

## Μέθοδος εξωτερικού κόστους

Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε μία ποσοτική αποτίμηση κάθε μίας από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το άθροισμα των οποίων δίνει τη συνολική περιβαλλοντική αποτίμηση του έργου. Όμως η εκτίμηση μερικών συνιστωσών του εξωτερικού κόστους δεν μπορεί να γίνει αντικειμενικά και είναι έντονη η υποκειμενική εκτίμηση του αξιολογητή.

Σύμφωνα με μέθοδο του εξωτερικού κόστους, στο κόστος της παραγόμενης ενέργειας, όπως αυτό υπολογίζεται με καθαρά οικονομικά και τεχνικά δεδομένα, θα πρέπει να συνυπολογισθεί το κόστος που αντιστοιχεί στη μείωση της κοινωνικής ευημερίας, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος κλπ. Η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων που επιχειρείται με τη μέθοδο του εξωτερικού κόστους δεν τυγχάνει γενικής αποδοχής, καθώς ο υπολογισμός άλλων συνιστωσών του εξωτερικού κόστους έχει πολύ μικρότερη αντικειμενικότητα (εργατικών ατυχημάτων, οπτικής παρέμβασης κλπ.).

## 7.3 Επιπτώσεις ως προς το περιβάλλον

### 7.3.1 Στο φυσικό περιβάλλον

Ένα υδατόρεμα αποτελεί το φυσικό περιβάλλον το οποίο συντηρεί μεγάλη ποικιλία πανίδας και χλωρίδας, ενώ επίσης σε αυτό καταφεύγουν και μεγάλα άγρια ζώα. Από εδαφολογικής πλευράς η κοίτη του ποταμού και τα πρανή της βρίσκονται σε μια δυναμική ισορροπία, καθώς οι φερτές ύλες συνεχώς παρασύρονται προς τις χαμηλότερες στάθμες. Η ισορροπία αυτή έχει αποκατασταθεί κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης ιστορίας του ποταμού. Από υδρολογικής πλευράς η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υδατορέματος αποτελεί την οριακή συνθήκη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα τον οποίο τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από αυτόν.

Με την κατασκευή ενός ΥΗΕ και συγκεκριμένα με την κατασκευή του φράγματος (ή του υπερχειλιστή) διαταράσσεται αυτή η ισορροπία, τόσο στον εδαφολογικό, όσο στον υδρολογικό και βιολογικό τομέα. Το φράγμα αποτελεί μία διακοπή της συνέχειας του υδατορέματος προκαλώντας τις ακόλουθες επιπτώσεις:

#### α) Εδαφολογικές

Η ροή παρασύρει φερτές ύλες προς τα χαμηλότερα υψόμετρα. Το φράγμα αποτελεί μία διακοπή της συνέχειας της παροχής των φερτών υλών οι οποίες εγκλωβίζονται στον ταμιευτήρα τον οποίο αυτό σχηματίζει. Στην περίπτωση των μΥΗΕ ο ταμιευτήρας είναι μικρής χωρητικότητας με αποτέλεσμα οι φερτές ύλες που συσσωρεύονται σε αυτόν να αποτελούν πρόβλημα που απαιτεί συνεχή αντιμετώπιση, ώστε η λειτουργία του έργου να είναι απρόσκοπτη. Όμως η διακοπή της συνέχειας της ροής των φερτών προκαλεί εδαφολογικά προβλήματα κατάντη της διατομής παραγωγής, μετά την έξοδο από τους υδροστρόβιλους που η παροχή του νερού συναντά εκ νέου τη φυσική της κοίτη. Η ροή εκεί δημιουργεί διάβρωση των εδαφών κατάντη του ΥΗΣ, τα οποία όμως δεν προσχώνονται με αποθέσεις από τα ανάντη, αφού αυτές έχουν φραχθεί. Ο ρυθμός διαβρώσεως εξαρτάται από τη σύσταση των εδαφών. Το πρόβλημα αυτό είναι εξίσου σημαντικό τόσο στα μεγάλα, όσο και στα μικρά ΥΗΕ, αφού επηρεάζει μέχρι και την ευστάθεια της εγκατάστασης.

#### β) Υδρολογικές

Με την κατασκευή του φράγματος ανυψώνεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού η οποία φθάνει μέχρι και τη στάθμη της υπερχειλίσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ανάντη της λεκάνης υδροληψίας. Η ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα προκαλεί άνωση στα παρακείμενα κτίρια με αποτέλεσμα να τίθεται σε αμφιβολία η στατικότητα τους. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο στα ΥΗΕ ροής τα οποία κατά κανόνα διαμορφώνονται σε επίπεδες περιοχές μικρής κλίσης, οπότε η ανύψωση της στάθμης γίνεται αισθητή σε μεγάλη έκταση. Αυτό αντιμετωπίζεται με την κατασκευή παράπλευρης συλλεκτήριας διώρυγας, παράλληλης προς το υδατόρεμα.

Μια πρόσθετη συνέπεια της δημιουργίας ταμίευσης είναι ότι δημιουργούνται συνθήκες αποξυγόνωσης – ευτροφισμού λόγω της δημιουργίας στάσιμων υδάτων σε περιοχές που πριν είτε δεν ήταν καλυμμένες από νερό, είτε είχαν τρεχούμενα νερά. Αυτό υποβαθμίζει την ποιότητα του νερού που αποθηκεύεται ιδιαίτερα στις χαμηλές στάθμες του ταμιευτήρα (κάτω από τη στάθμη υδροληψίας). Θα πρέπει να τονισθεί το ότι το νερό, κατά τη διέλευσή του από τους υδροστρόβιλους δεν υφίσταται κάποια αλλοίωση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών, επομένως είναι κατάλληλο για την ίδια χρήση (άρδευση και ενδεχόμενα ύδρευση), όπως και πριν την προσαγωγή του στο ΥΗΕ.

#### γ) Βιολογικές

Κατάντη του φράγματος η παροχή στη φυσική κοίτη του ποταμού μπορεί ακόμη και να μηδενισθεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ιδιαίτερα εάν η λεκάνη υδροληψίας είναι μεγάλης χωρητικότητας. Το γεγονός αυτό θα είχε καταστρεπτικές συνέπειες στην επιβίωση της χλωρίδας και της πανίδας, τουλάχιστον στη ζώνη μεταξύ υδροληψίας και ΥΗΣ. Για το λόγο αυτό απαιτείται η διατήρηση μιας ελάχιστης παροχής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, η οποία να διαρρέει τη φυσική κοίτη, η οικολογική παροχή. Υψηλή τιμή της παροχής συντήρησης αντιστοιχεί σε μείωση της διαθέσιμης παροχής για παραγωγή ενέργειας και μειωμένα έσοδα του έργου. Εάν δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε μία συγκεκριμένη περίπτωση, η παροχή συντήρησης πρέπει

να είναι τουλάχιστον ίση προς ελάχιστη φυσική παροχή του υδατορέματος ή προς το 30% της μέσης παροχής των θερινών μηνών.

Η σημαντικότερη επίπτωση στο βιολογικό τομέα είναι ότι η ύπαρξη του φράγματος αποτελεί ένα ανυπέρβλητο εμπόδιο στα είδη των ψαριών που διακινούνται κατά μήκος του ποταμού. Όπως πιο αναλυτικά αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4 του παρόντος, για να μπορούν τα ψάρια να παρακάμπτουν το φράγμα (ή τον εκχειλιστή) πρέπει να διαμορφωθεί μία δίοδος ώστε αφενός να αποτρέπεται η προσέγγιση τους στις ζώνες υψηλής τύρβης (κοντά στην υδροληψία όπου θα οδηγηθούν μετά στους στροβίλους με αποτέλεσμα το θάνατο τους) και αφετέρου να οδηγηθούν στη διώρυγα. Η διακινούμενη παροχή στη διώρυγα μπορεί να είναι και η παροχή συντήρησης έτσι ώστε να μην αποτελεί μία πρόσθετη απώλεια νερού.

#### δ) Ατμοσφαιρικές

Οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα από ένα ΥΗΕ προκαλούνται από την επιφάνεια την οποία καταλαμβάνει η λεκάνη υδροληψίας (ανάτη δεξαμενή). Στην περίπτωση μεγάλου ταμιευτήρα αυξάνεται η υγρασία λόγω της εξάτμισης που λαμβάνει χώρα και μεταβάλλεται το μικροκλίμα της περιοχής. Στα μικρά ΥΗΕ λόγω της πολύ μικρής έκτασης της υδροληψίας οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα είναι πρακτικά αμελητέες.

Κατά την παραγωγή ενέργειας από μΥΗΕ (και εν γένει ΥΗΕ) δεν εκπέμπονται αέριοι ρύποι (π.χ. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως συμβαίνει κατά τη χρήση των συμβατικών καυσίμων. Το γεγονός αυτό όμως δεν είναι θετική περιβαλλοντική επίπτωση για τη θέση εγκατάστασης καθότι η εγκατάσταση του ΥΗΣ δεν συνιστά βελτίωση. Η βελτίωση αυτή είναι σε ένα ευρύτερο χωρικό τμήμα από αυτό που μελετάται σε μία ΜΠΕ.

Στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα της παρουσίας ενός μΥΗΕ στην περιοχή που αυτό εγκαθίστανται δεν μπορούν να υπολογιστούν θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε άλλες περιοχές, αδικώντας έτσι το έργο. Για παράδειγμα στην Ελλάδα η παρουσία αρκετών μΥΗΕ βάσης σε διάφορες περιοχές, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας που παράγεται από τα λιγνιτικά εργοστάσια στην Πτολεμαΐδα, επομένως η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας εκεί μειώνεται σημαντικά, κάτι που συνιστά θετική περιβαλλοντική επίπτωση.

#### ε) Απόβλητα

Και στις δύο περιπτώσεις μΥΗΣ (με ή χωρίς ταμιευτήρα) έχουν παρατηρηθεί οι ακόλουθες επιπτώσεις ως προς τη δημιουργία αποβλήτων. Στη φάση της κατασκευής του μΥΗΣ δημιουργούνται κάποια απόβλητα, κυρίως από εξαρτήματα, λάδια ή και από τους εργαζομένους, τα οποία όμως είναι μικρής κλίμακας όγκου. Τα απόβλητα αυτά θα πρέπει να έχει οριστεί από τη σύμβαση με τον εργολάβο να απομακρυνθούν και να διατεθούν κατάλληλα. Κατά τη λειτουργία ενός ΥΗΣ δεν δημιουργούνται ιδιαίτερης επικινδυνότητας απόβλητα. Συνήθως αυτά είναι οικιακής μορφής και διατίθενται εύκολα. Πρόσθετα κατά τη λειτουργία του έργου και προκειμένου να μην μειωθεί η αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα, πραγματοποιείται τακτικός καθαρισμός του πυθμένα του από τις συσσωρεύσεις φερτών υλικών και βούρκου (βυθοκορήσεις). Έτσι δημιουργούνται κάποια απόβλητα τα οποία επίσης θα πρέπει να αποτίθενται

κατάλληλα. Στο σημείο αυτό θα αναφερθεί και μια επίπτωση βιολογικού χαρακτήρα των βυθοκορήσεων. Τα ψάρια συνηθίζουν να αφήνουν τα αυγά του σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν έντονη τύρβη. Αν οι βυθοκορήσεις πραγματοποιηθούν σε τέτοιες θέσεις, τα αυγά αυτά καταστρέφονται. Ως εκ τούτου οι βυθοκορήσεις σε μια περιοχή θα πρέπει να προγραμματίζονται με τη συμβουλή βιολόγου εξοικειωμένου με τον υδροβιότοπο της περιοχής.

Τέλος για τη λειτουργία του στροβίλου και της γεννήτριας με ελαχιστοποιημένες τριβές και άρα φθορά απαιτείται η χρήση λιπαντικών ουσιών, για τις οποίες απαιτείται ιδιαίτερη μέριμνα για τη συλλογή και διαχείριση τους σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία περί διάθεσης χρησιμοποιούμενων ορυκτέλαιων (ΥΑ 72751/3054/85 και ΥΑ 98012/2001).

### 7.3.2 Στο κοινωνικό και πολιτιστικό περιβάλλον

#### α) Οπτική επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον

Τα ΥΗΕ κατασκευάζονται κατά κανόνα σε ορεινές περιοχές φυσικού κάλλους. Η κύρια οπτική ενόχληση προκαλείται από το φράγμα και το έργο υδροληψίας, τη διώρυγα προσαγωγής, τις οδούς προσπέλασης, τον αγωγό προσαγωγής, το κτίριο του ΥΗΣ και τις γραμμές μεταφοράς. Από τα προηγούμενα το περισσότερο ενοχλητικό είναι ο αγωγός προσαγωγής, λόγω του μήκους του, και το έργο υδροληψίας το οποίο όμως καταλαμβάνει συνήθως μικρή έκταση. Η εγκατάσταση ολόκληρου του αγωγού πτώσης πλήρως υπόγειου αυξάνει το κόστος σημαντικά, ενώ δεν είναι πάντοτε εφικτή. Τα πρηνή που διαμορφώνονται κατά μήκος της διώρυγας προσαγωγής προκαλούν οπτική υποβάθμιση κατά τη φάση της κατασκευής, όμως καλύπτονται από αυτοφυή βλάστηση μετά από σύντομο χρονικό διάστημα.

Το κτίριο του ΥΗΣ συνήθως δεν προκαλεί οπτική ενόχληση στο περιβάλλον, καθώς με διάφορες αρχιτεκτονικές επεμβάσεις, που δεν επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος, μπορούν να ενταχθούν πολύ ικανοποιητικά στον περιβάλλοντα χώρο. Συνήθως στην εξωτερική όψη του κτιρίου του ΥΗΣ ακολουθείται, όσο αυτό είναι δυνατό, η τοπική αρχιτεκτονική. Επίσης ο περιβάλλον χώρος του ΥΗΣ, μετά την ολοκλήρωση των εργασιών, μπορεί να γίνει καλαίσθητος με μικρές σχετικά επεμβάσεις.

Κατά τη φάση της κατασκευής του ΥΗΕ η οπτική ενόχληση στην περιοχή μπορεί να είναι σημαντική και προέρχεται από την εγκατάσταση του εργοταξίου, την απόθεση της περίσσειας των εκσκαφών, την ενδεχόμενη δημιουργία δανειοθαλάμων από υλικά χρήσιμα για την κατασκευή του έργου κλπ. Για το λόγο αυτό θα πρέπει στις προδιαγραφές κατασκευής του έργου να προβλέπεται σαφώς η πλήρης αποκατάσταση των χώρων μετά την ολοκλήρωση των εργασιών.

Σε ορισμένες περιοχές οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως προστατευόμενες (εθνικοί δρυμοί, περιοχές natura), σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους ή με ιδιαίτερη αρχαιολογική αξία η κατασκευή ενός μικρού ΥΗΕ είναι ουσιαστικά απαγορευμένη, καθώς είναι πολύ δύσκολο να ικανοποιηθούν οι περιβαλλοντικοί όροι κατά τη διαδικασία προέγκρισης χωροθέτησης.

Η διέλευση των καλωδίων μέσης τάσης προκαλεί μία οπτική υποβάθμιση της περιοχής, ενώ παράλληλα μπορεί να είναι εστία κινδύνου πυρκαγιάς από βραχυκύκλωμα ή αστοχία στο δίκτυο μεταφοράς.

## β) Ασφάλεια

Από πλευράς ασφάλειας και άλλων κινδύνων στο περιβάλλον και τους ανθρώπους οι επιπτώσεις ενός μικρού ΥΗΕ είναι συνήθως αμελητέες λόγω του μικρού ύψους και χωρητικότητας του ταμιευτήρα του φράγματος, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κύρια πηγή κινδύνου είναι αυτή της αστοχίας του φράγματος. Η λειτουργία του έργου και κυρίως οι γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύουν ένα αυξημένο κίνδυνο πρόκλησης πυρκαγιάς από βραχυκύκλωμα, τουλάχιστον για τα ΥΗΕ που κατασκευάζονται σε ορεινές περιοχές με δασική κάλυψη.

Τα εργατικά ατυχήματα τόσο κατά τη φάση της κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία του έργου είναι συνήθως τυχαία περιστατικά των οποίων η συχνότητα και η κατηγορία στην οποία εντάσσονται (θανατηφόρα, σοβαρά και ελαφρά) εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η φύση του έργου και κυρίως τα λαμβανόμενα μέτρα ασφαλείας). Τις περισσότερες φορές η εκτίμηση του κινδύνου εργατικών ατυχημάτων γίνεται βάσει στατιστικών στοιχείων από ΥΗΕ που έχουν ήδη κατασκευαστεί. Σε κάθε περίπτωση, τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία ενός μικρού ΥΗΕ ο κίνδυνος εργατικών ατυχημάτων δεν είναι μεγαλύτερος αυτού των άλλων τεχνικών έργων (οδών, γεφυρών κλπ).

## γ) Θόρυβος

Η κατασκευή ενός ΥΗΕ εμφανίζει αρκετά υψηλά επίπεδα θορύβου σε όλα τα στάδια, και στα έργα οδοποιίας για να γίνει προσβάσιμη η θέση του έργου και για τα έργα θεμελίωσης των εγκαταστάσεων και για τα έργα της κατασκευής καθ' αυτής. Τα επίπεδα αυτά του θορύβου είναι για μικρό χρονικό διάστημα αλλά δεν αναιρείται ότι δημιουργούν θέματα στην τοπική πανίδα.

Η λειτουργία ενός ΥΗΕ συνοδεύεται από εκπομπή θορύβου. Ο θόρυβος προέρχεται από τη λειτουργία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του ΥΗΣ, με κυριότερες πηγές θορύβου τους υδροστροβίλους, τις γεννήτριες και το σύστημα εξαερισμού τους και το μετασχηματιστή. Από αυτούς τη σημαντικότερη συμμετοχή στην εκπομπή θορύβου έχει το σύστημα εξαερισμού των γεννητριών.

Η στάθμη του θορύβου στον περιβάλλοντα χώρο είναι δυνατό να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών στην κατασκευή του ΥΗΣ, όπως κατασκευή του με διπλό τοίχο με τη παρεμβολή ηχομονωτικού υλικού όπως είναι ο πετροβάμβακας ή ο υαλοβάμβακας, ή τη διαμόρφωση του ΥΗΣ πλήρως υπόγειο. Επίσης, είναι συνηθισμένη πρακτική κατά την παραγγελία να ζητείται όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός από μια εταιρεία με περιορισμό ως προς την ένταση του ήχου στην πλήρη λειτουργία, ώστε να εξασφαλίζεται η συμμόρφωση της εγκατάστασης με τα όρια. Στο εξωτερικό αναφέρονται περιπτώσεις κατασκευής μικρών ΥΗΣ μέσα σε αστικές περιοχές πληρώντας πολύ αυστηρούς περιβαλλοντικούς όρους.

## δ) Οικονομικές

Η παραγωγή ενέργειας από ΥΗΣ παρουσιάζει και αρκετά τεχνικοοικονομικά οφέλη όπως ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί αυξάνουν την αξιοπιστία του δικτύου καθότι είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις ζητηθεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια, σε αντίθεση με τους θερμικούς

σταθμούς. Οι μΥΗΣ ροής έχουν βέβαια το ζήτημα της διαθεσιμότητας λόγω της στοχαστικότητας της απορροής, φαινόμενο όμως περιορισμένο σε σχέση με το αντίστοιχο στις ανεμογεννήτριες. Επίσης εμφανίζουν πολύ υψηλή απόδοση της τάξης του 90% σε αντίθεση με τα θερμοηλεκτρικά όπου η απόδοση εξαρτάται από τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου η οποία στον ελληνικό λιγνίτη δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή ακόμη και σε σχέση με το λιγνίτη άλλων χωρών. Πολύ σημαντικό είναι ότι έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού ο Η/Μ εξοπλισμός έχει διάρκεια ζωής της τάξης των 20 χρόνων και με την προϋπόθεση ότι συντηρείται επιμελώς (συντήρηση η οποία έχει μικρό κόστος), εμφανίζει άριστη διαχρονική συμπεριφορά. Τέλος, για τη φάση κατασκευής του μΥΗΕ ανοίγονται πολλές θέσεις εργασίας στην τοπική κοινωνία, ενώ ενισχύεται σημαντικά και ο κλάδος παροχής υπηρεσιών της τοπικής κοινωνίας.

Τα παραπάνω δεν σημαίνουν ότι δεν υπάρχουν αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις. Οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν τη μετακίνηση των ανθρώπων και των κατοικιών τους, που βρίσκονται εγκατεστημένοι στις περιοχές, που κατασκευάζεται ο ταμιευτήρας και τα υπόλοιπα οικοδομικά έργα, την αλλαγή του αντικειμένου εργασίας τους και στην απώλεια των γεωργικών εκτάσεων που εκμεταλλεύονταν οικονομικά και πλέον κατακλύζονται από τα νερά που συγκεντρώνονται στον ταμιευτήρα. Προφανώς και οι εκτάσεις αυτές απαλλοτριώνονται αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι τα ποσά αυτά είναι ικανοποιητικά καθώς επίσης και ότι οι ιδιοκτήτες έχουν την δυνατότητα να βρουν άλλη μορφή απασχόλησης.

#### ε) Υποδομές

Τα ΥΗΕ, όπως αναφέρεται και παραπάνω, κατασκευάζονται συνήθως σε απομακρυσμένες ορεινές περιοχές φυσικού κάλλους. Αυτό σημαίνει ότι στην καλύτερη περίπτωση η πρόσβαση στις περιοχές αυτές γίνεται μέσω στενών αγροτικών οδών, ενώ στη χειρότερη περίπτωση η πρόσβαση είναι δύσκολη ακόμη και για πεζούς. Επομένως η κατασκευή του ΥΗΕ στην περιοχή αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εκτέλεση περιφερειακών έργων, τη διάνοιξη καινούργιων δρόμων, την ανάπτυξη δικτύων, την οικιστική και τη βιομηχανική ανάπτυξη. Με τα έργα αυτά παίρνουν μεγαλύτερη αξία και οι εκτάσεις της περιοχής, αφού πια είναι πιο εύκολο να ηλεκτροδοτηθούν ενώ η προσβασιμότητά τους κατ' ελάχιστο βελτιώνεται σημαντικά. Επίσης η προσβασιμότητά τους εξασφαλίζεται και για τα χρόνια λειτουργίας του ΥΗΕ με δωρεάν συντήρηση, καθότι ο κύριος του έργου θέλει το έργο να είναι επισκέψιμο προς συντήρηση.

Συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνοπτικά ανάλογα με τη φάση κατασκευής του έργου. Είναι προφανές ότι τα οφέλη από την κατασκευή ενός μΥΗΕ είναι πολλαπλά σε σχέση με τις οχλήσεις που δημιουργούνται και ως επί το πλείστο έχουν παροδικό χαρακτήρα.



Περιβαλλοντική επίπτωση ως προς το:		Φάση κατασκευής		Φάση λειτουργίας	
		Θετικές	Αρνητικές	Θετικές	Αρνητικές
Φυσικό Περιβάλλον	Υδρολογικές			<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Η παρουσία του ταμιευτήρα παρέχει κάποια ρύθμιση των πλημμυρικών παροχών προς τα κατάντη</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα επηρεάζει την ασφάλεια των προϋπάρχουσων κατασκευών</li> <li>▪ Δημιουργούνται συνθήκες αποξυγόνωσης – ευτροφισμού</li> <li>▪ Αλλαγή της ενδιαίτησης στα κατάντη του έργου</li> </ul>
	Εδαφικές				<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Μεταβολή της στερεοπαροχής κατάντη του έργου</li> </ul>
	Βιολογικές		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Θόρυβος κατά τις εργασίες</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Η παρουσία ταμιευτήρα δυσκολεύει τη διέλευση ψαριών</li> </ul>
	Ατμοσφαιρικές			<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη θέση των παραδοσιακών μονάδων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Αλλαγή του μικροκλίματος της περιοχής λόγω του ταμιευτήρα</li> </ul>

	Απόβλητα		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Εκσκαφές εδαφών για τη θεμελίωση των έργων</li> <li>▪ Απόβλητα οικιακού τύπου από την παρουσία των εργατών</li> <li>▪ Απόβλητα βιομηχανικού τύπου (λιπαντικά, εξαρτήματα κλπ.)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Απόβλητα οικιακού τύπου από την παρουσία των λειτουργών της εγκατάστασης</li> <li>▪ Απόβλητα από τη βυθοκόρηση σε περίπτωση μΥΗΕ με ταμειυτήρα</li> <li>▪ Προϊόντα εσχάρωσης και εξάμμωσης</li> </ul>
Κοινωνικό & Πολιτιστικό Περιβάλλον	Κοινωνικές		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Θόρυβος κατά τη διάρκεια των εργασιών</li> <li>▪ Κίνδυνος εργατικών ατυχημάτων όπως σε κάθε τεχνικό έργο</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Θόρυβος από τη λειτουργία του Η/Μ εξοπλισμού</li> <li>▪ Οπτική όχληση ο αγωγός πτώσης στο φυσικό τοπίο</li> <li>▪ Αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς λόγω της εγκατάστασης γραμμών μεταφοράς σε δασική συνήθως περιοχή</li> </ul>
	Οικονομικές	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Άνοιγμα θέσεων ανειδίκευτης εργασίας στην τοπική κοινωνία</li> <li>▪ Οικονομική αναβάθμιση όλων των</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Απαλλοτρίωση των εκτάσεων που θα καλυφθούν από νερό</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Θέσεις εργασίας για τη φύλαξη και εποπτεία του έργου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ενδεχόμενη αλλαγή οικονομικών δραστηριοτήτων όσων πλήττονται από την κατασκευή του ΥΗΕ</li> </ul>

		τοπικών επιχειρήσεων παροχής υπηρεσιών όπως διαμονής, εστίασης			
Αξία και χρήσεις γης				<ul style="list-style-type: none"> <li>Αναβάθμιση της αξίας της γης λόγω των υποδομών οδοποιίας και δικτύου</li> </ul>	
Υποδομές	<ul style="list-style-type: none"> <li>Κατασκευή ή βελτίωση της οδοποιίας και προς τη θέση υδροληψίας και προς τη θέση του ΥΗΣ</li> <li>Επέκταση του δικτύου για τη σύνδεση με τον ΥΗΣ</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>Διαρκής συντήρηση των υποδομών στη διάρκεια ζωής του έργου</li> </ul>	
Αναψυχή				<ul style="list-style-type: none"> <li>Δημιουργείται νέος υδροβιότοπος και με τον ταμιευτήρα μπορούν να αναπτυχθούν τουριστικές δραστηριότητες, αλιευτικές κλπ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ενδεχόμενα παύουν να υφίστανται ποτάμια δραστηριότητες με την κατασκευή του έργου.</li> </ul>



## 8 Οικονομοτεχνική Ανάλυση Μικρών Υδροηλεκτρικών Μονάδων

### 8.1 Εισαγωγή

Η οικονομοτεχνική ανάλυση ενός μικρού ΥΗΕ έχει ως αντικείμενο την εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου. Το κριτήριο της οικονομικής βιωσιμότητας εξαρτάται από το εάν το μικρό ΥΗΕ τροφοδοτεί ένα διασυνδεδεμένο ή ένα αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο.

Εάν το μΥΗΕ θα τροφοδοτήσει ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο, τότε πρόκειται για μία επένδυση η οποία θα πρέπει να είναι αποδοτική συγκρινόμενη με άλλη εναλλακτική τοποθέτηση των χρημάτων, θα πρέπει δηλαδή η απόδοση των χρημάτων που θα επενδυθούν να είναι μεγαλύτερη από αυτή που αναμένεται εάν είχαν κατατεθεί σε τραπεζικό λογαριασμό. Η ανάλυση της οικονομικής απόδοσης ενός μικρού ΥΗΕ δεν είναι απλή όταν το μικρό ΥΗΕ συνδυάζεται με άλλες χρήσεις και διευθετήσεις όπως η ύδρευση, η άρδευση, η τουριστική αξιοποίηση κλπ. Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την έντονη διακύμανση της φυσικής απορροής κατά τη διάρκεια ενός έτους καθώς και τη διακύμανσή της από έτος σε έτος τίθεται έντονα το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του έργου και επιλογής του μεγέθους και του πλήθους των υδροτροβίλων ώστε να μεγιστοποιηθεί η οικονομική του απόδοση, ανεξάρτητα της παραγόμενης ανά έτος ενέργειας και της καμπύλης διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας.

Στην περίπτωση κατά την οποία το μικρό ΥΗΕ προβλέπεται να καλύπτει εν μέρει ή στο σύνολό του ένα αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή καλύπτει μία ανελαστική ανάγκη (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), η οικονομική του απόδοση θα πρέπει να συγκριθεί με άλλους εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδα Diesel, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, τη δυνατότητα συνεχούς τροφοδοσίας του δικτύου κ.ά.. Στην περίπτωση αυτή η μονάδα παραγωγής διαστασιοποιείται έτσι ώστε να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου, τόσο τις σημερινές, όσο και τις αναμενόμενες μετά από μερικά χρόνια (π.χ. μετά από 10 χρόνια).

Συγκρίνοντας ένα μικρό ΥΗΕ με μία μονάδα Diesel οι κύριες οικονομοτεχνικές διαφορές εντοπίζονται στο ότι ένα μΥΗΕ έχει υψηλό κόστος επένδυσης, μεγάλη διάρκεια ζωής (περί τα 15÷30 έτη), σταθερά και μικρά λειτουργικά έξοδα, διαθεσιμότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα παροχής νερού, μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενώ μια μονάδα Diesel χαμηλό κόστος επένδυσης (περίπου το 1/3 του αντίστοιχου μικρού ΥΗΕ), μικρή διάρκεια ζωής (περί τα 5÷15 έτη), υψηλά λειτουργικά έξοδα που εξαρτώνται από τις διακυμάνσεις της τιμής του καυσίμου, υψηλή διαθεσιμότητα στην παραγωγή ενέργειας, σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (θόρυβος, ρύπανση).

Στον ελληνικό χώρο, το 99% περίπου των κατοικημένων περιοχών καλύπτονται από το διασυνδεδεμένο δίκτυο της ΔΕΗ και για το λόγο αυτό η περίπτωση κάλυψης ενός αυτόνομου δικτύου είναι σπάνια ή περιορισμένη (για παράδειγμα στο Άγιο Όρος ή σε μικρά νησιά στα οποία όμως κατά κανόνα η υδραυλική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη). Για τους λόγους αυτούς η περίπτωση τροφοδοσίας αυτόνομου δικτύου δεν θα αναλυθεί ιδιαίτερος στη συνέχεια.

Δεν θα πρέπει να παραβλεφθεί το σημαντικό όφελος που προκύπτει σε επίπεδο εθνικής οικονομίας από την όσο το δυνατό μεγαλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδροδυναμικού, μικρής και

μεγάλης κλίμακας, καθώς πρόκειται για μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό οι διάφορες κυβερνήσεις δίνουν κίνητρα ή επιδοτήσεις για την κατασκευή ή ανακατασκευή και ανανέωση του εξοπλισμού των μικρών ΥΗΕ ή επιδοτούν το τιμολόγιο αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η οικονομοτεχνική ανάλυση είναι απαραίτητη για την κατάταξη των πιθανών θέσεων κατασκευής μικρών ΥΗΕ και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάταξης ενός μικρού ΥΗΕ σε δεδομένο υδατόρεμα (προσδιορισμός της θέσης κατασκευής του φράγματος και της υδροληψίας και της θέσεως εγκατάστασης του ΥΗΣ). Η οικονομική ανάλυση ενός μικρού ΥΗΕ, μετά την ολοκλήρωση των βελτιστοποιήσεων, συμπληρώνεται με τη χρηματοδοτική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο χρηματοδότησης του έργου, δηλαδή το ποσοστό της επιδότησης (εάν αυτή υπάρχει), το ύψος και τους όρους του τραπεζικού δανείου κλπ. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει η αναμενόμενη χρηματορροή, η δυνατότητα κάλυψης των λειτουργικών εξόδων και εξόδων συντήρησης, η αποπληρωμή του δανείου.

