



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Αιολικής Ενέργειας με Αντλησιοταμίευση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Χ. Λουκάτου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Αιολικής Ενέργειας με Αντλησιοταμίευση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Χ. Λουκάτου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Απριλίου 2013.

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2013

.....
Αγγελική Χ. Λουκάτου
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αγγελική Χ. Λουκάτου, 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών για αντλησιοταμίευση και ειδικότερα η σύγκριση των τεχνολογιών άντλησης με σταθερές και μεταβλητές στροφές. Ειδικότερα μελετάται ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης για αποθήκευση αιολικής ενέργειας με αντλίες μεταβλητών και σταθερών στροφών.

Περιγράφονται αρχικά οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροπαραγωγή από αιολική και υδραυλική ενέργεια. Εξηγείται επίσης η αναγκαιότητα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση της μεθόδου της αντλησιοταμίευσης και παρουσιάζονται τα υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση. Ακολούθως, γίνεται μια εκτενής περιγραφή της τεχνολογικής προσέγγισης της αποθήκευσης και αναλύονται οι περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές, οι οποίες εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Έπειτα, πραγματοποιείται μια ειδικότερη εφαρμογή σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης με αντλίες μεταβλητών και σταθερών στροφών. Ειδικότερα, προσδιορίζονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις των αντλιών και πιο συγκεκριμένα εξάγονται οι σχέσεις παροχής – στροφών και ισχύος – στροφών της αντλίας. Από τις σχέσεις αυτές προσδιορίζεται η βέλτιστη παροχή καθώς και ισχύς άντλησης. Για δύο δεδομένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου αλλά και δύο συγκεκριμένες τεχνολογίες ανεμογεννητριών προσδιορίζονται τέσσερα σενάρια μελέτης. Για κάθε σενάριο και περίπτωση άντλησης (μεταβλητές, βέλτιστες και σταθερές στροφές) υπολογίζονται η ηλεκτροπαραγωγή από τις ανεμογεννήτριες, ο όγκος άντλησης για την διαθέσιμη ηλεκτροπαραγωγή, η αντίστοιχη υδροηλεκτρική παραγωγή αλλά και ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής. Πραγματοποιείται έτσι ποσοτική σύγκριση της άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές. Διαπιστώθηκε ότι η άντληση με μεταβλητές στροφές υπερτερεί έναντι της άντλησης με σταθερές στροφές καθώς στην δεύτερη περίπτωση μεγάλο ποσό αιολικής ενέργειας απορρίπτεται αν δεν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Επίσης, η άντληση με μεταβλητές στροφές και μικρότερες αντλίες παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με την άντληση με μεταβλητές στροφές και μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία, αφού στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται καλύτερη κλιμάκωση της απορροφούμενης αιολικής ισχύος και ως αποτέλεσμα μεγαλύτερος όγκος αποθηκεύεται.

Στη συνέχεια, για όλες τις περιπτώσεις άντλησης και για όλα τα σενάρια, υπολογίζεται το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την αντλησιοταμίευση για δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις: περίπτωση 1) άντληση με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση από το δίκτυο και περίπτωση 2) άντληση χωρίς αυτή την δυνατότητα. Συγκρίνονται πάλι οι περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές και

σταθερές στροφές. Διαπιστώθηκε ότι η άντληση με μεταβλητές στροφές έχει αυξημένο κέρδος σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές γίνεται πλήρης απορρόφηση της αιολικής ισχύος ενώ στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές η αιολική ισχύς απορροφάται κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ισχύος κάθε αντλίας. Τέλος, βρέθηκε ότι το κέρδος στην περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές αυξάνεται όταν αγοράζεται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο αφού στην περίπτωση αυτή δεν απορρίπτεται η αιολική ισχύς που περισσεύει. Όλοι οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab.

Λέξεις Κλειδιά

Αποθήκευση ενέργειας, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αντλησιοταμίευση, αιολική ενέργεια, αντλίες, ανεμογεννήτριες, μεταβλητές στροφές, βέλτιστες στροφές, σταθερές στροφές, παροχή, ισχύς άντλησης, όγκος άντλησης, υδροηλεκτρική παραγωγή, βαθμός απόδοσης κύκλου, οικονομικό όφελος.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to present the available technologies of pumped storage hydropower systems and especially to compare the fixed speed pumped storage hydropower plants with the variable speed ones. More specifically a pumped storage hydropower system used for storage of wind power is examined, with variable and fixed speed pumps.

Reference is made in the different methods of energy production from renewable energy sources, with a great importance given to the energy production from wind and hydraulic energy. In addition, the reason of energy storage for power system applications is mentioned. Moreover, the pumped storage hydropower is explained and the hybrid wind energy systems with pumped storage hydropower is presented. Following this, the technological approach of pumped storage systems is described and the cases of variable and fixed speed units, that are examined in this diploma thesis, are presented.

A comprehensive implementation of a pumped storage hydropower system with variable and fixed speed pumps is made. Subsequently, the characteristic equations of pumps are determined and especially the discharge – speed and power – speed ones. From these equations, the optimum discharge and the optimum active power is determined in pumping mode. Four different scenarios are determined, considering two measured wind speed time series and two different types of wind generators. For every scenario and case of pumped storage (variable, optimal and fixed speed), the available wind energy, the volume, the hydropower energy and the overall efficiency are calculated. The comparison between variable and fixed speed units is made. It is concluded that the adjustable speed pumped storage is more efficient than the conventional pumped storage running at constant speed considering the fact that in the second case a great amount of wind power is rejected because it can be absorbed when the possibility of getting the extra energy needed from the system does not exist. In addition, the pumped storage with variable speed and smaller pumps is more efficient than the adjustable speed pumped storage with a larger one, considering that in the first case the wind power is better absorbed and as a result, a bigger volume of water is pumped.

Moreover, for all the scenarios and the pumped cases discussed, the profit from the hydraulic pumped storage for two different case studies is calculated: Case 1 when the extra energy needed can be obtained from the grid and Case 2 when the extra energy needed cannot be obtained. A comparison is made once again between the adjustable pumped storage and the fixed one. It was found that the pumped storage with variable speed has an increased profit compared to the fixed one when the extra energy needed is not able to be purchased from the grid. This is because of the fact that in the adjustable pumped storage units a full absorption of wind power is taken place and that in the conventional ones running at constant speed the wind

energy is absorbed in multiples of the active power of every pump. Finally, it was concluded that the profit in the fixed speed units is increased when the energy needed is provided from the grid thanks to the fact that the wind energy that cannot be integrated is not rejected in this case. All calculations were implemented using the program Matlab.

Key Words

Energy storage, renewable energy sources, pumped storage hydropower, wind energy, pumps, wind generators, variable speed, optimum speed, constant speed, discharge, pump active power, pumped volume, hydroelectric power, overall efficiency, profit.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, αφ' ενός μεν για την ανάθεση του θέματος της παρούσης διπλωματικής εργασίας και αφ' ετέρου για την πολύτιμη βοήθεια και την συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Η στενή συνεργασία που είχαμε, οι πολύωρες συναντήσεις και το ενδιαφέρον που έδειξε συνέβαλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα.

Ευχαριστώ επίσης τον Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κ. Γ. Κορρέ και τον Λέκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κ. Π. Γεωργιλάκη που δέχθηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο ΕΜΠ.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	15
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	15
1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	17
1.2.1 Γενικά	17
1.2.2 Αιολική ενέργεια	19
1.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια	22
1.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	27
1.3.1 Ανάγκες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	27
1.3.2 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης.....	31
1.4 Αντικείμενο, σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας	35
Κεφάλαιο 2: Υδροδυναμικές μηχανές και Υδροηλεκτρικοί σταθμοί.....	39
2.1 Γενικά για την υδραυλική ενέργεια.....	39
2.2 Φυγόκεντρες αντλίες	40
2.3 Υδροστρόβιλοι	47
2.4 Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί.....	52
2.4.1 Διαφορές μεταξύ ΥΗΣ και μικρών ΥΗΣ.....	52
2.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικρών ΥΗΣ	53
2.5 Αναστρέψιμοι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	55
2.5.1 Γενικά	55
2.5.2 Αναστρέψιμα Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα	55
2.5.3 Αρχή λειτουργίας.....	57
2.5.4 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	58
2.5.5 Εκκίνηση στους αναστρέψιμους ΥΗΣ	61
2.5.6 Κατάταξη των αναστρέψιμων ΥΗΣ ανάλογα με την σωλήνωση.....	64
2.5.7 Βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής	65
Κεφάλαιο 3: Αιολική ενέργεια	69
3.1 Γενικά.....	69
3.2 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών	71
3.3 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών	74
3.4 Ταχύτητα ανέμου	81

Κεφάλαιο 4: Υβριδικά Συστήματα Αιολικής ενέργειας με Αντλησιοταμίευση	83
4.1 Γενικά για την Αντλησιοταμίευση	83
4.1.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδου	83
4.2 Περιγραφή Υβριδικού Σταθμού	84
4.3 Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων	88
4.3.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	88
4.3.2 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα	88
4.3.3 Τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού	89
4.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης με άντληση	89
4.4.1 Άντληση με σταθερή ταχύτητα περιστροφής.....	89
4.4.2 Συνεργασία αντλιών με σταθερή ταχύτητα περιστροφής.....	90
4.4.3 Άντληση με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής	92
4.5 Υπάρχουσες εφαρμογές	97
4.5.1 Υβριδικό ενεργειακό έργο της ΔΕΗ στην Ικαρία.....	97
4.5.2 Υβριδικό ενεργειακό έργο στο νησί El Hierro της Ισπανίας.....	99
Κεφάλαιο 5: Χαρακτηριστικές εξισώσεις αντλιών.....	103
5.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες	103
5.2 Κανονικοποίηση εξισώσεων αντλίας	104
5.3 Εξαγωγή χαρακτηριστικών αντλίας	107
5.3.1 Χαρακτηριστικές πίεσης - παροχής.....	107
5.3.2 Χαρακτηριστικές ισχύος - παροχής.....	110
5.3.3 Εύρεση σχετικών βαθμών απόδοσης.....	113
5.4 Σχετικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής.....	114
5.5 Προσέγγιση αναλυτικής εξίσωσης αντλίας.....	115
5.6 Προσδιορισμός βέλτιστης ταχύτητας άντλησης	119
Κεφάλαιο 6: Αξιοποίηση αιολικής παραγωγής για Αντλησιοταμίευση.....	121
6.1 Χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου	121
6.1.1 Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1	121
6.1.2 Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2	124
6.2 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών	126
6.2.1. Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας	126
6.2.2 Υπολογισμός γωνίας βήματος έλικας.....	127
6.2.3 Υπολογισμός ονομαστικής ταχύτητας ανέμου	128

6.2.4 Υπολογισμός ονομαστικής ισχύος εξόδου	129
6.2.5 Σχεδιασμός καμπύλης ισχύος	130
6.3 Ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών	131
6.3.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας	131
6.3.2 Υπολογισμός ταχύτητας ένταξης και ονομαστικής ταχύτητας ανέμου.....	132
6.3.3 Σχεδιασμός καμπύλης ισχύος	133
6.4 Υπολογισμός αιολικής ισχύος και ενέργειας	134
6.4.1 Διατύπωση σεναρίων.....	134
6.4.2 Υπολογισμός αιολικής ισχύος και ενέργειας για όλα τα σενάρια	135
6.5 Υπολογισμός παροχής και όγκου άντλησης	139
6.5.1 Περιγραφή αντλιοστασίου.....	139
6.5.2 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με μεταβλητές στροφές....	140
6.5.3 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με σταθερές στροφές.....	143
6.5.4 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες	149
6.6 Υπολογισμός ηλεκτροπαραγωγής και βαθμού απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής.....	152
6.6.1 Περιγραφή υδροηλεκτρικής μονάδας.....	152
6.6.2 Υπολογισμός υδροηλεκτρικής παραγωγής.....	153
6.6.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής.....	155
6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων	159
Κεφάλαιο 7: Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση	163
7.1 Τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	163
7.2 Υπολογισμοί χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση .	164
7.3 Υπολογισμοί με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση	166
7.3.1 Περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές.....	166
7.3.2 Περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές	170
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και προοπτικές.....	175
8.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας.....	175
8.2 Συμπεράσματα	176
8.3 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα	179
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	181

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την μετατροπή κάποιας άλλης μορφής ενέργειας πρώτα σε μηχανική μέσω των κινητήριων μηχανών (π.χ. στροβίλων) και στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης [1]. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από απόψεως εκτάσεως μπορούν να διακριθούν σε “Εθνικά Συστήματα”, “Περιφερειακά Συστήματα” και “Ιδιωτικά Συστήματα” εφ’ όσον αντίστοιχα καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής ή τις ανάγκες μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος [2]. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1].

Παρά τις διαφορές στο μέγεθος, κυρίως, των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία των ΣΗΕ είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος και συχνότητας 50 ή 60 Hz (για τα ελληνικά και γενικότερα τα ευρωπαϊκά 50 Hz), σε εξαιρετικές, όμως περιπτώσεις είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και συνεχές ρεύμα στη μεταφορά. Η τάση των ζυγών του συστήματος παραμένει σταθερή στην κανονική λειτουργία, οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης έχουν επιπλέον ουδέτερο αγωγό (ωστόσο υπάρχουν και μονοφασικές γραμμές χαμηλής τάσης δύο αγωγών) [1].

Σε ένα ΣΗΕ υπάρχουν 3 ξεχωριστές λειτουργίες που αποσκοπούν στην τροφοδότηση των καταναλωτών: η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα και μεταφέρεται με υψηλή τάση μέσω των υποσταθμών ανυψώσεως της τάσεως. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται κυρίως στην μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου), της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων πόρων και υδατοπτώσεων και της πυρηνικής ενέργειας από την πυρηνική σχάση (ουράνιο, θόριο, πλουτόνιο) σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια γίνεται επίσης όλο πιο έντονη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο άνεμος (αιολική), τα θαλάσσια κύματα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα [1]. Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι

ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσον για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων (εξωτερική καύση). Αντίθετα, οι πετρελαιοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες είναι είτε αεριοστροβίλοι είτε εμβολοφόρες Ντιζελογεννήτριες (Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη – HZ) [1,2,3].

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης μέσω των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια στους αντίστοιχους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Τα δίκτυα διανομής διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές διαμέσου των σταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης 380/220V (στην Ευρώπη) [1,2]. Σημειώνεται ότι η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε υψηλές τάσεις, διότι συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και επομένως πιο οικονομική λειτουργία.

Αναλόγως τώρα με το αν υπάρχει δυνατότητα διασύνδεσής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερο δίκτυο, το σύστημα αυτό μπορεί να είναι είτε διασυνδεδεμένο είτε αυτόνομο. Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί λοιπόν μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Ο λόγος που επιδιώκεται όπου είναι εφικτό από τεχνοοικονομικής απόψεως να υπάρχει διασύνδεση είναι γιατί αυτό εξασφαλίζει σταθερότητα στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου [2].

Σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η διασύνδεση, το δίκτυο καλείται να λειτουργεί αυτόνομα. Τέτοια συστήματα συναντώνται ευρέως σε ελληνικά νησιά, όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης στο Εθνικό δίκτυο. Τα αυτόνομα συστήματα είναι πιο επιρρεπή σε απότομες μεταβολές του φορτίου και οι επιμέρους διατάξεις τους πρέπει να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά σε αυτές. Επίσης, δεν υπάρχει η δυνατότητα κατανομής του φορτίου που συναντάται στο διασυνδεδεμένο σύστημα, και έτσι, κάθε σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση αυτόνομα να αντιμετωπίζει τις όποιες δυσκολίες κάλυψης αναγκών.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2004 διαμορφώθηκε στις 17531 TWh και προερχόταν κατά 65.8% από καύση ορυκτών καυσίμων, 16.5% από υδροηλεκτρικά, 15.6% από πυρηνική ενέργεια και μόλις 2.1% από ανανεώσιμες. Το 2009, η συνολική κατανάλωση στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα έφτασε στις 52.8 TWh. Από αυτές οι 4.4 TWh προήλθαν από εισαγωγές, ενώ η εγχώρια παραγωγή καλύφθηκε κατά 62.9% (30.5TWh) από λιγνίτη, 3.5% (1.7TWh) από πετρέλαιο, 19.4% (9.4TWh) από φυσικό αέριο, 10.3% (5TWh) από υδροηλεκτρική παραγωγή και 3.9% (1.9TWh) από ανανεώσιμες πηγές, κυρίως αιολικά [1].

1.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.2.1 Γενικά

Τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο) δεν είναι ανανεώσιμα, αλλά αναλώσιμα. Παράλληλα, η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει αποτέλεσμα την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα και συνακόλουθα τη μεταβολή της σύνθεσης της ατμόσφαιρας και του κλίματος. Από την άλλη πλευρά με το εντεινόμενο καταναλωτικό μοντέλο που οι ανεπτυγμένες χώρες ακολουθούν, χρόνο με το χρόνο η κατανάλωση ενέργειας αυξάνει εκθετικά [5].

Μέχρι σήμερα η παραγωγή και κατανάλωση πετρελαίου αυξάνει χρόνο με το χρόνο, αλλά αναπότρεπτα σε μερικά χρόνια θα φτάσουμε στην κατάσταση που έχει αποκληθεί «πετρελαϊκή αιχμή», μετά την οποία η παραγωγή θα φθίνει με το χρόνο. Ορισμένοι την τοποθετούν στο τέλος της τρέχουσας δεκαετίας αλλά και με την πιο αισιόδοξη εκδοχή δεν μπορεί να τοποθετηθεί πέρα από τα μέσα του αιώνα. Ας σημειωθεί ότι η ιδέα της πετρελαϊκής αιχμής έχει εισαχθεί στα μέσα του εικοστού αιώνα από τον Hubbert (1956), ο οποίος προέβλεψε με ακρίβεια την αιχμή που συνέβη στις ΗΠΑ το 1970, ενώ διατύπωσε την πρόβλεψη ότι η αιχμή σε παγκόσμιο επίπεδο θα σημειωνόταν μετά από 50 χρόνια (το 2006). Σύμφωνα με την υπόθεση συμμετρίας του Hubbert, η αιχμή σημειώνεται όταν έχει καταναλωθεί το μισό των αποθεμάτων πετρελαίου. Η εκμετάλλευση του δεύτερου μισού θα είναι πιο ακριβή (αφού ήδη εξαντλούνται τα πλέον πρόσφορα οικονομικώς αποθέματα) και θα κυριαρχείται από έλλειμμα προσφοράς. Ο τετραπλασιασμός των τιμών του πετρελαίου από το 2002 μέχρι σήμερα συνδέεται ενδεχομένως με το ότι πλησιάζουμε στην πετρελαϊκή αιχμή [5].

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Αμερικανού Υπουργείου Ενέργειας (Department of Energy), ο μέσος ρυθμός με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο προβλέπεται να φτάσει τα 25-30 TW το 2050 και τα 40-50 TW το 2100. Παίρνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα καυσίμων στο μέλλον, έχει εκτιμηθεί ότι θα υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα 14 TW το 2050 (μεγαλύτερο του σημερινού συνολικού ρυθμού παραγωγής) και 33 TW το 2100. Βεβαίως τα ελλείμματα αυτά είναι εικονικά και στην πραγματικότητα η κατανάλωση ενέργειας δεν μπορεί παρά να προσαρμοστεί στη διαθεσιμότητα/παραγωγή. Ωστόσο, οι αριθμοί αυτοί είναι χαρακτηριστικοί του μεγέθους του προβλήματος και σηματοδοτούν την ανάγκη αλλαγής του σημερινού μοντέλου ζωής αλλά και ειδικότερα του ενεργειακού τοπίου.

Δύο είναι άξονες δράσεων και αλλαγών που μπορούν να οδηγήσουν σε βιώσιμη διαχείριση ενέργειας στο μέλλον [5]:

- η υποκατάσταση μορφών ενέργειας βασισμένων στα ορυκτά καύσιμα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και
- η εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι βασικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι ακόλουθες [10]:

- Η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.
- Η ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των φωτοβολταϊκών γεννητριών μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και πιο σπάνια μέσω των ηλιακών συλλεκτών με τη συγκέντρωση υψηλών θερμοκρασιών και εν τέλει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τα μικρά υδροηλεκτρικά, τα οποία εκμεταλλεύονται τα υδάτινα ρεύματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθήκευσης.
- Η γεωθερμική ενέργεια η οποία αναφέρεται στην θερμότητα του εδάφους της γης και αξιοποιείται με κατάλληλες διατάξεις, όταν υπάρχουν συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες.
- Η βιομάζα, η οποία αναφέρεται σε γεωργικά αλλά και δασικά υπολείμματα, από τα οποία μπορούν με ειδική κατεργασία να εξαχθούν καύσιμα.
- Η ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων, της οποίας η αξιοποίηση βρίσκεται, ακόμη, σε φάση έρευνας ώστε να μετατρέπεται η κινητική τους ενέργεια σε ηλεκτρική.

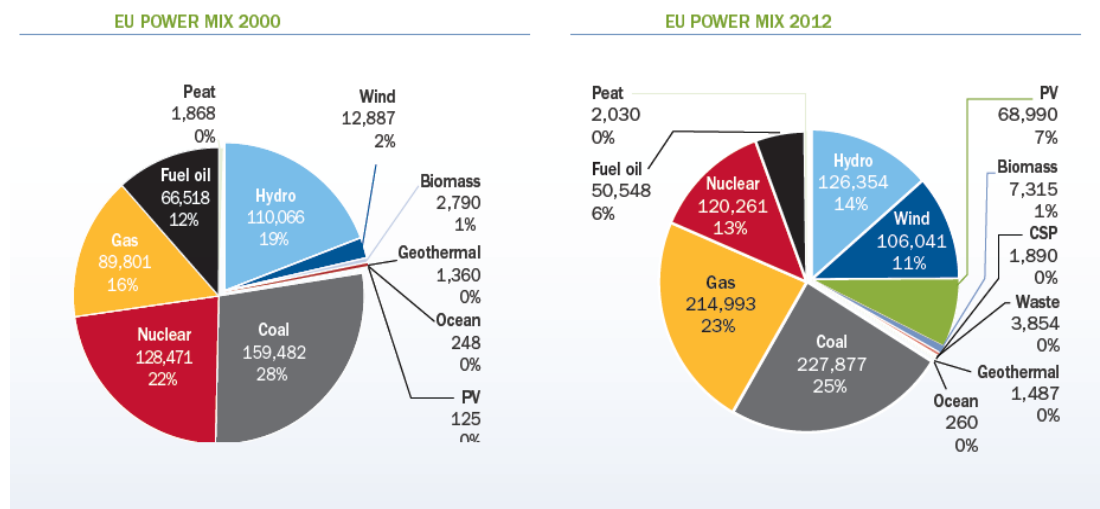
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν ανεξάντλητες πηγές, δεν αφήνουν κατάλοιπα, είναι φιλικές ως προς το περιβάλλον, είναι απλές κατασκευαστικά και συμβάλλουν στην ενδυνάμωση των τοπικών κοινοτήτων προσφέροντας νέες θέσεις εργασίας.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται λοιπόν όλο και περισσότερο κοινή συνείδηση η ανάγκη αποδοτικότερης χρησιμοποίησης των πηγών ενέργειας γενικά, ειδικότερα δε η κατά τον δυνατόν μεγαλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό επιβάλλεται όχι μόνον από το πεπερασμένο των συμβατικών πηγών ενέργειας αλλά και από την ανάγκη περιορισμού των δυσμενών επιπτώσεων από την χρήση τους στο περιβάλλον [10].

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια οι τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες καταβάλλουν προσπάθειες προσαρμογής προς τα νέα αυτά δεδομένα, με την λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων και ενημέρωση των πολιτών καθώς και την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ κατά τρόπον ώστε το κόστος τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας [10].

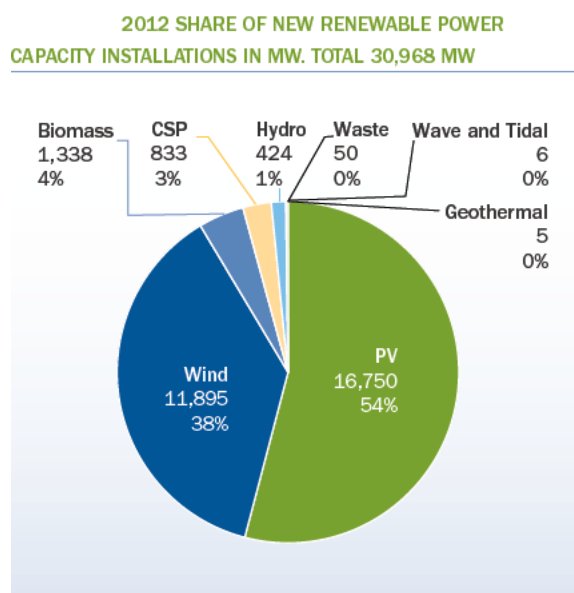
Την περίοδο 2000-2012, η εγκατεστημένη ισχύς από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσίασε μεγάλη αύξηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Πιο συγκεκριμένα, η

συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη αυξήθηκε από 22.5% σε 33.9% [11].



Σχήμα 1.1: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη για τα έτη 2000,2012 [11].

Συγκεκριμένα για το έτος 2012, 31 GW ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (κυρίως αιολικά και φωτοβολταικά) εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη με βάση το Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη από ΑΠΕ για το έτος 2012 [11].

1.2.2 Αιολική ενέργεια

Η δομή των διασυνδεδεμένων αιολικών συστημάτων έχει εξελιχθεί από το πρώιμο Δανέζικο μοντέλο της δεκαετίας του '70 σε αυτό των μεγάλων εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων. Τα αιολικά πάρκα της Καλιφόρνιας σχεδιάστηκαν και εγκαταστάθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '80, οι εγκαταστάσεις στην Δανία τη δεκαετία του '70 και αργότερα αποτελούνταν εν γένει από μικρές συστάδες

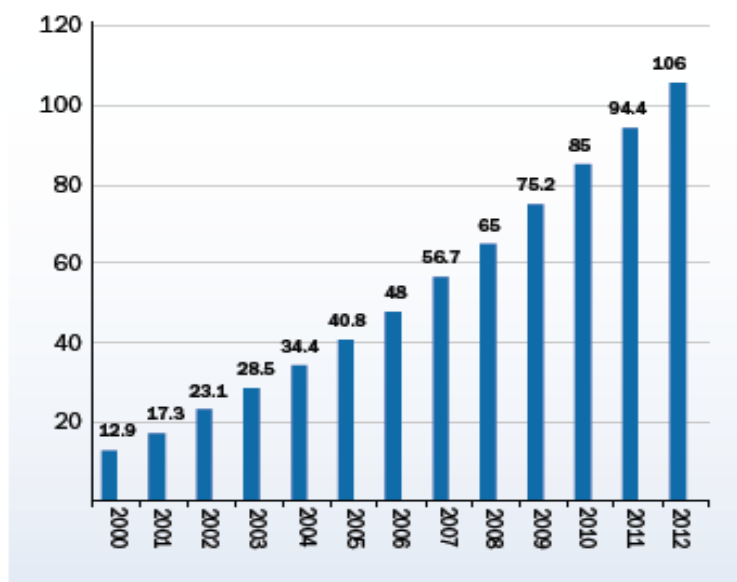
ανεμογεννητριών διασκορπισμένες γεωγραφικά. Τυπικά, μια διασυνδεδεμένη αιολική εγκατάσταση αποτελούνταν από τρεις ή περισσότερες ανεμογεννήτριες.

Στην περίπτωση της Δανίας, οι κάτοικοι δημιούργησαν συνεταιρισμούς για να έχουν στην κατοχή τους και να λειτουργούν τις ανεμογεννήτριες και για να χρησιμοποιούν και να πωλούν την παραγόμενη από αυτές ισχύ. Αντίθετα το μοντέλο της Καλιφόρνιας αφορούσε το σχηματισμό αιολικών πάρκων, δηλαδή μιας εμπορικής συνάθροισης μεγάλου αριθμού ανεμογεννήτριες σε στενή γεωγραφική εγγύτητα. Οι πρόσφατες ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις ακολούθησαν το μοντέλο της Καλιφόρνιας, παρότι υπάρχουν διαφορές στα μεγέθη των εγκαταστάσεων [12].

Η Δανία υπήρξε η πρώτη ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε μια επιτυχημένη πολιτική ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας και παρέμεινε η κυρίαρχη χώρα αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η κλίμακα ανεμογεννητριών μεγέθους 300 με 500kW άρχισε να εισάγεται με επιτυχία στην υπόλοιπη Ευρώπη, σηματοδοτώντας την έκρηξη της αιολικής ενέργειας στη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια της ραγδαίας αυτής ανάπτυξης, η Γερμανική βιομηχανία αιολικής ενέργειας έφτασε τα τεχνολογικά επίπεδα της Δανίας και τώρα διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά αιολικών συστημάτων. Παρόμοια πορεία ακολούθησε και η Ισπανία από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Αυτή η ανάπτυξη κατέστη δυνατή λόγω της ύπαρξης ισχυρών αγορών με ασφαλείς συνθήκες για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά [8].

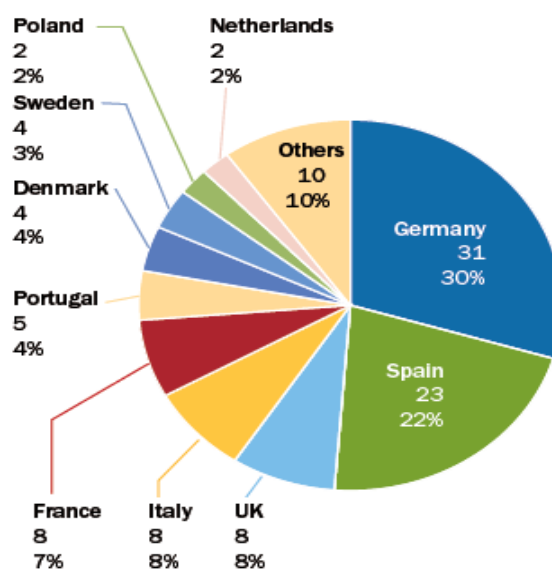
Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη το 2012 είναι 106 GW, με ετήσια αύξηση της τάξεως του 12.6% σε σχέση με τον προηγούμενο χρόνο και παρόμοια με την αύξηση που καταγράφηκε για το έτος 2011 (Σχήμα 1.3). Η Γερμανία αποτελεί την πρώτη ευρωπαϊκή χώρα σε εγκατεστημένη αιολική ισχύ. Ακολουθούν η Ισπανία, η Ιταλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γαλλία. Δέκα άλλες ευρωπαϊκές χώρες έχουν πάνω από ένα 1 GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος: Αυστρία, Βέλγιο, Δανία, Ελλάδα, Ιρλανδία, Ολλανδία, Πολωνία, Πορτογαλία, Ρουμανία, Σουηδία (Σχήμα 1.4). Η Γερμανία (31.3GW) και η Ισπανία (22.8 GW) μαζί αναπαριστούν το 52% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύς στην Ευρώπη. Το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ιταλία και η Γαλλία ακολουθούν με 8.4GW (8% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ευρώπη), 8.1GW (8%), 7.6GW (7%) αντίστοιχα. Ανάμεσα στα νεότερα μέλη, η Πολωνία με 2.5 GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος ανήκει πλέον μέσα στην δεκάδα, μπροστά από την Ολλανδία. Τέλος, η Ρουμανία είναι ενδέκατη σε σειρά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος με 1.9GW (1.8%) [11].

**CUMULATIVE WIND POWER INSTALLATIONS IN THE
EU (GW)**



Σχήμα 1.3: Ετήσια αύξηση εγκατεστημένης αιολικής ισχύος για την περίοδο 2000-2012 [11].

**EU MEMBER STATE MARKET SHARES FOR TOTAL
INSTALLED CAPACITY. TOTAL 106 GW**



Σχήμα 1.4: Ποσοστό εγκατεστημένης αιολικής ισχύος των κυριότερων ευρωπαϊκών κρατών το έτος 2012 [11].

1.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας μέσω μετατροπής της σε μηχανική ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους με τους γνωστούς νερόμυλους. Σημαντικός σταθμός, όμως, αποτέλεσε η ανάπτυξη των εφαρμογών του ηλεκτρισμού. Έκτοτε το έργο αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας γίνεται ‘‘Υδροηλεκτρικό’’, δηλαδή η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική από τον υδροστρόβιλο και στην συνέχεια σε ηλεκτρική από την ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συζευγμένη με αυτόν. Με τον τρόπο αυτό αποδεσμεύθηκε ο τόπος παραγωγής της μηχανικής ενέργειας από τον τόπο κατανάλωσης της ενέργειας, γεγονός που επέτρεψε την αύξηση της ισχύος των υδροηλεκτρικών έργων [9].

Στην Ευρώπη τουλάχιστον οι δυο-τρεις δεκαετίες μετά τον Β΄ παγκόσμιο πόλεμο θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως η χρυσή περίοδος των μεγάλων ΥΗΕ επειδή η έντονη αξιοποίηση του διαθέσιμου υδραυλικού δυναμικού έγινε με μονάδες μεγάλης ισχύος, μερικών εκατοντάδων MW η καθεμία, ως αποτέλεσμα της μεγάλης αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα παλαιάς τεχνολογίας μικρά ΥΗΕ που ήδη υπήρχαν είτε εγκαταλείφθηκαν (κυρίως όσα ήταν πολύ μικρής ισχύος) είτε ανακατασκευάστηκαν και ανανεώθηκε ο εξοπλισμός τους. Από τη δεκαετία του 1980, άρχισε να εκδηλώνεται διεθνώς έντονο ενδιαφέρον για την κατασκευή και ανάπτυξη των μικρών ΥΗΕ είτε με την αξιοποίηση νέων μικρών υδατοπτώσεων είτε με την επανασχεδίαση και επανεξοπλισμό των σταθμών που είχαν απομείνει ή εγκαταλειφθεί [9].

Η κατασκευή μικρών υδροηλεκτρικών έργων, που σε αντίθεση με τα μεγάλα δεν προϋποθέτουν την κατασκευή φράγματος και ταμιευτήρα ή ρύθμιση της ροής, ξεκίνησε στην Ελλάδα από τη δεκαετία του 1920, δηλαδή πολύ πριν την κατασκευή μεγάλων έργων. Κατά σύμβαση (για διάκρισή τους από τα μεγάλα) μικρά υδροηλεκτρικά έργα θεωρούνται συνήθως όσα έχουν εγκατεστημένη ισχύ κάτω των 10 MW. Πιο συγκεκριμένα, την περίοδο 1927-1931 και πριν από την ίδρυση της ΔΕΗ, είχαν τεθεί σε λειτουργία πολύ μικρά ΥΗΕ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος περίπου 6MW (Γλαύκος, Βέρμιο, Αγιά Χανίων, Αγ. Ιωάννης Σερρών). Την περίοδο 1950-1975 κατασκευάστηκαν 8 μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1410 MW (Άγρας, Λάδωνας, Λούρος, Ταυρωπός/Πλαστήρας, Κρεμαστά, Καστράκι, Εδεσσαίος και Πολύφυτο). Μεταξύ αυτών συμπεριλαμβάνονται και οι τρεις (3) μεγαλύτεροι: Κρεμαστά (437MW), Καστράκι (384MW), Πολύφυτο (375MW). Από το προηγούμενο συμπεραίνεται ότι η ανάπτυξη του υδροδυναμικού της Ελλάδας ουσιαστικά συμπίπτει με την ίδρυση της ΔΕΗ Δημόσιας Επιχείρησης Κοινής Ωφέλειας το 1950. Κατά την περίοδο 1976 ως σήμερα, κατασκευάστηκαν οκτώ μεγάλοι και τρεις μικροί ΥΗΕ (Πουρνάρι Ι και ΙΙ, Σφηκιά, Ασώματα, Στράτος Ι, Στράτος ΙΙ, Πηγές Αώου, Θησαυρός, Πλατανόβρυση, Γκιώνα και Μακροχώρι), συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1.630MW. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται και δύο αναστρέψιμοι αντλητικοί Σταθμοί (Σφηκιά και Θησαυρός) [13].

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Υδροηλεκτρικών Σταθμών της ΔΕΗ Α.Ε. ανέρχεται σε 3060MW. Η συνολική μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι περίπου 4000GWh. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί σήμερα (Σχήμα 1.5) κατατάσσονται σε

τέσσερα κυρίως συγκροτήματα [Αχελώου (ΥΗΣ Κρεμαστών-Καστρακίου-Στράτος) - 925.6MW, Νέστου (ΥΗΣ Θησαυρού-Πλατανόβρυσης)-500MW, Αράχθου (ΥΗΣ Πουρναρίου Ι,ΙΙ)-553.9MW, Αλιάκμονα (Πολύφυτου-Σφηκιάς-Ασωμάτων)-879.3MW)], σε δύο Ανεξάρτητους ΥΗΣ (Πλαστήρας-129.9MW, Λάδωνας-70MW) και σε άλλους μικρότερους (Αγ. Ιωάννης Σερρών, Αγιά, Αλμυρός-συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1.3MW). Η μέση ετήσια υδροηλεκτρική παραγωγή, ανάλογα με την υδραυλικότητα του έτους καλύπτει το 9÷10% της παραγωγής της ΔΕΗ. Ειδικά για το 2006, έτος υψηλής υδραυλικότητας, η υδραυλική παραγωγή ανήλθε σε 6.270GWh δηλαδή κάλυψε το 13% της συνολικής παραγωγής της ΔΕΗ. Η σημερινή οργάνωση της αρμόδιας διεύθυνσης εκμετάλλευσης των υδροηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ Α.Ε. αποτελείται από τις κεντρικές Υπηρεσίες, τα τέσσερα Συγκροτήματα που προαναφέρθηκαν και τους δύο ανεξάρτητους ΥΗΣ [13].

Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ



Σχήμα 1.5: Κατάταξη των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ σε 4 συγκροτήματα, δύο ανεξάρτητους ΥΗΣ και λοιπούς μικρότερους [14].

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι το ετήσιο θεωρητικό υδροδυναμικό της Ελλάδας ανέρχεται σε 80 TWh, από τις οποίες οι 12 αποτελούν το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο υδροδυναμικό και μέχρι σήμερα έχει αναπτυχθεί περίπου το 40%. Επίσης, το εγχώριο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο ετήσιο δυναμικό από ΜΥΗΕ είναι 2 TWh περίπου, η συνολική εφικτή εγκατεστημένη ισχύς 600 MW και ο εκτιμώμενος αριθμός κατάλληλων θέσεων 250.

Πέραν όμως των ποσοτικών χαρακτηριστικών, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τους ΥΗΣ έχει τα εξής χαρακτηριστικά, τα οποία της προσδίδουν ιδιαίτερη αξία στο Εθνικό Σύστημα [13]:

- Η ισχύς των ΥΗΣ είναι ευέλικτη και εντάσσεται γρήγορα στο σύστημα. Η αναφερόμενη ιδιότητα καθιστά πολύτιμη τη συμβολή τους στην κάλυψη αιχμών φορτίου (σε περιόδους αυξημένης ζήτησης), με την αντίστοιχη ενέργεια να αποτελεί ενέργεια υψηλής οικονομικής αξίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταξη μιας υδροηλεκτρικής μονάδας στο σύστημα απαιτεί μόλις λίγα λεπτά ώστε από ακινησία να παραλάβει πλήρες φορτίο. Έτσι οι υδροηλεκτρικές μονάδες παρέχουν εφεδρεία ισχύος που αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος. Η ευελιξία τους, η ικανότητα τους δηλαδή σε γρήγορες αυξομειώσεις του φορτίου, τις καθιστά πολύ χρήσιμες στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών δηλαδή στη συμβολή τους στη ρύθμιση της συχνότητας του συστήματος.
- Η παραγόμενη ενέργεια είναι καθαρή (χωρίς ρύπους). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια μέση παραγωγή της τάξεως των 5.000 GWh κατ' έτος από ΥΗΣ υποκαθιστά, εκπομπές ρύπων CO₂ που είναι της τάξης των 3 ÷ 8 εκατομμυρίων τόνων CO₂ κατ' έτος ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου που υποκαθιστά (φυσικό αέριο ή λιγνίτη). Από αυτό προκύπτουν τα προφανή οικολογικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση της υδροηλεκτρικής παραγωγής αλλά και τα οικονομικά οφέλη για την ΔΕΗ Α.Ε. και κατ' επέκταση της εθνικής οικονομίας από το εναλλακτικό σενάριο αγοράς δικαιωμάτων ρύπων.
- Ορισμένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε., όπως ο ΥΗΣ Σφηκιάς και ο ΥΗΣ Θησαυρού, λειτουργούν και ως αναστρέψιμοι – αντλητικοί σταθμοί. Με τη λειτουργία αυτή αποθηκεύουν νερό στους άνω ταμιευτήρες με άντληση κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου χρησιμοποιώντας ενέργεια χαμηλού κόστους και την αποδίδουν σε ώρες αιχμής συμβάλλοντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών της ημερήσιας καμπύλης φορτίου με αποτέλεσμα αφ' ενός τη δυνατότητα κάλυψης αυξημένων ενεργειακών αναγκών τις συγκεκριμένες ώρες, αφ' ετέρου και την μείωση του κόστους παραγωγής (βελτιστοποίηση ενεργειακού ισοζυγίου).

Εάν δεν υπήρχαν οι ΥΗΣ με τα παραπάνω χαρακτηριστικά το εθνικό σύστημα θα απαιτούσε υποκατάσταση της αντίστοιχης ισχύος με ευέλικτη παραγωγή (αεροστροβίλους κλπ), υψηλού κόστους και περιβαλλοντική επιβάρυνσης. Επίσης, οι ΥΗΣ ως εγκαταστάσεις πολλαπλού σκοπού (παραγωγή ενέργειας, επικουρικές υπηρεσίες, αντιπλημμυρική προστασία, αρδεύσεις, ύδρευση, αναψυχή, αλιεία) είναι πολύ σημαντικοί ιδιαίτερα για την Ελλάδα, (Μεσογειακή χώρα), όπου το πρόβλημα της λειψυδρίας είναι έντονο. Ο ρόλος τους αποβαίνει όλο και πιο σημαντικός τις ημέρες μας γιατί οι κλιματικές αλλαγές θα επηρεάσουν σημαντικά την Μεσογειακή Ζώνη με σοβαρή μείωση των βροχοπτώσεων αλλά με ένταση των ακραίων φαινομένων (πλημμύρες, καταιγίδες κλπ) [13].

Στον Πίνακα 1.1 δίνονται τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) που βρίσκονται σε λειτουργία στην Ελλάδα και στον Πίνακα 1.2 τα σημαντικότερα υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ) κατά ποταμό.

Πίνακας 1.1: Μικρά υδροηλεκτρικά έργα σε λειτουργία στην Ελλάδα [15].

A/A	Μικρός ΥΗΣ	Περιοχή	Έτος ένταξης	Εγκατ. ισχύς (MW)
1	Γλαύκος	Πάτρα	1927	1.60
2	Αγνιά	Χανιά	1929	0.30
3	Αγ. Ιωάννης	Σέρρες	1931	0.30
4	Τριπόταμος	Βέροια	1929	1.80
5	Λούρος I, II	Ήπειρος	1954	5.00
6	Λούρος III	Ήπειρος	1964	5.00
8	Γκιώνα	Άμφισσα	1989	8.00
9	Σμόκοβο	Θεσσαλία	2005	10.0
10	Μακρυχώρι	Βέροια	1992	10.8
11	Βέρμιο II	Βέροια		
12	Βέρμιο III	Βέροια		
13	Άγγιστρο	Σέρρες		
14	Τσιβλός	Ακράτα	1998	1.25

Πίνακας 1.2: Σημαντικότερα υδροηλεκτρικά έργα της Ελλάδας[15].

A/A	ΥΗΕ	ΠΟΤΑΜΟΣ	ΕΤΟΣ ΕΝΤΑΞΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΩΦΕΛΙΜΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (hm ³)
1	Κρεμαστά	Μέσος Αχελώας	1965	4	437,2	2.820,0
2	Καστράκι		1970	4	320,0	74,0
3	Στράτος I+II		1988	2+2	156,2	14,0
Σύνολο συγκροτήματος					913,4	2.908,0
4	Πλαστήρας*	Ταυρωπός (Αχελώας)	1962	3	129,3	300,0
5	Πηγές Αώου**	Αώος και Άραχθος	1990	2	210,0	170,0
6	Πουρνάρι I		1981	3	300,0	323,0
7	Πουρνάρι II		1988	3	33,6	4,5
Σύνολο συγκροτήματος					543,6	497,5
8	Λάδωνας	Λάδωνας	1956	-	70,0	50,0
9	Άγρας	Βόδας	1956	-	50,0	-
10	Εδεσσαίος	Εδεσσαίος	1969	-	19,0	-
11	Πολύφυτο	Αλιάκμονας	1974	3	375,0	1.300,0
12	Σφηκιά***		1985	3	315,0	20,0
13	Ασώματα		1985	2	108,0	14,0
Σύνολο συγκροτήματος					808,8	1.334,0
14	Θησαυρός****	Νέστος	1997	3	384,0	680,0
15	Πλατανόβρυση		2000	2	116,0	12,0
Σύνολο συγκροτήματος					500,0	692,0
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ					3.054,1	

* Εκτροπή Αχελώου (του παραπόταμου του Ταυρωπού) προς Θεσσαλία.

** Εκτροπή Αώου προς Άραχθο.

*** Αναστρέψιμος σταθμός (Άντληση από Ασώματα προς Σφακιά).

**** Αναστρέψιμος σταθμός (Άντληση από Πλατανόβρυση προς Θησαυρό).

Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες εξάντλησαν σε μεγάλο ποσοστό την ανάπτυξη του υδροδυναμικού τους και κατά συνέπεια η ηλεκτροπαραγωγή από μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα δεν αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Η Ελλάδα αποτελεί εξαίρεση: μόνο το ένα τρίτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού χρησιμοποιείται ή βρίσκεται υπό αξιοποίηση. Διαθέτει επομένως η χώρα σοβαρά ανεκμετάλλευτα αποθέματα εγχώριων, καθαρών και ανανεώσιμων υδατικών ενεργειακών πηγών, για την αξιοποίηση των οποίων υπάρχει και όλη η απαιτούμενη εγχώρια τεχνογνωσία και η κατασκευαστική υποδομή [5].