Στην οικονομική ανάλυση που ακολουθεί λαμβάνονται υπόψη δαπάνες και έσοδα τα οποία είναι μετρήσιμα με καθαρά οικονομικούς όρους και όχι αυτά που σχετίζονται με κοινωνικές ή άλλες επιπτώσεις, όπως για παράδειγμα το εξωτερικό κόστος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή η παράλληλη ανάπτυξη τουριστικής δραστηριότητας.

## **8.2 Βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης**

### **α) Χρονική διάρκεια**

Η διάρκεια ζωής ενός μικρού ΥΗΕ είναι της τάξεως των 15-30 ετών, ενώ η διάρκεια ζωής των έργων πολιτικού μηχανικού είναι τουλάχιστον 50 χρόνια. Στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου και ανάλογα με τις συνθήκες θα πρέπει να αποφασισθεί είτε η ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού είτε η πλήρης ανακατασκευή του. Η οικονομική ανάλυση θα πρέπει να γίνεται για ένα χρονικό ορίζοντα της τάξεως των 20 ετών.

Στην οικονομική βιωσιμότητα του μικρού ΥΗΕ σημαντικό ρόλο παίζει η διάρκεια κατασκευής του, δηλαδή η περίοδος κατά την οποία υπάρχουν υψηλές δαπάνες αλλά μηδενικά έσοδα. Συνήθως η διάρκεια κατασκευής ενός μικρού ΥΗΕ είναι της τάξεως του ενός με δύο έτη με περισσότερο πιθανή αυτή των 2 ετών (εκτός και εάν πρόκειται για ΥΗΕ πολύ μικρής ισχύος, της τάξεως των 100 [kW]). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διάρκεια των μελετών και των διαδικασιών δανειοδότησης είναι τουλάχιστον δύο έτη στα οποία υπάρχουν δαπάνες. Στην πράξη και για λόγους απλοποίησης ως αφετηρία της οικονομικής ανάλυσης θεωρείται συνήθως η έναρξη της κατασκευής του έργου (και όχι η έναρξη των διαδικασιών και μελετών).

### **β) Επιτόκιο δανεισμού**

Το επιτόκιο δανεισμού υπεισέρχεται στη χρηματοδοτική ανάλυση καθώς εκφράζει την ποσοστιαία προσαύξηση που πρέπει να καταβληθεί στο δανειοδότη για το ποσό του δανείου με

το οποίο καλύπτεται μέρος της συνολικής επένδυσης. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται από την οικονομική κατάσταση και την οικονομική πολιτική του κράτους.

#### γ) Προεξοφλητικό επιτόκιο

Το προεξοφλητικό επιτόκιο λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της σημερινής αξίας ενός χρηματικού ποσού που θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί στο μέλλον και χρησιμοποιείται στην ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας μίας επένδυσης. Συνήθως λαμβάνεται υψηλότερο από το επιτόκιο δανεισμού έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι οικονομικές αβεβαιότητες και η αβεβαιότητα της παραγωγής κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας του έργου. Πρόκειται επίσης για μακροοικονομικό μέγεθος.

#### δ) Πληθωρισμός

Ως πληθωρισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αύξησης (θετικός πληθωρισμός) ή μείωσης (αρνητικός πληθωρισμός) των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών με το πέρασμα του χρόνου, κατά τρόπο μη ομοιόμορφο για κάθε ένα από αυτά. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας, όσο και τις διεθνείς εξελίξεις. Ιδιαίτερα στα ΥΗΕ, των οποίων η διάρκεια ζωής είναι σημαντική, η εξέλιξη του πληθωρισμού σε τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα είναι δύσκολο να προβλεφθεί.

#### ε) Αναγωγή σε παρούσα αξία

Λόγω των επιτοκίων, η σημερινή (ή παρούσα) αξία  $A_0$  ενός ποσού χρημάτων  $A_n$  το οποίο θα εισπραχθεί (ή θα δαπανηθεί) μετά από  $n$  χρόνια δίνεται από τη σχέση:

$$A_0 = \frac{A_n}{(1+r)^n} \quad (8.1)$$

στην οποία με  $r$  συμβολίζεται το προεξοφλητικό επιτόκιο. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή ένα ποσό 100[€] το οποίο θα εισπραχθεί μετά από 5 χρόνια και με επιτόκιο  $r=10\%$  αξίζει σήμερα 62[€] ή αντίστοιχα, εάν κατατεθεί σήμερα στην τράπεζα το ποσό των 62[€], με επιτόκιο 10% και μετά από 5 χρόνια η κατάθεση θα έχει γίνει 100[€]. Ο όρος  $\frac{1}{(1+r)^n}$  ονομάζεται συντελεστής παρούσας αξίας.

Επειδή η διάρκεια ζωής ενός μικρού ΥΗΕ είναι σημαντική, για 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 δυνατή η εφαρμογή μίας μεθόδου οικονομικής ανάλυσης σε ένα μικρό ΥΗΕ θα πρέπει να είναι γνωστά τουλάχιστο η εγκατεστημένη ισχύς, η ετήσια παραγωγή ενέργειας, το συνολικό ύψος της επένδυσης (προϋπολογισμός του έργου), το τιμολόγιο πώλησης της ενέργειας, το επιτόκιο δανεισμού και καταθέσεως, ο πληθωρισμός, η χρονική περίοδος οικονομικής διαχείρισης, η διάρκεια κατασκευής του έργου, τα ετήσια λειτουργικά έξοδα (συντήρηση, ασφάλεια, μισθοί, απόσβεση κλπ).

### 8.3 Τεχνικές και κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας

α) Λόγος εσόδων προς έξοδα BCR (Benefit to Cost Ratio)

Ο λόγος εσόδων προς τα έξοδα εκφράζει το πηλίκο του αθροίσματος  $B_0$  των εσόδων καθ' όλη τη διαχειριστική περίοδο  $n$  ετών (ανηγμένα σε παρούσα αξία), προς το άθροισμα των εξόδων  $C_0$  (ανηγμένων επίσης σε παρούσα αξία), δηλαδή

$$BCR = \frac{B_0}{C_0} = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+r)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+r)^j}} \quad (8.2)$$

στην οποία με  $B_j$  και  $C_j$  συμβολίζονται τα ετήσια έσοδα και έξοδα κατά το έτος  $j$  μετά την έναρξη της επένδυσης και με  $r$  το μέσο επιτόκιο προεξόφλησης.

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει ο λόγος BCR να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Ο δείκτης αυτός πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, καθώς μία επένδυση με την υψηλότερη τιμή του BCR δεν αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο όφελος, δεδομένου ότι δεν αποδίδει την τάξη των μεγεθών (ως λόγος μεγεθών) και για το λόγο αυτό θα πρέπει να συνοδεύεται με την εξέλιξη του αριθμητή. Σε διάγραμμα της παρούσας αξίας εσόδων προς την παρούσα αξία κόστους, η ευθεία με κλίση  $45^\circ$  αντιστοιχεί στο όριο για το οποίο ο λόγος εσόδων προς έξοδα γίνεται ίσος προς μονάδα, οπότε η επένδυση γίνεται οριακά αποδεκτή.

β) Καθαρή παρούσα αξία NPV (Net Present Value)

Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης εκφράζεται από τη διαφορά της παρούσας αξίας του αθροίσματος των εσόδων μείον την παρούσα αξία του αθροίσματος των εξόδων και δαπανών, δηλαδή

$$NPV = B_0 - C_0 = \sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+r)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+r)^j} \quad (8.3)$$

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας να είναι θετική. Έργα με αρνητική παρούσα αξία πρέπει να απορρίπτονται. Ο δείκτης αυτός είναι χρήσιμος για την κατάταξη διαφόρων εναλλακτικών λύσεων κατά σειρά οικονομικής βιωσιμότητας: το πλέον αποδοτικό είναι αυτό στο οποίο αντιστοιχεί υψηλότερη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας.

γ) Διάρκεια αποπληρωμής

Εκφράζει το πλήθος των ετών που απαιτούνται ώστε τα αναμενόμενα καθαρά έσοδα (έσοδα μείον τα λειτουργικά έξοδα) να αποπληρώσουν το ποσό της επένδυσης. Συνήθως υπολογίζεται χωρίς την αναγωγή των διαφόρων ποσών σε παρούσα αξία. Η διάρκεια αποπληρωμής ενός μικρού ΥΗΕ



δε πρέπει να ξεπερνά τα 7 έτη ώστε να μπορεί να κριθεί ως οικονομικά βιώσιμο. Το κριτήριο αυτό δεν επιτρέπει την κατάταξη διαφόρων μικρών ΥΗΕ, κατά σειρά οικονομικής απόδοσης, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την απόδοση της επένδυσης καθ' όλη διάρκεια ζωής του.

#### δ) Κριτήριο εσωτερικής απόδοσης της επένδυσης IRR (Internal Rate of Return)

Στο κριτήριο του λόγου εσόδων προς έξοδα (BCR) και της καθαρής παρούσας αξίας τα διάφορα μεγέθη ανάγονται στην παρούσα αξία τους, ώστε να είναι συγκρίσιμα από οικονομικής πλευράς μέσω της σχέσης αναγωγής, στην οποία σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου  $r$ . Όσο η τιμή του επιτοκίου  $r$  αυξάνεται, τόσο μειώνεται η τιμή των BCR και NPV και κινδυνεύει η επένδυση να αποδειχθεί ως οικονομικά μη βιώσιμη. Ως εσωτερική απόδοση μίας επένδυσης ορίζεται η τιμή του επιτοκίου IRR για την οποία η καθαρή παρούσα αξία γίνεται μηδενική. Δεδομένου ότι η τιμή του επιτοκίου  $r$  με το οποίο γίνονται οι αναγωγές στην παρούσα αξία είναι ένα μέγεθος μακροοικονομικό και ενδέχεται να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, το κριτήριο της εσωτερικής απόδοσης εκφράζει το πόσο κινδυνεύει να ανατραπεί η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου λόγω μεταβολής των επιτοκίων.

Ο υπολογισμός της τιμής της εσωτερικής απόδοσης IRR γίνεται με δοκιμές, δηλαδή υπολογίζεται η καθαρή παρούσα αξία NPV για διάφορες τιμές του επιτοκίου  $r$ , οπότε η τιμή της εσωτερικής απόδοσης IRR είναι αυτή για την οποία η καμπύλη  $NPV=f(r)$  μηδενίζεται.

#### ε) Κόστος παραγόμενης μονάδας ενέργειας

Το μέγεθος αυτό προκύπτει ως ο λόγος των συνολικών ετήσιων δαπανών προς την ενέργεια  $E$  [kWh] που αναμένεται να παραχθεί σε ένα έτος. Ως συνολικές ετήσιες δαπάνες εννοείται το άθροισμα της ετήσιας απόσβεσης  $A$  του έργου και των λειτουργικών δαπανών  $C$ .

Η ετήσια σταθερή απόσβεση  $A$  υπολογίζεται από το ότι το συνολικό ύψος της επένδυσης  $K$  θα πρέπει να είναι ίσο προς την παρούσα αξία των χρηματικών ποσών  $A$  κατά τη διάρκεια ζωής της επένδυσης, δηλαδή επί  $n$  έτη:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{A}{(1+r)^i} = A \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} = A \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (8.4)$$

Άρα το κόστος της παραγόμενης μονάδας ενέργειας [kWh] θα είναι ίσο προς:

$$K_E = \frac{A + C}{E} \quad (8.5)$$

στην οποία η ετήσια καθαρή απόσβεση  $A$  προκύπτει από την εξίσωση (8.4).

#### ζ) Έλεγχος ευαισθησίας

Ο υπολογισμός των κριτηρίων οικονομικής βιωσιμότητας μίας επένδυσης βασίζεται στην εκτίμηση ορισμένων οικονομοτεχνικών μεγεθών, όπως του ύψους της επένδυσης, του επιτοκίου, της παραγόμενης ενέργειας ετησίως κλπ. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να ελεγχθεί η ευαισθησία

της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης στις μεταβολές των βασικών εκτιμήσεων. Προκύπτει ότι η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές των εσόδων (παραγόμενη ενέργεια και τιμή διάθεσής της) και στο επιτόκιο  $r$ .

## **8.4 Υπολογισμός συνιστωσών κόστους κατασκευής μικρών υδροηλεκτρικών έργων**

### 8.4.1 Εισαγωγή

Αν και η διαμόρφωση του συνολικού κόστους ενός ΥΗΕ εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιαιτερότητες του έργου και τις συνθήκες της περιοχής (όπως τις υποδομές, αποστάσεις από κεντρικά οδικά και ηλεκτρικά δίκτυα κλπ.), από το πλήθος των ΥΗΕ που έχουν ήδη κατασκευασθεί είναι δυνατή η εξαγωγή μερικών γενικών συμπερασμάτων.

Το κόστος ενός ΥΗΕ διακρίνεται στο κόστος κατασκευής και το λειτουργικό κόστος. Το κόστος κατασκευής διακρίνεται σε τρεις μεγάλες ενότητες:

- το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού
- το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και
- το κόστος μελετών, επίβλεψης και αδειοδοτήσεων

Η αναλογία των τριών αυτών συνιστωσών στο συνολικό κόστος κατασκευής είναι κατά κανόνα διαφορετική για τα μεγάλα και για τα μικρά ΥΗΕ. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής φιλοσοφίας διαστασιολόγησης και λειτουργίας των μικρών και των μεγάλων ΥΗΕ. Το μΥΗΕ λειτουργεί όσο υπάρχει διαθέσιμη παροχή, ενώ ο βασικός στόχος ενός μεγάλου ΥΗΕ είναι συνήθως η κάλυψη των αιχμών ζήτησης του δικτύου (μέσω του αποθηκευμένου νερού στον ταμιευτήρα), ώστε να αποσυνδέεται η παραγωγή ενέργειας από την ποσότητα των φυσικών εισροών. Για το λόγο αυτό το μΥΗΕ διαστασιολογείται έτσι ώστε να προκύπτει η βέλτιστη αξιοποίηση της φυσικής απορροής χωρίς την κατασκευή μεγάλου φράγματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα αποτελούν τα μΥΗΕ τα οποία σχεδιάζονται με ταμιευτήρα ημερήσιας αναρρύθμισης, όταν ισχύει διαφορετικό τιμολόγιο πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τα μΥΗΕ που συνδυάζονται με άλλες διευθετήσεις, όπως ταμιευτήρες αποθήκευσης νερού για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών. Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι το ότι σε ένα μΥΗΕ, κυρίως τα έργα πολιτικού μηχανικού είναι περιορισμένα σε σύγκριση με ένα μεγάλο, γεγονός που μεταβάλλει την αναλογία μεταξύ των τριών βασικών συνιστωσών του κόστους κατασκευής. Επίσης στα μΥΗΕ χρησιμοποιείται κατά κανόνα τυποποιημένος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, άρα μικρότερου κόστους από τον αντίστοιχο επί παραγγελία για ένα μεγάλο ΥΗΕ.

Η ποσοστιαία συμμετοχή των τριών συνιστωσών κόστους στο συνολικό κόστος κατασκευής είναι 40-50% για τα έργα πολιτικού μηχανικού, 40-60% για τον Η/Μ εξοπλισμό και 10-20% για μελέτες και επίβλεψη.

Στην περίπτωση των μΥΗΕ ο υπολογισμός του ύψους της επένδυσης μέσω μίας τιμής ειδικού κόστους, π.χ. σε [€] ανά εγκατεστημένο [kW], είναι ιδιαίτερα επισφαλής λόγω της σημαντικής επίπτωσης στη διαμόρφωση του κόστους της τιμής της υδραυλικής πτώσης  $h$  και της ιδιαιτερότητας της κάθε περίπτωσης. Η επίδραση της υδραυλικής πτώσης  $h$  στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους γίνεται φανερή αφού η ισχύς  $N$  είναι γινόμενο της παροχής  $Q$  και της υδραυλικής πτώσης  $H$ . Άρα, για την παραγωγή της ίδιας ισχύος  $N$ , όσο αυξάνεται η υδραυλική πτώση  $H$ , τόσο μειώνεται η παροχή  $Q$  και άρα μειώνεται ο όγκος των έργων υδροληψίας, η διάμετρος του αγωγού προσαγωγής, το μέγεθος του υδροστροβίλου, το μέγεθος του ΥΗΣ και κατά συνέπεια μειώνεται το κόστος του έργου. Όμως η μείωση αυτή του κόστους δεν είναι αντιστρόφως ανάλογη της υδραυλικής πτώσης  $H$ , καθώς αύξηση της υδραυλικής πτώσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των στατικών πιέσεων, του πάχους του αγωγού προσαγωγής και της διαμέτρου (άρα του μεγέθους) του υδροστροβίλου και συνήθως αύξηση του μήκους των έργων προσαγωγής του νερού.

Από την υπάρχουσα εμπειρία φαίνεται ότι ένα μΥΗΕ είναι οικονομοτεχνικά βιώσιμο εάν το κόστος ανά εγκατεστημένη ισχύ είναι της τάξεως των  $2000 - 3500 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$ . Σε ειδικές περιπτώσεις κατά τις οποίες μέρος των έργων προϋπάρχουν (για παράδειγμα κατασκευή μΥΗΕ σε διώρυγα άρδευσης ή ύδρευσης) το ειδικό κόστος του μΥΗΕ μπορεί να είναι μικρότερο των  $1500 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$ . Έχει φανεί από συγκεντρωτικά οικονομικά στοιχεία διαφόρων μΥΗΕ (Παπαντώνης, 2008), ότι η διασπορά του ειδικού κόστους είναι σημαντική. Δεν συμβαίνει το ίδιο με τα άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Θερμικές μονάδες, diesel, ανεμογεννήτριες) στα οποία το ειδικό κόστος κυμαίνεται σε στενά όρια. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση του ειδικού κόστους όσο αυξάνεται η υδραυλική πτώση και η οποία είναι έντονη για  $5 < H < 15$  [m]. Για την ίδια τιμή της υδραυλικής πτώσης  $H$  το ειδικό κόστος μειώνεται όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς και μάλιστα η μείωση αυτή είναι περισσότερο έντονη στην περιοχή των πολύ μικρών ΥΗΕ ( $N < 250$  [kW]).

Το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού καθώς και το κόστος για απαλλοτριώσεις γης, έργα υποδομής (οδοί και γέφυρες προσπέλασης) εξαρτώνται έντονα από τη μέγιστη παροχή λειτουργίας του έργου (έργα προσαγωγής), την υπολογιζόμενη πλημμυρική παροχή αλλά και τις τοπικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό το κόστος των έργων αυτών δεν είναι δυνατό να υπολογισθεί μέσω κάποιας απλής συσχέτισης. Αντίθετα το κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μπορεί να συσχετισθεί, με κάποια ανεκτή προσέγγιση, με το ονομαστικό σημείο λειτουργίας και το πλήθος των υδροστροβίλων.

#### 8.4.2 Προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους

##### α) Κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού

Ως κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός εννοούνται οι υδροστροβίλοι, οι γεννήτριες, οι ρυθμιστές στροφών, οι μετασχηματιστές, οι ηλεκτρικοί πίνακες. Η διατύπωση μίας συσχέτισης του κόστους συναρτήσει του ονομαστικού σημείου λειτουργίας είναι επισφαλής καθώς το κάθε επιμέρους κόστος εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες (για παράδειγμα για τον

υδροστρόβιλο, ο τύπος και η διάταξη του άξονα, για την ηλεκτρική γεννήτρια εάν είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη, η ταχύτητα περιστροφής της κλπ). Στη βιβλιογραφία διατυπώνονται απλές συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους  $C_{EM}$  της μονάδας παραγωγής (υδροστρόβιλος, γεννήτρια, ρυθμιστής στροφών) όπως η ακόλουθη:

$$C_{EM} = 20570 \frac{N^{0.7}}{H^{0.35}} \quad (8.6)$$

στην οποία με  $C_{EM}$  συμβολίζεται το κόστος της κάθε μονάδας παραγωγής σε [€], με  $N$  η ονομαστική ισχύς σε [kW] και με  $H$  η ονομαστική διαθέσιμη υδραυλική πτώση σε [mΣΥ].

Το κόστος του κύριου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού μπορεί να κυμαίνεται σε ένα εύρος της τάξεως του  $\pm 50\%$  με πιθανότητα ίση προς 67%, ως προς την τιμή που προκύπτει από τη Σχέση 8.6. Το κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και του μετασχηματιστή ισχύος κυμαίνεται σε περισσότερο στενά όρια και εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ.

#### β) Εκτίμηση του συνολικού κόστους της επένδυσης

Η εκτίμηση του συνολικού κόστους  $C$  της επένδυσης για μικρά ΥΗΕ που δεν παρουσιάζουν σημαντικές ιδιομορφίες μπορεί να γίνει μέσω ενός συντελεστή θέσης  $S$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού κόστους  $C$  προς το κόστος των μονάδων παραγωγής ( $z \cdot C_{EM}$ ) όπου με  $z$  συμβολίζεται το πλήθος των υδροστρόβιλων, δηλαδή:

$$C = S \cdot z \cdot C_{EM} \quad (8.7)$$

Ο συντελεστής θέσεως  $S$  λαμβάνει υπόψη, όσο αυτό είναι δυνατόν, τις ιδιαιτερότητες ενός έργου, τις δυσκολίες κατασκευής του και είναι της τάξεως του  $S=2.5-4$ .

Οι Σχέσεις 8.6 και 8.7 δίνουν απλώς μία τάξη μεγέθους του συνολικού κόστους και μπορεί να είναι χρήσιμες στη φάση της διαστασιολόγησης του μικρού ΥΗΕ. Στο κόστος κατασκευής θα πρέπει να συνυπολογισθεί και το κόστος της γραμμής μέσης τάσης και το οποίο θα καταβληθεί στο ΔΕΔΔΗΕ (ή στον ΑΔΜΗΕ αν πρόκειται για δίκτυο ΥΤ). Το κόστος αυτό εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ  $N$  και την απόσταση του ΥΗΣ από την πλησιέστερη γραμμή μεταφοράς του δικτύου ΜΤ της ΔΕΗ. Για το λόγο αυτό, αποτελεί μέγεθος χαρακτηριστικό του κάθε έργου, το οποίο όμως σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι πολύ σημαντικό, ιδιαίτερα για έργα σε απομακρυσμένες περιοχές.

#### 8.4.3 Συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους κάθε συνιστώσας του έργου

Στην παράγραφο που ακολουθεί δίνονται συσχετίσεις για τον υπολογισμό του κόστους κάθε συνιστώσας του έργου χωριστά. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή τους πρέπει να θεωρηθούν ως ενδεικτικές, καθώς το πραγματικό κόστος εξαρτάται από μεγάλο πλήθος παραγόντων, όπως η διαμόρφωση του μΥΗΕ, ο τύπος και η προέλευση του Η/Μ εξοπλισμού, οι τοπικές συνθήκες και δυσκολίες. Σε κάθε περίπτωση, στη φάση της αναγνωριστικής μελέτης, θεωρείται επαρκής μία ακρίβεια στον υπολογισμό του συνολικού

κόστους του έργου της τάξεως του  $\pm 40\%$ . Ακριβέστερος υπολογισμός του κόστους απαιτεί λεπτομερέστερη σχεδίαση και μελέτη των επιμέρους έργων, άρα απαιτεί τη δαπάνη χρημάτων, η οποία δεν θα αποσβεσθεί εάν η επένδυση κριθεί ως ασύμφορη.

α) Κόστος του φράγματος ή του εκχειλιστή

Το κόστος  $C_{dam} \left[ \frac{k\text{€}}{m} \right]$  του φράγματος ή του εκχειλιστή από σκυρόδεμα συσχετίζεται με το μέσο ύψος  $h$  [m] της κατασκευής και δίνεται ανά μέτρο πλάτους από τη σχέση:

$$C_{dam} = 97.632 \cdot h^2 + 14.3 \cdot h + 821.75 \quad (8.8)$$

β) Κόστος των έργων υδροληψίας

Στα έργα υδροληψίας περιλαμβάνονται το θυρόφραγμα και η εσχάρα καθαρισμού. Το κόστος  $C_{inlet}$  [k€] του έργου υδροληψίας συσχετίζεται με την ονομαστική παροχή  $Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  του μΥΗΕ και δίνεται από τη σχέση:

$$C_{inlet} = 9.236 \cdot Q_N^{0.72} \quad (8.9)$$

γ) Κόστος της διώρυγας προσαγωγής

Το κόστος  $C_{channel} \left[ \frac{k\text{€}}{m} \right]$  ανά μέτρο μήκους της διώρυγας προσαγωγής κατασκευασμένης από σκυρόδεμα με τραπεζοειδή διατομή κλίσης πρανών ίσης προς 0.25:1 συσχετίζεται με το βρεχόμενο εμβαδό  $A$  της διατομής (Ministry of Energy of Georgia, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2016). Διακρίνονται δύο (οριακές) περιπτώσεις, η κατασκευή της διώρυγας να γίνεται σε βραχώδες έδαφος και η κατασκευή να γίνεται σε χώμα. Οι συσχετίσεις για κάθε περίπτωση είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} C_{channel,rock} &= -0.1007 \cdot A^3 + 4.9196 \cdot A^2 - 66.746 \cdot A + 505.43 \\ C_{channel,earth} &= 0.0392 \cdot A^3 - 2.4502 \cdot A^2 + 61.938 \cdot A - 187.96 \end{aligned} \quad (8.10)$$

δ) Κόστος της δεξαμενής φόρτισης

Το κόστος  $C_{tank}$  [k€] της δεξαμενής φόρτισης σχετίζεται με την ονομαστική παροχή  $Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  του μΥΗΕ και δίνεται από τη σχέση:

$$C_{tank} = 9.05 \cdot Q_N + 4.14 \quad (8.11)$$

ε) Κόστος του αγωγού πτώσεως

Ο αγωγός πτώσεως θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένος από χαλυβδοσωλήνα, μεταβλητού πάχους ανάλογα με την πίεση που υφίσταται κάθε τμήμα. Το κόστος  $C_{penstock} \left[ \frac{\text{€}}{m} \right]$  του αγωγού

πτώσης, ανά μέτρο μήκους, σχετίζεται με την υδραυλική πτώση  $h$  [m] και την ονομαστική παροχή  $Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  του μΥΗΕ και δίνεται από την σχέση:

$$C_{penstock} = a \cdot Q_N^n \quad (8.12)$$

στην οποία

$$a = 7 \cdot 10^{-4} \cdot h^2 + 66.2 \cdot 10^{-3} \cdot h + 497.6$$

$$n = -6 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 + 9 \cdot 10^{-4} \cdot h + 0.316$$

Με  $h \geq 100$ [m].

Ο υπολογισμός του κόστους του αγωγού πτώσης πρέπει να γίνεται αναλύοντας τις 3 συνιστώσες του κόστους και συγκεκριμένα το κόστος του υλικού, το κόστος επιφανειακής προστασίας (όταν απαιτείται από τη φύση του υλικού) και το κόστος εγκατάστασης και δοκιμών. Για την περίπτωση αγωγού από χαλυβδοσωλήνα, το κόστος του υλικού είναι της τάξεως του  $0.7 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kg}} \right]$ , το κόστος επιφανειακής προστασίας της τάξεως των  $25 \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]$  εξωτερικής επιφάνειας του αγωγού και το κόστος εγκατάστασης και δοκιμών της τάξεως των  $1050$  [€] ανά μέτρο διαμέτρου και ραφή (αντιστοιχεί περίπου 1 ραφή ανά 6 μέτρα αγωγού).

#### ζ) Κόστος του κτιρίου ΥΗΣ

Το κόστος  $C_{HPS}$  του κτιρίου του ΥΗΣ σχετίζεται κυρίως με την ονομαστική παροχή  $Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  του μΥΗΕ, ενώ μικρότερη επίδραση σε αυτό έχει η τιμή της υδραυλικής πτώσης  $h$ , καθώς από αυτή εξαρτώνται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους υδροτροβίλους και το άκρο του αγωγού πτώσης. Το κόστος του ΥΗΣ δίνεται από σχέση της μορφής:

$$C_{HPS} = b \cdot Q_N^m \quad (8.13)$$

Στον όγκο και άρα στο κόστος του κτιρίου του ΥΗΣ σημαντικό ρόλο έχει και η διάταξη του άξονα των υδροτροβίλων, καθώς μία κατακόρυφη διάταξη απαιτεί περισσότερο χώρο, τα ενδεχόμενα προβλήματα στη θεμελίωση, ο όγκος των εκσκαφών κλπ.

#### η) Κόστος της διόδου ψαριών

Το κόστος  $C_{fish} \left[ \frac{\text{€}}{\text{m}} \right]$  της διόδου των ψαριών συσχετίζεται με την υψομετρική διαφορά μεταξύ της ανάντη και κατάντη του φράγματος (ή εκχειλιστή) στάθμης του νερού και κυμαίνεται μεταξύ 4-20 [k€] ανά μέτρο ανύψωσης και ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Το κόστος κατασκευής μίας διόδου ψαριών είναι συνήθως σημαντικό και να φθάσει μέχρι το 10-15% του συνολικού κόστους του έργου.

θ) Κόστος έργων οδοποιίας

Το κόστος των οδών προσπέλασης  $C_{road} \left[ \frac{k\text{€}}{km} \right]$  στα έργα κυμαίνεται μεταξύ  $20 - 50 \left[ \frac{k\text{€}}{km} \right]$  ανάλογα με το έδαφος και τις απαραίτητες διασταυρώσεις με το υδατόρεμα, όπου απαιτείται η κατασκευή γεφυρών.

ι) Κόστος υδροστροβίλου

Το κόστος  $C_{turbine}$  του υδροστροβίλου σχετίζεται με την ονομαστική παροχή του  $Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  και την υδραυλική πτώση  $H$  [m] ή την ονομαστική ισχύ  $N$  [kW] και τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση  $H$ , θεωρώντας μία μέση τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου ίση προς  $\eta=0.92$ . Οι συσχετίσεις αυτές έχουν τη μορφή:

$$C_{turbine} = a \cdot Q_N^n \cdot H^m$$

ή

$$C_{turbine} = b \cdot N^n \cdot H^k$$

Οι τιμές των συντελεστών και εκθετών  $a$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $b$  και  $k$  έχουν ως εξής για τους κύριους τύπους υδροστροβίλων.

Πίνακας 8.1: Συντελεστές προσδιορισμού του κόστους του υδροστροβίλου (Παπαντώνης, 2008).

Υδροστροβίλος	a	n	m	b	K
Αξονικής ροής	87.336	0.410	0.2000	35.446	-0.2100
Francis	96.998	0.481	0.1953	33.676	-0.2858
Pelton	115.420	0.444	0.2582	43.465	-0.1858

Από τις τιμές των εκθετών  $n$  και  $k$  και για όλους τους τύπους των υδροστροβίλων προκύπτει ότι για την ίδια ονομαστική ισχύ  $N$ , το κόστος του υδροστροβίλου μειώνεται, όσο αυξάνει η υδραυλική πτώση  $H$ . Επίσης το κόστος του υδροστροβίλου αυξάνεται, όσο αυξάνει η ισχύς και η ονομαστική παροχή.

κ) Κόστος γεννήτριας

Το κόστος  $C_{gen}$  [k€] της γεννήτριας σχετίζεται με την ονομαστική της ισχύ  $N$  [MW] και τον τύπο της, σύγχρονη ή ασύγχρονη, και περιγράφεται από τη σχέση:

$$C_{gen,συγ} = -2.394 \cdot N^2 + 60 \cdot N + 7.865$$

ή

$$C_{gen,ασυγ} = -1.811 \cdot N^2 + 47.5 \cdot N + 5.931$$

λ) Κόστος μετασχηματιστή

Το κόστος  $C$  [κ€] του 3-φασικού μετασχηματιστή ρεύματος ισχύος από τη ΧΤ στη ΜΤ των 20 [kV] σχετίζεται με την ονομαστική του ισχύ  $N$  [MW] και περιγράφεται από την σχέση:

$$C_{transformer} = -1.03 \cdot N^2 + 25.2 \cdot N + 6.11 \quad (8.16)$$

μ) Κόστος των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων

Το κόστος  $C_{elec}$  των ηλεκτρικών πινάκων και οργάνων συσχετίζεται με τη συνολική ονομαστική ισχύ του ΥΗΣ,  $N$  [MW], και το πλήθος των μονάδων παραγωγής (υδροστροβίλων - γεννητριών) και περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$C_{elec} = \begin{cases} 19.471 \cdot N + 201.84 & 1 \text{ μονάδα} & 0 < N < 7 \\ 23.91 \cdot N + 242 & 2 \text{ μονάδες} & 0 < N < 7 \\ 26.248 \cdot N + 275 & 3 \text{ μονάδες} & 0 < N < 7 \\ -2.361 \cdot N^2 + 47.18 \cdot N + 122.52 & 1 \text{ μονάδα} & 7 < N < 10 \\ -3.273 \cdot N^2 + 62.15 \cdot N + 132.22 & 2 \text{ μονάδες} & 7 < N < 10 \\ -3.381 \cdot N^2 + 65.74 \cdot N + 162.27 & 3 \text{ μονάδες} & 7 < N < 10 \end{cases} \quad (8.17)$$

στις οποίες δεν περιλαμβάνεται το κόστος της συστοιχίας πυκνωτών διόρθωσης του συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ , φίλτρων ή άλλων ειδικών εξαρτημάτων που προκύπτουν από ειδικές προδιαγραφές, σχετικά με την ποιότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

ν) Ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς

Το κόστος των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος μέχρι το δίκτυο ΜΤ εξαρτάται από τη τάση της γραμμής μεταφοράς (15, 20 ή 44 [kV]), τη δυσκολία κατασκευής της γραμμής, το μήκος της γραμμής και την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικές τιμές του κόστους της γραμμής μεταφοράς και του υποσταθμού, εάν απαιτείται, για μέσης δυσκολίας συνθήκες, ανάλογα με την ηλεκτρική ισχύ και την τάση.

Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	Τάση [kV]	Κόστος Γραμμής Μεταφοράς $\left[\frac{\text{κ€}}{\text{km}}\right]$	Κόστος Υποσταθμού [κ€]
0-2	25	55	250
2-5	44	65	600
>5	115	100	2000

ξ) Κόστος μελετών, αδειοδότησης και επίβλεψης

Το συνολικό κόστος για την εκπόνηση των μελετών, την έκδοση των αδειών και την επίβλεψη του έργου ανέρχεται στο 10-15% περίπου του συνολικού κόστους του έργου.



ο) Τέλος δεν θα πρέπει να παραληφθεί το κόστος αποκατάστασης του φυσικού περιβάλλοντος, το οποίο είναι της τάξεως του 1-2% του συνολικού κόστους του έργου.

## **8.5 Εκτίμηση λειτουργικού κόστους**

Το λειτουργικό κόστος ενός μΥΗΕ περιλαμβάνει τα εξής: κόστος κεφαλαίου (τοκοχρεωλύσια), απόσβεση, αμοιβές προσωπικού, διοικητικά έξοδα της επιχείρησης, λειτουργικά έξοδα και έξοδα συντήρησης, ασφάλιση του εξοπλισμού, φόροι, δικαιώματα χρήσης του νερού (εάν υπάρχουν).

Το κόστος εξυπηρέτησης του κεφαλαίου εξαρτάται από το ύψος του δανείου, τη διάρκεια αποπληρωμής του και το επιτόκιο. Οι αποσβέσεις σύμφωνα με το Ν.4172/2013 ανέρχονται σε 10% επί του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και των υδραυλικών έργων, σε 4% επί του κόστους των κτιριακών εγκαταστάσεων (ΥΗΣ) και σε 10% στο κόστος των μελετών, εξόδων δανειοδότησης κ.λ.π..

Για την επιτήρηση και λειτουργία ενός μΥΗΕ αρκεί συνήθως η απασχόληση ενός τεχνίτη. Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ετήσιες αμοιβές για μερική απασχόληση λογιστή της επιχείρησης και επιβλέποντος μηχανικού. Κατά συνέπεια το ετήσιο κόστος αμοιβών προσωπικού, μαζί με τις εργοδοτικές εισφορές, είναι υπολογίσιμο. Στα λειτουργικά έξοδα της επιχείρησης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δαπάνες τηλεπικοινωνίας, ταχυδρομικές, αναλωσίμων και πρώτων υλών (πχ. λιπαντικών).

Τα ασφάλιστρα υπολογίζονται σε 0,65% επί του κόστους του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και σε 0,35% επί της αξίας των κτιριακών. Επίσης στις ετήσιες δαπάνες προϋπολογίζεται ετησίως ποσό 15% επί των γενικών βιομηχανικών δαπανών ως απρόβλεπτες δαπάνες.

## **8.6 Οικονομικά κίνητρα και τιμολόγηση**

Η Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας λειτουργεί με βάση μια δομή συγκέντρωσης (pool structure). Αυτό σημαίνει πως το σύνολο της διαθέσιμης ισχύος στη χώρα δημιουργεί μια «δεξαμενή» από την οποία προμηθεύονται όλοι συμμετέχοντες στο σκέλος της διανομής την ηλεκτρική ενέργεια που προμηθεύουν στους πελάτες τους - καταναλωτές. Συνεπώς, ακόμη και οι καθετοποιημένες επιχειρήσεις όπως η Δ.Ε.Η. θα πρέπει να εγχύσουν την παραγόμενη ενέργεια στην κοινή «δεξαμενή» και εν συνεχεία να την αγοράσουν επί ίσους όροις με τους λοιπούς εναλλακτικούς προμηθευτές, για να την προμηθεύσουν στους πελάτες τους.

Δεδομένου ότι η διαθέσιμη ισχύς, για λόγους ασφαλείας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πάντοτε μεγαλύτερη της ζητούμενης από τους τελικούς καταναλωτές και συνεπώς από τους συμμετέχοντες στο σκέλος της διανομής, ο Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΛΑΓΗΕ) βάσει του Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο προγραμματίζονται οι ανάγκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, εγγέεται η ισχύς της κάθε μονάδας παραγωγής στο σύστημα και εν τέλει διαμορφώνεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για τους συμμετέχοντες στην αγορά παραγωγούς και προμηθευτές.

Η Οριακή Τιμή του Συστήματος είναι η τιμή στην οποία εκκαθαρίζεται η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και διαμορφώνεται από το συνδυασμό των προσφορών τιμών και ποσοτήτων που υποβάλλουν κάθε μέρα οι διαθέσιμες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και του ωριαίου φορτίου ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, που διαμορφώνεται σε καθημερινή βάση από τους καταναλωτές.

Απλουστευτικά, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μικροοικονομικής θεωρίας, οι μονάδες παραγωγής κατατάσσονται αναλόγως των προσφορών τους σε αύξουσα σειρά, ξεκινώντας από την χαμηλότερη προσφερόμενη τιμή για ορισμένη ποσότητα ενέργειας και καταλήγοντας στην υψηλότερη προσφερόμενη τιμή. Στο σημείο, όπου οι προσφερόμενες ποσότητες ενέργειας εξυπηρετούν το ζητούμενο φορτίο, καθορίζεται και η Οριακή Τιμή του Συστήματος. Στην ουσία, η Οριακή τιμή του Συστήματος συμπίπτει με την προσφορά της τελευταίας μονάδας που πρέπει να λειτουργήσει για να καλυφθεί η ζήτηση. Για λόγους προστασίας των καταναλωτών και διαμόρφωσης συνθηκών υγιούς ανταγωνισμού τίθεται διοικητικά ανώτερο όριο ως προς την προσφερόμενη τιμή, το οποίο έχει τεθεί ίσο με  $300 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  καθώς και κατώτερο επίπεδο προσφορών, το οποίο είναι το μεταβλητό κόστος της μονάδας, ώστε στις περισσότερες περιπτώσεις οι παραγωγοί να πληρώνονται το κόστος καυσίμου τους.

Στην Οριακή Τιμή πωλούν τελικά όλοι οι παραγωγοί ανεξαρτήτως του κόστους τους ηλεκτρική ενέργεια και αντίστοιχα αυτή πληρώνουν όλοι οι προμηθευτές. Άρα σε περιόδους υψηλής ζήτησης χρειάζεται να εγχυθούν στο σύστημα ποσότητες ενέργειας από παραγωγικές μονάδες με μεγάλο κόστος με συνέπεια την άνοδο της τιμής και το αντίστροφο.

Αυτό σημαίνει ότι κατά βάση πρώτα χρησιμοποιείται η παραγόμενη από λιγνιτικές μονάδες ενέργεια, εν συνεχεία από υδροηλεκτρικούς σταθμούς και στο τέλος από φυσικό αέριο. Εξαιρέση στα παραπάνω αποτελούν οι ΑΠΕ. Η κάθε στιγμή διαθέσιμη ενέργεια από ΑΠΕ εγχέεται κατά προτεραιότητα στο σύστημα και λειτουργούν σε καθεστώς εγγυημένων ελάχιστων τιμών. Η κάθε μονάδα ΑΠΕ συμβάλλεται με το Διαχειριστή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγύησης Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ). ο ΛΑΓΗΕ υποχρεούται να αγοράζει όλη την παραγόμενη ενέργεια σε μια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή. Έτσι, ο παραγωγός ΑΠΕ θα λάβει την προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή για την παραγόμενη ενέργεια ακόμη και αν η Οριακή Τιμή του Συστήματος, κατά τα ανωτέρω, είναι χαμηλότερη. Ο ΛΑΓΗΕ όμως συμμετέχει στη «δεξαμενή» της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ως πωλητής της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας και λαμβάνει σε κάθε περίπτωση την Οριακή Τιμή, όπως όλοι οι συμμετέχοντες παραγωγοί. Η κάλυψη της διαφοράς μεταξύ της Οριακής Τιμής του Συστήματος και της εγγυημένης τιμής για τον κάθε παραγωγό ΑΠΕ προέρχεται από τα έσοδα του Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ, ο οποίος χρηματοδοτείται μέσω ειδικού αναλογικού τέλους από τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με το ν4414/2016, η τιμή αναφοράς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ  $< 3[MW_e]$  διαμορφώνεται σε  $100 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  ενώ για εγκατεστημένη ισχύ από  $3[MW_e]$  έως και  $15[MW_e]$  διαμορφώνεται σε  $97 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$ .

## **8.7 Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων**

Τα έσοδα του μΥΗΕ υπολογίζονται ως γινόμενο της καθαρής παραγόμενης ενέργειας με το εκάστοτε ισχύον τιμολόγιο αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από το ΔΑΔΕΕΠ. Εκτός από την ενέργεια τιμολογείται και η παραγόμενη ισχύς, ενώ χρεώνεται η απορρόφηση άεργης ισχύος από το δίκτυο για την περίπτωση εγκατάστασης ασύγχρονης γεννήτριας. Για παραγωγούς με σύγχρονες γεννήτριες δεν προβλέπεται ούτε χρέωση, ούτε αγορά άεργης ισχύος.

Σε ορισμένες χώρες το τιμολόγιο αγοράς της παραγόμενης ενέργειας από την ηλεκτρική εταιρεία δεν είναι ενιαίο και διακρίνεται σε θερινό και χειμερινό και εξαρτάται από τις ώρες της ημέρας στις οποίες προσφέρεται η ενέργεια (ώρες αιχμής και ώρες χαμηλής ζήτησης). Στην περίπτωση αυτή τα έσοδα του μΥΗΕ είναι δυνατό να αυξηθούν με τη διαμόρφωση ανάντη ταμιευτήρα μικρής δυνατότητας αναρρύθμισης.

Στον υπολογισμό των καθαρών εσόδων θα πρέπει να υπολογισθεί ο φόρος εισοδήματος επί των αποτελεσμάτων χρήσης για την περίπτωση κατά την οποία η επιχείρηση που διαχειρίζεται το έργο είναι ανώνυμη εταιρεία. Μία αμιγής κοινοτική επιχείρηση δεν επιβαρύνεται με φόρο εισοδήματος.

## **8.8 Παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια με αντλησιοταμίευση**

Η αντλησιοταμίευση πραγματοποιείται από μονάδες αντιστρεπτής λειτουργίας, δηλαδή μονάδες που παράγουν ενέργεια για να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση (συνήθως κατά τη διάρκεια της μέρας) με νερό που αντλούν από κατάντη σε ώρες με περίσσεια ενέργειας (συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας που μειώνεται σημαντικά η ανθρώπινη δραστηριότητα). Τα προηγούμενα χρόνια η περίσσεια του ρεύματος αντιμετωπιζόταν από τον πάροχο με κίνητρα προς τον καταναλωτή να αυξήσει την κατανάλωσή του τις ώρες αυτές.

Η περίσσεια ενέργειας οφείλεται στο ότι ένα μΥΗΕ χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα λόγω της μεταβλητότητας της παροχής, οπότε συνδυάζεται με κάποια άλλη πηγή ενέργειας, παραδοσιακά με κάποιο θερμοηλεκτρικό σταθμό, ενώ η έρευνα επιδιώκει τη σύνδεση με κάποια ΑΠΕ όπως ανεμογεννήτριες. Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί έχουν το λειτουργικό μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να ρυθμίσουν σε σύντομο χρονικό διάστημα την παραγωγή τους.

Με την αντλησιοταμίευση θεωρητικά, αν δεν υπολογισθούν οι απώλειες του νερού, και η περίσσεια ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας είναι αρκετή, δύναται να ανεξαρτητοποιηθεί η παραγωγή της ενέργειας από την παροχή του ποταμού γεγονός πολύ σημαντικό για την Ελλάδα, που το υδατικό ισοζύγιο το καλοκαίρι είναι αρνητικό. Επίσης αν βρεθεί αξιόπιστος Η/Μ εξοπλισμός στη χρήση θαλασσινού νερού, μπορεί σαν κατάντη ταμιευτήρας να χρησιμοποιείται η θάλασσα μειώνοντας έτσι το κόστος των τεχνικών έργων.

## 8.9 Υπολογισμός εσόδων μικρών υδροηλεκτρικών έργων με αντλησιοταμίευση

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι το πιο σημαντικό θέμα για την πιθανή ανάπτυξή του στο μέλλον. Για να πραγματοποιηθεί μια οικονομική μελέτη, το κόστος επένδυσης που περιλαμβάνει την αγορά και κατασκευή του αντλητικού σταθμού και της σωλήνωσης λαμβάνεται ίσο με  $450 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right]$ . Η επιλογή των υπόλοιπων οικονομικών παραμέτρων βασίζεται στις παρούσες συνθήκες και σε συνήθεις πρακτικές: η διάρκεια ζωής λαμβάνεται ίση με 25 χρόνια, το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο (annual discount rate) ίσο με 8%, ο φορολογικός συντελεστής (tax rate) ίσος με 20%. Τα κεφάλαια που λαμβάνονται μέσω δανειοδότησης λαμβάνονται ίσα με το 50% του αρχικού κόστους, με επιτόκιο εξόφλησης 8% και η περίοδος αποπληρωμής ίση με 15 έτη. Λαμβάνεται ως διάρκεια των έργων τα 2 έτη, περίοδος στην οποία τα ετήσια λειτουργικά έξοδα της εγκατάστασης αυξάνονται κατά 1% του αρχικού κόστους επένδυσης.

Τα καθαρά ετήσια έσοδα υπολογίζονται σύμφωνα με την ακόλουθη προσέγγιση: Η εγκατάσταση αγοράζει την πλεονάζουσα από το σύστημα ενέργεια από τους παραγωγούς ενέργειας σε μία λογική τιμή, η οποία εκτιμάται στο μισό της στιγμιαίας οριακής τιμής του συστήματος (Marginal System Price – MSP), και πουλά την ποσότητα που παράγει από τους στροβίλους σε τιμή ίση με την οριακή τιμή του συστήματος. Η διαφορά αυτή ιδεατά αποζημιώνει και τις υδραυλικές απώλειες του κύκλου άντλησης – ταμίευσης – παραγωγής ενέργειας που είναι περίπου ίσες με 30%. Η οριακή τιμή του συστήματος λαμβάνεται από πρόσφατα δεδομένα από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), θεωρώντας μια αρχική εκτίμηση  $40 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  για τις ώρες χαμηλής ζήτησης και  $80 \left[ \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right]$  για το υπόλοιπο της ημέρας.

## 8.10 Οικονομική ανάλυση μικρών υδροηλεκτρικών έργων με αντλησιοταμίευση

Η τελική μελέτη περιλαμβάνει τον έλεγχο πολλών σεναρίων με προσομοιώσεις και ισοζύγια από όπου προκύπτει ότι η ενέργεια που παράγεται καθώς και η επίδοση της επένδυσης εξαρτώνται άμεσα από την ποσότητα και κατανομή της πλεονάζουσας ενέργειας και επακόλουθα την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων των οποίων αξιοποιείται η πλεονάζουσα ενέργεια (normalized ratio  $R_{w-s}$ ), αλλά και από το σενάριο λειτουργίας των στροβίλων που υιοθετείται (Anagnostopoulos & Papantonis, 2012).

Η διαφοροποίηση μεταξύ της λειτουργίας αντλησιοταμίευσης σε ένα ΥΗΕ με ένα μΥΗΕ οφείλεται στο «χαρακτήρα» του έργου. Ένα ΥΗΕ που έχει σχεδιαστεί για να καλύπτει τις αιχμές μπορεί να μη λειτουργεί αν δεν υπάρχει ανάγκη για μεγάλο χρονικό διάστημα, συλλέγοντας νερό από τα ανάντη και αν το σύστημα εμφανίζει περίσσεια ενέργειας, μέσω του συστήματος άντλησης να αυξάνει περισσότερο την ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα του. Σε ένα τυπικό μΥΗΕ η φιλοσοφία αυτή δεν είναι εφικτή, καθότι δεν μπορεί να ταμιεύει νερό χωρίς να το χάνει λόγω της απαίτησης για οικολογική παροχή, ενώ λόγω των προδιαγραφών του έργου η λειτουργία του

εξαρτάται από τη διαθέσιμη παροχή και επιδιώκεται η λειτουργία του καθότι πουλάει τη ενέργεια που παράγει κατά προτεραιότητα στο σύστημα με την οριακή τιμή συστήματος. Και στις δύο μορφές ΥΗΕ η συλλογή νερού δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να θέσει σε κίνδυνο την ευστάθεια της κατασκευής, αφού ανεξέλεγκτη ανύψωση της στάθμης έχει συνήθως δυσμενείς συνέπειες για το έργο.

Η περίπτωση που ένα μΥΗΕ μπορεί να λειτουργήσει με τη φιλοσοφία αντλησιοταμίευσης ενός ΥΗΕ είναι σε περίπτωση μη διασυνδεδεμένου νησιού με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ και σε συνδυασμό με άλλες χρήσεις, για παράδειγμα άντληση θαλασσινού νερού και αφαλάτωσή του, ταμίευσή του σε κάποιον υπέργειο ή υπόγειο ταμιευτήρα και όταν το σύστημα έχει ανάγκη για ενέργεια να ενεργοποιείται η παραγωγή. Εδώ ο χαρακτηρισμός μΥΗΕ αφορά μόνο την ποσότητα της εγκατεστημένης ισχύος, η οποία για ένα μικρό αυτόνομο δίκτυο μπορεί να μην χρειάζεται να ξεπεράσει τα 15[MW].

Γενικά, ένα ορθά σχεδιασμένο μΥΗΕ παρέχει τη δυνατότητα για ταχεία απόσβεση της αρχικής επένδυσης, αποτελώντας έτσι ένα κατάλληλο επενδυτικό project. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζεται το νομικό πλαίσιο που διέπει τη μελέτη, την αδειοδότηση και την κατασκευή ενός μΥΗΕ.

## 9 Αρχές Σχεδίασης & Εγκατάστασης Υδροηλεκτρικής Μονάδας Παραγωγής Ενέργειας.

### 9.1 Φάσεις της μελέτης υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής ενέργειας

Η μελέτη ενός μικρού ΥΗΕ περιλαμβάνει διάφορες φάσεις οι οποίες αρχίζουν από την τεκμηριωμένη πρόταση υδροηλεκτρικής ανάπτυξης μίας θέσης μέχρι την ολοκλήρωση της μελέτης εφαρμογής και τη σύνταξη των τευχών δημοπράτησης του έργου. Η έκταση και εμβάθυνση της μελέτης ενός μικρού ΥΗΕ εξαρτάται σημαντικά από το χαρακτήρα και το μέγεθος του έργου. Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική η μελέτη ενός μικρού ΥΗΕ διεξάγεται σε τρεις διακριτές φάσεις:

- την αναγνωριστική μελέτη (ή μελέτη σκοπιμότητας),
- την προκαταρκτική μελέτη,
- τη μελέτη εφαρμογής.

Σκοπός της αναγνωριστικής μελέτης είναι η διαπίστωση του εάν η εξεταζόμενη θέση αξίζει περισσότερης διερεύνησης, προκειμένου για μικρό ΥΗΕ που θα τροφοδοτεί διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν η απάντηση είναι θετική, τότε προχωρά στην επόμενη φάση, δηλαδή στην προκαταρκτική μελέτη, διαφορετικά παύει κάθε διερεύνηση. Η διάρκεια της φάσης αυτής δεν ξεπερνά τον 1 με 2 μήνες.

Σκοπός της προκαταρκτικής μελέτης είναι η διαμόρφωση και η διαστασιολόγηση του έργου όπως θα προκύψει από την εξέταση και ανάλυση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Η διάρκεια της φάσης αυτής δεν ξεπερνά τους 6 μήνες. Η μελέτη εφαρμογής (ή οριστική μελέτη) σκοπό έχει τη σύνταξη όλων των τευχών δημοπράτησης, των αναλυτικών σχεδίων και υπολογισμών, των προδιαγραφών των έργων και του εξοπλισμού, καθώς και την ολοκλήρωση των διαδικασιών αδειοδότησης και χρηματοδότησης του έργου, συμβολαίων διάθεσης της ενέργειας κλπ. Η διάρκεια της φάσης αυτής είναι της τάξεως των 6 έως 24 μηνών.

Η συνολική διάρκεια των μελετών ενός μικρού ΥΗΕ, από την έναρξη της αναγνωριστικής μελέτης μέχρι την έναρξη της κατασκευής των έργων δεν μπορεί να είναι μικρότερη των 24 μηνών, κυρίως επειδή οι διαδικασίες αδειοδότησης είναι χρονοβόρες και πολύπλοκες.

Το συνολικό κόστος της μελέτης ενός μικρού ΥΗΕ αποτελεί υψηλό ποσοστό της συνολικής επένδυσης, της τάξεως του 8-15%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το τελικό ζητούμενο της αναγνωριστικής και της προκαταρκτικής φάσης είναι το εάν το εξεταζόμενο έργο είναι οικονομολογικά βιώσιμο, θα πρέπει στις δύο πρώτες φάσεις η εμβάθυνση να μην προχωρά περισσότερο από όσο δικαιολογείται από το παραδοτέο της κάθε φάσης, δηλαδή για παράδειγμα δε θα πρέπει στην αναγνωριστική φάση της μελέτης να γίνει οποιαδήποτε τοπογραφική αποτύπωση ή γεωλογική μελέτη (οπότε θα δαπανηθούν σημαντικά ποσά) και οι εκτιμήσεις να βασισθούν σε υπάρχοντα στοιχεία, όπως γεωλογικούς και γεωγραφικούς χάρτες.

### 9.1.1 Αναγνωριστική Μελέτη

Η αναγνωριστική μελέτη μπορεί να θεωρηθεί ως μία συνοπτική προκαταρκτική μελέτη με σκοπό τη διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητας της υδροηλεκτρικής αξιοποίησης μιας θέσης. Επίσης, η αναγνωριστική μελέτη που διεξάγεται για περισσότερες θέσεις επιτρέπει την κατάταξή τους από πλευράς παραγόμενης ενέργειας, υψηλού κόστους επένδυσης, δεικτών οικονομικής απόδοσης της επένδυσης έτσι ώστε να δοθεί η προτεραιότητα στις περισσότερο ευνοϊκές θέσεις.

Πριν από την έναρξη της αναγνωριστικής μελέτης για την αξιοποίηση μίας υποψήφιας θέσης θα πρέπει να διερευνηθεί εάν η ίδια θέση έχει κατά το παρελθόν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης χωρίς να υλοποιηθεί το έργο ή εάν για την αξιοποίηση της θέσης αυτής έχει ήδη εκδοθεί άδεια από άλλον ενδιαφερόμενο.

Τα βήματα της αναγνωριστικής μελέτης είναι τα ακόλουθα:

#### α) Αναγνώριση της περιοχής

Η αναγνώριση της περιοχής περιλαμβάνει την αρχική διάταξη και χωροθέτηση του έργου, την καταγραφή των τοπικών συνθηκών, των δυσκολιών, της υποδομής, των άλλων ανταγωνιστικών χρήσεων του νερού (για ύδρευση ή άρδευση), τις γεωλογικές συνθήκες. Επίσης περιλαμβάνει τη χάραξη του έργου σε γεωγραφικό χάρτη ή αεροφωτογραφίες σε κλίμακα 1 :50.000 και 1:5.000, από την οποία προκύπτουν τα βασικά χαρακτηριστικά του έργου, όπως η υδραυλική πτώση και το μήκος των έργων προσαγωγής.

Στο βήμα αυτό καταγράφονται οι μείζονες δυσκολίες, εάν υπάρχουν, όπως οικονομικές, κοινωνικές, χρήσεις γης, περιβαλλοντικές, γεωλογικές κλπ, κάθε μία από τις οποίες θα μπορούσε από μόνη της να οδηγήσει στη ματαίωση του έργου.

#### β) Συλλογή υπαρχόντων υδρολογικών στοιχείων

Συλλέγονται και αξιολογούνται τα υπάρχοντα υδρολογικά στοιχεία και συγκεκριμένα τυχόν χρονοσειρές παροχής. Στην περισσότερο συνηθισμένη περίπτωση όπου δεν είναι διαθέσιμα επαρκή υδρολογικά στοιχεία γίνεται προσεγγιστική εκτίμηση αυτών συνεκτιμώντας στοιχεία από την ίδια ή γειτονικές λεκάνες απορροής. Υδρολογικά στοιχεία και συγκεκριμένα μετρήσεις παροχής μπορεί να αναζητηθούν από διάφορες υπηρεσίες όπως από τη ΔΕΗ, το Υπουργείο Γεωργίας, Νομαρχίες, το ΚΑΠΕ. Επίσης εκτιμάται η μέγιστη πλημμυρική παροχή και η ελάχιστη παροχή του υδατορέματος καθώς και η οικολογική παροχή ώστε να καλύπτονται οι σχετικοί περιβαλλοντικοί περιορισμοί. Στη φάση αυτή είναι πολλές φορές χρήσιμες οι μαρτυρίες των κατοίκων της περιοχής, κυρίως όσον αφορά τις πλημμυρικές στάθμες.

#### γ) Προκαταρκτική χάραξη του έργου

Η χάραξη αυτή γίνεται σε χάρτη κλίμακας 1:50.000 και 1:5.000 των έργων προσπέλασης στη θέση της υδροληψίας και του ΥΗΣ. Εκτίμηση της απόστασης από την πλησιέστερη γραμμή μέσης τάσης, η οποία θα μπορούσε να συνδεθεί με την έξοδο του ΥΗΣ. Σημειώνεται ότι η Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) διαθέτει στους ενδιαφερόμενους χάρτες ολόκληρης της χώρας, με απλή διαδικασία (εκτός από παραμεθόριες περιοχές) και χαμηλό κόστος.

#### δ) Υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας

Από τα στοιχεία των δύο προηγούμενων βημάτων υπολογίζεται η ετησίως παραγόμενη ενέργεια για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής και άρα της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος και για την εγκατάσταση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων. Για μικρά ΥΗΕ που τροφοδοτούν ένα αυτόνομο δίκτυο θα πρέπει να διερευνηθούν οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια και να εξασφαλισθεί η διάθεσή της, καθώς επίσης να εξετασθούν άλλοι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η τελευταία αυτή περίπτωση παρουσιάζει την πρόσθετη δυσκολία ότι θα πρέπει να βασισθεί σε ένα σενάριο αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα βάθος χρόνου ίσο προς τη διάρκεια ζωής του μΥΗΕ. Η οικονομική βιωσιμότητα ενός μΥΗΕ που τροφοδοτεί ένα αυτόνομο δίκτυο είναι δυσμενέστερη από αυτή ενός μΥΗΕ που τροφοδοτεί ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο, καθώς στα πρώτα χρόνια λειτουργίας του, λόγω μικρής ζήτησης, δεν θα είναι σε θέση να διαθέσει την ηλεκτρική ενέργεια την οποία δύναται να παράγει (δηλαδή είναι σχετικά υπερδιαστασιοποιημένο σε σχέση με την κατάσταση κατά την έναρξη της λειτουργίας του).

#### ε) Υπολογισμός του κόστους της επένδυσης

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής (και άρα της εγκατεστημένης ισχύος), ο οποίος βασίζεται σε προσεγγιστικές συσχετίσεις και την εμπειρία από παρόμοια έργα που έχουν ήδη ολοκληρωθεί. Στη φάση αυτή δεν θεωρείται σκόπιμη η εκπόνηση λεπτομερούς και αναλυτικής τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, καθώς όλα τα στοιχεία της διαμόρφωσης του έργου (διάταξη, διαστάσεις έργων προσαγωγής κλπ) τελούν ανά πάσα στιγμή υπό αναίρεση.

#### ζ) Επαναληπτική διαδικασία

Τα βήματα δ και ε επαναλαμβάνονται για διάφορες τιμές της ονομαστικής παροχής έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη τιμή της και άρα η βέλτιστη τιμή της εγκατεστημένης ισχύος. Σχετικά με την επιλογή της βέλτιστης τιμής της εγκατεστημένης ισχύος και του πλήθους των υδροστροβίλων θα γίνει περισσότερο αναλυτική αναφορά στη συνέχεια.