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 1.3 και στο Σχήμα 1.6 δίνονται τα μεγαλύτερα ΥΗΕ στο κόσμο.

Πίνακας 1.3: Τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα του κόσμου με βάση την ονομαστική ισχύ τους[14].

Όνομα	Χώρα	Έτος κατασκευής	Ισχύς (MW)	Επιφάνεια ταμιευτήρα (km ²)
Three Gorges	Κίνα	2011	18.300-22.500	632
Itaipu	Βραζιλία – Παραγουάη	2003	14.000	1350
Guri (Simón Bolívar)	Βενεζουέλα	1986	10.200	4250
Tucurui	Βραζιλία	1984	8.370	3014



Σχήμα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση των μεγαλύτερων υδροηλεκτρικών έργων ανά τον κόσμο [14].

Η Κίνα διαθέτει το μεγαλύτερο υδροδυναμικό στον κόσμο (περίπου το 17% του παγκόσμιου υδροδυναμικού) και δυνατότητα ετήσιας παραγωγής 1320 TWh. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο κατά το 1978 κατασκευάσθηκαν 6000 μικρά ΥΗΕ συνολικής ισχύος 940kW. Σχεδόν όλα τα μικρά ΥΗΕ της Κίνας συνδυάζονται με άλλες χρήσεις του νερού ή διευθετήσεις (άρδευση, ύδρευση, παραγωγή ενέργειας για έγγειες βελτιώσεις, έλεγχος πλημμύρας, ιχθυοπαραγωγή κλπ). [9].

Σε ό,τι αφορά τις ΗΠΑ τώρα, η υδροκίνηση είναι η παλαιότερη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, με ιστορία άνω των 140 ετών. Εξαιρουμένων των πολύ μικρών

έργων, ο πρώτος υδροστρόβιλος κατασκευάστηκε το 1869 στον ποταμό Claverack Creek στο Stotville της Νέας Υόρκης. Το 1882, ο πρώτος σύγχρονος υδροηλεκτρικός σταθμός, που τροφοδοτούσε με ρεύμα δύο εργοστάσια και ένα σπίτι, εγκαινιάστηκε στο Appleton του Wisconsin. Τέλος, το 1898 λειτούργησε στο Mechanicville της Νέας Υόρκης -επί του ποταμού Hudson- ο παλαιότερος σταθμός παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας από όσους υφίστανται σήμερα. Σε παγκόσμιο επίπεδο και σε απόλυτους αριθμούς, οι ΗΠΑ είναι ο τέταρτος μεγαλύτερος παραγωγός υδροηλεκτρικής ενέργειας, μετά από την Κίνα, τον Καναδά και τη Βραζιλία [16].

Γεωγραφικά, οι Πολιτείες των ΗΠΑ με τη μεγαλύτερη παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι κατά σειρά η Πολιτεία Ουάσιγκτον (77.422 εκατ. KW, εκ των οποίων σχεδόν το 1/11 προέρχεται από το Grand Coulee Dam), το Όρεγκον (33.324), η Νέα Υόρκη (26.535), η Καλιφόρνια (18.651), η Μοντάνα (9.776) και το Αϊντάχο (9.538) [16].

1.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

1.3.1 Ανάγκες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο, είτε αυτό είναι ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο (όπως αυτό της ηπειρωτικής χώρας) είτε είναι αυτόνομο (μεγάλης ή μικρότερης ισχύος, όπως τα νησιά ανάλογα με το μέγεθός τους) σε κάθε χρονική στιγμή πρέπει να ικανοποιείται το ισοζύγιο της ισχύος, δηλαδή η ισχύς που απορροφάται από τους καταναλωτές, το φορτίο, πρέπει να είναι ίση, με μικρές αποκλίσεις, προς αυτή που παράγουν οι σταθμοί παραγωγής (θερμικοί, υδροηλεκτρικοί κλπ) [4].

Η χρονική διακύμανση του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη ώστε να προσαρμόζεται σε αυτή η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Για τεχνικούς λόγους και σε περιόδους χαμηλού φορτίου, οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο οπότε τις χρονικές αυτές περιόδους φαίνεται να περισσεύει ισχύς στο δίκτυο [4].

Η αύξηση της συμμετοχής της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από την αιολική ενέργεια προκαλεί νέα τεχνικά προβλήματα στην διαχείριση ενός ηλεκτρικού δικτύου, τα οποία οφείλονται στην έντονη χρονική διακύμανση που παρουσιάζει η παραγωγή των αιολικών πάρκων και στην αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της παραγωγής από τα αιολικά πάρκα λόγω της έντονης μεταβλητότητας του ανέμου. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα επίσης δεν κάνουν ρύθμιση της ροής και η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται από τη φυσική παροχή του ποταμού (είναι μεγάλη κατά τις πλημμύρες και μικρή κατά τις ξηρές περιόδους). Ακόμη, η ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται στους φωτοβολταϊκούς σταθμούς μηδενίζεται τη νύχτα, ενώ την ημέρα εξαρτάται από τον καιρό (ηλιοφάνεια ή νέφωση). Κατά συνέπεια, όλες αυτές οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής, η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με τη ζήτηση. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για μικρά έως μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ανάγκη της αποθήκευσης υπήρχε και παλαιότερα, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και κατά περιόδους (τη νύχτα) η

ενέργεια που παράγουν είναι μεγαλύτερη της ζήτησης. Ωστόσο, η ανάγκη της αποθήκευσης θα μεγαλώσει στο μέλλον σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ [5].

Στην ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας λοιπόν που υπήρχε παραδοσιακά λόγω των τεχνικών ελαχίστων των μεγάλων θερμικών σταθμών παραγωγής και για την κάλυψη των αιχμών ενός δικτύου προστίθεται μία καινούργια που προέρχεται από την αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ και ιδιαίτερα των αιολικών πάρκων στο σύστημα παραγωγής.

Ο διαχειριστής ενός ηλεκτρικού δικτύου έχει να αντιμετωπίσει δύο ακραία προβλήματα [4]:

α) στις περιόδους χαμηλού φορτίου την καλύτερη δυνατή ενσωμάτωση στο δίκτυο της παραγωγής από τις ΑΠΕ και κυρίως από τα αιολικά πάρκα (προβλήματα ευστάθειας λειτουργίας από την υψηλή διείσδυση) και

β) στις χρονικές περιόδους υψηλού φορτίου (υψηλής ζήτησης) και ιδιαίτερα στις αιχμές του φορτίου την διαθεσιμότητα μεγάλης ισχύος και ενέργειας μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η ανάγκη αποθήκευσης μέρους της ενέργειας που προέρχεται από την παραγωγή αιολικών πάρκων γίνεται τόσο πιο επιτακτική, όσο η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας αρχίζει να πλησιάζει κάποια όρια πέρα από τα οποία προκαλεί προβλήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ήδη κάποιες περιοχές έχουν φθάσει στο όριο αυτό, οπότε η περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορεί να γίνει μόνο αν συνδυαστεί με αποθήκευση.

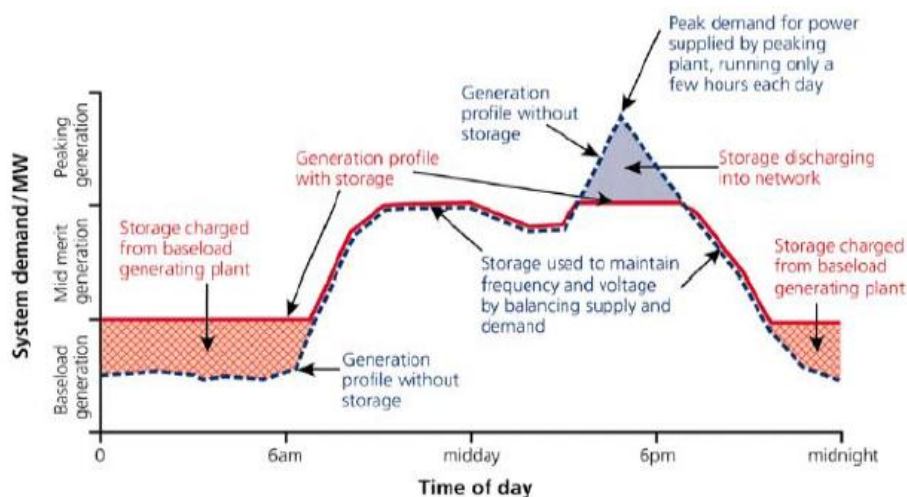
Προφανώς το πρόβλημα της διαχείρισης της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ γίνεται τόσο πιο έντονο και ανελαστικό όσο μικρότερο είναι το δίκτυο που τροφοδοτείται, όπως συμβαίνει στα νησιά, ακόμη και σε αυτά του μεγέθους της Κρήτης [4].

Συμπερασματικά, όταν μία από τις μονάδες που εμπλέκονται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγει ισχύ με έντονη μεταβλητότητα, όπως είναι η περίπτωση ενός αιολικού πάρκου, υπάρχει αβεβαιότητα ως προς τη διαθεσιμότητα ενέργειας σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή για την κάλυψη της ζήτησης και ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτής της αβεβαιότητας και ως εκ τούτου εξασφάλισης της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι μέσω της εγκατάστασης ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 1.7) που επιτρέπει την προσαρμογή του ακανόνιστου χαρακτήρα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες στη ζήτηση. Ο πλέον αποδοτικός τρόπος αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας κατά την παρούσα στιγμή, είναι η χρήση συστημάτων αντλησιοταμίευσης [6].

Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται πώς η αποθήκευση της ενέργειας λειτουργεί ως εξομάλυνση της παραγωγής ισχύος των συμβατικών μονάδων παραγωγής, μια τυπική μέρα του

έτους [7]. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ του φορτίου στη διάρκεια της ημέρας, η οποία ταυτίζεται με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των συμβατικών μονάδων στην περίπτωση απουσίας της αποθήκευσης ενέργειας. Αντίθετα, η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην παραγωγή των συμβατικών μονάδων, όταν στη λειτουργία του συστήματος ενσωματώνονται διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι με τη χρήση μεθόδων αποθήκευσης, το εύρος λειτουργίας των συμβατικών μονάδων περιορίζεται σημαντικά, οδηγώντας στην οικονομικότερη λειτουργία τους. Έτσι, στην περίπτωση που το φορτίο του συστήματος μειωθεί σημαντικά, πράγμα που συμβαίνει συνήθως τις νυχτερινές ώρες, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής παράγουν ισχύ που υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια της οποίας αποθηκεύεται για μεταγενέστερη χρήση. Έτσι ο βαθμός απόδοσής τους διατηρείται σε υψηλά επίπεδα. Τις απογευματινές ώρες όπου το φορτίο σημειώνει την αιχμή της ημέρας, αντί να ενταχθεί επιπλέον μονάδα παραγωγής που συνεπάγεται σημαντικό κόστος, η επιπλέον ισχύς που απαιτεί το φορτίο παρέχεται από την εκφόρτιση της διάταξης όπου είχε αποθηκευτεί προηγουμένως η ηλεκτρική ενέργεια.

Load Profile of a Large-Scale Energy Storage Facility



Σχήμα 1.7: Η αρχή της ενεργειακής αποθήκευσης [7].

Τα πλεονεκτήματα της ενεργειακής αποθήκευσης είναι τα ακόλουθα [7]:

- Μείωση των λειτουργικών εξόδων και του κεφαλαίου εγκατάστασης νέων συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Αύξηση της παραγωγής από ΑΠΕ
- Βελτιστοποίηση της χρήσης του υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς και διανομής και ελαχιστοποίηση των εξόδων για την ενίσχυσή του
- Λειτουργία σε αυτόνομες εφαρμογές, όπως ως συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)
- Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον
- Βελτίωση της ευελιξίας και της αξιοπιστίας του συστήματος, με την εξασφάλιση εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος.

Σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο να συμπίπτει με την περίοδο της μέγιστης ζήτησης της κατανάλωσης. Παράλληλα, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των μεταβλητών (μη ελεγχόμενων) ΑΠΕ, όπως τα αιολικά και τα ηλιακά συστήματα, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η εφαρμογή των διατάξεων των ανανεώσιμων πηγών παράλληλα με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, παρέχει στις ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ενεργειακή αποθήκευση παρέχει επίσης ευελιξία στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού, όσον αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση της συχνότητας για τις αυτόνομες μονάδες, η αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Ακόμα, τα βάση στρατηγικής εγκατεστημένα συστήματα αποθήκευσης μπορεί να αξιοποιήσουν καλύτερα τον υπάρχοντα εξοπλισμό μεταφοράς και διανομής.

Επιπρόσθετα, η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού [7,8,9].

Το σύνολο των εφαρμογών των αποθηκευτικών διατάξεων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζεται παρακάτω [52] :

- **Load Leveling:** Είναι η αποθήκευση φθηνής πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες βάσης κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και η χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής φορτίου, αντί της χρήσης των ακριβών μονάδων. Η εφαρμογή αυτή αφορά το στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Transmission Voltage Regulation:** Είναι η διατήρηση της τιμής της τάσης μέσα σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα όρια διακύμανσης, τόσο κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στα σημεία του φορτίου. Αφορά το στάδιο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Power Quality Improvement:** Διακρίνεται σε μικρής διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος η οποία σχετίζεται με την εξομάλυνση απότομων βυθίσεων και αιχμών τάσης, για χρονικό διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικά λεπτά για απαιτήσεις ισχύος < 1MW, και σε μεγάλης διάρκειας βελτίωση ποιότητας η οποία σχετίζεται με ότι και η προηγούμενη, αλλά για απαιτήσεις ισχύος > 1MW για χρονική διάρκεια 1 - 2 ώρες.
- **Spinning Reserve:** Ονομάζεται και στρεφόμενη εφεδρεία. Είναι η διατήρηση μέρους της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες και η παροχή της σε έκτακτες

χρονικές στιγμές (π.χ. λόγω βλάβης μιας γεννήτριας), προκειμένου να συνεχιστεί η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στους πελάτες μιας ηλεκτρικής εταιρίας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί αποθήκευση ισχύος της τάξης των 10 - 100 MW για χρονικό διάστημα < 30 λεπτών.

- **Black - start:** Είναι η ικανότητα ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να τεθεί σε λειτουργία μετά από την πλήρη αποκοπή του από το δίκτυο λόγω κάποιου σφάλματος. Μερικές μονάδες παραγωγής (όπως για παράδειγμα οι πυρηνικές μονάδες) απαιτούν μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για να επανεκκινηθούν μετά από ένα σφάλμα. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια για την επανεκκίνηση της θα δίνεται πλέον από την αποθηκευμένη.
- **Transmission & Distribution System Stability:** Αφορά τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος μεταφοράς και διανομής και την αποτροπή της κατάρρευσης του. Για την εφαρμογή αυτή απαιτείται ισχύς > 100 MW για χρονική διάρκεια μερικών δευτερολέπτων.
- **Frequency Control:** Είναι ο έλεγχος για τη διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή.
- **Generation Capacity Deferral:** Είναι η αναβολή της αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων παραγωγής, με την τροφοδότηση της αιχμής του φορτίου από διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί 10 – 100 MW για 2 - 4 ώρες.
- **Transmission & Distribution Facility Deferral:** Είναι η αναβολή της εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής, τροφοδοτώντας την αιχμή φορτίου μέσω μη υπερφορτωμένων γραμμών από αποθηκευτικές διατάξεις ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Renewable Energy Management:** Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για κάλυψη της ζήτησης.
- **Απόσβεση ταλαντώσεων** στις σύγχρονες γεννήτριες μετά από σφάλμα.
- **Εξομάλυνση της μεταβλητότητας της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα.**

1.3.2 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης

Σε αυτή την παράγραφο δίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των διάφορων διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [6].