#### η) Προτάσεις χρηματοδότησης του έργου

#### θ) Καταγραφή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

#### ι) Σύνταξη έκθεσης αναγνωριστικής φάσεως

Στην έκθεση αυτή αναφέρονται αναλυτικά όλα τα ευρήματα των προηγούμενων βημάτων με ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνικοοικονομική ανάλυση και την καταγραφή των σημείων που χρήζουν περισσότερης διερεύνησης. Η έκθεση καταλήγει στο εάν συνιστάται ή όχι να υπάρξει συνέχεια με την εκπόνηση της προκαταρκτικής μελέτης.

Η αναγνωριστική μελέτη πρέπει να εκπονείται από ειδικευμένο μηχανικό, με συμμετοχή γεωλόγου και περιβαλλοντολόγου, έτσι ώστε να οδηγηθεί γρήγορα και με ασφάλεια σε εφικτές και ορθές εκτιμήσεις, κυρίως όσον αφορά τη δυνατότητα κατασκευής του έργου, τις μείζονες δυσκολίες και την κατ' αρχή διάταξη του έργου και τις κύριες επιλογές.

Η διάρκεια εκπόνησης της αναγνωριστικής μελέτης είναι της τάξεως του ενός με 2 μήνες και αντιστοιχεί σε περίπου 15-20 ανθρωποημέρες ειδικευμένου μηχανικού για μΥΗΕ ονομαστικής ισχύος μέχρι 1 MW και σε 30-45 ανθρωποημέρες για μΥΗΕ ονομαστικής ισχύος της τάξεως των 5 MW.



### 9.1.2 Προκαταρκτική Μελέτη

Σκοπός της προκαταρκτικής μελέτης είναι να καθορίσει την οικονομοτεχνικά βέλτιστη διάταξη και διαστασιολόγηση των επιμέρους έργων και η επιλογή του εξοπλισμού, όπως αυτή θα προκύψει από την εξέταση διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Η προκαταρκτική μελέτη ολοκληρώνεται με πλήρη και λεπτομερή χρηματοδοτική ανάλυση του έργου, η οποία θα περιλαμβάνει ανάλυση της ευαισθησίας των διαφόρων τεχνικοοικονομικών παραμέτρων.

Η προκαταρκτική μελέτη βασίζεται στα κύρια συμπεράσματα της αναγνωριστικής μελέτης θεωρώντας ως αφετηρία της διερεύνησής της τη διάταξη και διαστασιολόγηση, η οποία προέκυψε ως βέλτιστη από την αναγνωριστική μελέτη.

Για λόγο αυτό το πλήθος των εναλλακτικών διατάξεων του έργου, τα οποία εξετάζονται στη φάση αυτή είναι λιγότερα και περισσότερο συγκεκριμένα.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη σύνταξη της προκαταρκτικής μελέτης είναι τα ακόλουθα:

#### α) Επανακαθορισμός της διάταξης του έργου

Στη φάση αυτή πιθανό να προκύψει ότι είναι σκόπιμη μία μικρή μετατόπιση της θέσεως της υδροληψίας, της δεξαμενής φόρτισης (εάν προβλέπεται) ή και της θέσεως του ΥΗΣ, σε σύγκριση με τη διάταξη της προηγούμενης φάσης, με σκοπό την αύξηση της ασφάλειας ή και τη μείωση του κόστους κατασκευής. Από τη σκοπιά αυτή, η επιλογή μίας διάταξης που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή της υδραυλικής πτώσης, δεν είναι οπωσδήποτε συμφερότερη από άλλη με μικρότερη υδραυλική πτώση, η οποία παρουσιάζει, λόγω της διαμόρφωσης της περιοχής, μικρότερα κατασκευαστικά προβλήματα.

#### β) Καταγραφή των συνθηκών της περιοχής

Στη φάση αυτή και με σκοπό την ακριβή χωροθέτηση των έργων κρίνεται απαραίτητη η τοπογραφική αποτύπωση (σε κλίμακα 1 :200 ή 1 :500) μίας ζώνης πλάτους 200 μέτρων γύρω από τον άξονα του έργου. Από την τοπογραφική αποτύπωση θα προκύψει το ακριβές μήκος των έργων προσαγωγής (διώρυγα και αγωγός προσαγωγής), καθώς και η ακριβής τιμή της υδραυλικής πτώσης. Μετά την ολοκλήρωση της τοπογραφικής αποτύπωσης, η διάταξη των έργων υπόκειται σε ενδεχόμενες τροποποιήσεις και τελικά χαράσσεται η μηκοτομή των έργων προσαγωγής.

Καθορισμός των νομικών διαδικασιών για την κατασκευή του έργου και την εγκατάσταση του εργοταξίου.

Επεξεργασία των υπαρχόντων γεωλογικών στοιχείων και, εάν υπάρχει ανάγκη εκτέλεση τοπικών γεωλογικών ερευνών. Οι γεωλογικές μελέτες σκοπό έχουν τον προσδιορισμό της φύσης και της ποιότητας του εδάφους στο οποίο θα εδραστούν τα έργα. Βάσει των ευρημάτων της μελέτης αυτής καθορίζονται οι περιοχές στις οποίες είναι δύσκολη ή αδύνατη η κατασκευή έργων ή ο κίνδυνος που αυτά θα διατρέχουν λόγω εδαφικών ασταθειών ή κατολισθήσεων. Η γεωλογική μελέτη εκτελείται από ειδικευμένο γεωλόγο, ο οποίος αφού συμβουλευθεί τους γεωλογικούς χάρτες, διατρέχει την περιοχή και καταγράφει σε λεπτομερή χάρτη τα διάφορα γεωλογικά φαινόμενα που συναντά κατά μήκος του έργου. Η διάταξη του έργου θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις υποδείξεις της γεωλογικής έκθεσης, γεγονός που σε ορισμένες περιπτώσεις αντιστοιχεί σε επαναχάραξη του

έργου και κυρίως της διαδρομής που ακολουθεί η διώρυγα προσαγωγής (ή ο αγωγός πτώσης), τα οποία λόγω του σημαντικού μήκους τους, συνήθως συναντούν μεγάλη ποικιλία γεωλογικών διαμορφώσεων. Ανάλογα με τα ευρήματα αποφασίζεται η διενέργεια λεπτομερέστερων ερευνών (με διερευνητικές τομές) ή τροποποιείται η διαδρομή της διώρυγας προσαγωγής, εάν οι εναλλακτικές λύσεις είναι εφικτές.

#### γ) Συμπλήρωση και επιβεβαίωση των υδρολογικών στοιχείων

Τα υδρολογικά στοιχεία και κυρίως οι χρονοσειρές της παροχής στη θέση υδροληψίας συμπληρώνονται σε σχέση με αυτές της προηγούμενης φάσεως είτε με δειγματοληπτικές μετρήσεις που άρχισαν να διεξάγονται με την έναρξη της προκαταρκτικής φάσης, είτε με την εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων που βασίζονται σε συσχετίσεις με τις βροχοπτώσεις ή υδρολογικά στοιχεία γειτονικής λεκάνης απορροής παρόμοιας σύνθεσης με την εξεταζόμενη. Επίσης υπολογίζεται η πλημμυρική παροχή (συνήθως της εκατονταετίας) και η αντίστοιχη στάθμη του ποταμού στην περιοχή κατασκευής του ΥΗΣ, ώστε να μην κινδυνεύσουν τα έργα και ο εξοπλισμός σε ακραίες συνθήκες.

#### δ) Διάταξη και διαστασιολόγηση του έργου

Μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων βημάτων είναι πλέον καθορισμένη η χάραξη του έργου και η μελέτη θα πρέπει να συμπληρωθεί με τον καθορισμό της ονομαστικής παροχής λειτουργίας και άρα της εγκατεστημένης ισχύος. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται ένα πλήθος τιμών της ονομαστικής παροχής (περί τις 4 ή 5) γύρω από τη βέλτιστη τιμή της παροχής που προέκυψε από την αναγνωριστική μελέτη. Για κάθε τιμή της ονομαστικής παροχής διαστασιολογείται η διώρυγα και ο αγωγός προσαγωγής, υπολογίζεται η διαθέσιμη υδραυλική πτώση και επιλέγεται ο τύπος του υδροστροβίλου. Εάν στο εξεταζόμενο ονομαστικό σημείο λειτουργίας υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές του τύπου του υδροστροβίλου θα πρέπει αυτές να εξεταστούν χωριστά. Από τον τύπο και την ονομαστική ισχύ του υδροστροβίλου εκτιμάται η καμπύλη του ολικού βαθμού απόδοσης, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και επιλέγεται ο τύπος και η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας (εάν μεταξύ υδροστροβίλου και γεννήτριας θα πρέπει να παρεμβληθεί πολλαπλασιαστής στροφών). Εναλλακτικά εξετάζεται η περίπτωση σύγχρονης ή ασύγχρονης γεννήτριας, καθώς και η εγκατάσταση ενός ή περισσότερων στροβίλων (του ίδιου ή διαφορετικού μεγέθους).

#### ε) Υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας

Για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις του προηγούμενου βήματος και με βάση τα υδρολογικά στοιχεία (ενδεχόμενα την καμπύλη διάρκειας της παροχής) υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά έτος.

#### ς) Εκτίμηση του κόστους του έργου

Για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις του βήματος δ εκτιμάται το συνολικό κόστος του έργου, όπως προκύπτει από διαστασιολόγηση των επί μέρους έργων (υδροληψία, εκχειλιστής, έργα προσαγωγής, ΥΗΣ, ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, έργα προσπέλασης κ.λ.π.), βάσει συσχετίσεων και εμπειρίας από προηγούμενα έργα. Στο συνολικό κόστος λαμβάνεται υπόψη το κόστος σύνδεσης με το δίκτυο μέσης τάσης, καθώς και το κόστος ελαχιστοποίησης δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εάν υπάρχουν. Το κόστος σύνδεσης του ΥΗΣ με το δίκτυο μέσης

τάσης μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι πολύ υψηλό και να καθιστά την επένδυση απαγορευτική. Η εκτίμηση του κόστους του κύριου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (υδροστροβίλων, γεννητριών και μετασχηματιστή) είναι δυνατό να βασιστεί σε πρόσφατες προσφορές από κατασκευάστριες εταιρείες για βέλτιστη ονομαστική παροχή και υδραυλική πτώση που προέκυψε από την προηγούμενη φάση.

Η εκτίμηση των ολικών διαστάσεων του κύριου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (υδροστροβίλου, γεννήτριας, μετασχηματιστή), ώστε να διαστασιοποιηθεί και να κοστολογηθεί με καλή προσέγγιση ο ΥΗΣ βασίζεται σε καταλόγους τυποποιημένου εξοπλισμού.

#### η) Οικονομοτεχνική ανάλυση

Για κάθε μία από τις εναλλακτικές λύσεις είναι δυνατή η διεξαγωγή οικονομικής ανάλυσης βιωσιμότητας και έλεγχος της οικονομικής ευαισθησίας της επένδυσης από την οποία θα προκύψει η βέλτιστη λύση, δηλαδή η ονομαστική παροχή, η υδραυλική πτώση, ο τύπος και το πλήθος των υδροστροβίλων, για τα οποία η καθαρή παρούσα αξία ή οι άλλοι δείκτες οικονομικής απόδοσης της επένδυσης γίνονται μέγιστοι. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι κατά φάση της οριστικής μελέτης, καθώς και κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, μπορεί να ανακύψουν δυσκολίες που θα έχουν ως αποτέλεσμα διόγκωση των απρόβλεπτων δαπανών (όπως π.χ. για συμπληρωματικά έργα αντιστήριξης ή αντιπλημμυρικά έργα).

#### θ) Οριστικοποίηση της διάταξης

Σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση που προέκυψε οριστικοποιείται η διάταξη και το μέγεθος των έργων τα οποία αποτυπώνονται σε σχέδια.

#### ι) Λεπτομερής ανάλυση του κόστους

Ακολουθεί λεπτομερέστερη εκτίμηση του κόστους του έργου ως άθροισμα του κόστους όλων των επί μέρους έργων και εξοπλισμού. Καθορίζοντας τον τρόπο χρηματοδότησης του έργου (ύψος και όροι του δανείου) προκύπτει λεπτομερής χρηματοδοτική ανάλυση και ανάλυση ευαισθησίας των διαφόρων παραμέτρων.

#### κ) Σύνταξη χρονοδιαγράμματος

Συντάσσεται προκαταρκτικό χρονοδιάγραμμα εκτέλεσης των έργων. Κατά τη σύνταξη του χρονοδιαγράμματος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυνατότητα εκτέλεσης ή μη ορισμένων εργασιών κατά τους χειμερινούς μήνες, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές συνθήκες.

#### λ) Σύνταξη προκαταρκτικής μελέτης

Συντάσσεται έκθεση της προκαταρκτικής μελέτης στην οποία επισυνάπτονται τα τεχνικά σχέδια, οι υπολογισμοί και αναλύσεις, γενικό συμπέρασμα της οποίας είναι η επαναβεβαίωση (ή όχι) του συμπεράσματος της αναγνωριστικής φάσης, ότι το έργο είναι οικονομοτεχνικά βιώσιμο.

Για την εκπόνηση της προκαταρκτικής μελέτης απαιτείται η συνεργασία περισσότερων ειδικοτήτων μηχανικών και επιστημόνων, όπως πολιτικού μηχανικού (υδραυλικού), γεωλόγου, τοπογράφου, μηχανολόγου και ηλεκτρολόγου μηχανικού, οικονομολόγου, ενώ γενική σύνθεση και συντονισμό θα πρέπει να αναλάβει μηχανικός ή γραφείο μελετών με εμπειρία στο αντικείμενο.

### 9.1.3 Μελέτη εφαρμογής

Η μελέτη εφαρμογής σκοπό έχει σύνταξη των τελικών σχεδίων και των προδιαγραφών κατασκευής, προμήθειας και εγκατάστασης του εξοπλισμού σύμφωνα με τα οποία ο ανάδοχος θα κατασκευάσει και θα θέσει σε λειτουργία τη μονάδα. Η μελέτη εφαρμογής ολοκληρώνεται με σύνταξη των τευχών δημοπράτησης του έργου βάσει των οποίων θα δοθούν οι προσφορές και θα επιλεγεί ο ανάδοχος του έργου.

Στην οριστική μελέτη, μελετώνται αναλυτικά όλες οι συνιστώσες του έργου και συντάσσονται τα οριστικά κατασκευαστικά σχέδια. Παραδοτέο της μελέτης εφαρμογής είναι τα πλήρη και αναλυτικά σχέδια, τα τεύχη των υπολογισμών (στατικών, γεωστατικών, μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών, υδραυλικών), το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης κάθε φάσης των εργασιών, τα τεύχη των προδιαγραφών κατασκευής και προμήθειας, εγκατάστασης και δοκιμών του εξοπλισμού, η διαδικασία θέσης σε λειτουργία και δοκιμών παραλαβής του έργου κ.λ.π., το τεύχος της προμέτρησης των υλικών και εργασιών και του προϋπολογισμού.

Για την εκπόνηση της μελέτης εφαρμογής και ιδιαίτερα της αρχιτεκτονικής και στατικής μελέτης του κτιρίου του ΥΗΣ θα πρέπει ο μελετητής να έχει διάθεσή του τα πλήρη σχέδια που αφορούν τις ακριβείς ολικές διαστάσεις και λεπτομέρειες έδρασης του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (υδροστροβίλου, μονάδας ισχύος ρυθμιστή στροφών, γεννήτριας, μετασχηματιστή), τα βάρη καθώς και τα φορτία που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία. Τα στοιχεία αυτά υποχρεούται να υποβάλλει εγκαίρως η κατασκευάστρια εταιρεία.

Τα τεύχη δημοπράτησης του έργου κατασκευής μικρού ΥΗΕ είναι αντίστοιχα με αυτά των άλλων έργων δηλαδή:

1. Περίληψη διακήρυξης
2. Διακήρυξη δημοπρασίας
3. Ειδική συγγραφή υποχρεώσεων
4. Γενική συγγραφή υποχρεώσεων
5. Τιμολόγιο μελέτης
6. Προϋπολογισμός μελέτης
7. Περιγραφή, άδειες νερού, άδεια παραγωγής και εγκεκριμένοι περιβαλλοντικοί όροι
8. Τεχνικές προδιαγραφές
9. Κατασκευαστικά σχέδια
10. Τοπογραφικές αποτυπώσεις
11. Τιμολόγιο προσφοράς
12. Προϋπολογισμός προσφοράς
13. Πίνακας των εγγυημένων χαρακτηριστικών του εξοπλισμού
15. Πίνακας ποσοστιαίας ανάλυσης δαπανών των εργασιών

16. Τεύχος τεχνικών προδιαγραφών προμήθειας και εγκατάστασης του κύριου και του βοηθητικού εξοπλισμού

Η δημοπράτηση του έργου είναι δυνατό να αφορά τη κατασκευή του μόνο (βάσει της οριστικής μελέτης), ή τη μελέτη εφαρμογής του και την κατασκευή (μελέτη-κατασκευή).

## 9.2 Κατασκευή υδροηλεκτρικής μονάδας

Οι διαδικασίες που προβλέπονται στη μελέτη εφαρμογής όσον αφορά την κατασκευή, την προμήθεια, την εγκατάσταση και τη δοκιμή του εξοπλισμού, τους κανόνες ασφαλείας, τις ρήτρες κλπ. είναι κοινές με τα άλλα τεχνικά έργα. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε ορισμένα σημεία τα οποία είναι χαρακτηριστικά των μΥΗΕ.

### α) Υδραυλική δοκιμή του αγωγού προσαγωγής

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αγωγού προσαγωγής ακολουθεί έλεγχος των συγκολλήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργοτάξιο, είτε με τη μέθοδο της ραδιογράφισης, είτε με υπερήχους. Σε αγωγούς μεγάλης υδραυλικής πτώσης  $H$ , (πάνω από 50[m] περίπου), θα πρέπει ο έλεγχος των συγκολλήσεων να γίνει με μέθοδο της ραδιογράφισης και να είναι πλήρης, δηλαδή στο 100% των συγκολλήσεων, ενώ για μικρότερες τιμές του  $H$  είναι δυνατό να προβλεφθεί δειγματοληπτικός έλεγχος με ραδιογράφιση, π.χ. στο 10% των συγκολλήσεων.

Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου των συγκολλήσεων και την αποκατάσταση των αστοχιών, θα πρέπει να διεξαχθεί υδραυλική στατική δοκιμή σε πίεση ίση προς 1.5 φορές τη στατική πίεση λειτουργίας προσαυξημένη κατά την αναμενόμενη υπερπίεση λόγω των μεταβατικών φαινομένων. Η στατική υδραυλική δοκιμή πραγματοποιείται πριν την επίχωση ή τη σκυροδέτηση του αγωγού, αφού προηγουμένως ταπωθούν στεγανά όλα τα άκρα. Επίσης προβλέπονται αναμονές για σύνδεση όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων, όπως της αντλίας πίεσης, μανομέτρου, δικλείδας εξαερισμού, δικλείδας πλήρωσης και εκκένωσης. Η στατική αυτή πίεση εφαρμόζεται σταδιακά και διατηρείται στη μέγιστη τιμή της επί 30[min] τουλάχιστο, κατά τη διάρκεια των οποίων ελέγχεται ο αγωγός πτώσης σε όλο το μήκος του για ενδεχόμενες διαρροές ή παραμορφώσεις. Σε περίπτωση εμφάνισης διαρροών, θα πρέπει αυτές να εξαλειφθούν και στη συνέχεια να επαναληφθεί η υδραυλική δοκιμή. Μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής δοκιμής ο αγωγός πτώσης επιχωματώνεται ή σκυροδετείται (όπου αυτό προβλέπεται) και συνδέεται με τα λοιπά εξαρτήματα, όπως τη βάνα εισόδου.

### β) Εκπαίδευση του προσωπικού

Την εγκατάσταση, ρυθμίσεις, ελέγχους, δοκιμές και θέση σε λειτουργία του κύριου εξοπλισμού (κυρίως των υδροστροβίλων, των ρυθμιστών στροφών, των γεννητριών κ.λ.π.) αναλαμβάνει η κατασκευάστρια εταιρεία, η οποία για το σκοπό αυτό αποστέλλει ειδικευμένους τεχνικούς. Το προσωπικό που θα αναλάβει την επίβλεψη και συντήρηση της μονάδας θα πρέπει από την αρχή να συμμετέχει στις εργασίες εγκατάστασης, ρυθμίσεων και δοκιμών. Η κατασκευάστρια εταιρεία θα πρέπει να υποβάλει τα απαραίτητα σχέδια, λειτουργικά διαγράμματα, οδηγίες συντήρησης κ.λ.π. έτσι ώστε να είναι δυνατή η αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων. Επίσης θα πρέπει να καταγράψει τις ρυθμίσεις των διακένων, σταθερών ρύθμισης, ανοχών κ.λ.π.

Η κατασκευάστρια εταιρεία θα πρέπει να προμηθεύσει τα ανταλλακτικά που κρίνονται ως απαραίτητα, καθώς και ειδικά εργαλεία (εάν απαιτούνται) για την εκτέλεση των τακτικών ή έκτακτων συντηρήσεων.

#### γ) Θέση σε λειτουργία του εξοπλισμού

Το έργο θα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία, αφού προηγουμένως ελεγχθούν όλα τα επιμέρους στοιχεία του. Όσον αφορά τη θέση σε λειτουργία των μονάδων παραγωγής (υδροστροβίλων-γεννητριών), θα πρέπει προηγουμένως να ελεγχθούν: οι καλωδιώσεις και οι ηλεκτρικοί πίνακες, η σύνδεση με το δίκτυο, τα δίκτυα λίπανσης (λαδιού και γράσου), τα δίκτυα ψύξης και εξαερισμού, οι διάφορες προστασίες, η λειτουργία και ο χρόνος απόκρισης των σερβοκινητήρων, των πρεσοστατών, των διακοπών στάθμης, των θερμοστατών, των οργάνων μέτρησης και ελέγχου.

Στη συνέχεια θα πρέπει να πληρωθεί ο αγωγός πτώσης (αφού καθαριστεί), και να ελεγχθεί η στεγανότητα (κυρίως της βάνας εισόδου) και να μηδενιστούν ενδεχόμενες διαρροές. Πρέπει επίσης να ελεγχθεί η λειτουργία του μηχανισμού ανοίγματος και κλεισίματος της βάνας εισόδου και να ρυθμισθεί η διάρκεια του χειρισμού. Η περιστροφή της μονάδας παραγωγής (υδροστροβίλου-γεννήτριας), αρχικά γίνεται εν κενώ (αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο), σε μειωμένη ταχύτητα περιστροφής και ακολούθως στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης ελέγχονται τα βοηθητικά κυκλώματα (λίπανσης, εξαερισμού κ.λ.π.).

Μετά τον έλεγχο του συστήματος διέγερσης της γεννήτριας (εάν είναι σύγχρονη) είναι δυνατή η σύνδεση της μονάδας με το δίκτυο σε μερικό φορτίο μέχρι το πλήρες φορτίο. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αυτών ελέγχεται η τιμή και η σταθεροποίηση των θερμοκρασιών των εδράνων, καθώς και οι ενδείξεις όλων των μετρητικών οργάνων.

Μετά την επιτυχή λειτουργία σε μερικά φορτία θα πρέπει να γίνει δοκιμή απόρριψης του φορτίου ανοίγοντας το διακόπτη σύνδεσης με το δίκτυο. Κατά τη φάση αυτή ελέγχεται η υπερτάχυνση της μονάδας, οι υπερπίεσεις-υποπίεσεις και γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις του ρυθμιστή στροφών.

Η δοκιμαστική αυτή περίοδος λειτουργίας του έργου, πάντοτε με την παρουσία και ευθύνη των τεχνικών της κατασκευάστριας εταιρείας, διαρκεί περί τις 15-30 ημέρες, κατά τη διάρκεια των οποίων, παράλληλα με την επίβλεψη της καλής λειτουργίας και των ελέγχων των συστημάτων και υποσυστημάτων, γίνεται και η τελική εκπαίδευση του προσωπικού που θα αναλάβει τη λειτουργία και συντήρηση.

#### δ) Δοκιμές βαθμού απόδοσης των μονάδων

Οι δοκιμές βαθμού απόδοσης της κάθε μονάδας αποτελούν σε ορισμένες περιπτώσεις συμβατική υποχρέωση του αναδόχου, οπότε θα πρέπει να διεξαχθούν πριν τη λήξη της περιόδου εγγύησης, σύμφωνα με τη διαδικασία και τα όργανα που έχουν συμφωνηθεί με τον ανάδοχο του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Σε ορισμένες περιπτώσεις πριν την έναρξη κατασκευής των υδροστροβίλων προηγείται εργαστηριακή δοκιμή της λειτουργικής συμπεριφοράς και μέτρησης του βαθμού απόδοσης του υδροστροβίλου σε γεωμετρικά όμοιο μοντέλο. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση των μεγάλων υδροστροβίλων, όμως είναι δαπανηρή και χρονοβόρα και για το λόγο αυτό μη εφαρμόσιμη στην περίπτωση των μικρών υδροστροβίλων. Στην τελευταία αυτή περίπτωση

πρόκειται συνήθως για τυποποιημένο υδροστροβίλο, μέλος μίας σειράς υδροστροβίλων που έχουν ήδη δοκιμασθεί εργαστηριακά κατά τη φάση της ανάπτυξής τους.

Θα πρέπει ο κατασκευαστής του υδροστροβίλου να υποβάλει τις σχετικές μετρήσεις και την αναγωγή του βαθμού απόδοσης για τον τύπο και μέγεθος του υδροστροβίλου που εγκατέστησε. Η διαδικασία μέτρησης του βαθμού απόδοσης, πρέπει να επαναλαμβάνεται κατά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε ένα ή δύο χρόνια), ώστε να διαπιστώνεται εάν έχει επέλθει φθορά στον εξοπλισμό, αποτέλεσμα της οποίας είναι η πτώση του βαθμού απόδοσης.

### 9.3 Διαδικασίες αδειοδότησης

Η αδειοδότηση ενός μΥΗΕ περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια.

#### 9.3.1 Έκδοση Άδειας Παραγωγής

Υποβολή αίτησης στη ΡΑΕ. Ο φάκελος πρέπει να περιέχει:

- Μελέτη σκοπιμότητας
- Νομική υπόσταση, οργανωτική και διοικητική δομή του αιτούντος, καθώς και οικονομικά στοιχεία των τελευταίων τριών ετών
- Συνοπτική παρουσίαση του Επιχειρηματικού Σχεδίου για τα επόμενα πέντε έτη
- Συνοπτικό χρηματοοικονομικό προγραμματισμό για το έργο που θα παρέχει την προβλεπόμενη ταμειακή ροή

#### 9.3.2 Έκδοση Άδειας Εγκατάστασης

Αρμόδιος για την έκδοση εγκατάστασης είναι ο Γενικός Γραμματέας της οικείας περιφέρειας.

- Σε περίπτωση σύνδεσης σταθμού στο Σύστημα ή σε Δίκτυο τα αναγκαία στοιχεία για τη διατύπωση προσφοράς σύνδεσης του σταθμού (Τοπογραφικό διάγραμμα 1:50.000, περιγραφή Η/Μ εγκαταστάσεων)
- Φάκελος μελέτης προέγκρισης χωροθέτησης
- Φάκελος μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Άδεια χρήσης νερού και, εφόσον ο αιτών είναι νομικό πρόσωπο που δεν υπάγεται στον ευρύτερο δημόσιο τομέα, άδεια εκτέλεσης έργου αξιοποίησης υδατικών πόρων, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν. 1739/1987

#### 9.3.3 Προκαταρκτική Περιβαλλοντική Εκτίμηση και Αξιολόγηση (Π.Π.Ε.Α.)

- Τεχνική Περιγραφή Έργου
- Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΠΠΕ)
- Χάρτες και Φωτογραφικό Υλικό – Τοπογραφικοί χάρτες
- Θετικές γνωμοδοτήσεις Δασαρχείου, Πολεοδομικής Υπηρεσίας, ΟΤΕ, ΥΠΑ, ΓΕΕΘΑ, ΕΟΤ, Εφορειών Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, Βυζαντινών Αρχαιοτήτων και Νεοτέρων Μνημείων και των Οργανισμών Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος, εφόσον το έργο πρόκειται να εγκατασταθεί σε περιοχή δικαιοδοσίας των εν λόγω οργανισμών

#### 9.3.4 Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (Ε.Π.Ο.)

- Απαραίτητη η θετική γνωμοδότηση του Νομαρχιακού Συμβουλίου της οικείας Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης και των Οργανισμών Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος, εφόσον το έργο πρόκειται να εγκατασταθεί σε περιοχή δικαιοδοσίας των εν λόγω οργανισμών
- Ο συνοδευτικός φάκελος της αίτησης, περιλαμβάνει την πλήρη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) του έργου, στην οποία αναλύονται εκτενέστερα το σύνολο των στοιχείων που αναφέρονται στην Π.Π.Ε.Α.

#### 9.3.5 Έγκριση Επέμβασης σε δάσος ή δασική έκταση (Εεπ)

Αρμόδιος για την έκδοσή της είναι ο Γενικός Γραμματέας της οικείας Περιφέρειας.

- Τα περιεχόμενα του φακέλου για την Εεπ είναι η Τεχνική Περιγραφή Έργου, οι χάρτες και το φωτογραφικό υλικό, όπως αυτά ορίζονται για το φάκελο της Π.Π.Ε.Α.
- Προϋπόθεση για τη χορήγηση Εεπ είναι η Ε.Π.Ο. του συγκεκριμένου έργου

#### 9.3.6 Άδεια Χρήσης Νερού – Εκτέλεση Έργου Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Αρμόδια αρχή για την έκδοση της άδειας είναι το ΥΠΑΝ.

- Νόμιμη εξουσιοδότηση εκπροσώπησης
- Τοπογραφικό διάγραμμα, κατάλληλης κλίμακας
- Γενική περιγραφή του έργου
- Αντίγραφο ιδιωτικού συμφωνητικού σε περίπτωση χρήσης νερού από χώρο ξένης ιδιοκτησίας
- Επαρκή στοιχεία μελέτης στα οποία αναλύεται η ποσοτική και ποιοτική κατάσταση των υδατικών πόρων, πριν και μετά την εκτέλεση του έργου

#### 9.3.7 Έκδοση Άδειας Λειτουργίας

- Βεβαίωση του ΔΕΣΜΗΕ ή της ΔΕΗ ΑΕ περί ολοκλήρωσης των κατασκευών του δικτύου σύνδεσης και των λοιπών αναγκαίων εγκαταστάσεων, σύμφωνα με τις ελάχιστες προδιαγραφές που ορίζονται στη σύμβαση σύνδεσης
- Επικυρωμένο αντίγραφο σύμβασης αγοραπωλησίας Η/Ε μεταξύ Παραγωγού και ΔΕΣΜΗΕ ή ΔΕΗ ΑΕ, ανάλογα με το αν η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο Σύστημα ή στο δίκτυο, αντίστοιχα
- Επικυρωμένο αντίγραφο σύμβασης σύνδεσης στο Σύστημα ή στο Δίκτυο, μεταξύ Παραγωγού και ΔΕΣΜΗΕ ή ΔΕΗ ΑΕ αντίστοιχα
- Πιστοποιητικό της αρμόδιας Υπηρεσίας του Πυροσβεστικού Σώματος, ότι έχουν ληφθεί όλα τα απαραίτητα μέτρα πυρασφάλειας
- Έκθεση αυτοψίας της Αδειοδοτούσας Αρχής, με την οποία βεβαιώνεται η τήρηση των όρων και περιορισμών της άδειας εγκατάστασης
- Νόμιμο θεωρημένο αντίγραφο της οικοδομικής άδειας του σταθμού παραγωγής
- Υπεύθυνη δήλωση του φορέα του έργου ότι έχουν τηρηθεί οι όροι της απόφασης Ε.Π.Ο. και ότι θα τηρούνται και κατά τη διάρκεια λειτουργίας
- Λοιπές υπεύθυνες δηλώσεις του ιδιοκτήτη, του επιβλέποντος την κατασκευή μηχανικού και του μηχανικού επίβλεψης της λειτουργίας του έργου



## 9.4 Νομικό καθεστώς

Η εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας υπόκειται στους κανονισμούς της εκάστοτε χώρας. Οι διαδικασίες αδειοδότησης και εγκατάστασης ΜΥΗΕ πολλές φορές αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες για την υλοποίηση μια τέτοιας επένδυσης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των αρμόδιων φορέων είναι μεγάλος με συχνό χαρακτηριστικό την έλλειψη συντονισμού μεταξύ τους, με αποτέλεσμα μεγάλοι χρόνοι αναμονής για την έκδοση αποφάσεων. Σε έρευνα που διεξήχθη από την ESHA ο εκτιμώμενος χρόνος αδειοδότησης για ένα ΜΥΗΕ κυμαίνεται από 12 μήνες (Αυστρία) μέχρι και 12 χρόνια (Πορτογαλία). Οι επί μέρους άδειες που συνήθως απαιτούνται αφορούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Απαιτείται ακόμη οικοδομική άδεια και άδεια για σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες διαφέρουν όχι μόνο μεταξύ των χωρών αλλά και μεταξύ διαφορετικών περιοχών της ίδιας χώρας.

Χαρακτηριστικά σε κάποιες περιοχές της Ιταλίας απαιτούνται 58 εγκρίσεις από διαφορετικούς φορείς. Ο πιθανός επενδυτής επιβαρύνεται επιπλέον με το κόστος σύνταξης του φακέλου που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες προμελέτες προκειμένου να αιτηθεί της αδειοδότησης, το οποίο κυμαίνεται από 10.000€ έως 30.000€. Στην πράξη η χρονοβόρα και γραφειοκρατική διαδικασία αδειοδότησης ενός ΜΥΗΕ απέχει πολύ από την έννοια "fast track" που τελευταία ευρέως χρησιμοποιείται.

Στην Ελλάδα με τροπολογία που έγινε στο νομοσχέδιο για το δομημένο περιβάλλον, δίνεται η δυνατότητα σε κατόχους Υβριδικών Σταθμών σε μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, που έχουν συνάψει σύμβαση σύνδεσης με το Διαχειριστή πριν την 31/12/2015 και βρίσκονται σε τελικό στάδιο υλοποίησης, να συνάψουν σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με το άρθρο 12 του ν. 3468/2006 χωρίς να εφαρμόζεται για αυτούς το άρθρο 21 του ν. 4414/2016.

Ειδικότερα:

- Επανακαθορίζεται το νομοθετικό πλαίσιο, για τη σύναψη των συμβάσεων πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους κατόχους αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Υβριδικούς Σταθμούς σε Μ.Δ.Ν. και ορίζεται ότι, οι εν λόγω κάτοχοι αδειών που έχουν συνδεθεί με το Διαχειριστή του Δικτύου πριν τις 31-12-2015 και έχουν εκδοθεί οι απαραίτητες άδειες εγκατάστασης, καθώς και οι κάτοχοι αδειών που έχουν ενταχθεί σε Ευρωπαϊκά χρηματοδοτικά προγράμματα πριν την ανωτέρω ημερομηνία, μπορούν να συνάπτουν τις προαναφερόμενες συμβάσεις πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 12 του ν.3468/2006 που ισχύουν για τους σταθμούς από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) αντί των ισχυουσών, από 1-1-2016, διατάξεων του άρθρου 21 του ν.4414/2016 ειδικά για τους Υβριδικούς Σταθμούς σε Μ.Δ.Ν.
- Παρέχεται η δυνατότητα υλοποίησης, με υπουργική απόφαση, δύο (2) Ειδικών Πιλοτικών Έργων (ένα σε κάθε ηλεκτρικό σύστημα Μ.Δ.Ν) σε δύο (2) ηλεκτρικά συστήματα Μ.Δ.Ν. και ένταξης σε καθεστώς Λειτουργικής Ενίσχυσης, με σκοπό την επίτευξη υψηλότερης διείσδυσης ενέργειας από σταθμούς παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. και συγχρόνως την διασφάλιση της κάλυψης της ζήτησης και της ασφαλούς λειτουργίας αυτών με τον πλέον οικονομικό τρόπο.

Με την εν λόγω απόφαση καθορίζονται, μεταξύ άλλων, το ειδικό πλαίσιο λειτουργίας κάθε Ειδικού Πιλοτικού Έργου, η διάρκεια ισχύος, η μορφή της Λειτουργικής Ενίσχυσης, οι αρχές τιμολόγησης, οι διαδικασίες αδειοδότησης, οι ειδικοί όροι και τα κριτήρια αξιολόγησης της ανταγωνιστικής διαδικασίας προσφορών, η διαδικασία κατάρτισης της σχετικής Σύμβασης Λειτουργικής Ενίσχυσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε Έργο κ.λπ.

- Καθορίζεται ο τρόπος διενέργειας της ανταγωνιστικής διαδικασίας υποβολής προσφορών για την επιλογή αναδόχου προς υλοποίηση κάθε Ειδικού Πιλοτικού Έργου.

- Ορίζεται ότι, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας από τα Ειδικά Πιλοτικά Έργα επιβαρύνονται, από την έναρξη της λειτουργίας τους, με το προβλεπόμενο, για όλους τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από ΛΠΕ, ειδικό τέλος (άρθρο 25 παρ.Α.1, ν.3468/2006), στη βάση της προ Φ.Π.Α. συνολικής αποζημίωσης που λαμβάνουν από τη λειτουργία τους.

Νόμος 3468/2006

Άρθρο 9 Ένταξη σταθμών Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α στο Σύστημα ή το Διασυνδεδεμένο Δίκτυο

1. Για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α. που συνδέονται με το Σύστημα ή το Δίκτυο, εκτός από το Δίκτυο των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, εφόσον δεν τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια του Συστήματος ή του Δικτύου, ο αρμόδιος Διαχειριστής του Συστήματος ή του Δικτύου υποχρεούται, κατά την κατανομή του Φορτίου, να δίνει προτεραιότητα:

α) Σε διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής, στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από Α.Π.Ε., ανεξάρτητα από την Εγκατεστημένη Ισχύ τους, καθώς και σε υδροηλεκτρικές μονάδες με Εγκατεστημένη Ισχύ μέχρι δεκαπέντε (15) MWe.

β) Σε διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής, στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από σταθμούς Σ.Η.Θ.Υ.Α. με χρήση Α.Π.Ε. ή από σταθμούς Σ.Η.Θ.Υ.Α. με χρήση Α.Π.Ε., σε συνδυασμό, με αέρια καύσιμα, ανεξάρτητα από την Εγκατεστημένη Ισχύ τους.

γ) Σε διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής, στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από σταθμούς Σ.Η.Θ.Υ.Α. κατά τρόπο διάφορο από αυτόν που ορίζεται στην περίπτωση β'. Στην περίπτωση αυτή, το δικαίωμα προτεραιότητας παρέχεται σε εγκαταστάσεις παραγωγής με Εγκατεστημένη Ισχύ μέχρι τριάντα πέντε (35) MWe.

2. Το δικαίωμα προτεραιότητας που παρέχεται σύμφωνα με τις διατάξεις της προηγούμενης παραγράφου, ισχύει και για το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας Αυτοπαραγωγών, εφόσον η πλεονάζουσα ενέργεια παράγεται από σταθμούς Σ.Η.Θ.Υ.Α. κατά τα οριζόμενα στην περίπτωση γ' της προηγούμενης παραγράφου, με μέγιστη Εγκατεστημένη Ισχύ έως τριάντα πέντε (35) MWe και για το τμήμα της παραγόμενης ενέργειας που δεν υπερβαίνει, σε ετήσια βάση, το 20% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο, σε κάθε περίπτωση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο των πενήντα χιλιάδων (50.000) MWh. Αν ο Αυτοπαραγωγός παράγει ηλεκτρική ενέργεια από σταθμούς Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α., κατά τα οριζόμενα στις περιπτώσεις α' και β' της προηγούμενης παραγράφου, το δικαίωμα προτεραιότητας παρέχεται σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συνολική Εγκατεστημένη Ισχύ έως τριάντα πέντε (35) MWe.

3. Κατά την Κατανομή του Φορτίου, σύμφωνα με την παράγραφο 1, ο Διαχειριστής του Συστήματος ή του Δικτύου παρέχει στις μονάδες Α.Π.Ε. του Υβριδικού Σταθμού που συνδέεται

με το Σύστημα, απευθείας ή μέσω Δικτύου, το δικαίωμα προτεραιότητας που παρέχεται και στους σταθμούς Α.Π.Ε. οι οποίοι δεν αποτελούν τμήμα Υβριδικού Σταθμού, σύμφωνα με την περίπτωση α' της παραγράφου 1. Αν, για λόγους ασφάλειας της λειτουργίας του Συστήματος ή του Δικτύου, καθίσταται αδύνατη η ένταξη σε αυτά των μονάδων παραγωγής Α.Π.Ε. του Υβριδικού Σταθμού, το δικαίωμα προτεραιότητας των μονάδων Α.Π.Ε. του Υβριδικού Σταθμού ισχύει για ποσοστό της ισχύος που απορροφάται από το Σύστημα ή το Δίκτυο για τη λειτουργία των αποθηκευτικών μονάδων του Υβριδικού Σταθμού που λειτουργούν κατά την ίδια ώρα κατανομής. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται στην άδεια παραγωγής του Υβριδικού Σταθμού.

4. Οι μονάδες ελεγχόμενης παραγωγής του Υβριδικού Σταθμού που αξιοποιούν την αποθηκευμένη ενέργεια στο σύστημα αποθήκευσης του σταθμού αυτού, εντάσσονται στο Σύστημα σύμφωνα με τις διατάξεις του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος, όπως αυτές ισχύουν κάθε φορά για υδροηλεκτρικούς σταθμούς με Εγκατεστημένη Ισχύ μεγαλύτερη των δεκαπέντε (15) MWe.

5. Για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του Υβριδικού Σταθμού μπορεί να απορροφάται ενέργεια από το Σύστημα ή το Διασυνδεδεμένο Δίκτυο, εφόσον υποβάλλεται σχετική Δήλωση Φορτίου προς τον Διαχειριστή του Συστήματος σύμφωνα με τις διατάξεις του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος, όπως αυτές ισχύουν κάθε φορά για υδροηλεκτρικούς σταθμούς με Εγκατεστημένη Ισχύ μεγαλύτερη των δεκαπέντε (15) MWe.

6. Οι όροι, οι προϋποθέσεις, η διαδικασία και κάθε αναγκαία λεπτομέρεια για την προτεραιότητα κατά την κατανομή του Φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής, σύμφωνα με τις προηγούμενες παραγράφους, ορίζονται στον Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος. Άρθρο 10 Ένταξη σταθμών Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α. στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

1. Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, ο αρμόδιος Διαχειριστής αυτών υποχρεούται να απορροφά, κατά προτεραιότητα, την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από σταθμό Α.Π.Ε. Παραγωγού ή Αυτοπαραγωγού, καθώς και από τις μονάδες Α.Π.Ε. Υβριδικού Σταθμού και, ακολούθως, το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει Αυτοπαραγωγός από σταθμό Σ.Η.Θ.Υ.Α..

2. Ο Διαχειριστής του Δικτύου των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, κατά την κατανομή του φορτίου, παρέχει προτεραιότητα, σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, στη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. Υβριδικού Σταθμού έναντι των άλλων μονάδων Α.Π.Ε., εφόσον συμμετέχει στην παροχή εγγυημένης ισχύος του Υβριδικού Σταθμού κατά τα προβλεπόμενα στην οικεία άδεια παραγωγής ή εφόσον γίνεται αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα παραγωγής του Υβριδικού Σταθμού. Στην τελευταία περίπτωση, η προτεραιότητα παρέχεται μέχρι του ποσοστού ισχύος που απορροφάται από το Δίκτυο για την πλήρωση των συστημάτων αποθήκευσης του Υβριδικού Σταθμού που είναι συνδεδεμένα με το Δίκτυο Μη Διασυνδεδεμένου Νησιού. Το ποσοστό αυτό αναγράφεται στην άδεια παραγωγής και για τον προσδιορισμό του λαμβάνεται υπόψη η σχετική εισήγηση του Διαχειριστή Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών. Ο Διαχειριστής του Δικτύου των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, κατά την κατανομή του φορτίου, παρέχει προτεραιότητα στις μονάδες ελεγχόμενης παραγωγής για την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας του Υβριδικού Σταθμού, έναντι των συμβατικών μονάδων του Μη Διασυνδεδεμένου Νησιού.

3. Οι όροι, οι προϋποθέσεις, η διαδικασία και κάθε αναγκαία λεπτομέρεια για την απορρόφηση της ενέργειας των εγκαταστάσεων παραγωγής από τον Διαχειριστή Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, κατά τις διατάξεις του παρόντος άρθρου, ορίζονται στον Κώδικα Διαχείρισης Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών.

#### Άρθρο 12 Σύμβαση Πώλησης

1. Για την ένταξη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α. στο Σύστημα ή στο Δίκτυο, περιλαμβανομένου και του Δικτύου των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, σύμφωνα με τα άρθρα 9 και 10, ο Διαχειριστής του Συστήματος, εφόσον οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται στο Σύστημα είτε απευθείας είτε μέσω του Δικτύου ή ο Διαχειριστής Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, εφόσον οι εγκαταστάσεις παραγωγής συνδέονται με το Δίκτυο των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών, υποχρεούνται να συνάπτουν σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με τον κάτοχο της άδειας παραγωγής της.

2. Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας ισχύει για δέκα (10) έτη και μπορεί να παρατείνεται για δέκα (10), επιπλέον, έτη, μονομερώς, με έγγραφη δήλωση του παραγωγού, εφόσον αυτή υποβάλλεται τρεις (3), τουλάχιστον, μήνες πριν από τη λήξη της αρχικής σύμβασης. Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Υβριδικούς Σταθμούς ισχύει για είκοσι (20) έτη και μπορεί να παρατείνεται, σύμφωνα με τους όρους της άδειας αυτής, μετά από έγγραφη συμφωνία των μερών, εφόσον ισχύει η σχετική άδεια παραγωγής.

3. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης, μετά από εισήγηση του αρμόδιου Διαχειριστή και γνώμη της Ρ.Α.Ε., καθορίζονται ο τύπος, το περιεχόμενο και η διαδικασία κατάρτισης των συμβάσεων πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τις διατάξεις του παρόντος άρθρου, καθώς και κάθε ειδικότερο θέμα και αναγκαία λεπτομέρεια.

## 9.5 Βήματα τεχνικοοικονομικής επιλογής υδροηλεκτρικής μονάδας

### 9.5.1 Εκτίμηση ύπαρξης υδροδυναμικής ενέργειας

Ως προς την εκτίμηση ύπαρξης υδροδυναμικής ενέργειας, η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφηκε συνοπτικά στο κεφάλαιο 3 του παρόντος. Πιο αναλυτικά, για τμήμα υδατορέματος το οποίο παραμένει ανεκμετάλλευτο, εξετάζεται είτε με παραδοσιακό τρόπο (τοπογραφικοί χάρτες, επικοινωνία με δασικές υπηρεσίες, δήμους κ.λ.π.), είτε με πιο σύγχρονες μεθόδους (GIS) η δυνατότητα ανάπτυξης ΥΗΕ στις θέσεις που πιθανόν ενδιαφέρουν. Επιδιώκεται στη θέση που θα επιλεγεί, να μεγιστοποιείται το ονομαζόμενο γινόμενο ενέργειας, δηλαδή το γινόμενο της παροχής επί το ύψος. Συνήθως στα υδατορέματα η παροχή αυξάνεται όσο πηγαίνει κανείς προς τα κατάντη, ενώ τα ποτάμια του ελληνικού χώρου δείχνουν να έχουν μεγαλύτερες κλίσεις προς τα ανάντη τους καθότι ξεκινούν από ορεινά τμήματα και καταλήγουν σε πεδινά πριν εκβάλλουν στη θάλασσα. Επομένως για τις θέσεις που ενδιαφέρουν και είναι εφικτό να κατασκευαστεί ΥΗΕ, υπολογίζεται το γινόμενο ενέργειας και επιλέγονται οι θέσεις για τις οποίες το γινόμενο αυτό μεγαλώνει.

### 9.5.2 Θέση εγκατάστασης υδροηλεκτρικής μονάδας

Ο υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) ενός ΥΗΕ στεγάζει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του έργου και εξασφαλίζει την είσοδο και απαγωγή της παροχής που προσάγεται στους υδροστροβίλους. Η διαμόρφωσή του εξαρτάται από τον τύπο του ΥΗΕ, τον τύπο και το πλήθος των υδροστροβίλων και την ονομαστική τους ισχύ. Η επιλογή της θέσης του ΥΗΣ και η διαμόρφωση του ΥΗΣ πρέπει να εξασφαλίζουν την υψηλή απόδοση, την ασφάλεια (κυρίως έναντι πλημμυρικών φαινομένων), την ευκολία στην πρόσβαση, τη συντήρηση και επιτήρηση του εξοπλισμού με την κατά το δυνατόν μικρή επιβάρυνση του προϋπολογισμού.

Εκτός από τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας και τον έλεγχο αυτού, ο ΥΗΣ περιλαμβάνει εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την εγκατάσταση και συντήρηση του κύριου εξοπλισμού όπως η γερανογέφυρα, αντλίες αποστράγγισης (εάν απαιτούνται), εργαλεία επισκευών (δράπανο, ηλεκτροσυγκόλληση, τροχός κλπ). Στη διαμόρφωση του ΥΗΣ θα πρέπει να προβλεφθεί χώρος πρόσβασης και συναρμολόγησης του εξοπλισμού και θύρες κατάλληλων διαστάσεων για την εισαγωγή του εξοπλισμού. Πρέπει επίσης να διαμορφωθεί χώρος γραφείου ελέγχου (control room) στο οποίο θα φυλάσσονται όλα τα σχέδια της εγκατάστασης και εγχειρίδια του εξοπλισμού, χώρος αποθήκευσης των ανταλλακτικών και λιπαντικών και χώροι για τις ανάγκες του προσωπικού (όπως WC, αποδυτήρια), πάγκος εργασίας. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να ληφθεί για το χώρο του (ή των) μετασχηματιστή ισχύος ο οποίος πρέπει να πληροί τους ισχύοντες κανονισμούς ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού.

Τα μΥΗΕ διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: σε αυτά στα οποία η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω εκτροπής του υδατορέματος, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ΥΗΕ εκτροπής, και σε αυτά στα οποία η υδραυλική πτώση επιτυγχάνεται μέσω του έργου υδροληψίας και τα οποία χαρακτηρίζονται ως ΥΗΕ ροής. Τα ΥΗΕ ροής έχουν συνήθως μικρή υδραυλική πτώση, της τάξεως των 5[m] έως 15[m], η οποία επιτυγχάνεται από υπερχειλιστή μικρού ύψους, χωρίς την παρεμβολή διώρυγας ή αγωγού προσαγωγής. Αντίθετα τα ΥΗΕ εκτροπής έχουν υδραυλική πτώση από 15[m] έως 500[m] περίπου και ο ΥΗΣ τροφοδοτείται μέσω διώρυγας και αγωγού προσαγωγής ή μόνο μέσω αγωγού προσαγωγής. Για το λόγο αυτό τα μικρά ΥΗΕ εκτροπής εξοπλίζονται με υδροστροβίλους Francis ή δράσεως (Pelton, Turgo ή Cross-Flow). Αντίθετα τα μΥΗΕ ροής εξοπλίζονται με υδροστροβίλους αξονικής ροής ή Francis ανοικτού θαλάμου.

Ο ΥΗΣ μΥΗΕ εκτροπής κατασκευάζεται πλησίον του φυσικού υδατορέματος στο οποίο οδηγείται η παροχή από τους αγωγούς απαγωγής των υδροστροβίλων στην ανοικτή διώρυγα απαγωγής. Η στάθμη στη διώρυγα απαγωγής διατηρείται σχεδόν σταθερή μέσω υπερχειλιστή. Σε πολλές περιπτώσεις κάθε υδροστροβίλος έχει τη δική του διώρυγα απαγωγής, λύση που βελτιώνει την ευελιξία της λειτουργίας του ΥΗΣ. Η διώρυγα απαγωγής συμβάλλει στο υδατόρεμα σχηματίζοντας οξεία γωνία με αυτό έτσι ώστε να αναπτύσσεται η ελάχιστη αλληλεπίδραση και φθορά στις κατασκευές.

Η στάθμη στη διώρυγα απαγωγής είναι υψηλότερη από τη μέγιστη αναμενόμενη στάθμη του υδατορέματος, με σκοπό την απρόσκοπτη λειτουργία των μονάδων ακόμη και στις δυσμενέστερες συνθήκες. Το τοίχιο του ΥΗΣ προς την πλευρά του υδατορέματος προφυλάσσεται από πιθανή

διάβρωση με την στοίβαξη μεγάλων λίθων. Οι βάνες εισόδου των υδροστροβίλων στεγάζονται στο χώρο του ΥΗΣ, αυξάνοντας αντίστοιχα τις διαστάσεις του ΥΗΣ.

Στις πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ υδροστροβίλου οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα. Όταν όμως αυτό είναι δυνατό, συνήθως για υδροστροβίλους Francis ή Pelton, η επιλογή οριζόντιου άξονα παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως ευκολότερη εγκατάσταση, ευκολία στην επίβλεψη και συντήρηση, μικρότερο απαιτούμενο ύψος του ΥΗΣ, ευκολία στην εγκατάσταση σφονδύλου, όμως οι συνολικές διαστάσεις της κάτοψης του ΥΗΣ προκύπτουν αυξημένες σε σύγκριση με την κατακόρυφη διάταξη.

Στη διαμόρφωση του ΥΗΣ θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ισχύοντες κανονισμοί σχετικά με στέγαση εξοπλισμού μέσης τάσεως (χώρος των μετασχηματιστών και διακοπών) και την πυρασφάλεια. Για την κατηγορία χαμηλού κινδύνου στην οποία κατατάσσεται ένας ΥΗΣ δεν απαιτείται η εγκατάσταση συστήματος αυτόματης πυρανίχνευσης και πυρασφάλειας παρά η εγκατάσταση ορισμένου αριθμού (ανάλογα με το εμβαδόν) φορητών πυροσβεστήρων ξηράς σκόνης CO<sub>2</sub>.

Η παροχή νερού για τις ανάγκες ύδρευσης του ΥΗΣ (νιπτήρας, WC) προέρχεται από τον αγωγό πτώσεως. Η λήψη αυτή γίνεται από σημείο ανάντη των βανών των υδροστροβίλων. Επίσης στον ΥΗΣ πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για την εκκένωση και αποστράγγιση των υδροστροβίλων για τις ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης.

Στην περίπτωση κατά την οποία ο υδροστροβίλος είναι τοποθετημένος πάνω από τη στάθμη του νερού στο φρεάτιο απαγωγής (θετική τιμή του ύψους τοποθέτησης  $H_{\pi}$ ) αρκεί το κλείσιμο της βάνας εισόδου και η εισχώρηση αέρα από το υψηλότερο σημείο. Όταν ο υδροστροβίλος είναι τοποθετημένος χαμηλότερα από τη στάθμη απαγωγής (για να ικανοποιούνται τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας έναντι σπηλαιώσεως) πρέπει να προβλέπεται θυρόφραγμα στο άκρο του αγωγού απαγωγής, οπότε η εκκένωση του υδροστροβίλου από το νερό επιτυγχάνεται μέσω αντλίας τοποθετημένης σε φρεάτιο στο χαμηλότερο σημείο. Σε όλες τις περιπτώσεις θα πρέπει να προβλέπεται σύστημα αποστράγγισης είτε μέσω φυσικής ροής εάν είναι δυνατό, είτε μέσω αντλιών για τις ενδεχόμενες διαρροές.

Δεν είναι δυνατή η διατύπωση περισσότερο συγκεκριμένων κανόνων σχετικά με τη διαμόρφωση ενός ΥΗΣ καθώς αυτή εξαρτάται έντονα από τον τύπο και το μέγεθος των υδροστροβίλων, των γεννητριών καθώς και από τις συνθήκες και το χώρο στον οποίο αυτός θα κατασκευαστεί.

### 9.5.3 Εκτίμηση ενεργειακών αναγκών

Προϋπόθεση για την αδειοδότηση ενός μΥΗΕ είναι ο Βαθμός Ενεργειακής Αξιοποίησης να είναι μεγαλύτερος του 0.75. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι απαιτείται από το ΥΗΕ να λειτουργεί ως έργο βάσης. Στο πλαίσιο αυτό προκύπτει (δίχως να είναι ο μοναδικός λόγος) βέλτιστη η χρήση πολλαπλών μικρότερων στροβίλων αντί ενός μεγαλύτερου ώστε να μειώνεται η τιμή της ελάχιστης αξιοποιήσιμης παροχής (αυτή της μέγιστης δεν αλλάζει).

Ως εκ τούτου ένα μΥΗΕ μπορεί να κατασκευαστεί σαν μία πρόσθετη πηγή ενέργειας βάσης αν έχουν αυξηθεί οι ανάγκες της περιοχής ή να ανακουφίσει την περιοχή από τη χρήση καυσίμων για

την παραγωγή ενέργειας. Πάντως δεν είναι συνηθισμένος ο σχεδιασμός ενός μΥΗΕ με ζητούμενο να εξυπηρετήσει πλήρως κάποια απαιτούμενη ζήτηση.

#### 9.5.4 Εκτίμηση γενικών διαστάσεων υδροηλεκτρικής μονάδας

Δεδομένης της παροχής σχεδιασμού του ΥΗΕ (υπολογίστηκε σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στο Κεφάλαιο 2 του παρόντος), του διαθέσιμου ύψους πτώσης καθώς και του μήκους του αγωγού πτώσης (όπως αυτός σχεδιάζεται σε τοπογραφικό χάρτη) μπορούν να διαστασιολογηθούν σε πρώτη φάση όλα τα έργα του μΥΗΕ.

Σύμφωνα με όσα γράφονται στο κεφάλαιο 4 μπορούν να διαστασιολογηθούν όλα τα έργα πολιτικού μηχανικού, δηλαδή κάποιο φράγμα αν έχει προβλεφθεί, η διάταξη της υδροληψίας και της εσχάρωσης, η δεξαμενή εξάμμωσης, η διώρυγα προσαγωγής, και ο αγωγός πτώσης (ή περισσότεροι αν έχει προβλεφθεί η χρήση πολλών στρόβιλων και είναι επιθυμητή η χρήση πολλαπλών αγωγών). Εκτός από τη διαστασιολόγηση των έργων αυτών, αποτέλεσμα των υπολογισμών είναι και το ωφέλιμο ύψος πτώσης για το στρόβιλο.

Με βάση το ωφέλιμο ύψος πτώσης, την παροχή σχεδιασμού και σύμφωνα με όσα αναφέρονται στα Κεφάλαια 5 και 6 επιλέγεται ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός με τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, ώστε να σχεδιαστεί κατόπιν ο ΥΗΣ.

#### 9.5.5 Τελικά παραγόμενη ισχύς και ενέργεια υδροηλεκτρικής μονάδας

Η τελικά παραγόμενη ενέργεια (και η αντίστοιχη αξιοποιούμενη ισχύς) της εγκατάστασης είναι συνάρτηση της ροής του υδατορέματος σε συνδυασμό με το διαθέσιμο εύρος αξιοποίησης της παροχής από το στρόβιλο. Για παροχές μικρότερες από την ελάχιστη παροχή λειτουργίας του στρόβιλου, ο στρόβιλος δεν τίθεται καν σε λειτουργία. Για παροχές μεγαλύτερες από τη μέγιστη παροχή λειτουργίας ο στρόβιλος διαχειρίζεται τη μέγιστη παροχή λειτουργίας, ενώ η υπόλοιπη υπερχειλίζει ανεκμετάλλευτη.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

# 10 Προσομοίωση Τεχνικοοικονομικής Επιλογής Υδροηλεκτρικής Μονάδας Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Περιβάλλον MatLab

## 10.1 Ανάπτυξη Προγράμματος

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής αναπτύχθηκε κώδικας ο οποίος πραγματοποιεί τη διαδικασία της μελέτης σκοπιμότητας για την αξιολόγηση της επένδυσης σε ένα υδροηλεκτρικό έργο. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν 5 διακριτά υποπρογράμματα (scripts).