- **Αντλησιοταμίευση**

Σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης, το πλεόνασμα ενέργειας που εμφανίζεται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ή αυξημένης παραγωγής (π.χ. από υπάρχοντα αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα) χρησιμοποιείται μέσω άντλησης για την ανύψωση νερού από ένα ταμιευτήρα που βρίσκεται σε ένα χαμηλό επίπεδο σε έναν άλλο που βρίσκεται σε υψηλότερη στάθμη. Σύμφωνα με αυτό, κατά την διάρκεια των ωρών αιχμής ή σε περιόδους άπνοιας, το νερό απελευθερώνεται από τον άνω ταμιευτήρα και οι υδροστρόβιλοι με τις γεννήτριες της εγκατάστασης, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, εκμεταλλευόμενοι την δυναμική ενέργεια του νερού μέσω της υψομετρικής διαφοράς

των δύο ταμιευτήρων. Έτσι, το σύστημα αυτό είναι ικανό να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος χρησιμοποιώντας την ενέργεια που προηγουμένως έχει αποθηκευτεί. Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αναλαμβάνουν την τροφοδότηση του φορτίου μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα εξαιτίας της γρήγορης απόκρισης των υδροστροβίλων και συνδυάζονται εύκολα με τις υπόλοιπες μονάδες ΑΠΕ παρέχοντας έτσι εγγυημένη ισχύ στο δίκτυο. Η τυπική απόδοση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77% και η χρονική περίοδος λειτουργίας τους κυμαίνεται από 20 μέχρι 50 χρόνια, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης. Απαιτούν μικρή συντήρηση και φύλαξη, το κόστος παραγόμενης ενέργειας δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις ενώ συνδυάζονται συχνά με άλλες διευθετήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση της πλημμύρας και συνοδεύονται με έργα υποδομής που βοηθούν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών [6].

Το κύριο μειονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι η έλλειψη κατάλληλων τοποθεσιών (απαιτούνται μεγάλες υψομετρικές διαφορές σε μικρή γεωγραφική έκταση) και το υψηλό κόστος κεφαλαίου, που οφείλεται κυρίως στην κατασκευή των δύο ταμιευτήρων με μια κατάλληλη υψομετρική διαφορά. Εξαιτίας αυτού, ένα ποτάμι θα μπορούσε να λειτουργήσει ως κάτω ταμιευτήρας για να μειωθεί το κόστος του έργου. Ένα άλλο μειονέκτημα αποτελούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή του φράγματος του έργου [4,6].

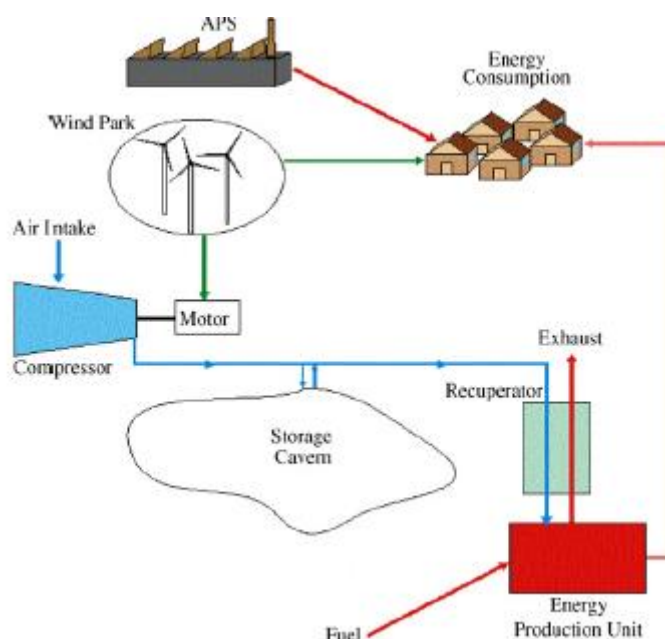
Αναλυτικότερη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συγκροτήματος γίνεται στα Κεφάλαια 2 και 4.

- Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Η γενική λογική είναι ότι σε περιόδους χαμηλής ζήτησης του φορτίου, καταναλώνεται ισχύς από συστοιχία συμπιεστών οι οποίοι συμπιέζουν αέρα που αποθηκεύεται σε κάποια δεξαμενή (Σχήμα 1.8). Οι συμπιεστές ευρίσκονται στον ίδιο άξονα με ένα ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος απορροφά ηλεκτρική ισχύ για την περιστροφή του. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του αέρα. Σε περιόδους αιχμής του φορτίου, ο πεπιεσμένος αέρας από τη δεξαμενή, αφού προθερμανθεί, εκτονώνεται σε έναν στρόβιλο παράγοντας περιστροφική ισχύ η οποία, με τη γεννήτρια που είναι προσαρτημένη στον ίδιο άξονα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική και εγχέεται στο δίκτυο. Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES) έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις υδραντλητικές μονάδες, με τυπική εγκατεστημένη ισχύ από 50 – 300 MW [52]. Το σύστημα αυτό, όπως και το σύστημα της αντλησιοταμίευσης απαιτεί ιδιαίτερες τοποθεσίες και γεωλογικές συνθήκες κατάλληλες για υπόγεια αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα.

Σε ό,τι αφορά την απόδοση του κύκλου, αν εξαιρεθεί ο ρόλος του καυσίμου και βασιζόμενοι μόνο στην απόδοση της διαστολής και συμπίεσης, ένας τυπικός βαθμός απόδοσης του κύκλου πλησιάζει στο 70%. Από άποψη χωρητικότητας, αν ληφθεί υπόψη ότι η ονομαστική ισχύς των υπαρχόντων συστημάτων αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι πάνω από 100MW, τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου

αέρα είναι τα μόνα που μπορούν να αποτελέσουν ικανές εναλλακτικές για τα συστήματα αντλησιοταμίευσης [6].



Σχήμα 1.8: Σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα [6].

- Σύστημα αποθήκευσης με σφόνδυλο

Σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο, η κινητική ενέργεια αποθηκεύεται στο σύστημα μέσω της περιστροφής ενός δίσκου ή ενός δρομέα γύρω από τον άξονα του. Η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται σε έναν σφόνδυλο είναι ευθέως ανάλογη με την ροπή αδράνειας του δρομέα και το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής. Όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ο σφόνδυλος εκμεταλλεύεται την αδράνεια του δρομέα και η κινητική ενέργεια που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί αποδίδεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σφόνδυλος τοποθετείται στο εσωτερικό ενός θαλάμου υπό κενό, αιωρούμενος με τη βοήθεια μαγνητικών τριβέων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβών. Η κινητική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται ή να αποσπάται από το σφόνδυλο μέσω μίας ηλεκτρικής μηχανής μεταβλητών στροφών τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών, η οποία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια αντίστοιχα. Ένας σύγχρονος σφόνδυλος αποτελείται από μία στρεφομένη μάζα με ρουλεμάν, που συνδέεται με τον/την κινητήρα/γεννήτρια. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα, ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στον στάτη και η παραγόμενη ροπή αυξάνει την κινητική ενέργεια του δρομέα. Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, συμβαίνει η αντίθετη διαδικασία.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά του συστήματος αποθήκευσης με σφόνδυλο είναι η υψηλή παραγόμενη ισχύς, οι σχετικά μικρές ανάγκες συντήρησης, η φιλικότητα του συστήματος ως προς το περιβάλλον, η συμβολή του συστήματος στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (γρήγορη και άμεση ηλεκτροπαραγωγή) και η υψηλή συνολική

απόδοση (85%). Οι απώλειες δεν είναι υψηλότερες του 2% της ονομαστικής ισχύος του συστήματος. Παρ'όλα αυτά, τα συστήματα αυτά δεν ενδείκνυνται για ισχείς πάνω από κάποιες εκατοντάδες kW και η βασική περίοδος λειτουργίας αποτελεί διάστημα κάποιων ωρών. Για αυτούς τους λόγους, το σύστημα αποθήκευσης με σφόνδυλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για πολύ μικρές εγκαταστάσεις, όπως τα πολύ μικρά νησιά [6].

- Σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες (συσσωρευτές)

Οι μπαταρίες αποτελούν γενικά το πιο δημοφιλές μέσο αποθήκευσης. Τα στοιχεία αυτού του συστήματος αποθήκευσης είναι η συστοιχία των συσσωρευτών, το σύστημα μετατροπής ενέργειας και το σύστημα ελέγχου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι το βάθος εκφόρτισης, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο αριθμός των στοιχείων εν σειρά και ο έλεγχος της φόρτισης-εκφόρτισης. Η αποθήκευση με το σύστημα αυτό θεωρείται μια ώριμη μέθοδος αποθήκευσης και ενδείκνυται για αποθήκευση μικρών ποσοτήτων ενέργειας καθώς αποτελούν απλό σύστημα αποθήκευσης. Κοστίζουν όμως ακριβά για μεγάλα μεγέθη καθώς απαιτούν συντήρηση και ηλεκτρονικά μέσα για την ανόρθωση, τη μετατροπή συχνοτήτων και την σταθεροποίηση τάσης και συχνότητας, για κατανάλωση εναλλασσόμενου ρεύματος [6].

- Σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες ροής

Οι μπαταρίες ροής αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία. Η ενέργεια αποθηκεύεται και απελευθερώνεται μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Τα στάδια φόρτισης και εκφόρτισης συνιστούν την μετατροπή από ηλεκτρική σε χημική ενέργεια και αντίστροφα. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος αποθήκευσης είναι ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης εξαρτάται αποκλειστικά από την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρολυτών ενώ η ισχύς καθορίζεται από την ενεργό περιοχή της στοιβάς του στοιχείου (cell stack).

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες ροής αποτελείται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών στοιχείων, καθένα από τα οποία έχει 2 διαχωριστικά (1 για κάθε ηλεκτρολύτη), τα οποία διαχωρίζονται από μία μεμβράνη. Οι δύο ηλεκτρολύτες αντλούνται από τις δεξαμενές μέσω της στοιβάς του στοιχείου και της μεμβράνης. Διερχόμενος μέσα από την μεμβράνη, ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται και ο άλλος ανάγεται, παράγοντας ρεύμα διαθέσιμο στο εξωτερικό κύκλωμα. Οι χρησιμοποιούμενες αντλίες, απαραίτητες για την κυκλοφορία των ηλεκτρολυτών, συμβάλλουν στην διατήρηση της θερμοκρασίας του συστήματος στο επιθυμητό επίπεδο.

Η ικανότητα αποθήκευσης αυτού του συστήματος εξαρτάται όπως προαναφέρθηκε από την χωρητικότητα των δεξαμενών των ηλεκτρολυτών. Προφανώς, αυξάνοντας την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρολυτών, το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης κλίμακας συστήματα αποθήκευσης, συγκρίσιμα με τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και πεπιεσμένου αέρα [6].

- Αποθήκευση με κυψέλες καυσίμου

Σε ό,τι αφορά τις κυψέλες καυσίμου, ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο, το οποίο μαζί με το οξυγόνο παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, ενώ έχει ως απόβλητο το νερό. Με τις κυψέλες καυσίμου παρατηρείται απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική με την ηλεκτροχημική γεννήτρια, καρδιά της οποίας είναι η κυψέλη καυσίμου. Η όλη διαδικασία μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης μιας και δεν υπάρχει περιορισμός από το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα [3].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψέλων καυσίμου που χρησιμοποιούνται και μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται γενικά από δύο ηλεκτρόδια που περιβάλλονται από έναν ηλεκτρολύτη. Το οξυγόνο περνά από το ένα ηλεκτρόδιο και το υδρογόνο από το άλλο, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και αποβάλλοντας νερό. Σε γενικές γραμμές, μία κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σαν μπαταρία. Παρολ' αυτά, μια κυψέλη καυσίμου δεν απαιτεί επαναφόρτιση. Όσο ένα καύσιμο παρέχεται στην κυψέλη, ηλεκτρική ενέργεια παράγεται. Οι περιορισμοί και στο σύστημα αυτό έγκειται στο μέγεθος της δεξαμενής καυσίμου. Η ενέργεια που παράγει μία κυψέλη καυσίμου εξαρτάται από τον τύπο της κυψέλης, την θερμοκρασία λειτουργίας και τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της απόδοσης της χημικής αντίδρασης. Τα στάδια της παραγωγής και της αποθήκευσης είναι διαφοροποιημένα.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι η χαμηλή συνολική απόδοση, η οποία εκτιμάται γύρω στο 30-40% για έναν πλήρη κύκλο. Οι απώλειες εντοπίζονται στην ηλεκτρόλυση του νερού για παραγωγή υδρογόνου, στην φάση της αποθήκευσης και στην παραγωγή μέσω της κυψέλης καυσίμου [6].

Είναι πιθανόν ότι οι κυψέλες καυσίμου θα συμβάλλουν ουσιαστικά στην ενεργειακή κάλυψη των αναγκών στο τέλος της δεκαετίας του 2020 [3].

1.4 Αντικείμενο, σκοπός και δομή της διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών για αντλησιοταμίευση και ειδικότερα η σύγκριση των τεχνολογιών άντλησης με σταθερές και μεταβλητές στροφές. Συγκεκριμένα μελετάται ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης για αποθήκευση αιολικής ενέργειας με αντλίες μεταβλητών και σταθερών στροφών. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται στη διπλωματική εργασία στηρίζονται στα ονομαστικά μεγέθη δύο ανεμογεννητριών [32], σε δεδομένα και χαρακτηριστικές αντλιών που λήφθηκαν από την εργασία [50] και σε δύο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου [51]. Όλοι οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab και των αντίστοιχων εξισώσεων.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης, με έμφαση στις