### 10.1.1 hydrology.m

Το υποπρόγραμμα *hydrology.m* υπολογίζει την παροχή σχεδιασμού της εγκατάστασης σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2 του παρόντος. Πιο συγκεκριμένα με δεδομένη τη χρονοσειρά των καταγεγραμμένων εισροών κοντά στην εξεταζόμενη θέση του έργου, αφού υπολογίζει σύμφωνα με τον κανονισμό την οικολογική παροχή, επιλέγει την παροχή σχεδιασμού.

```
%% Constants
rho=999.7; % density of water in [kg/m^3]
g=9.81; % gravity acceleration [m/s^2]
kv=10^-6; % kinematic viscosity in [m^2/s]
%% Field Discharge Values [m^3/s]
% Discharge values should be in in a matrix 12xY double where Y is the
% number of years with measurements
% Row 1 of the matrix should have October values, row 2 November ones and
% so on
FDV=xlsread('tables.xlsx','input discharge'); % Total efficiency factor of
generation
numY=size(FDV,2); % Number of years of field measurements
FDVts=FDV(:); % Discharge values in form of time series
mon=1:1:numY*12;
%% Statistical Analysis
QmeanMonthly=zeros(12,2);
QmeanMonthly(:,2)=[31 28.25 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31]; % Number of days
of every month.
% It's usual in Hydrology to use 28.5 days for February as the sum of days
% of 4 years of Februaries is equal to the real one.
for c=1:1:12
    QmeanMonthly(c,1)=mean(FDV(c,:));
end
%% Ecological Discharge
% Qeco equals to a 0.3 fraction of the weighted average of summer discharge
values
Qeco1=0.3*(dot(QmeanMonthly(9:11,1),QmeanMonthly(9:11,2))/sum(QmeanMonthly(9
:11,2)));
% Qeco equals to a 0.5 fraction of the average September Discharge values
Qeco2=0.5*QmeanMonthly(12,1);
% Qeco equals to 30[Lts/s]=0.03[m^3/s]
Qeco3=0.03;
Qecos=[Qeco1 Qeco2 Qeco3]';
Qeco=max(Qecos);
%% Usable Discharge (Net Discharge)
FDVnet=max(0,FDV-Qeco);
FDVnetts=FDVnet(:); % Discharge values in form of time series
```



```

%% Flow Duration Curve (FDC) & Design Discharge QN
FDC=zeros(numY*12,2);
FDC(:,1)=sort(FDVnetts,'descend');
for c=1:1:12*numY
    FDC(c,2)=c/(12*numY);
end
QNperc=0.4; % Qd is equal to the value that 40% of the year discharge will
be greater than.
QN=interp1(FDC(:,2),FDC(:,1),QNperc);
%% Figures
figure(1);
plot(mon,FDVts);
title('Measured Discharge Values');
xlabel('Months');
ylabel('Discharge [m^3/s]');

figure(2);
plot(mon,FDVnetts,mon,FDVts);
title('Discharge Values');
xlabel('Months');
ylabel('Discharge [m^3/s]');
legend('Net Discharge','Measured Discharge');

figure(3);
plot(100*FDC(:,2),FDC(:,1));
title('Flow Duration Curve');
xlabel('Time %');
ylabel('Discharge [m^3/s]');
hold on;
plot([100*QNperc 100*QNperc 0],[0 QN QN]);
hold off;

```

### 10.1.2 single\_penstock.m

Το υποπρόγραμμα *single\_penstock.m* διαστασιολογεί τον αγωγό πτώσης σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 του παρόντος.



```

%% Geometry
Hnet = 124.8; %input('Select clear head in [m]:');
L = 1540; %input('Select total length of penstock in [m]:');
%QN can be equal to Q40 which is the 40th percentile of the annual river
discharge value.
v0=4; %Initial velocity in [m/s] at normal function point QN
D0=1000*sqrt(4*QN/(v0*pi));%Initial estimate of the diameter in [mm].
% We have to choose a proper diameter!!!
DNsteel=xlsread('tables.xlsx','4.6','A1:C34');
D_pen=0;
i=1;
while D0>D_pen
    D_pen=DNsteel(i,1);
    i=i+1;
end
t_pen=DNsteel(i-1,3); %Thickness of the penstock walls in [mm].
A_pen=pi*(D_pen/1000)^2/4; %Internal Section Area of the chosen diameter in
[m^2].
v_pen=QN/A_pen;
%% Colebrook - White
ks=0.0001;%[m]

```

```

Re=v_pen*(D_pen/1000)/kv;
Er=10.^-4;
f0=0.02;
E=10.^-1; %initialize any value greater than Er
while E>Er
    f=(-2.*log10(ks./(3.71.*(D_pen/1000))+2.51./(Re.*sqrt(f0))))).^-2;
    E=abs(f-f0);
    f0=f;
end
%% Darcy - Weisbach - Linear Losses?
hf=f*L/(D_pen/1000)*v_pen^2/(2*g);
%% Local Losses - Approach 1
Kloctotal=6; % Total local losses factor
hm=Kloctotal*v_pen^2/(2*g);
%% Local Losses - Approach 2
Klocinlet=0.5;
%% Total Losses
ht=hf+hm;
%% Usable height
Hus=Hnet-ht;
%%
% Empirical Criterion for the acceptability of losses.
emp_check=ht/Hnet;
idx=find(DNsteel(:,1)>=D0,1,'first');

```

Πιο συγκεκριμένα για την παροχή σχεδιασμού  $Q_N$  επιλέγεται μια επιθυμητή ταχύτητα στον αγωγό ίση με  $v_0 = 4 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

Για την ταχύτητα αυτή επιλέγεται η αντίστοιχη θεωρητική διάμετρος που αναλογεί από τη σχέση:

$$D_0[mm] = 1000 \sqrt{\frac{4 Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{v_0 \left[ \frac{m}{s} \right] \pi}} \quad (10.1)$$

Ανάλογα με το ύψος διαθέσιμο ύψος πτώσης της εγκατάστασης και την τιμή της διαμέτρου που υπολογίστηκε παραπάνω, επιλέγεται ο τύπος της σωλήνωσης που θα χρησιμοποιηθεί (υλικό και πίεση σχεδιασμού) και από τον τύπο αυτό επιλέγεται η πρώτη διαθέσιμη τυποποιημένη εσωτερική διάμετρος  $D$  που είναι μεγαλύτερη από τη  $D_0$ .

Για τη διάμετρο αυτή  $D$  υπολογίζεται η ταχύτητα που αντιστοιχεί από τη σχέση  $v_0 = \frac{4Q_N}{\pi D^2}$ .

Κατόπιν πρέπει να υπολογιστούν οι γραμμικές  $\Delta h_f$  και οι τοπικές  $\Delta h_i$  απώλειες στον αγωγό. Οι γραμμικές απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση 4.51 του παρόντος. Ο συντελεστής γραμμικών απωλειών  $f$  υπολογίζεται από τη σχέση 4.54 αφού πρώτα υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds από τη σχέση 4.52 του παρόντος. Οι τοπικές απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση 4.56 όπου θεωρείται ένας συνολικός συντελεστής τοπικών απωλειών  $k_{tot}=6$  για την αναγνωριστική μελέτη. Επομένως οι συνολικές απώλειες προκύπτουν  $\Delta h_{tot}=\Delta h_f+\Delta h_i$ .

Για να προσδιοριστεί αν η διάμετρος που επιλέχθηκε είναι κατάλληλη εφαρμόζεται το εμπειρικό κριτήριο που περιγράφεται στην παράγραφο 4.8.2 με τιμή αναφοράς 10%. Αν το κριτήριο ικανοποιείται, διατηρείται η διάμετρος του αγωγού που επιλέχθηκε, εναλλακτικά επιλέγεται η

αμέσως μεγαλύτερη διαθέσιμη διάμετρος και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να βρεθεί η κατάλληλη.

### 10.1.3 mechel\_equipment.m

Το υποπρόγραμμα *mechel\_equipment.m* διαστασιολογεί τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Πιο συγκεκριμένα επιλέγει από διαθέσιμους στροβίλους αυτόν που το σημείο λειτουργίας που έχει υπολογιστεί ( $Q_N, h_{\omega\phi}$ ) είναι στο εύρος λειτουργίας τους και ως προς τα δύο χαρακτηριστικά.

```


%% Toshiba horizontal axis Francis Turbine selection
ztur=2; % Number of Turbines used
QNpt=QN/ztur; % Discharge passing through each turbine
[numFr, txtFr, rawFr]=xlsread('tables.xlsx','fig 5.33','A1:H181');
s_T_F=zeros(size(numFr,1),1); % suitable_Toshiba_Francis
for i=1:size(s_T_F,1);
    if numFr(i,2)<=QNpt & QNpt<=numFr(i,3) & numFr(i,4)<=Hus &
Hus<=numFr(i,5)
        s_T_F(i,1)=1;
    end
    i=i+1;
end
suit_T_F=find(s_T_F);
s_T_F_Model=txtFr(suit_T_F+1,1);
s_T_F_Series=txtFr(suit_T_F+1,2);
s_T_F_Diameter=numFr(suit_T_F,1);
s_T_F_RevC=numFr(suit_T_F,6);
[numns, txtns, rawns]=xlsread('tables.xlsx','5.3','A1:L11');
serln=find(not(cellfun('isempty',strfind(rawns(:,1),char(s_T_F_Series))))));
ns=numns(serln-1,1); % in [RPM]
T_c_f=numns(serln-1,11); % Turbine cavitation factor
Qturmin=0.5*QNpt; % min discharge value for operation
Qturmax=1.15*QN; % max discharge value for production
%% Efficiency factor
Ntheoreticalpt=rho*g*QNpt*Hus/10^6; % Power per turbine in [MW]
ef_factor_Francis=xlsread('tables.xlsx','5.4','A1:F5');
[Nd_francis,ns_francis]=meshgrid(ef_factor_Francis(1,2:6),ef_factor_Francis(2:5,1));
heta_francis=ef_factor_Francis(2:5,2:6);
Er=10.^-5;
ntot0=1;
Nd0=ntot0*Ntheoreticalpt;
E=10.^-1; %initialize any value greater than Er
while E>Er
    ntot=interp2(Nd_francis,ns_francis,heta_francis,Nd0,ns);
    Nd=ntot*Ntheoreticalpt;
    E=abs(ntot-ntot0);
    ntot0=ntot;
    Nd0=Nd;
end
%% Generator Selection
Freq=50; % Electricity frequency in Europe
cosphi=0.9; % Power factor inductive
SthG=Nd*1000/cosphi; % Theoretical Nominal Power in [kVA]
coup=2;
pe=coup*floor(120*Freq/s_T_F_RevC/coup); % # of poles of generator grater
integer multiple of 2
GMef=xlsread('tables.xlsx','6.1','A1:I2'); % Total efficiency factor of
generation
hetaGM0=0.9;
Sth0=hetaGM0*SthG;

```

```

Er=10.^-5;
E=10.^-1; %initialize any value greater than Er
while E>Er
    hetaGMtot=interp1(GMef(1,:),GMef(2,:),Sth0);
    Sth=hetaGMtot*SthG;
    E=abs(hetaGMtot-hetaGM0);
    hetaGM0=hetaGMtot;
    Sth0=Sth;
end
SG=Sth;
PG=SG*cosphi; % in [kW]
hetaGM=hetaGMtot;
GMav=xlsread('tables.xlsx','6.9','A2:D68'); % Available generators
SGnom=GMav(find(and(GMav(:,1)>SG,GMav(:,2)==s_T_F_RevC),1)); % in [kVA]
lo_fa=SG/SGnom; % Load factor
%% Voltage transformer
% An oil based transformer will be used
STrnom=SGnom; % Transformer power is equal to the generator's
Tref=xlsread('tables.xlsx','6.10','A1:G17'); % Total efficiency factor of
transformer
hetaTrSTrnom=find(Tref(2:end,1)>=STrnom,1,'first');
hetaTrtot=interp1(Tref(1,2:4),Tref(hetaTrSTrnom+1,2:4),lo_fa);
STr=round(hetaTrtot*STrnom,2);
%% Total efficiency factor & Power
hetatot=hetaTrtot*hetaGM*ntot;
SHPP=hetatot*ztur*Ntheoreticalpt; % Power of Hydrostation in [MW]


```

Υπολογίζεται η θεωρητική ισχύς του στροβίλου από τη σχέση  $N_{th,tur}[MW] = \frac{\rho \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] g \left[ \frac{m}{s^2} \right] Q_N \left[ \frac{m^3}{s} \right] h_{\omega\phi} [m]}{10^6}$  και μετά από επαναληπτική διαδικασία υπολογίζεται ο ολικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου σύμφωνα με το πίνακα 10.5 και η πραγματική ισχύς του,  $N_{tur}$ , με βάση τη σχέση 5.5 (κεφάλαιο 5).

Με όμοιο τρόπο επιλέγονται η κατάλληλη διαθέσιμη τυποποιημένη γεννήτρια και ο κατάλληλος τυποποιημένος μετασχηματιστής τάσης. Η θεωρητική ισχύς της γεννήτριας προκύπτει ως  $N_{th,G}[MW] = \frac{N_{tur}}{\cos\phi}$  και ο βαθμός απόδοσης της προκύπτει με βάση τον πίνακα 10.6. Αντίστοιχα, ο μετασχηματιστής επιλέγεται ώστε να έχει ίδια ονομαστική φαινόμενη ισχύ με τη γεννήτρια και ο βαθμός απόδοσης του προκύπτει με γραμμική παρεμβολή σύμφωνα με τον πίνακα 10.8. Το γινόμενο των τριών βαθμών απόδοσης (του στροβίλου, της γεννήτριας και του μετασχηματιστή) δίνει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος,  $\eta_{tot}$ . Η συνολική πραγματική ισχύς της μονάδας προκύπτει ως  $N_{SHPP}[MW] = N_{th,tur} \cdot \eta_{tot}$ .

#### 10.1.4 sHPP\_function.m

Το υποπρόγραμμα *sHPP\_function.m* υπολογίζει την καμπύλη διάρκειας ισχύος και την ετήσια παραγωγή ενέργειας από το μΥΗΕ.

	
<pre> %% Annual Energy Production DuT=zeros(12*numY,1); for c=1:1:12*numY </pre>	

```

    if FDC(c,1)>Qturmax;
        DuT(c,1)=Qturmax;
    elseif FDC(c,1)<Qturmin;
        DuT(c,1)=0;
    else
        DuT(c,1)=max(FDC(c,1),Qturmin);
    end
end
chl=zeros(12*numY,1); % corresponding hydraulic losses in [m]
cHn=zeros(12*numY,1); % corresponding net Head in [m]
Pus=zeros(12*numY,1); % Used Turbine Power in [kW]
for c=1:1:12*numY
    chl(c,1)=DuT(c,1)^2*ht/(QN^2);
    cHn(c,1)=Hnet-chl(c,1);
    Pus(c,1)=rho*g*hetatot*DuT(c,1)*cHn(c,1)/1000;
end
Epr=zeros(12*numY-1,1); % Energy production in [MWh]
Vus=zeros(12*numY-1,1); % Water used for Energy production in [hm^3]
Vav=zeros(12*numY-1,1); % Available water for Energy production in [hm^3]
for c=1:1:12*numY-1
    Epr(c,1)=8760*((Pus(c,1)+Pus(c+1,1))/2)*(FDC(c+1,2)-FDC(c,2))/1000;
    Vus(c,1)=8760*((DuT(c,1)+DuT(c+1,1))/2)*(FDC(c+1,2)-FDC(c,2))*3600/10^6;
    Vav(c,1)=8760*((FDC(c,1)+FDC(c+1,1))/2)*(FDC(c+1,2)-FDC(c,2))*3600/10^6;
end
TEpr=sum(Epr(:,1)); % Total Energy production in [MWh]
TVus=sum(Vus(:,1)); % Total water used in [hm^3]
TVav=sum(Vav(:,1)); % Total Available water in [hm^3]
An_LO_FA=TEpr/(8760*SHPP); % Annual Load Factor. In small HPPs should be
close to 1.
EUr=TVus/TVav; % Vathmos Energeiakis Axiopoiisis. In small HPPs must be
>0.75
if EUr<0.75;
    disp('Another turbine combination should be chosen. Take in mind that
you could use 2 smaller ones to use more of the discharge.');
```

end

%% Figures

```

figure(4);
plot(100*FDC(:,2),FDC(:,1));
title('Flow Duration Curve');
xlabel('Time %');
ylabel('Used Discharge [m^3/s]');
hold on;
plot(100*FDC(:,2),DuT(:,1));
hold off;
legend('Net Discharge','Used Discharged');
```

```

figure(5);
plot(100*FDC(:,2),Pus(:,1));
title('Used Power Duration Curve');
xlabel('Time %');
ylabel('Used Power [kW]');
```

```

figure(6);
plot(100*FDC(1:12*numY-1,2),Epr(:,1));
title('Energy production Duration Curve');
xlabel('Time %');
ylabel('Energy Production [MWh]');
```

### 10.1.5 economics.m

Το υποπρόγραμμα *economics.m* υπολογίζει τον χρόνο απόσβεσης με βάση την καθαρή παρούσα αξία, τα εκτιμώμενα έσοδα από τη λειτουργία του ΥΗΣ στη διάρκεια ζωής του έργου καθώς επίσης και τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης με σκοπό την αξιολόγηση της καταλληλότητας της επένδυσης, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 8 του παρόντος.

```

%% Costs
Cem=20.57*(1000*SHPP)^0.7/Hus^0.35; % Cost of E/M equipment in [k€]
S=3.5; % Coefficient that takes into consideration the place and
construction difficulties
Ctot=S*Cem; % Total Cost of sHPP in [k€]
%% Income
PrEn=0.075; % Selling Price of energy in [k€/MWh]
AnInc=PrEn*TEpr; % Annual income in [k€]
AnExp=0.14*AnInc; % Annual expences in [k€]
AnIncnet=AnInc-AnExp; % Annual net income in [k€]
%% Ateles kritirio
Pbd1=Ctot/AnIncnet; % Investment payback duration in [yrs] after after
function / Method 1
%% Net Present Value (NPV)
yrsfun=25; % Years of function
constrtime=2; % Construction time in [yrs]
discrate=0.07; % Discount rate
years=[1:1:yrsfun]';
investment=zeros(yrsfun,1);
for c=1:constrtime;
    investment(c,1)=Ctot/constrtime;
end
annetinc=zeros(yrsfun,1);
for c=constrtime+1:yrsfun;
    annetinc(c,1)=AnIncnet;
end
PVF=zeros(yrsfun,1); % Present Value Factor
for c=1:yrsfun;
    PVF(c,1)=(1+discrate)^years(c,1);
end
NPV=(annetinc-investment)./PVF; % Net Present Value
NPVcum=zeros(yrsfun,1);
for c=1:yrsfun;
    NPVcum(c,1)=sum(NPV(1:c,1));
end
PbdNPV=interp1(NPVcum(:,1),years(:,1),0)-constrtime; % Investment payback
duration in [yrs] after function
%% Internal Rate of Return (IRR)
PbdNPVdem=5;% Demanded investment payback duration in [yrs] after function
IRRdiscrate0=0.01;
PbdNPVirr0=1;
while PbdNPVdem>PbdNPVirr0;
    IRRdiscrate=IRRdiscrate0;
    PVFirr=zeros(yrsfun,1);
    for c=1:yrsfun;
        PVFirr(c,1)=(1+IRRdiscrate)^years(c,1);
    end
    NPVirr=(annetinc-investment)./PVFirr;
    NPVirrsum=zeros(yrsfun,1);
    for c=1:yrsfun;
        NPVirrsum(c,1)=sum(NPVirr(1:c,1));
    end
end

```

```

PbDNPVirr=interp1(NPVirrcum(:,1),years(:,1),0)-consttime;
PbDNPVirr0=PbDNPVirr;
IRRdiscrate0=IRRdiscrate+0.0001;
end
IRR=IRRdiscrate;
%% Figures
figure(7);
plot(years(:,1),NPVcum(:,1));
title('Cumulative Net Present Value');
xlabel('Years');
ylabel('k€');

```

## 10.2 Δεδομένα βασικής εκτέλεσης προγράμματος

Τα δεδομένα εισόδου για την εκτέλεση του υποπρογράμματος *hydrology.m* είναι οι μετρημένες μέσες μηνιαίες παροχές του υδατορέματος σε  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ . Αυτές εισάγονται σε πίνακα 12xY όπου Y είναι ο αριθμός των ετών για τα οποία έχουμε τιμές για τη μέση μηνιαία απορροή. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μέσες μηνιαίες απορροές 10 ετών με τις οποίες έγινε η εκτέλεση του προγράμματος.

Πίνακας 10.1: Μέσες μηνιαίες παροχές 10 ετών στη πιθανή θέση του έργου  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

		Έτη									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Μήνες	Oct	1.365	2.964	5.863	3.757	3.185	3.185	2.535	1.885	1.261	3.315
	Nov	4.875	4.524	5.655	3.705	5.018	4.485	4.654	4.095	4.758	5.499
	Dec	2.782	11.375	14.04	11.245	9.074	7.098	5.928	4.914	10.14	15.041
	Jan	4.485	5.135	5.044	9.516	9.685	5.915	6.695	5.174	5.135	9.373
	Feb	9.425	7.605	6.136	7.072	7.345	7.072	10.257	10.985	10.517	10.283
	Mar	5.395	6.175	5.135	6.799	5.239	6.201	5.941	7.293	9.724	9.516
	Apr	5.564	5.174	4.225	5.928	4.225	4.602	7.631	6.565	6.63	6.968
	May	5.096	5.044	5.265	4.654	4.316	4.251	5.057	5.525	6.084	6.058
	Jun	3.731	3.445	3.354	4.576	3.289	3.146	4.082	3.965	5.226	4.212
	Jul	3.835	3.575	6.253	4.745	3.328	3.406	3.445	4.225	3.757	4.914
	Aug	3.627	3.705	3.874	4.212	3.614	3.588	4.745	3.055	3.497	3.055
	Sep	3.523	4.095	4.875	3.497	3.302	3.965	4.095	2.665	3.575	2.886

Τα πρόσθετα δεδομένα εισόδου που χρειάζεται το υποπρόγραμμα *single\_penstock.m* για να λειτουργήσει (δηλαδή δεδομένα που δεν έχει πάρει από τους υπολογισμούς του *hydrology.m*) είναι το μήκος του αγωγού και το ύψος πτώσης (τα οποία μπορεί να ληφθεί κάνοντας μια σύντομη όδευση σε ένα τοπογραφικό διάγραμμα από κάποιο GIS υπόβαθρο), καθώς επίσης και κατάλογοι διαθέσιμων τυποποιημένων αγωγών. Στο παρόν η διαστασιολόγηση γίνεται με τυποποιημένους χαλύβδινους αγωγούς με διαμέτρους όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 10.2: Τυποποιημένες διάμετροι χαλύβδινων σωλήνων και εξαρτημάτων (Παπαντώνης, 2008).

D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]	D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]	D <sub>N</sub> [mm]	D <sub>ext</sub> [mm]	t [mm]
8	13.5	2.75	125	139.7	7.35	1000	1016	8
10	17.2	3.6	150	168.3	9.15	1200	1220	10
15	21.3	3.15	200	219.1	9.55	1400	1420	10
20	26.9	3.45	250	273	11.5	1600	1620	10
25	33.7	4.35	300	323.9	11.95	1800	1820	10
32	42.4	5.2	350	355.6	2.8	2000	2020	10
40	48.3	4.15	400	406.4	3.2	2200	2220	10
50	60.3	5.15	500	508	4	2400	2420	10
65	76.1	5.55	600	609.6	4.8	2600	2620	10
80	88.9	4.45	700	711.2	5.6	2800	2820	10
100	114.3	7.15	800	812.8	6.4	3000	3020	10

Τα πρόσθετα δεδομένα εισόδου του υποπρογράμματος *mechel\_equipment.m* είναι ο αριθμός των στροβίλων που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε, ένας πίνακας με διαθέσιμους τυποποιημένους υδροστροβίλους για τους οποίους έχουμε το εύρος λειτουργίας ως προς την παροχή και το ύψος πτώσης, καθώς επίσης και τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής τους, τον ειδικό αριθμό στροφών τους, η συχνότητα του δικτύου με το οποίο θα συνδεθεί ο ΥΗΣ, ο επαγωγικός συντελεστής  $\cos\phi$ , κάποια συσχέτιση μεταξύ του βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας και της φαινόμενης ισχύος της, κάποιες τυποποιημένες σύγχρονες γεννήτριες, τυποποιημένους μετασχηματιστές τάσης με τους συντελεστές ισχύος τους.

Πιο συγκεκριμένα, έχει μετατραπεί το Σχήμα 5.33 του συγγράμματος «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα» (Παπαντώνης, 2008) σε μορφή πίνακα όπου για κάθε υδροστρόβιλο Francis οριζοντίου άξονα με σπυροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba έχει εκτιμηθεί και καταγραφεί το εύρος λειτουργίας του. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία αυτή για τη σειρά Β των στροβίλων.

Πίνακας 10.3: Υδροστρόβιλοι οριζοντίου άξονα σειράς Β της εταιρείας Toshiba (μετατροπή από διάγραμμα) (Παπαντώνης, 2008).

Name	Series	D <sub>1</sub> [mm]	Q <sub>N,min</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>N,max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	H <sub>us,min</sub> [m]	H <sub>us,max</sub> [m]	Σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής [rpm]
B-550	B	550	3.2	3.9	33	40.5	750
B-610	B	610	3.9	4.3	27	32	600
B-630	B	630	4.3	4.9	29	34	600
B-650	B	650	4.9	5.4	30	36	600
B-740	B	740	5.4	6.1	27	32.5	500
B-770	B	770	6.1	7	29	34	500
B-800	B	800	7	7.8	30.7	38	500
B-860	B	860	7.8	8.3	28	33	429
B-890	B	890	8.3	8.95	29	36	429
B-930	B	930	8.95	9.3	32	40.5	429
B-1040	B	1040	9.3	9.5	30	35	375
B-1080	B	1080	9.5	9.95	31	38	375
B-1160	B	1160	9.95	10.4	30	36	333

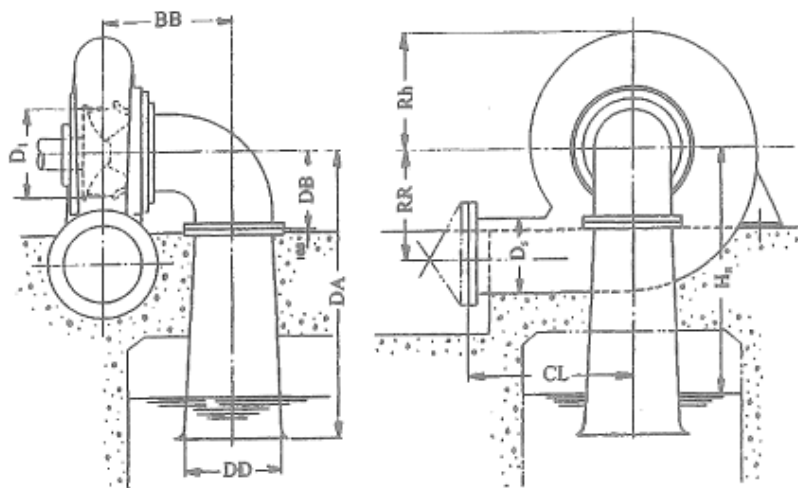


B-1260	B	1260	10.4	10.85	28	33.3	300
B-1310	B	1310	10.85	11.5	30	36.5	300
B-1470	B	1470	11.5	12	25	32	250
B-1530	B	1530	12	12.7	28.5	33.8	250

Οι γενικές διαστάσεις, ο ειδικός αριθμός στροφών και η παράμετρος σπηλαίωσης μερικών από τους στροβίλους Francis οριζοντίου άξονα της εταιρείας Toshiba φαίνονται στον πίνακα και το σχήμα που ακολουθούν:

*Πίνακας 10.4: Χαρακτηριστικά στροβίλων οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba (Παπαντώνης, 2008).*

Series	ns	D1 [mm]	RR [mm]	DS [mm]	Rh [mm]	BB [mm]	DA [mm]	DB [mm]	CL [mm]	DD [mm]	$\sigma_{kr}$
B	275	1000	1730	1540	2050	2710	7130	1390	3630	2730	0.2
C	240	1000	1610	1400	1910	2480	6520	1310	3530	2530	0.17
D	208	1000	1510	1280	1780	2260	5980	1250	3450	2340	0.14
E	181	1000	1420	1160	1670	2070	5520	1190	3380	2040	0.12
F	157	1000	1350	1060	1570	1910	5100	1160	3320	2000	0.1
G	137	1000	1280	880	1460	1770	4750	1090	3260	1780	0.08
H	119	1000	1215	850	1390	1630	4440	1050	3210	1650	0.07
I	104	1000	1185	770	1340	1530	4180	1050	3180	1520	0.06
J	90	1000	1155	690	1310	1420	3950	1050	3160	1420	0.05
K	78	1000	1155	670	1300	1330	3730	1050	3160	1300	0.04



*Σχήμα 10.1: Χαρακτηριστικές διαστάσεις στροβίλου οριζοντίου άξονα με σπειροειδές κέλυφος της εταιρείας Toshiba (Παπαντώνης, 2008).*

Ο προσδιορισμός του ολικού συντελεστή απόδοσης του στροβίλου γίνεται με επαναλαμβανόμενη διπλή γραμμική παρεμβολή με δεδομένο τον ειδικό αριθμό στροφών  $n_s$  και τη ισχύ του στροβίλου με τις τιμές του πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 10.5: Ολικός βαθμός απόδοσης στροβίλου συναρτήσει της ισχύος του και του ειδικού αριθμού στροφών (Παπαντώνης, 2008).

		N [MW]				
		1	3	5	7	10
$n_s$	78	0.861	0.875	0.885	0.895	0.895
	137	0.876	0.891	0.901	0.908	0.911
	208	0.879	0.893	0.902	0.909	0.912
	275	0.862	0.876	0.885	0.892	0.895

Η συχνότητα του δικτύου για την Ευρώπη είναι  $f=50$ [Hz], ενώ θεωρείται  $\cos\varphi=0.9$  επαγωγικός.

Η συσχέτιση μεταξύ της φαινόμενης ισχύος και του συντελεστή απόδοσης της σύγχρονης γεννήτριας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του πίνακα που ακολουθεί

Πίνακας 10.6: Μέγιστη τιμή ολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της φαινόμενης ισχύος της (Παπαντώνης, 2008).

$N_G$ [kVA]	500	1000	2000	3000	4000	5000	8000	10000
$\eta_G$	0.965	0.9664	0.9702	0.9724	0.974	0.975	0.9775	0.9786

Ως τυποποιημένες σύγχρονες γεννήτριες (οριζοντίου άξονα αφού χρησιμοποιούνται αντίστοιχοι στροβίλοι) χρησιμοποιούνται αυτές του πίνακα που ακολουθεί, με γραμμική παρεμβολή της ισχύος της γεννήτριας.

Πίνακας 10.7: Ενδεικτικές διαστάσεις σύγχρονων γεννητριών οριζοντίου άξονα (Παπαντώνης, 2008).

[kVA]	$n_s$ [RPM]	L [mm]	H [mm]	[KVA]	$n_s$ [RPM]	L [mm]	H [mm]
1000	1000	3570	1180	6000	429	5800	2430
1000	750	3840	1180	6000	375	6050	2430
1000	600	3840	1180	6000	333	6050	2430
1500	1000	3840	1180	6000	300	6320	2430
1500	750	3900	1320	6000	250	6250	2720
1500	600	3960	1320	7000	750	7000	2060
1500	500	4140	1320	7000	600	7400	2240
2000	1000	3840	1320	7000	500	6150	2240
2000	750	4080	1320	7000	429	6050	2430
2000	600	4270	1600	7000	375	6050	2430
2000	500	4270	1600	7000	333	6320	2430
2000	429	4610	1600	7000	300	6320	2720

3000	1000	4210	1600	7000	250	6500	2720
3000	750	4330	1600	8000	600	7400	2240
3000	600	4610	1600	8000	500	7400	2430
3000	500	4610	1750	8000	429	6050	2430
3000	429	5380	2060	8000	375	6320	2430
3000	375	5380	2060	8000	333	6250	2720
4000	750	4460	1750	8000	300	6320	2720
4000	600	5620	1750	8000	250	6500	2720
4000	500	5450	2960	9000	600	7120	2430
4000	429	5700	2060	9000	500	7400	2430
4000	375	5900	2240	9000	429	6320	2430
4000	333	4770	2240	9000	375	6250	2720
5000	750	6900	1750	9000	333	6320	2720
5000	600	5700	2060	9000	300	6500	2720
5000	500	5700	2060	9000	250	6500	2900
5000	429	5900	2240	10000	500	7400	2430
5000	375	6000	2240	10000	429	6320	2430
5000	333	5700	2430	10000	375	6320	2720
5000	300	5900	2430	10000	333	6500	2720
6000	750	7000	1750	10000	300	6500	2720
6000	600	7000	2060	10000	250	6600	2900
6000	500	6050	2240				

Ως τυποποιημένοι μετασχηματιστές τάσης εξόδου 24[kV] για σύνδεση στο δίκτυο Μ.Τ. (20[kV]) χρησιμοποιούνται οι τιμές του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10.8: Βαθμός απόδοσης και κύριες διαστάσεις μετασχηματιστή λαδιού τάσης εξόδου 24[kV] (Παπαντώνης, 2008).