τεχνολογίες άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές. Στη συνέχεια, εξάγονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις των αντλιών και πιο συγκεκριμένα, προσδιορίζονται οι σχέσεις παροχής – στροφών και ισχύος – στροφών, λαμβάνοντας υπόψη δύο χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας [50], από τις οποίες προσδιορίζονται στην συνέχεια η βέλτιστη παροχή και ισχύς άντλησης. Ακολούθως, γίνεται μια ειδικότερη εφαρμογή για δεδομένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου αλλά και συγκεκριμένες τεχνολογίες ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου [51] και τις διαθέσιμες ανεμογεννήτριες (μία ανεμογεννήτρια σταθερών και μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών) [32] προσδιορίζονται τέσσερα σενάρια μελέτης και υπολογίζεται για κάθε σενάριο και περίπτωση άντλησης (με σταθερές και μεταβλητές στροφές) η ηλεκτροπαραγωγή από τις ανεμογεννήτριες, ο όγκος άντλησης για την διαθέσιμη ηλεκτροπαραγωγή, η αντίστοιχη υδροηλεκτρική παραγωγή αλλά και ο βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης – παραγωγής. Πραγματοποιείται έτσι μια ποσοτική σύγκριση της άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές. Τέλος, υπολογίζεται το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την αντλησιοταμίευση για δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις: α) περίπτωση άντλησης με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση από το δίκτυο και β) περίπτωση άντλησης χωρίς την δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Συγκρίνονται πάλι οι περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές αντίστοιχα. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των Κεφαλαίων που συναντώνται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιείται μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και στα βασικά μέρη που τα απαρτίζουν. Ακολούθως, περιγράφονται οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροπαραγωγή από αιολική και υδραυλική ενέργεια. Στην συνέχεια, εξηγείται η αναγκαιότητα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την αντιμετώπιση των αιχμών του φορτίου και της μεγάλης διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή. Τέλος, περιγράφονται διάφορες διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης με έμφαση κυρίως στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική περιγραφή των υδροηλεκτρικών σταθμών και των υδροδυναμικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στην αντλησιοταμίευση. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η δομή ενός υδροηλεκτρικού έργου, η λειτουργία των φυγόκεντρων αντλιών που συμμετέχουν στην άντληση ηλεκτρικής ενέργειας και η λειτουργία των υδροστροβίλων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των υδροηλεκτρικών έργων και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Τέλος, αναλύεται η λειτουργία των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων, εστιάζοντας κυρίως στην αρχή λειτουργίας τους, στις διάφορες παραλλαγές του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και της διαμόρφωσης της εγκατάστασης αλλά και στις απώλειες που παρατηρούνται σε έναν πλήρη κύκλο άντλησης - παραγωγής.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια. Αρχικά, αναφέρονται οι προκλήσεις με τις οποίες έρχονται αντιμέτωποι οι διαχειριστές των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και σημειώνονται τα διάφορα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν λόγω της μεγάλης αιολικής διείσδυσης και της μεταβλητότητας του ανέμου. Στην συνέχεια, αναλύεται η τυπική δομή μιας ανεμογεννήτριας και ο τρόπος λειτουργίας της. Ακολούθως, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών ανάλογα με την διεύθυνση του άξονα του δρομέα τους, το μέγεθος τους, την θέση εγκατάστασης τους, την ταχύτητα περιστροφής τους, την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους και τον τρόπο ελέγχου που χρησιμοποιούν.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση. Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση της μεθόδου της αντλησιοταμίευσης και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα της. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η λειτουργία ενός υβριδικού σταθμού καθώς και κάποιες εφαρμογές του. Ακολούθως, γίνεται μια εκτενής περιγραφή της τεχνολογικής προσέγγισης της αποθήκευσης και πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές, οι οποίες άλλωστε εφαρμόζονται και στα επόμενα Κεφάλαια στα οποία γίνεται μια ειδικότερη εφαρμογή σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης. Τέλος, παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία δύο υβριδικών ενεργειακών έργων με αιολική παραγωγή και αντλησιοταμίευση, στην Ικαρία και στην Ισπανία αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 5 εξάγονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις των αντλιών και πραγματοποιείται μια προσέγγιση της αναλυτικής χαρακτηριστικής εξίσωσης της αντλίας. Όπως έχει προαναφερθεί, λαμβάνονται δύο χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας [50] πάνω στις οποίες στηρίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, πραγματοποιείται μια κανονικοποίηση των εξισώσεων της αντλίας και εξάγονται οι χαρακτηριστικές ολικού ύψους και ισχύος συναρτήσει της διακινούμενης παροχής για τέσσερις δεδομένες ταχύτητες περιστροφής. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο σχετικός βαθμός απόδοσης της αντλίας για τις τέσσερις αυτές ταχύτητες περιστροφής και γίνεται μια πολυωνυμική προσέγγιση του σχετικού βαθμού απόδοσης έτσι ώστε να προσδιοριστεί συναρτήσει των στροφών. Ακολούθως, προσεγγίζεται η αναλυτική εξίσωση της αντλίας και τέλος, εξάγονται δύο σχέσεις για την παροχή και την ισχύ που καταναλώνει η αντλία συναρτήσει των στροφών της, από τις οποίες προσδιορίζονται στην συνέχεια η βέλτιστη παροχή και ισχύς άντλησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα Κεφάλαια 6 και 7.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής από δύο δεδομένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου για αντλησιοταμίευση. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί μέσω του διαθέσιμου συστήματος αντλησιοταμίευσης αλλά και η αντίστοιχη ηλεκτροπαραγωγή που δίνει ο υδροηλεκτρικός σταθμός. Παρουσιάζονται οι διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου και οι διαθέσιμοι τύποι ανεμογεννητριών. Πιο αναλυτικά στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται δύο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου και μία

ανεμογεννήτρια σταθερών και μία ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, οι οποίες λαμβάνονται από τις εργασίες [51], [32] αντίστοιχα. Με συνδυασμό των παραπάνω, διατυπώνονται τα σενάρια που εξετάζονται στη παρούσα διπλωματική εργασία και υπολογίζεται η διαθέσιμη αιολική παραγωγή για κάθε σενάριο. Ακολούθως, δίνεται μια περιγραφή του αντλιοστασίου που χρησιμοποιείται και υπολογίζεται ο διαθέσιμος όγκος άντλησης για τη δεδομένη ηλεκτροπαραγωγή για την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές για διάφορες περιπτώσεις αντλιών που λειτουργούν παράλληλα. Έπειτα δίνεται η δομή της υδροηλεκτρικής μονάδας και υπολογίζεται η υδροηλεκτρική παραγωγή με βάση τον όγκο που έχει αποθηκευτεί για κάθε περίπτωση άντλησης αλλά και ο βαθμός απόδοσης ενός πλήρους κύκλου άντλησης - παραγωγής για τις παραπάνω περιπτώσεις άντλησης. Τέλος, συγκρίνονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις διάφορες τεχνολογίες ανεμογεννητριών και τις τρεις περιπτώσεις άντλησης που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο αυτό.

Στο Κεφάλαιο 7, εξετάζεται το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την αντλησιοταμίευση για δύο περιπτώσεις: α) περίπτωση όπου υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση και β) περίπτωση όπου δεν υπάρχει η παραπάνω δυνατότητα να αγορασθεί επιπρόσθετη ενέργεια από το δίκτυο. Γενικά, όταν η ισχύς που μπορεί να αντληθεί είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ισχύος κάθε αντλίας, τότε αναγκαστικά παρατηρείται απόρριψη αιολικής ισχύος, εκτός και αν υπάρχει δυνατότητα να αγορασθεί η επιπρόσθετη ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει ακόμη μία αντλία και έτσι να μην απορριφθεί αιολική ισχύς. Αρχικά, υπολογίζεται το κέρδος από την πώλησης της υδροηλεκτρικής παραγωγής που έχει προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 6 για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, στην περίπτωση των μεταβλητών και σταθερών στροφών, χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Στην συνέχεια, υπολογίζεται το κέρδος που προκύπτει από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής, πάλι για την περίπτωση αντλιών σταθερών και μεταβλητών στροφών, με δυνατότητα όμως αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση στην περίπτωση αυτή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 8, όπου συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη και τους υπολογισμούς των προηγούμενων κεφαλαίων. Αναφέρονται ακόμα κάποια ζητήματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία και μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

Κεφάλαιο 2

Υδροδυναμικές μηχανές και Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

2.1 Γενικά για την υδραυλική ενέργεια

Εάν το νερό μιας φυσικής ροής συλλεγεί σε μια υψηλότερη στάθμη z_E , οδηγηθεί σε μια χαμηλότερη στάθμη z_A αφού διέλθει μέσω ενός υδροστροβίλου γίνεται δυνατή η μετατροπή της ανά μονάδα μάζας ενέργειας [17]:

$$g (z_E - z_A) \quad (2.1)$$

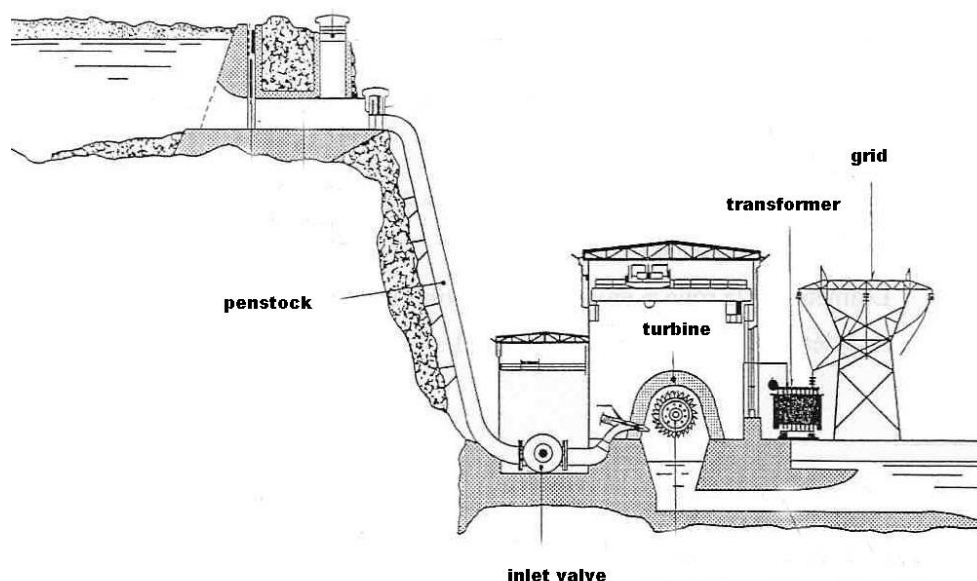
της διερχόμενης παροχής σε μηχανική ενέργεια, αφού αφαιρεθούν οι πάσης φύσεως απώλειες.

Επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια, δηλαδή η κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο, δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης της μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Για το λόγο αυτό, το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (Σχήμα 2.1) [17].

Το Υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) είναι ένα έργο σύνθετο που περιλαμβάνει σημαντικά έργα πολιτικού μηχανικού καθώς και σημαντικό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Τα κύρια μέρη των έργων του πολιτικού μηχανικού ενός μικρού ΥΗΕ είναι: Το φράγμα, η υδροληψία, τα συστήματα προσαγωγής και απαγωγής του νερού και ο υδροηλεκτρικός σταθμός παραγωγής (ΥΗΣ). Με τον όρο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός του ΥΗΕ εννοούνται οι υδροστροβίλοι, οι ηλεκτρογεννήτριες, οι μετασχηματιστές, οι ασφαλειοαποξυέκτες, τα ανυψωτικά μηχανήματα (γερανογέφυρες), το σύστημα πεπιεσμένου ελαίου και αέρα και οι αυτοματισμοί που περιλαμβάνονται στον βοηθητικό εξοπλισμό. Κάθε ηλεκτρογεννήτρια είναι κατ' ευθείαν συζευγμένη με τον υδροστροβίλο στην ίδια άτρακτο, εκτός από κάποιες μικρές μονάδες στις οποίες παρεμβάλλεται γραναζωτή μετάδοση. Σκοπός των μετασχηματιστών είναι η ανύψωση της τάσεως που παράγουν οι γεννήτριες στην υψηλή τάση του διασυνδεδεμένου δικτύου ώστε η μεταφορά της ενέργειας να γίνεται με μικρότερες απώλειες [17].

Η επιλογή της θέσεως του σταθμού εξαρτάται βασικά από τον τύπο της υδραυλικής ενέργειας και το είδος της εγκαταστάσεως (ροής ποταμού, υδατόπτωση κτλ). Στη συνήθη περίπτωση κατασκευής τεχνητής λίμνης χρειάζεται κατάλληλη επιλογή της θέσεως του φράγματος και του υδροηλεκτρικού σταθμού. Η δημιουργία τεχνητής λίμνης πρέπει να βασιστεί σε υδρολογικές μελέτες και στατιστικά στοιχεία συλλογής

ύδατος στη λεκάνη απορροής από διάφορες προελεύσεις (χειμάρροι, χιονοπτώσεις κτλ). Η στεγανότητα του εδάφους της λεκάνης υπό συνθήκες πλήρους φορτίσεως αποτελεί βασικό δεδομένο του προβλήματος και πρέπει να στηρίζεται σε κατάλληλες εδαφολογικές και βραχομηχανικές μελέτες. Στις περιπτώσεις που τα ΥΗΕ συνδυάζονται με άλλα έργα όπως άρδευση, ύδρευση κτλ η θέση του φράγματος επηρεάζεται και από αυτά τα έργα. Τέλος, τα μικρά ΥΗΕ (ισχύς μικρότερη από 10MW) δεν προυποθέτουν την κατασκευή φράγματος και μεγάλης τεχνητής λίμνης [3].



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση υδροηλεκτρικού έργου[18].

2.2 Φυγόκεντρες αντλίες

Οι στροβιλομηχανές μπορούν γενικά να ορισθούν ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια ρευστού ή αντίστροφα (δηλαδή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια) μέσω συνεχούς ροής του ρευστού και σταθερής περιστροφικής κίνησης.

Η μετατροπή της ενέργειας του ρευστού σε μηχανική ενέργεια ή το αντίστροφο, λαμβάνει χώρα σε ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής το οποίο ονομάζεται πτερωτή στην περίπτωση των αντλιών και δρομέας στην περίπτωση των στροβίλων. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται μέσω συνεχούς ροής του ρευστού δια μέσου της μηχανής και της σταθερής περιστροφικής κίνησης αυτής. Στην στρεφόμενη με γωνιακή ταχύτητα ω άτρακτο, αναπτύσσεται στρεπτική ροπή M , με αποτέλεσμα της εμφάνιση μηχανικής ισχύος P [17]:

$$P = M\omega \quad (2.2)$$

Οι στροβιλομηχανές διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες:

- Τις εργοστροβιλομηχανές (αντλίες)
- Τις κινητήριες στροβιλομηχανές ή στροβίλους

Στην πρώτη κατηγορία, πραγματοποιείται μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, η οποία προσδίδεται από έναν κινητήρα στην στρεφόμενη άτρακτο και από αυτήν στην πτερωτή, σε ενέργεια που μεταφέρεται στο ρευστό. Στην περίπτωση αυτή, η ροπή που αναπτύσσεται στην πτερωτή είναι ανθιστάμενη και για να στρέφεται το σύστημα στην σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω πρέπει η ανθιστάμενη αυτή ροπή να είναι ίση με την κινητήρια ροπή του συνδεδεμένου κινητήρα.

Στην δεύτερη κατηγορία, ενέργεια αφαιρείται από το διερχόμενο ρευστό και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Άρα η ροπή που αναπτύσσεται στον δρομέα και από αυτόν στην άτρακτο είναι κινητήρια και για να στρέφεται το σύστημα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω θα πρέπει η άτρακτος να συνδέεται με μια μηχανή που απορροφά την μηχανική ενέργεια προβάλλοντας ροπή ανθιστάσεως. Μια τέτοια μηχανή είναι η ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την μηχανική σε ηλεκτρική ισχύ. Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν οι υδροστροβίλοι.

Αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι σημαντικό ρόλο στα δύο παραπάνω είδη μετατροπής παίζει η κινητική ενέργεια του ρευστού. Για τον λόγο αυτό οι στροβιλομηχανές ασυμπίεστου ρευστού χαρακτηρίζονται και ως “υδροδυναμικές μηχανές”, όρος που τονίζει την σημασία της κινητικής του ενέργειας στην ροή ενέργειας διά μέσου της μηχανής [17].

Η αντλία τώρα χρησιμοποιείται για την διακίνηση ενός υγρού μεταξύ 2 δεξαμενών διαφορετικής στάθμης, συνήθως από την χαμηλότερη στην υψηλότερη. Η διακίνηση αυτή γίνεται μέσω σωλήνωσης στην οποία παρεμβάλλεται η αντλία. Οι αντλίες προσδίδουν ενέργεια στο υγρό, η οποία ανθιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του υγρού μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής και στην ενέργεια που δαπανάται λόγω υδραυλικών απωλειών στη σωλήνωση μέσω της οποίας γίνεται η διακίνηση του υγρού. Σημειώνεται ότι στις περισσότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται πλέον οι φυγόκεντρες αντλίες.