[kVA]	$\eta_M (\cos\varphi=0.90)$			L [mm]	W [mm]	H [mm]
	1	0.75	0.5			
100	0.9764	0.9792	0.9803	1300	660	1150
200	0.9807	0.9831	0.9841	1470	735	1270
250	0.982	0.9842	0.9852	1480	740	1390
400	0.9843	0.9863	0.9872	1570	880	1600
500	0.9854	0.9872	0.9879	1600	880	1650
630	0.9867	0.9883	0.989	1640	890	1740
800	0.9875	0.989	0.9897	1700	910	1900
1000	0.988	0.9895	0.9901	1750	1020	2050
1250	0.9888	0.9902	0.9908	1820	1040	2150
1600	0.9892	0.9906	0.9913	1900	1050	2420
2000	0.9899	0.9911	0.9914	2050	1270	2500
2500	0.9903	0.9914	0.9917	2200	1270	2600

3150	0.9914	0.9923	0.9924	2350	1300	2650
4000	0.9927	0.9934	0.9935	2600	1350	2700
5000	0.9935	0.9941	0.9941	2800	1400	2750

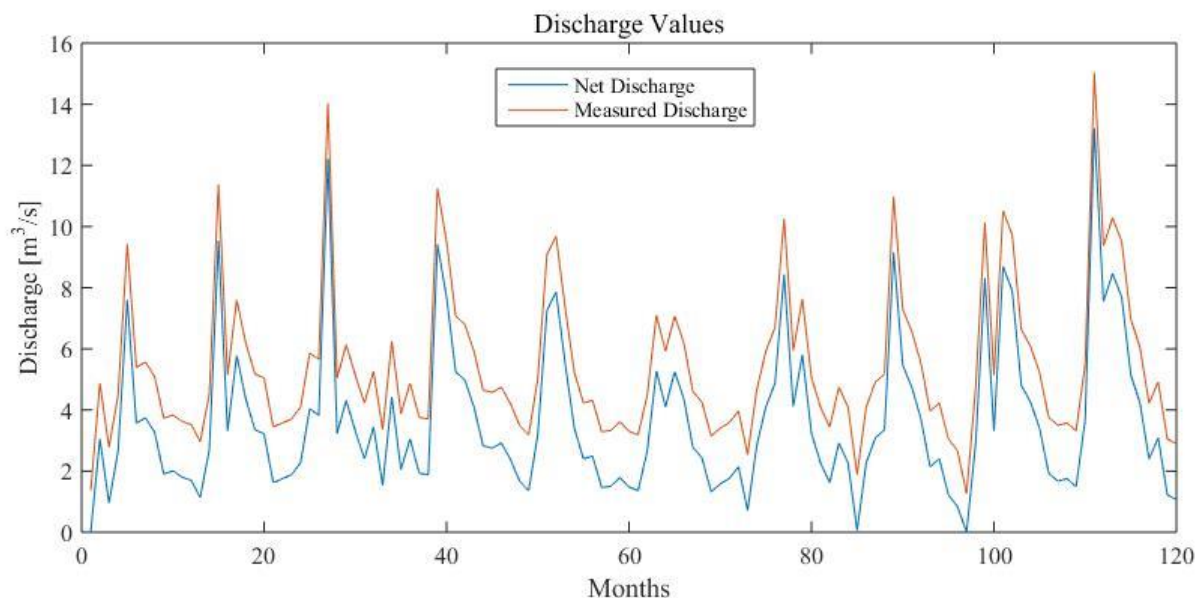
Το υποπρόγραμμα *sHPP\_function.m* δεν απαιτεί κάποια πρόσθετα στοιχεία εισόδου, λαμβάνει από τα προηγούμενα υποπρογράμματα ό,τι στοιχεία χρειάζεται.

Τέλος για το υποπρόγραμμα *economics.m* τα πρόσθετα στοιχεία εισόδου που απαιτούνται είναι η τιμή του συντελεστή θέσης  $S$  που λαμβάνει υπόψιν τις ιδιαιτερότητες και δυσκολίες κατά την κατασκευή του έργου για τον προσδιορισμό του ολικού κόστους ( $S=3.5$ ), την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας  $0.075 \left[ \frac{k\text{€}}{MWh} \right]$ , τα έτη λειτουργίας του έργου ( $=25$ ), τα έτη κατασκευής ( $=2$ ) και το αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής  $k=7\%$ .

Τα υποπρογράμματα αυτά μπορούν να εκτελεστούν όλα από ένα νέο script το οποίο θα τα καλεί με τη σειρά, χωρίς τις καταλήξεις τους (.m).

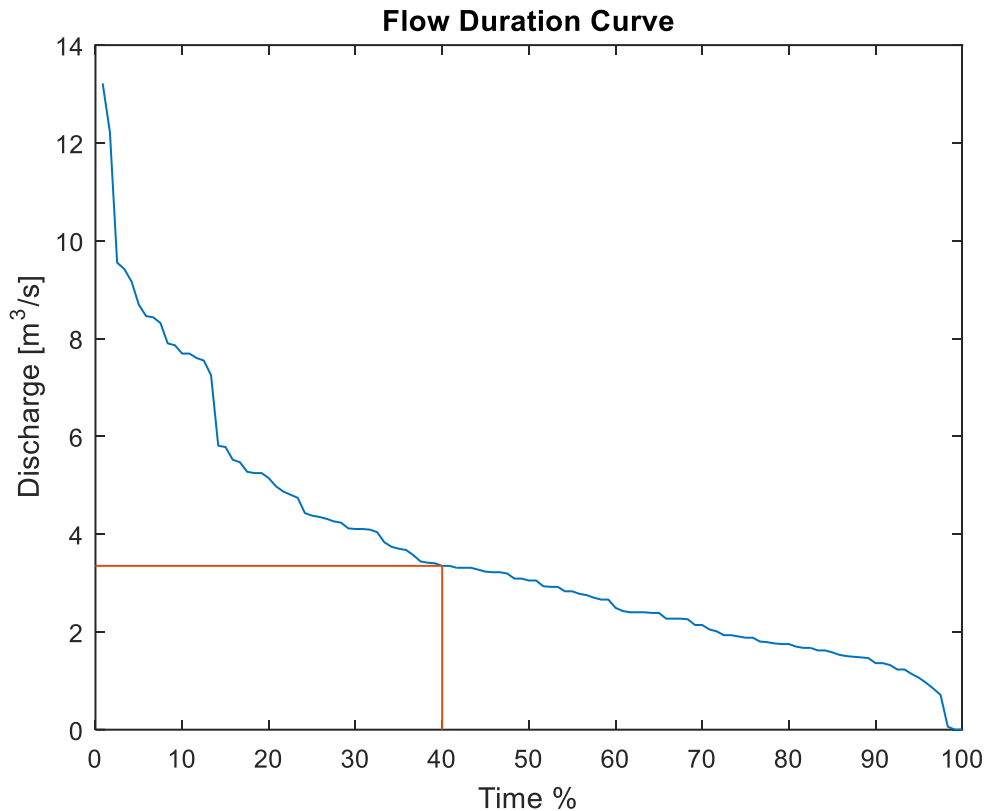
### 10.3 Αποτελέσματα εκτέλεσης προγράμματος

Το υποπρόγραμμα *hydrology.m* έχει ως κύριο δεδομένο εξόδου την παροχή σχεδιασμού του μΥΗΕ  $Q_N$ . Για οπτικούς σκοπούς έχει φτιαχτεί να δείχνει τις παροχές του υδατορέματος καθώς επίσης και τις αξιοποιήσιμες παροχές από το ΥΗΕ, δηλαδή τις παροχές του υδατορέματος μειωμένες κατά την οικολογική παροχή, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 10.2: Χρονοσειρά παροχών υδατορέματος και χρονοσειρά αξιοποιήσιμων παροχών από το μΥΗΕ.

Η παροχή σχεδιασμού προκύπτει από την καμπύλη διάρκειας των μετρημένων παροχών του υδατορέματος, η οποία επίσης χαράσσεται από το υποπρόγραμμα. Συνήθως λαμβάνεται η τιμή  $Q_{40}$ , η οποία αντιστοιχεί στην τιμή όπου η αξιοποιήσιμη παροχή είναι μεγαλύτερη το 40% του χρόνου.

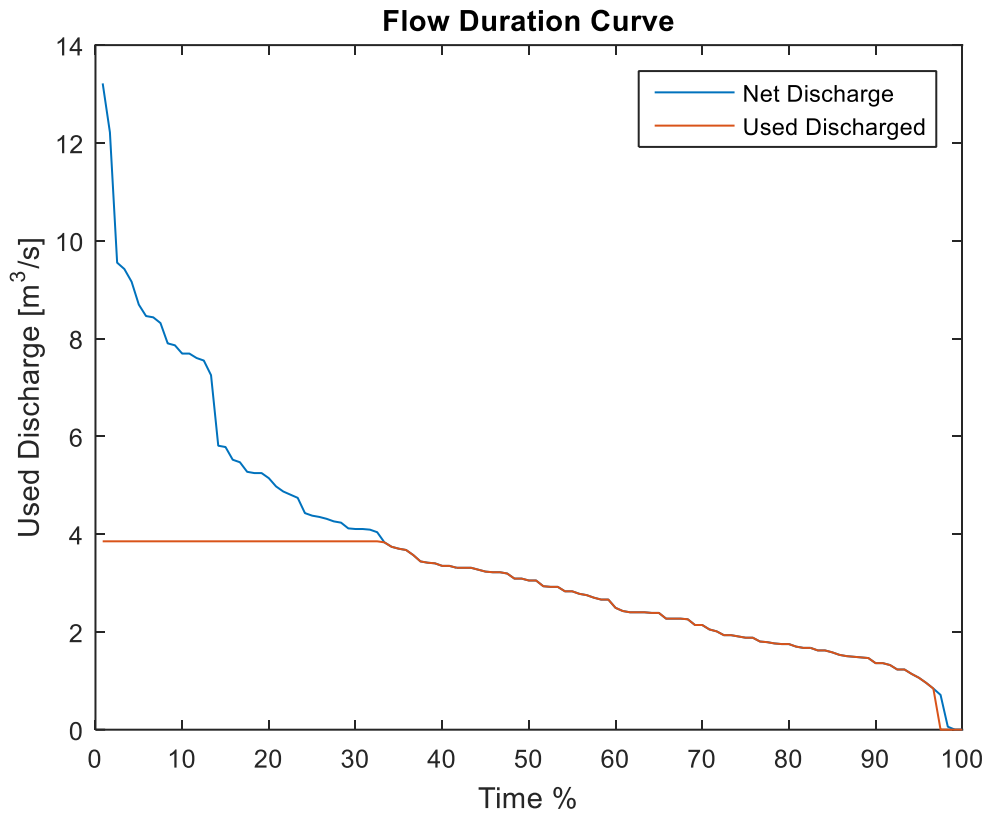


Σχήμα 10.3: Καμπύλη διάρκειας αξιοποιήσιμων παροχών και διαδικασία εύρεσης της παροχής σχεδιασμού  $Q_N=Q_{40}$ .

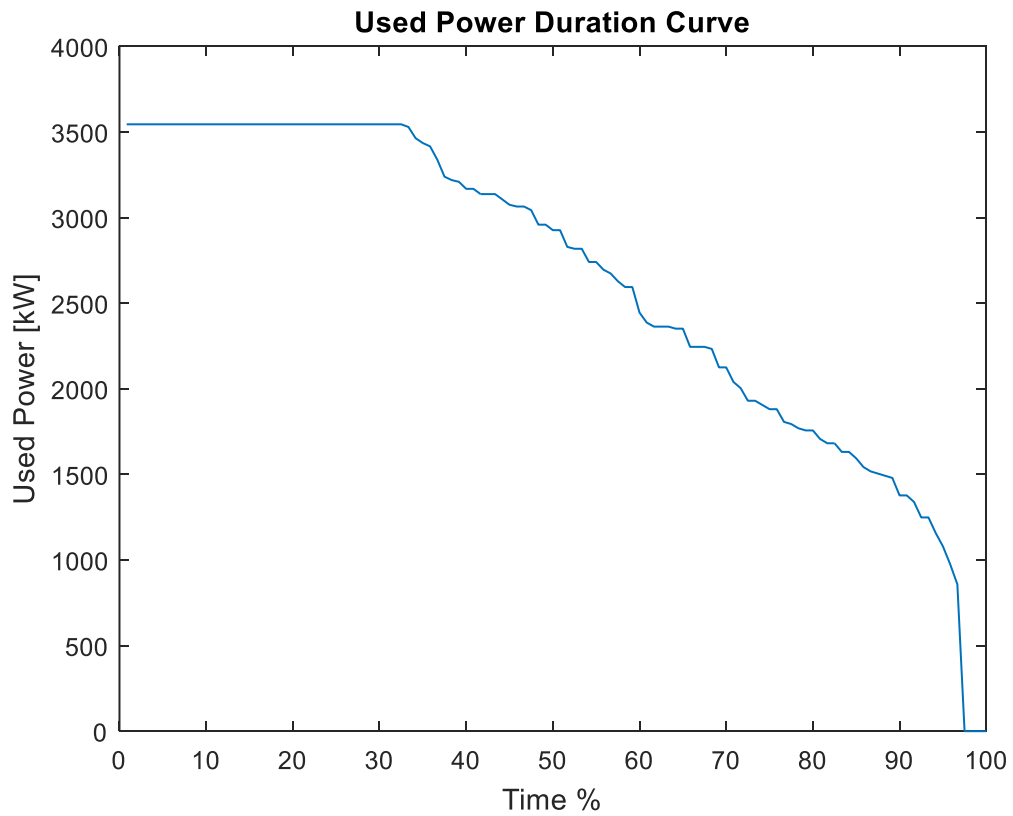
Το υποπρόγραμμα *single\_penstock.m* έχει ως δεδομένα εξόδου την ονομαστική διάμετρο του αγωγού πτώσης  $D_N$  και το ωφέλιμο ύψος πτώσης  $H_{us}$ , δηλαδή το ύψος πτώσης μειωμένο κατά τις απώλειες στον αγωγό πτώσης.

Το υποπρόγραμμα *mechel\_equipment.m* έχει ως δεδομένα εξόδου το μοντέλο του στροβίλου (ή των στροβίλων) με τα χαρακτηριστικά του (ή τους), καθώς επίσης και την ισχύ και βαθμό απόδοσης της ασύγχρονης γεννήτριας και του μετασχηματιστή τάσης και τέλος τον ολικό βαθμό απόδοσης και την ολική ισχύ του συστήματος.

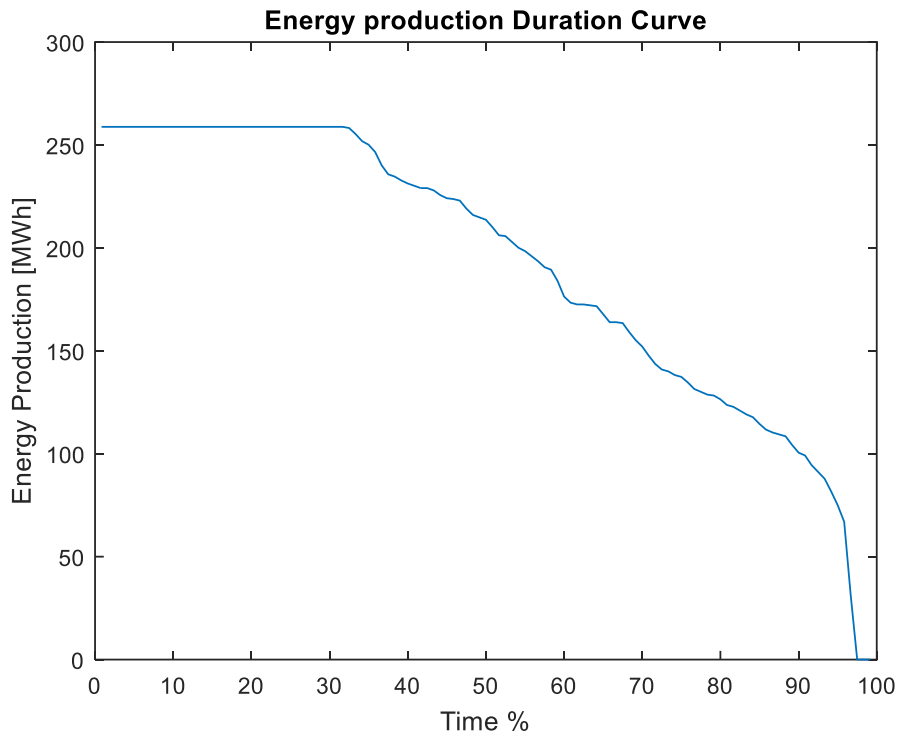
Το υποπρόγραμμα *sHPP\_function.m* έχει ως δεδομένα εξόδου την ετήσια παραγωγή υδρηλεκτρικής ενέργειας που παράγει το έργο, καθώς και την ποσότητα νερού που καταναλώνει για να την παράγει. Για οπτικούς σκοπούς στο Σχήμα 10.3 που ακολουθεί χαράσσονται η καμπύλη διάρκειας των αξιοποιήσιμων παροχών (Net Discharge) και η καμπύλη διάρκειας των αξιοποιημένων παροχών (Used Discharge). Επίσης στα Σχήματα 10.5 και 10.6 που ακολουθούν χαράσσονται η καμπύλη διάρκειας της αξιοποιημένης ισχύος και η καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος υπολογίζει τον ετήσιο βαθμό απόδοσης, καθώς επίσης και το βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης, για τον οποίο κάνει τον έλεγχο αν ξεπερνά το 0.75, όπως ορίζει η ελληνική νομοθεσία. Στον Πίνακα 10.9 παρατίθενται κάποια αποτελέσματα από την επίλυση.



Σχήμα 10.4: Καμπύλες διάρκειας αξιοποιήσιμων (Net) και αξιοποιημένων (Used) παροχών.

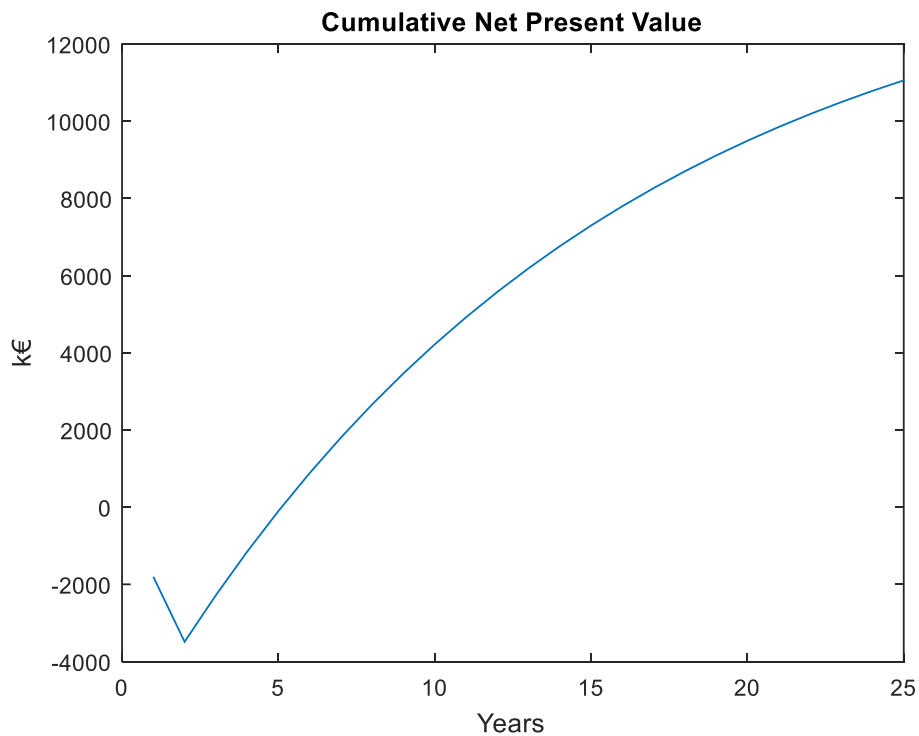


Σχήμα 10.5: Καμπύλη διάρκειας αξιοποιούμενης ισχύος.



Σχήμα 10.6: Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας.

Το υποπρόγραμμα *economatics.m* έχει ως δεδομένα εξόδου το συνολικό κόστος της επένδυσης, τα ετήσια έσοδα από την πώληση ενέργειας, τα ετήσια λειτουργικά κόστη, τα συνολικά έσοδα από την επένδυση, τη διάρκεια αποπληρωμής της επένδυσης καθώς επίσης και τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 10.7: Χρηματοροή μΥΗΕ.

Για οπτικούς σκοπούς στο Σχήμα 10.7 χαράσσεται η χρηματοροή του έργου ανηγμένη στην παρούσα αξία. Εκεί που η χρηματοροή συναντά το 0 προκύπτει η αποπληρωμή του έργου από την έναρξη των εργασιών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προκύπτει αποπληρωμή στα 3.2 περίπου έτη από την έναρξη λειτουργίας, δηλαδή 5.2 από την έναρξη της κατασκευής.

Πίνακας 10.9: Βασικά μεγέθη από την επίλυση.

<b>Υδρολογική ανάλυση</b>	
$Q_{eco}$ [ $m^3/s$ ]	1.8239
$Q_{40}$ [ $m^3/s$ ]	3.35
<b>Αγωγός πτώσης</b>	
$D_N$ [mm]	1200
$h_f$ [m]	6.96
$h_l$ [m]	2.68
$H_{net}$ [m]	115.15
<b>Μηχανολογικός εξοπλισμός/Στρόβιλοι</b>	
πλήθος στροβίλων	2
$Q_{N,pt}$ [ $m^3/s$ ]	1.675
Model	I650
αριθμός στροφών	1000
ns	104
$Q_{min}$ [ $m^3/s$ ] (1 tur)	0.8375
$Q_{max}$ [ $m^3/s$ ] (n tur)	3.8525
$N_{th,tur}$ [MW]	3.7834
$\eta_{tur}$	0.8723
$N_{tur}$ [MW]	3.3003
<b>Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός/ Γεννήτρια &amp; Μετασχηματιστής</b>	
πλήθος πόλων	6
$N_{G,th}$ [kVA]	1833.5
$\eta_G$	0.9694
$N_G$ [kVA]	1777.3
$N_{G,nom}$ [kVA]	2000
Load Factor	0.886
$N_{Tr,nom}$ [kVA]	2000
$\eta_{Tr}$	0.9904
<b>Μονάδα</b>	
$\eta_{tot}$	0.8375
$N_{SHPP}$ [MW]	3.1685
<b>Ενεργειακή Αξιολόγηση</b>	
Συντελεστής φορτίου (ΣΦ)	82.53%
Βαθμός ενεργειακής απόδοσης (BEA)	77.47%



## 10.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

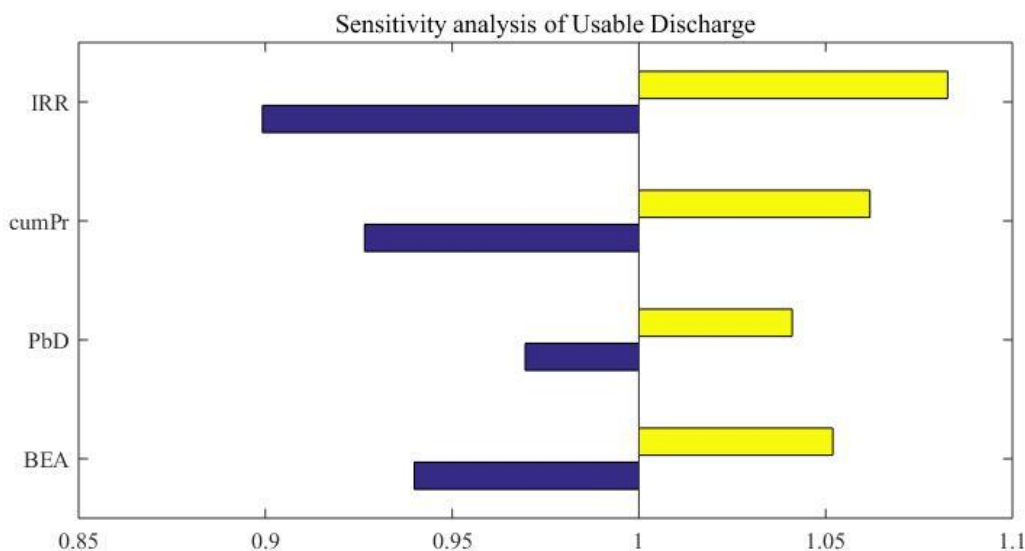
Τα παραπάνω υποπρογράμματα προχωρούν σε μια διαστασιολόγηση του μΥΗΕ στηριζόμενα σε ιστορικές μετρήσεις της απορροής του ποταμού 10 ετών. Για να επαληθευτούν οι προβλέψεις για την απόσβεση του έργου, η παραγόμενη ενέργεια και τα έσοδα που θα προκύψουν θα πρέπει η ετήσια εισροή να έχει καμπύλη διάρκειας ίδια με αυτή της ιστορικής χρονοσειράς, δηλαδή πρακτικά να επαναληφθεί πλήρως η ίδια χρονοσειρά εισροών για τη διάρκεια ζωής του έργου. Επειδή αυτό είναι απίθανο να συμβεί, επιστρατεύεται η ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να διαπιστωθεί πόσο σημαντική είναι η επιρροή της τιμής που επιλέγεται για ορισμένες από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται.

Η ανάλυση ευαισθησίας ορίζει ότι μεταβάλλεται κάθε φορά μία μόνο παράμετρος (ανεξάρτητη μεταβλητή) και εξετάζεται η επιρροή της μεταβολής αυτής σε προκαθορισμένες άλλες (εξαρτημένες) μεταβλητές που ενδιαφέρουν το μελετητή.

Στο πλαίσιο αυτό στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται σκόπιμο να εξεταστούν ως εξαρτημένες μεταβλητές ο βαθμός ενεργειακής αξιοποίησης (BEA), η διάρκεια αποπληρωμής της επένδυσης (PbD), το ολικό κέρδος της επένδυσης (cumPr), και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR). Επιλέχθηκε οι (ανεξάρτητες) μεταβλητές που θα εξεταστούν να ορίζονται μετά τη διαστασιολόγηση του έργου (δηλαδή να επαναλαμβάνεται η εκτέλεση των υποπρογραμμάτων *sHPP\_function.m* και *economics.m*), ώστε τα σενάρια να προσομοιάζουν την πραγματικότητα, δηλαδή πώς θα συμπεριφερθεί ένα έργο που έχει ήδη κατασκευαστεί αν για οποιοδήποτε λόγο οι μεταβλητές αλλάξουν τιμές μετά την κατασκευή. Έτσι ως ανεξάρτητες μεταβλητές λαμβάνονται η καμπύλη διάρκειας των παροχών με την οποία προσομοιάζεται η λειτουργία του συστήματος, η τιμή διάθεσης της ενέργειας, και το επιτόκιο  $r$ .

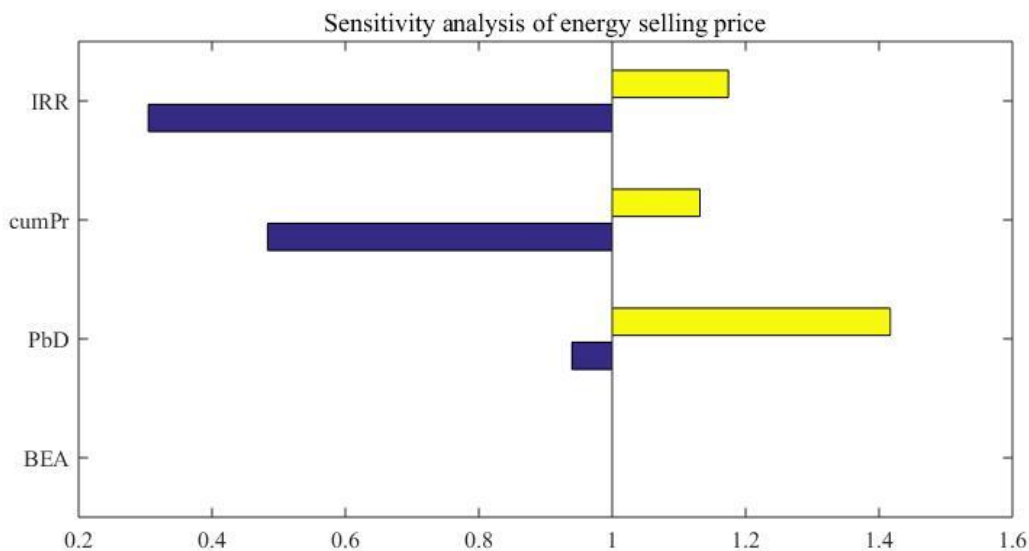
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας είθιστα να παρουσιάζονται σε διαγράμματα τύπου Tornado, οπότε τέτοιου τύπου διαγράμματα χρησιμοποιούνται και στο παρόν. Αναφέρεται ότι μειονέκτημα των διαγραμμάτων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν μόνο το εύρος της επίδρασης και όχι την εξέλιξή της με την παράμετρο που ενδιαφέρει το μελετητή. Επειδή οι εξαρτημένες μεταβλητές που μελετώνται έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης, τα διαγράμματα έχουν αναχθεί διαιρώντας με τις αντίστοιχες τιμές που αντιστοιχούν στην επίλυση χωρίς τη χρήση αυξητικών ή μειωτικών συντελεστών.

Στο σχήμα 10.8 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας για την εισερχόμενη στο σύστημα παροχή στα χρόνια λειτουργίας. Εξετάστηκαν τα σενάρια για παροχή ίση με το 0.9 της αρχικής παροχής έως το 1.1 με βήμα 0.05. Παρατηρείται ότι τη μικρότερη επιρροή οι παροχές την έχουν στο χρόνο αποπληρωμής του έργου ενώ τη μεγαλύτερη στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 10.8: Ανάλυση ευαισθησίας των εισερχόμενων παροχών στο σύστημα.

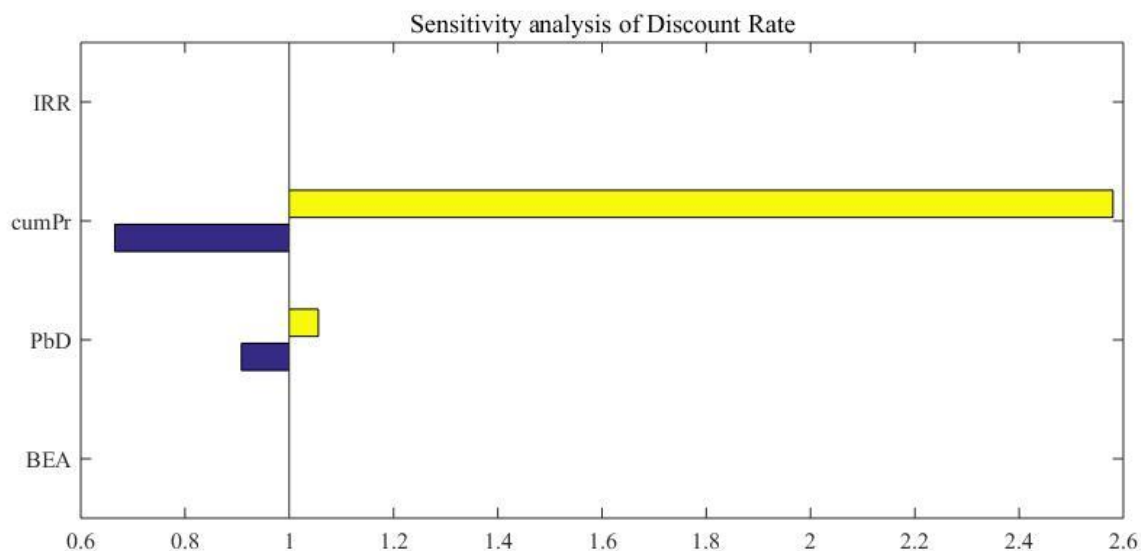
Στο σχήμα 10.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στα χρόνια λειτουργίας. Εξετάστηκαν τα σενάρια για τιμή ίση με το 0.65 της αρχικής τιμής έως το 1.1 με βήμα 0.05. Παρατηρείται ότι η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας δεν έχει καμία επιρροή στον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης (αναμενόμενο) ενώ τη μεγαλύτερη επιρροή έχει στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης, ακολουθώντας η διάρκεια αποπληρωμής του έργου.