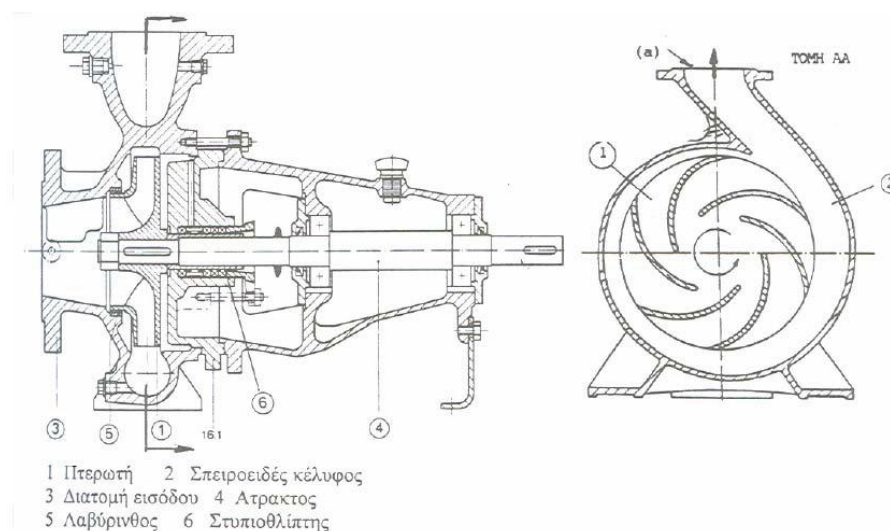
Τα βασικότερα τμήματα από τα οποία αποτελείται μια φυγόκεντρη αντλία δίνονται παρακάτω [17]:

- Το τμήμα εισόδου, σκοπός του οποίου είναι να οδηγήσει το ρευστό από την διατομή εισόδου της μηχανής στην διατομή εισόδου της πτερωτής. Η σύνδεση του τμήματος αυτού με τον αγωγό αναρρόφησης γίνεται μέσω φλάντζας.
- Την πτερωτή, στην οποία πραγματοποιείται μεταφορά ενέργειας από την μηχανή στο ρευστό. Η πτερωτή εδράζεται σε μια άτρακτο και περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα της τελευταίας.

- Την άτρακτο, πάνω στην οποία εδράζεται η περρωτή. Λαμβάνει την μηχανική ροπή που παράγει ο κινητήρας και την μεταβιβάζει στην περρωτή. Στηρίζεται με κατάλληλα έδρανα.
- Το τμήμα εξόδου, το οποίο συλλέγει το ρευστό που εξέρχεται από την περρωτή και το οδηγεί στην διατομή εξόδου της αντλίας. Η σύνδεση του τμήματος αυτού με τον αγωγό κατάθλιψης γίνεται πάλι μέσω φλάντζας.
- Τον μηχανισμό στεγανότητας, ο οποίος είναι απαραίτητος ώστε να μην διαφεύγει το ρευστό από το τμήμα της περρωτής στο υπόλοιπο εσωτερικό της μηχανής.
- Το εξωτερικό κέλυφος, το οποίο συνδέει και περιβάλλει όλα τα υπόλοιπα τμήματα της αντλίας, ώστε να εξασφαλίζεται η εξωτερική στεγανότητα της μηχανής. Συχνά τον ρόλο του εξωτερικού κελύφους επιτελεί ένα σπειροειδές τμήμα εξόδου που περιβάλλει την περρωτή.

Το ρευστό εισέρχεται στο τμήμα εισόδου, όπου εξασφαλίζεται η ομοιομορφία της ροής, που απαιτείται στην είσοδο της περρωτής. Όταν εισέρχεται στην περρωτή, το ρευστό είναι απαλλαγμένο συστροφής. Τέλος, συλλέγεται από το τμήμα εξόδου της αντλίας και οδηγείται στην έξοδο της μηχανής, όπου έχει ομοιόμορφη ροή και μια συγκεκριμένη τιμή πίεσης.

Στο Σχήμα 2.2 δίνεται σχηματικά η διαμόρφωση μιας τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την περρωτή σε πρόβολο.



Σχήμα 2.2: Τυπική διαμόρφωση μιας φυγόκεντρης αντλίας [17].

Η ροή του υγρού δια μέσου μιας αντλίας συνοδεύεται από απώλειες στις οποίες αντιστοιχεί η διαφορά ισχύος $P - P_i$, όπου η ισχύς P είναι η ισχύς που καταναλώνει η

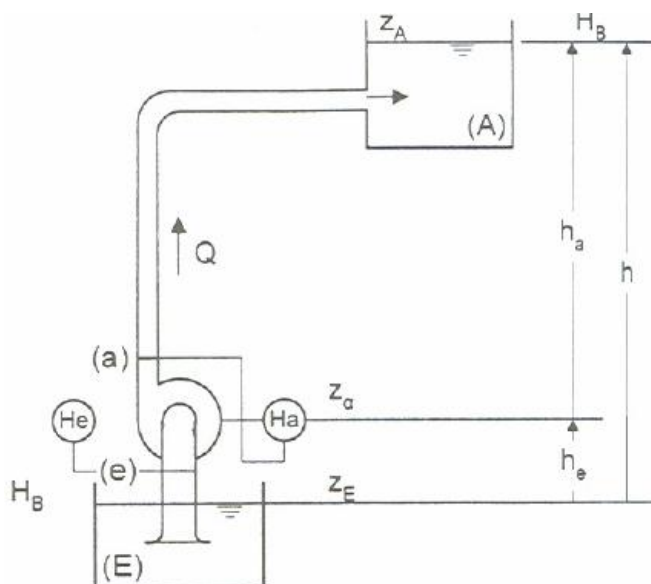
αντλία από τον κινητήρα της και η ισχύς P_i η ισχύς που παραλαμβάνει το υγρό. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε τρία είδη [17]:

- Υδραυλικές απώλειες

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια H που παραλαμβάνει το υγρό από την αντλία, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης ύδατος (mΣΥ), ονομάζεται πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας, και έτσι ορίζεται ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της μονάδας μάζας του υγρού, εκφρασμένη σε μονάδες ύψους στήλης υγρού, μεταξύ της διατομής κατάθλιψης και της διατομής αναρρόφησης (ή εναλλακτικά η διαφορά της θεωρητικής ενέργειας H_u που προσδίδει η πτερωτή στο υγρό μείον τις υδραυλικές απώλειες της ροής διαμέσου της μηχανής). Είναι δηλαδή:

$$H = H_a - H_e = H_u - \Delta h_{\text{fea}} \quad (2.3)$$

Όπου με τον δείκτη e συμβολίζεται η συμβατική διατομή εισόδου (διατομή αναρρόφησης) της αντλίας και με a η συμβατική διατομή εξόδου (διατομή κατάθλιψης) της αντλίας (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Διάταξη απλού αντλιοστασίου [17].

Στο Σχήμα 2.3 δίνεται σχηματικά η απλή αντλητική εγκατάσταση στην οποία η αντλία αντλεί το υγρό από την δεξαμενή αναρρόφησης Ε και το καταθλίβει στην δεξαμενή κατάθλιψης Α. Έστω z_E και z_A η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στις δεξαμενές αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα μετρημένες από κοινή στάθμη αναφοράς που συνήθως είναι η στάθμη της θάλασσας για τις μεγάλες αντλητικές εγκαταστάσεις. Το τμήμα της σωλήνωσης από την δεξαμενή αναρρόφησης μέχρι την διατομή εισόδου (e) της αντλίας ονομάζεται σωλήνωση αναρρόφησης, ενώ το τμήμα της σωλήνωσης από την διατομή εξόδου (a) της αντλίας μέχρι την δεξαμενή κατάθλιψης ονομάζεται σωλήνωση κατάθλιψης. Ως στάθμη της αντλίας z_a συμβολίζεται η στάθμη της ατράκτου της αντλίας εάν αυτή είναι οριζόντια

ή η στάθμη της διατομής εισόδου στην πτερωτή εάν αυτή είναι κατακόρυφη. Ως γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης h_e ορίζεται η υψομετρική διαφορά $z_a - z_E$ της αντλίας από την στάθμη αναρρόφησης ενώ ως γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης h_a ορίζεται η υψομετρική διαφορά $z_A - z_a$ της δεξαμενής κατάθλιψης από την αντλία.

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης λοιπόν της αντλίας, συμβολίζεται με η_h και ορίζεται ως:

$$\eta_h = \frac{H}{H_u} = \frac{H_u - \Delta h_{fea}}{H_u} = 1 - \frac{\Delta h_{fea}}{H_u} \quad (2.4)$$

Όπου οι υδραυλικές απώλειες Δh_{fea} αποτελούνται από τις υδραυλικές απώλειες τριβής Δh_τ και τις υδραυλικές απώλειες κρούσεως Δh_a .

- Ογκομετρικές απώλειες

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ο λόγος:

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_u} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_u} \quad (2.5)$$

Όπου:

- ✓ Q : η συνολική παροχή που διέρχεται από την αντλία, δηλαδή η παροχή που διέρχεται από τις διατομές εισόδου (e) - εξόδου (a) της αντλίας.
- ✓ Q_u : η παροχή που διέρχεται από την πτερωτή
- ✓ ΔQ : η διαφορά της παροχής που διέρχεται από την πτερωτή μείον την συνολική παροχή.

Η τιμή του ογκομετρικού βαθμού απόδοσης της αντλίας καθορίζεται με οικονομοτεχνικά κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος και τον τύπο της αντλίας (ακτινικής, μεικτής ροής). Η τιμή του είναι της τάξεως του 0.96 για μικρές αντλίες και μέχρι του 0.99 για μεγάλες αντλίες.

- Μηχανικές απώλειες

Από την μηχανική ισχύ που προσδίδεται στην άτρακτο της αντλίας μέσω του κινητήρα, ένα τμήμα της, το οποίο συμβολίζεται με P_m , δαπανάται για την υπερνίκηση των απωλειών τριβής των στρεφόμενων μερών της αντλίας ενώ το υπόλοιπο P_u , αποτελεί την περιφερειακή ισχύ της πτερωτής και διατίθεται στην πτερωτή ώστε να το μετατρέψει σε υδραυλική ενέργεια που προσδίδεται στο διακινούμενο υγρό.

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται παρακάτω:

$$\eta_m = \frac{P_u}{P} \quad (2.6)$$

Όπου $P=P_u+P_m$, η μηχανική ισχύς που καταναλώνει η αντλία και ισούται με το άθροισμα των απωλειών τριβής και της περιφερειακής ισχύς της πτερωτής.

Η ισχύς των μηχανικών απωλειών P_m διακρίνεται στην ισχύ P_E , που οφείλεται στις απώλειες τριβής των εδράνων και των στυπιοθλιπτών και την ισχύ P_S , που αποτελεί την ισχύ του στρεφόμενου δίσκου που οφείλεται στην τριβή μεταξύ της στρεφόμενης πτερωτής (στις εξωτερικές επιφάνειες της πλήμνης και της στεφάνης) και του ρευστού που βρίσκεται στα διάκενα αυτά. Είναι δηλαδή:

$$P_m = P_E + P_S \quad (2.7)$$

Η τιμή του μηχανικού βαθμού απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 0.91 (για μικρές αντλίες πλήρως ακτινικής ροής) και 0.985 (για μεγάλου μεγέθους αντλίες μεικτής ροής).

Συμβολίζοντας τώρα με Q την παροχή όγκου του υγρού που διακινείται από την αντλία, η θεωρητική ισχύς P_i , δηλαδή η ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που παραλαμβάνεται από το διερχόμενο υγρό είναι ίση προς:

$$P_i = \gamma Q H \quad (2.8)$$

Όπου $\gamma=\rho g$ είναι το ειδικό βάρος του υγρού, με τιμή στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας $\gamma=9810 \text{ kN/m}^3$.

Η πραγματική ισχύς P που καταναλώνει η αντλία για την διακίνηση της παροχής Q και την πρόσδοση ενέργειας H ανά μονάδα μάζας του υγρού θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που παραλαμβάνεται από το υγρό, δηλαδή τη P_i , κατά τις διάφορες απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της αντλίας κατά τη λειτουργία της. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως:

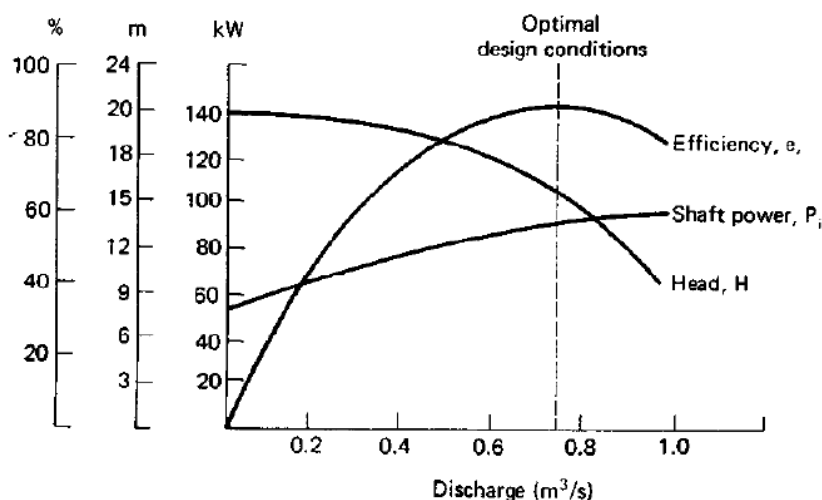
$$\eta = \frac{P_i}{P} = \frac{\gamma H Q}{P} \quad (2.9)$$

Όπου ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας προσδιορίστηκε παραπάνω και ισούται με το γινόμενο των τριών επιμέρους βαθμών απόδοσης της αντλίας, δηλαδή του υδραυλικού, του ογκομετρικού και του μηχανικού. Από τους τρεις αυτούς βαθμούς απόδοσης, ο μηχανικός και ο ογκομετρικός εξαρτώνται ελάχιστα από το σημείο λειτουργίας ενώ οι υδραυλικές απώλειες και αντίστοιχα ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης μεταβάλλονται πολύ έντονα με την διακινούμενη παροχή. Κατ' επέκταση, ο ολικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται κυρίως από τον υδραυλικό βαθμό απόδοσης. Η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης μιας αντλίας κυμαίνεται από 50% για μικρού μεγέθους αντλίες έως 85-90% για μεγάλου μεγέθους αντλίες ($P>50 \text{ MW}$).