Σχήμα 10.9: Ανάλυση ευαισθησίας της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο σχήμα 10.10 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή του επιτοκίου στα χρόνια λειτουργίας του έργου. Εξετάστηκαν τα σενάρια για τιμή ίση με το 0.05 της αρχικής τιμής έως το 1.45 με βήμα 0.05 (δηλαδή εύρος επιτοκίου 0.5% - 10%). Παρατηρείται ότι η τιμή του επιτοκίου δεν έχει καμία επιρροή στον βαθμό ενεργειακής αξιοποίησης (αναμενόμενο) καθώς

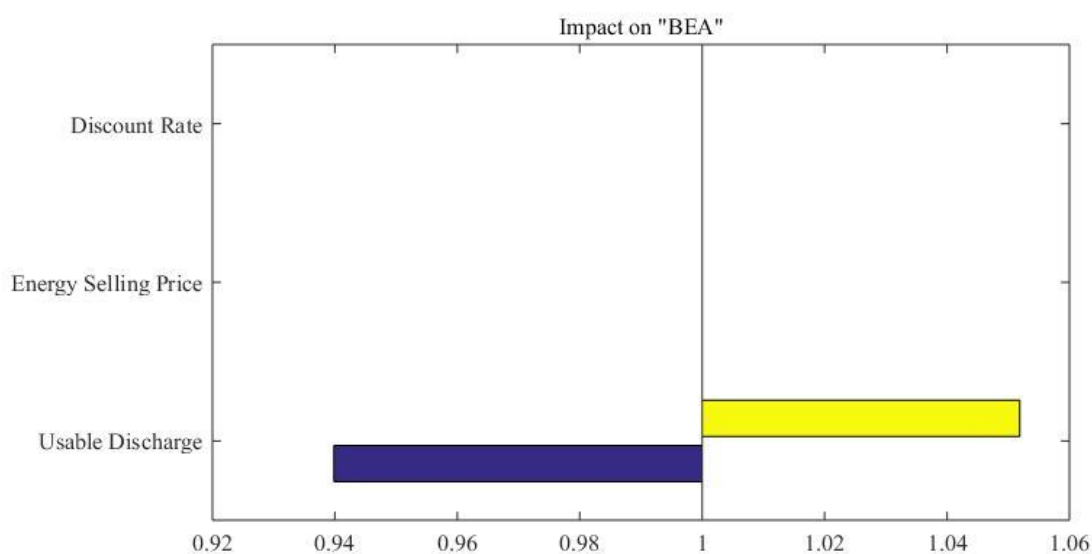
επίσης και στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (επίσης αναμενόμενο αφού αυτός είναι τιμή επιτοκίου για συγκεκριμένα χρόνια αποπληρωμής) ενώ τη μεγαλύτερη επιρροή έχει στα ολικά κέρδη της επένδυσης.



Σχήμα 10.10: Ανάλυση ευαισθησίας του επιτοκίου.

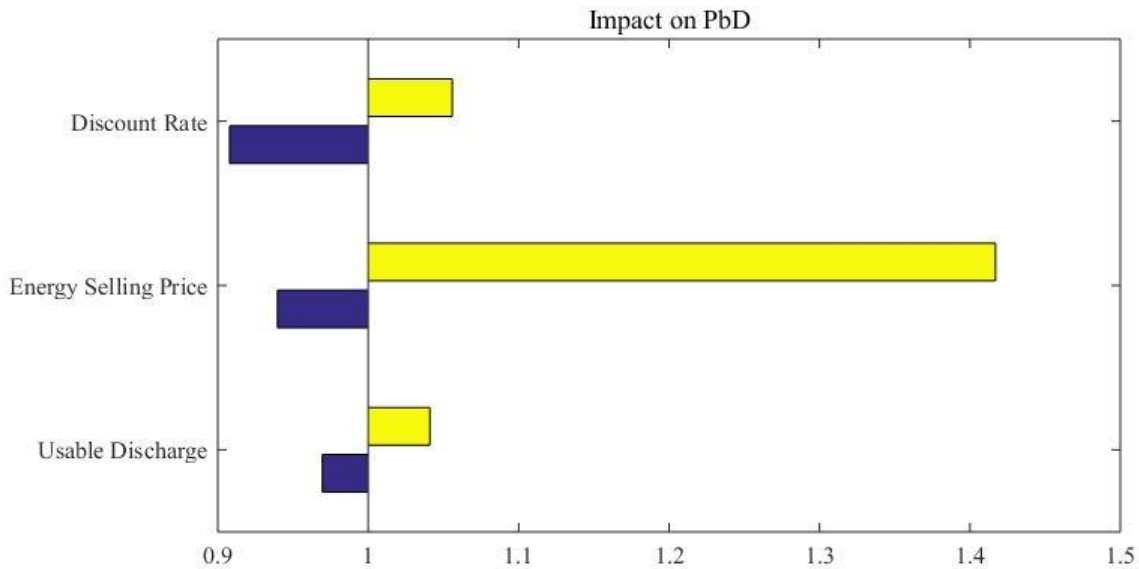
Ένα άλλο στοιχείο που ενδιαφέρει το μελετητή κατά την ανάλυση ευαισθησίας είναι η εύρεση των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν περισσότερο τη βιωσιμότητα του έργου. Επομένως στα σχήματα που ακολουθούν, φαίνεται η επίδραση της μεταβολής όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών στις εξαρτημένες μεταβλητές.

Στο σχήμα 10.11 που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης. Όπως προέκυψε και παραπάνω, από τις ανεξάρτητες μεταβλητές που επιλέχθηκαν, μόνο οι παροχές μπορούσαν να επηρεάσουν την τιμή του βαθμού ενεργειακής αξιοποίησης.



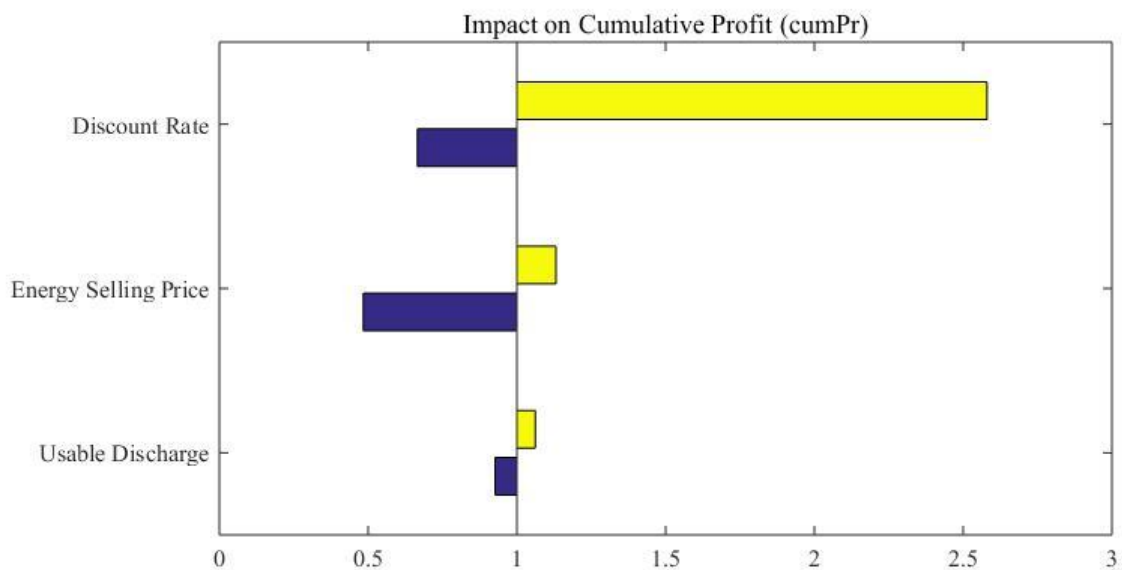
Σχήμα 10.11: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο Βαθμό Ενεργειακής Αξιοποίησης.

Στο σχήμα 10.12 που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή του χρόνου αποπληρωμής. Παρατηρείται ότι τη μικρότερη επίδραση στο χρόνο αποπληρωμής έχει η διακύμανση της παροχής, ενώ τη μεγαλύτερη επίδραση η τιμή πώλησης της ενέργειας.



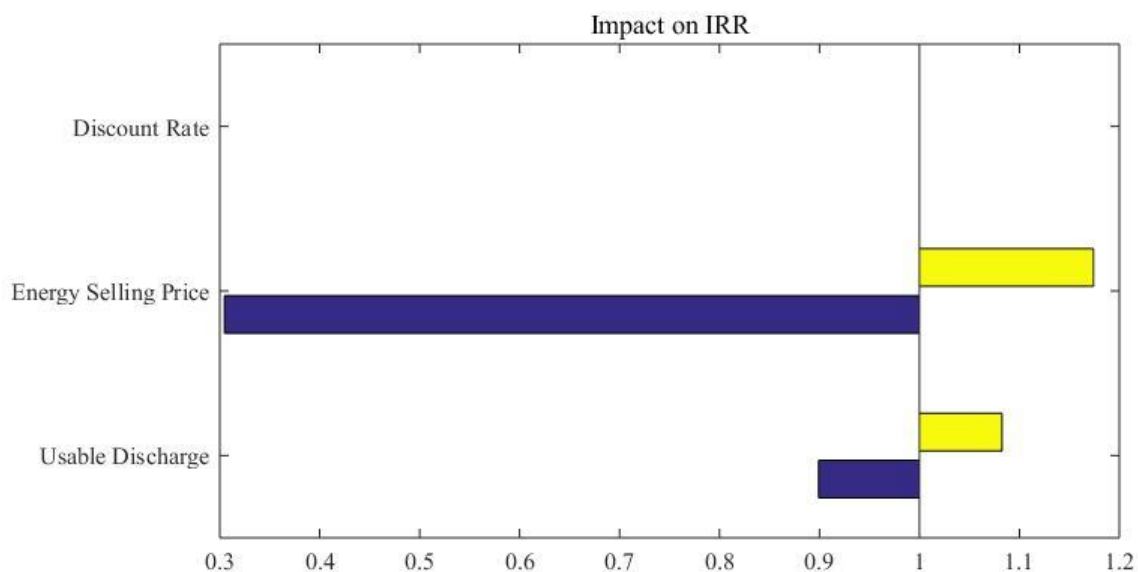
Σχήμα 10.12: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο Χρόνο Αποπληρωμής.

Στο σχήμα 10.13 που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή του ολικού κέρδους. Παρατηρείται ότι τη μικρότερη επίδραση στο ολικό κέρδος έχει η διακύμανση των παροχών, ενώ τη μεγαλύτερη επίδραση το επιτόκιο.



Σχήμα 10.13: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στο ολικό κέρδος από την επένδυση.

Στο σχήμα 10.14 που ακολουθεί φαίνεται η επίδραση της μεταβολής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη μεταβλητή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Όπως αναφέρθηκε δεν έχει επίδραση στον IRR η τιμή του επιτοκίου, ενώ τη μεγαλύτερη επίδραση έχει η τιμή πώλησης της ενέργειας.



Σχήμα 10.14: Επίδραση της μεταβολής των τιμών των παραμέτρων στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης.

Στο κεφάλαιο 8 του παρόντος αναφέρεται ότι η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές των εσόδων (παραγόμενη ενέργεια και τιμή διάθεσής της) και στο επιτόκιο  $r$ , ισχυρισμός ο οποίος από την ανάλυση που πραγματοποιείται επιβεβαιώνεται. Ακολουθούν κάποια γενικά συμπεράσματα, καθώς επίσης και προτάσεις για περεταίρω διερεύνηση.

# 11 Γενικά Συμπεράσματα & Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα

## 11.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η στροφή του ενδιαφέροντος στην ανάπτυξη των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων (ΜΥΗΕ) προβάλλει φυσιολογική, δεδομένου ότι είναι μια μορφή ενέργειας που ήταν ανέκαθεν προσιτή στον άνθρωπο και επιπρόσθετα εμπεριέχει τα συγκριτικά αποτελέσματα της αξιοπιστίας, της ασφάλειας, και της αφθονίας (ιδίως στη χώρα μας με βάση τη μορφολογία της), προσφέροντας δηλαδή «περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα».

Η πολιτική που εφαρμόστηκε μέχρι σήμερα για τα μΥΗΕ ήταν όχι μόνο σε αντίθεση με την προσπάθεια μεγαλύτερης διείσδυσης τους, αλλά έβαλε εναντίον της ανάπτυξης τους. Παλιότερες αλλά και πρόσφατες νομοθετικές ρυθμίσεις που αφορούν στην αδειοδότηση των μΥΗΕ, δημιούργησαν σημαντική ανάσχεση στην ουσιαστική ανάπτυξη τους, προκαλώντας παράλληλα την πλήρη στασιμότητα του κλάδου τα τελευταία χρόνια.

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη των μΥΗΕ παρουσιάζει σημαντική υστέρηση ακόμη και με τους μικρούς, σε σχέση με τις δυνατότητες των μΥΗΕ, στόχους που τέθηκαν (ενδιάμεσος στόχος 2014 και τελικός στόχος που έχει τεθεί για την διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα το 2020). Συγκεκριμένα, το ποσοστό πλήρωσης του στόχου των μΥΗΕ καθορίστηκε στο 73% για το 2014 και είναι στο 63% για το 2020, τη στιγμή που οι αντίστοιχοι στόχοι για άλλες τεχνολογίες έχουν υπερπληρωθεί (ΕΣΜΥΕ, 2020).

Τα ΜΥΗΕ έχουν την μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα (παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος) από όλες τις τεχνολογίες ΑΠΕ. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα των ΜΥΗΕ ξεπερνά τα 40% τη στιγμή που η αντίστοιχη αποδοτικότητα ανέρχεται σε 25% για τα αιολικά και σε 16% για τα Φωτοβολταϊκά (ΕΣΜΥΕ, 2020).

Τα μΥΗΕ είναι έργα με την μεγαλύτερη εγχώρια προστιθέμενη αξία από όλες τις ΑΠΕ. Πάνω από το 60% του προϋπολογισμού των έργων είναι υλικά και υπηρεσίες που προέρχονται από την χώρα μας, ποσοστό που ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε έργου μπορεί να φθάσει ακόμη και το 90% (ΕΣΜΥΕ, 2020).

Δεδομένων των προαναφερθέντων καθώς επίσης και της δυνατότητας να συνδυαστούν με άλλες παραγωγικές δραστηριότητες όπως ύδρευση και άρδευση, η εκμετάλλευση των υδατοπτώσεων κρίνεται απαραίτητη.

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω του κώδικα που αναπτύχθηκε προκύπτει ότι για τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιείται η απόσβεση του κεφαλαίου σε 3.5 περίπου χρόνια από την έναρξη λειτουργίας. Αυτό για έναν ιδιώτη είναι πάρα πολύ σημαντικό καθότι λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής του έργου έχει περιθώριο για μεγάλο κέρδος. Αντίστοιχα είναι σημαντικό και για το διαχειριστή του συστήματος αν το μΥΗΕ ανήκει σε κρατικό φορέα, καθότι δημιουργεί ένα κέρδος το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για βελτίωση ή αντικατάσταση εξοπλισμού καθώς επίσης και για τη βελτίωση του ευρύτερου συστήματος ενέργειας (βελτίωση του δικτύου μεταφοράς για μείωση των απωλειών, δημιουργία προϋποθέσεων για περεταίρω εισροή ΑΠΕ σε περίπτωση που αυξηθεί η ζήτηση κ.λ.π.). Τέλος, η γρήγορη απόσβεση κεφαλαίου και το μεγάλο περιθώριο κέρδους συνεπάγονται μικρότερο ρίσκο

και διευκολύνουν τη χρηματοδότηση, αδειοδότηση και γρήγορη υλοποίηση του έργου σε σχέση με άλλα ενεργειακά ή υδραυλικά έργα.

Τα πλεονεκτήματα των μΥΗΕ σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικά τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, καθιστούν τα μΥΗΕ το μέλλον της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Παράλληλα, η περαιτέρω διεξόδυση τους είναι σημαντική για την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών και την προώθηση των περιβαλλοντικών στόχων και της «πράσινης» ενέργειας στη χώρα.

## 11.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 10, ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιεί μια αναγνωριστική μελέτη σκοπιμότητας της κατασκευής ενός μΥΗΕ. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι με μικρές τροποποιήσεις δεν μπορεί να φτάσει να πραγματοποιεί ακόμη και την προκαταρκτική μελέτη.

Στο πλαίσιο αυτό, για παράδειγμα, για τον προσδιορισμό των υδραυλικών απωλειών του αγωγού πτώσης, υιοθετήθηκε μια απλουστευτική μέθοδος όπου θεωρήθηκε ένας ενιαίος συντελεστής τοπικών απωλειών, παραδοχή ικανοποιητική για το επίπεδο της αναγνωριστικής μελέτης. Στη συνέχεια και δεδομένου ότι θα γίνει χάραξη του αγωγού πτώσης σε κάποιο διαστάτο (στην απλούστερη περίπτωση) σχεδιαστικό πρόγραμμα, είναι εφικτό να λάβει ο μελετητής τις συντεταγμένες των κόμβων του άξονα του αγωγού, και με απλούς υπολογισμούς να βρίσκει τα μήκη μεταξύ των κόμβων (να τονιστεί ότι για πρακτικούς λόγους πρέπει τα επιμέρους μήκη να είναι άνω φραγμένα για παράδειγμα 6m που είναι η τυπική διάσταση των σωλήνων για να μπορούν να μεταφέρονται) και τις γραμμικές υδραυλικές απώλειες στα μήκη αυτά, τις γωνίες μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων ώστε να υπολογίζονται οι τοπικές απώλειες σε κάθε θέση ασυνέχειας (όπως και για την ύπαρξη κάποιου ειδικού τεμάχους).

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να χαραχθεί λεπτομερώς η πιεζομετρική γραμμή του αγωγού πτώσης και να καθοριστεί σε δεύτερη φάση το ελάχιστο επιθυμητό πάχος αγωγού για κάθε τμήμα ώστε να εξοικονομηθούν και πόροι. Ένας τέτοιος κώδικας είναι σχετικά απλός στην κατασκευή και μπορεί απλά να ενσωματωθεί στον κώδικα του παρόντος.

Επίσης, για τη διαστασιολόγηση του στροβίλου αξιοποιήθηκε το γράφημα με τους στροβίλους οριζοντίου άξονα τύπου Francis της εταιρείας Toshiba (Παπαντώνης, 2008). Η διαδικασία που ρεαλιστικά ακολουθείται, περιλαμβάνει την επιλογή του τύπου του στροβίλου από νομογραφήματα, και στη συνέχεια επικοινωνία του μελετητή με την κατασκευάστρια εταιρεία υδροστροβίλων και με δεδομένα την παροχή σχεδιασμού και το ύψος πτώσης, να ζητάει μια τεχνική λύση για το σύνολο του Η/Μ εξοπλισμού του μΥΗΕ, ώστε να εξασφαλίσει τη βέλτιστη συνεργασία μεταξύ τους. Στο πλαίσιο αυτό, φαντάζει περιττή η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων που να έχει τα πραγματικά χαρακτηριστικά του Η/Μ εξοπλισμού. Η βάση δεδομένων αυτή, είναι όμως ο μοναδικός τρόπος που μπορεί ο μελετητής να υπολογίσει τον βέλτιστο συνδυασμό του Η/Μ εξοπλισμού ώστε να επιτυγχάνει το σκοπό που του έχει ανατεθεί, από την πιο φθηνή εγκατάσταση μέχρι ενεργειακούς στόχους. Προτείνεται επομένως στο μέλλον, να ξεκινήσει να δημιουργείται μια τέτοια βάση δεδομένων με όλα τα επιμέρους στοιχεία του Η/Μ εξοπλισμού, με

τις πραγματικές τιμές για τα διάφορα μεγέθη σχεδιασμού, όπως αυτές πιθανόν υπάρχουν σε τεχνικά φυλλάδια.

Μια ακόμη σημαντική προσθήκη μπορεί να πραγματοποιηθεί στον υπολογισμό του συνολικού κόστους της εγκατάστασης. Στην παρούσα εργασία, το συνολικό κόστος του έργου υπολογίστηκε ως συνάρτηση του κόστους του Η/Μ εξοπλισμού με ένα συντελεστή θέσης που λαμβάνει υπόψιν και ιδιαιτερότητες και τεχνικές δυσκολίες. Η μέθοδος αυτή είναι ικανοποιητική για το επίπεδο της αναγνωριστικής μελέτης αλλά θέλει σίγουρα βελτίωση για τη συνέχεια. Ο αναλυτικός υπολογισμός του κόστους, προφανώς, απαιτεί την πλήρη διαστασιολόγηση όλων των πτυχών του έργου. Υπάρχουν σχέσεις για τον προσδιορισμό του κόστους κάθε συνιστώσας (Παπαντώνης, 2008), οι οποίες όμως χρήζουν ανανέωσης ώστε να λάβουν υπόψη τα έργα που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια.

Βασική βελτίωση ως προς τη δυνατότητα του κώδικα να υποβοηθήσει την εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας και προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι η προσθήκη υπολογισμών και σχεδίων για όλα τα επιμέρους έργα πολιτικού, μηχανολόγου και ηλεκτρολόγου μηχανικού, όπως για παράδειγμα του εξαμμοτή, της εσχάρωσης, των βανών, του κιβωτίου ταχυτήτων, των αυτοματισμών ελέγχου και της διασύνδεση με το δίκτυο, με βάση τόσο τυπικές διαστάσεις που προκύπτουν άμεσα από υπολογισμούς για τα εξατομικευμένα τμήματα του έργου, όσο και τυποποιημένες διαστάσεις και πραγματικές βάσεις δεδομένων για όσα εξαρτήματα εμπορίου δεν είναι συμφέρουσα η εξατομίκευση.

Ενδιαφέρον θα είχε και η εξέταση της δυνατότητας σχεδιασμού ενός μΥΗΕ ώστε αυτό να λειτουργήσει σε υβριδικό σύστημα αντλησιοταμίευσης. Ένα τέτοιο εγχείρημα απαιτεί λεπτομερή καταγραφή εκτός από την απορροή, και για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του υπάρχοντος συστήματος καθώς επίσης και της παραγωγής από τις διαθέσιμες μονάδες. Ο σχεδιασμός θα είναι ζήτημα βελτιστοποίησης ώστε να επιτευχθεί το μικρότερο κόστος επένδυσης με το μεγαλύτερο ενεργειακό όφελος. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά περίπλοκη γιατί συνδυάζει ενεργειακά ισοζύγια, υδατικά ισοζύγια καθώς επίσης και τη δυσκολία ότι χρειάζονται όσο το δυνατό πιο πυκνές χρονοσειρές καθώς επίσης και τεχνικοοικονομικά δεδομένα που δεν είναι εύκολα διαθέσιμα, αφού ο αριθμός τέτοιων έργων είναι σχετικά μικρός.

Τέλος, ο κώδικας που αναπτύχθηκε δυστυχώς απευθύνεται σε γνώστες της γλώσσας προγραμματισμού MatLab, και ταυτόχρονα σε γνώστες της διαδικασίας του υπολογισμού και διαστασιολόγησης ενός μΥΗΕ, ώστε να είναι δυνατή η προσπέλαση των μητρώων του workspace ώστε να βρουν τις τιμές που τους ενδιαφέρουν. Δεν έχει καταβληθεί προσπάθεια ο κώδικας να αλληλεπιδρά με το χρήστη, παρά μόνο όταν εμφανίζει κάποια πολύ χαρακτηριστικά διαγράμματα. Ίσως η δημιουργία ενός κώδικα, που να έχει ως έξοδο μία συνοπτική τεχνική περιγραφή, στην οποία θα αναγράφονται όλα τα σημαντικά στοιχεία του έργου, να μπορεί να συνεισφέρει στον τομέα αυτό.

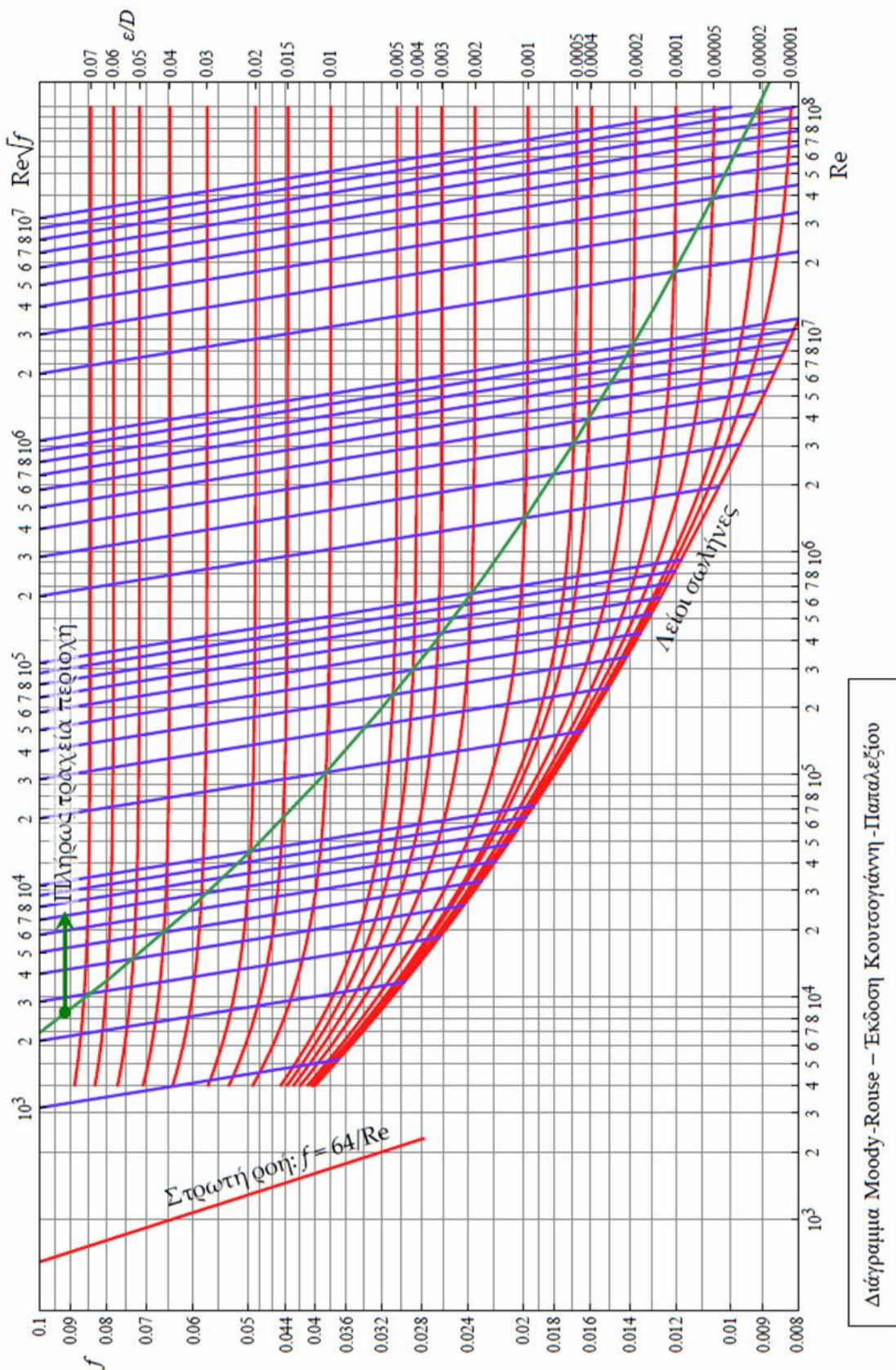


## Βιβλιογραφία

1. Akan, O., 2006. *Open Channel Hydraulics*. 1st ed. Oxford: Elsevier Ltd.
2. Anagnostopoulos, J. & Papantonis, D., 2012. Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece. September, 45(1), pp. 416-423.
3. Cora, E., Fry, J. J., Bachhiesl, M. & Schleiss, A., 2019. *Hydropower Technologies: the state-of-the-art*, s.l.: s.n.
4. International Hydropower Association, 2019. *Hydropower Status Report - Sector Trends and Insights*, London: IHA.
5. Koutsoyiannis, D. & Baloutsos, G., 2000. Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences. *Natural Hazards*, 22(1), pp. 29-48.
6. Ministry of Energy of Georgia, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2016. *Cost Base for Small Hydropower Plants in Georgia <13[MW]*, s.l.: s.n.
7. Petley, S., 2018. *Numerical and Experimental Investigation of Flow in Horizontal Axis Pelton Turbines*. s.l.:Lancaster University.
8. Tanchev, L., 2014. *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures*. 2nd ed. Leiden: CRC Press/Balkema.
9. Thematic Network on Small HydroPower (TNSHP), 2004. *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. s.l.:European Small Hydropower Association (ESHA).
10. Γεωργιόπουλος, Δ. & Δήμου, Χ., 2017. *Υδροηλεκτρικά Έργα 2015-2040: Ανάπτυξη και Προοπτικές*. Αθήνα, s.n., p. 13.
11. Ελληνική Δημοκρατία - Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019. *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*, Αθήνα: s.n.
12. Καραμάνου, Ε., Παπαθανασίου, Σ., Παπαευθυμίου, Σ. & Παπασταμούλος, Κ., 2010. *Παραμετρική διερεύνηση της τιμολόγησης Υβριδικών Σταθμών σε Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά*, Αθήνα: ΕΠΙΣΕΥ - Ε.Μ.Π..
13. Κατσαπρακάκης, Δ., 2015. *Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
14. Κουτσογιάννης, Δ. & Ξανθόπουλος, Θ., 2016. *Τεχνική Υδρολογία*. 4 επιμ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
15. Λιώκη - Λειβαδά, Η. & Ασημακοπούλου, Μ., 2008. *Αιολική και άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας Βιομάζα - Γεωθερμία - Υδατοπτώσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
16. Μιμίκου, Μ. & Μπαλτάς, Ε., 2012. *Τεχνική Υδρολογία*. 5 επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

17. Μπαλαράς, Κ., Αργυρίου, Α. & Καραγιάννης, Φ., 2006. *Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας*. Αθήνα: ΤεκΔΟΤΙΚΗ.
18. Παπανικολάου, Π., 2016. *Στοιχεία Μόνιμης Ροής σε Αγωγούς με Ελεύθερη Επιφάνεια - Διδακτικές Σημειώσεις*. 4η επιμ. Αθήνα: s.n.
19. Παπαντώνης, Δ., 2009. *Υδροδυναμικές Μηχανές: Αντλίες - Στρόβιλοι - Υδροδυναμικές Μεταδόσεις*. 3η επιμ. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
20. Παπαντώνης, Δ. Ε., 2008. *Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
21. Τσακίρης, Γ., 2015. *Υδραυλικά Έργα: Σχεδιασμός και Διαχείριση Αστικά Υδραυλικά Έργα*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
22. Τσόγκας, Χ., 2018. *Υδροδυναμικά Έργα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

# Παράρτημα



Σχήμα Π.0.1: Διάγραμμα Moody-Rouse. Έκδοση Κουτσογιάννη - Παπαλεξίου (Παπανικολάου, 2016).