Τελικά, η ισχύς P που απαιτεί μια αντλία για να διακινήσει υγρό παροχής, Q , και να του προσδώσει ενέργεια ανά μονάδα μάζας του, H , δίνεται από τη σχέση:

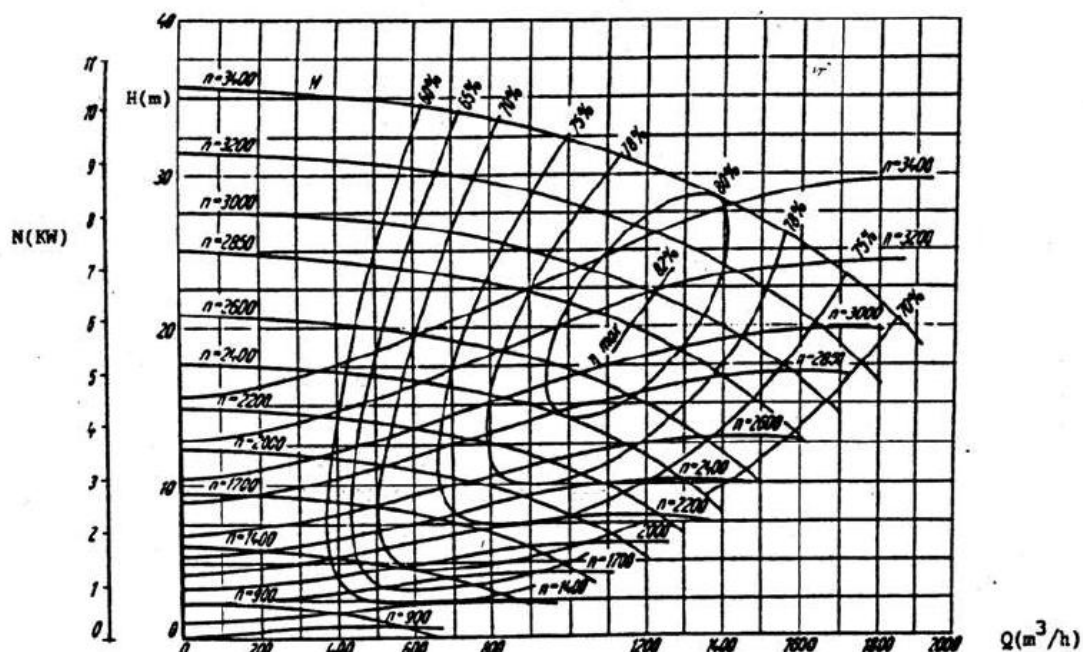
$$P = \frac{P_u}{\eta_m} = \frac{\gamma H_u Q_u}{\eta_m} = \frac{\gamma H Q}{\eta_h \eta_m \eta_Q} \quad (2.10)$$

Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες λειτουργίας της, οι οποίες δίνουν στοιχεία σχετικά με την μεταβολή του ολικού ύψους, της απόδοσης και της ισχύος της αντλίας συναρτήσει της διακινούμενης παροχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος, ολικού ύψους και βαθμού απόδοσης αντλίας συναρτήσει της διακινούμενης παροχής [17].

Από το Σχήμα 2.4 φαίνεται πως υπάρχει ένα σημείο στο οποίο σημειώνεται ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης της αντλίας. Η ταχύτητα περιστροφής για την οποία εμφανίζεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης καλείται κανονική ταχύτητα περιστροφής και η αντλία έχει την βέλτιστη απόδοση στο σημείο αυτό (κανονικό σημείο λειτουργίας). Όμως μια αντλία μπορεί να δουλεύει και σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής, για κάθε μία από τις οποίες υπάρχει μία διαφορετική καμπύλη λειτουργίας καθώς και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Τυπική μορφή καμπυλών λειτουργίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης [17].

2.3 Υδροστρόβιλοι

Ο υδροστρόβιλος μετατρέπει την δυναμική και κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια (περιστροφή) και μεταδίδει αυτή την κίνηση σε ηλεκτρογεννήτρια περιστρεφόμενου δρομέα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με την πάροδο των δεκαετιών βελτιώθηκε η σχετική τεχνολογία σε τέτοιο βαθμό, ώστε στο τέλος του 20^{ου} αιώνα κατασκευάζονται υδροστρόβιλοι με ισχύες, από 10kW μέχρι αρκετές εκατοντάδες MW. Αυτοί οι υδροστρόβιλοι σχεδιάζονται με διαφορετικές τεχνικές λεπτομέρειες, ανάλογα με τις γεωγραφικές συνθήκες της περιοχής που θα εγκατασταθούν, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μια ποτάμια μονάδα παραγωγής ή σε ένα σταθμό με μεγάλο ύψος πτώσης νερού. Οι μεγαλύτεροι υδροστρόβιλοι που έχουν κατασκευαστεί μέχρι το τέλος του 20^{ου} αιώνα έχουν διάμετρο περίπου 11 μέτρα. Σημαντικό ρόλο στη λειτουργία ενός υδροστρόβιλου παίζει ο αυτόματος έλεγχος του αριθμού στροφών, λόγω της μεταβαλλόμενης ποσότητας διερχόμενου νερού και λόγω μεταβολών στην πλευρά του φορτίου (ανοικτό κύκλωμα, ονομαστική λειτουργία, βραχυκύκλωμα λόγω βλάβης) [19].

Ανάλογα με το υδραυλικό ύψος λειτουργίας τους οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε μεγάλου, μεσαίου και μικρού υδραυλικού ύψους ενώ με βάση τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της παροχής και του υδραυλικού ύψους σε μηχανική ισχύ (βαθμός αντιδράσεως) διακρίνουμε υδροστρόβιλους δράσεως και υδροστρόβιλους αντιδράσεως. Έτσι, οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται με κριτήριο τον βαθμό αντιδράσεως σε [17]:

- Υδροστρόβιλους αντιδράσεως, οι οποίοι είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως που έχουν επικρατήσει είναι ο τύπος Francis, για μεσαίες τιμές

της υδραυλικής πτώσης ($H = 50 - 500$ m περίπου), ο υδροστροβίλος τύπου Deriaz διαγώνιας ροής και διάφορες διαμορφώσεις υδροστροβίλων αξονικής ροής, κατάλληλοι για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H < 50$ m περίπου) και μεγάλες παροχές ύδατος, όπως: Kaplan, βολβοειδής (bulb), σωληνωτός (tube), δακτυλίου (Straflo).

- Υδροστροβίλους δράσεως (μηδενικός βαθμός αντιδράσεως), οι οποίοι είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Ο τύπος υδροστροβίλου δράσεως που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστροβίλος Pelton, ο οποίος είναι κατάλληλος για μεγάλα ύψη και μικρές παροχές, ενώ η παραλλαγή του, δηλαδή ο υδροστροβίλος Turgo αποτελεί σήμερα μια πολύ σπάνια επιλογή. Ο υδροστροβίλος τύπου Cross-Flow ή Banki έχει σχεδόν μηδενικό βαθμό αντιδράσεως στην περιοχή του κανονικού σημείου λειτουργίας του και κατασκευάζεται για μικρές ισχύεις (μικρότερες των 2 MW) και σχετικά μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H < 100$ m).

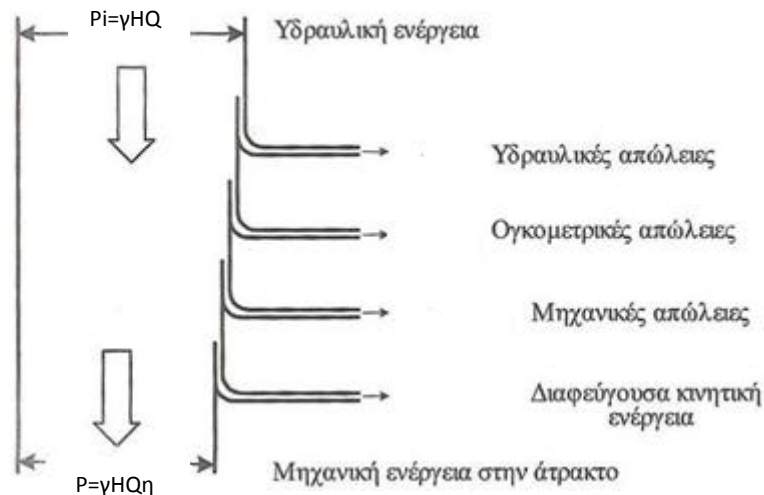
Από την προηγούμενη κατάταξη γίνεται φανερό η συσχέτιση μεταξύ της μεσημβρινής τομής και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης: οι υδροστροβίλοι Francis είναι ακτινικής και μεικτής ροής κατάλληλοι για μέσες τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H = 50 - 500$ m περίπου), ενώ οι υδροστροβίλοι αξονικής ροής (Kaplan) είναι κατάλληλοι για την αξιοποίηση μικρών υδραυλικών πτώσεων ($H < 50$ m περίπου) [17,20].

Όπως και στις φυγόκεντρες αντλίες, έτσι και σε έναν πλήρη υδροστροβίλο τα τμήματα εισόδου – εξόδου και ο δρομέας είναι τα τμήματα εκείνα της μηχανής που συμμετέχουν, έμμεσα ή άμεσα στην ενεργειακή μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική. Όμως, υπάρχουν και άλλα τμήματα του υδροστροβίλου, όπως αυτά που εξασφαλίζουν την στεγανότητα με το περιβάλλον (εξωτερικό κέλυφος, στυπιοθλίπτες) και αυτά που είναι υπεύθυνα για την μεταφορά της μηχανικής ισχύος (άτρακτος, συμπλέκτες, έδρανα) και την παραλαβή των αναπτυσσόμενων δυνάμεων (ωστικό έδρανο) [9].

Η λειτουργία του υδροστροβίλου δεν είναι απαλλαγμένη απωλειών με αποτέλεσμα να παρατηρείται μειωμένη αξιοποίηση της διαθέσιμης στην μηχανή υδραυλικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό η παραγόμενη μηχανική ισχύς P (σχέση 2.2) είναι μικρότερη από την διαθέσιμη υδραυλική ισχύ P_i στον υδροστροβίλο που δίνεται παρακάτω [17].

$$P_i = \gamma Q H \quad (2.11)$$

Στην συνέχεια, δίνεται στο Σχήμα 2.6 η ροή ενέργειας στον υδροστροβίλο και η ισχύς στην οποία αντιστοιχεί η κάθε μία επιμέρους απώλεια.



Σχήμα 2.6: Ροή της ενέργειας διά μέσου του υδροστροβίλου [17].

Όπου:

- Δh_{fe} : Οι υδραυλικές απώλειες της μηχανής, οι οποίες εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας και όπως και στην περίπτωση των φυγόκεντρων αντλιών διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής Δh_t και υδραυλικές απώλειες κρούσης Δh_a .
- ΔQ : Η διαφορά της παροχής Q που διέρχεται από την διατομή εισόδου και εξόδου από την μηχανή μείον την παροχή Q_u που διέρχεται μέσω του δρομέα και αποδίδει την ενέργεια. Η παροχή ΔQ αποτελεί τις ογκομετρικές απώλειες.
- c_a : Η ταχύτητα στην διατομή εξόδου του υδροστροβίλου.
- H_u : Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού που μετατρέπεται από τον δρομέα σε μηχανική ενέργεια. Είναι ίση με την διαθέσιμη από την εγκατάσταση ενέργεια H εάν αφαιρεθούν οι υδραυλικές απώλειες Δh_{fe} και η ενέργεια που διαφεύγει αναξιοποίητη.
- P_m : Οι μηχανικές απώλειες υπό την μορφή μηχανικής ισχύος.
- P_E : Οι απώλειες των εδράνων.
- P_s : Οι απώλειες στρεφόμενου δίσκου.

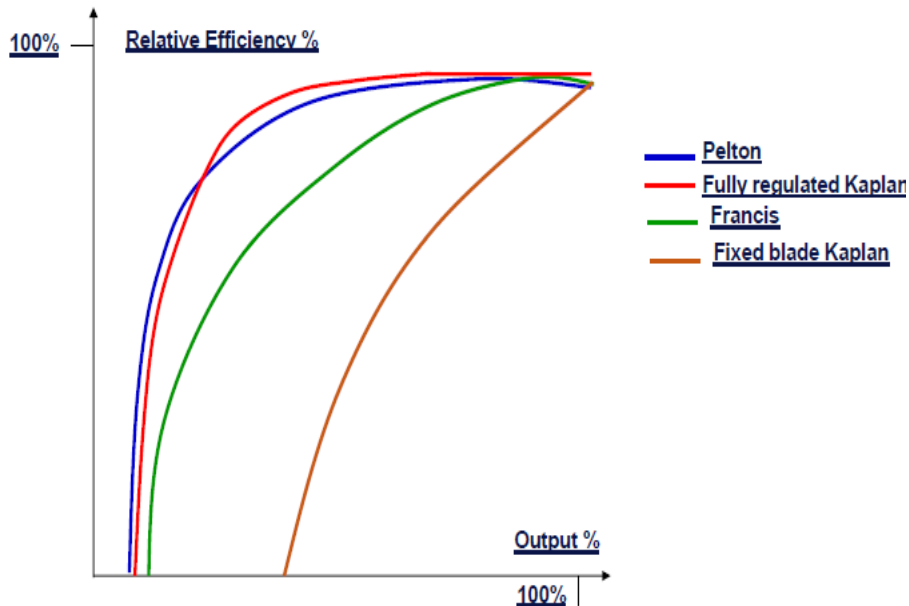
Ο ολικός βαθμός απόδοσης δίνεται παρακάτω:

$$\eta = \eta_h \eta_Q \eta_m = \frac{P}{P_i} = \frac{P}{\gamma Q H} \quad (2.12)$$

Όπου οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης υπολογίζονται με βάση τη ροή ενέργειας που δόθηκε στο Σχήμα 2.6. Ενδεικτικές τιμές των βαθμών απόδοσης δίνονται στον Πίνακα 2.1 ενώ στο Σχήμα 2.7 δίνονται οι καμπύλες των βαθμών απόδοσης συναρτήσει του φορτίου τους για διάφορους τύπους υδροστροβίλων.

Πίνακας 2.1: Ενδεικτικές τιμές των βαθμών απόδοσης υδροστροβίλων[17].

Υδροστρόβιλος αντιδράσεως	η_Q	η_h	η_m	η
Μικρός	0.950	0.896	0.975	0.830
Μεσαίος	0.970	0.920	0.985	0.880
Μεγάλος	0.990	0.950	0.990	0.940
Υδροστρόβιλος δράσεως				
Μικρός		0.850	0.960	0.820
Μεσαίος		0.880	0.980	0.860
Μεγάλος		0.920	0.990	0.915

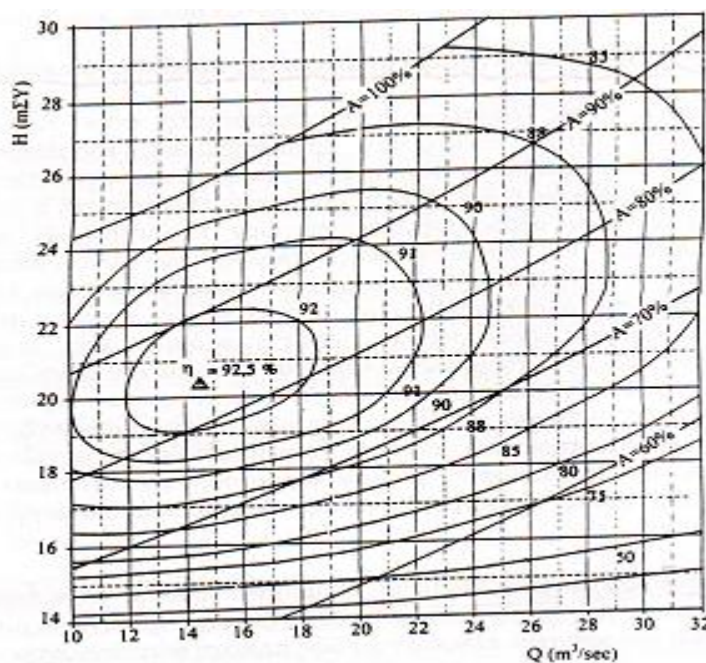


Σχήμα 2.7: Ενδεικτική μεταβολή του ολικού βαθμού απόδοσης των υδροστροβίλων συναρτήσει του φορτίου τους [20].

Από το Σχήμα 2.7 συμπεραίνεται ότι οι υδροστρόβιλοι Pelton και Kaplan διατηρούν υψηλό βαθμό απόδοσης ακόμη και σε μερικά φορτία, δηλαδή η καμπύλη (η, Q) είναι σχεδόν επίπεδη σε μεγάλο τμήμα της, έχουν δηλαδή μεγάλο εύρος λειτουργίας. Στους πρώτους αυτό οφείλεται στο ότι με την μεταβολή του φορτίου μεταβάλλεται η διάμετρος της δέσμης και όχι η ταχύτητάς της με αποτέλεσμα οι σχετικές ταχύτητες να μένουν αμετάβλητες. Οι δεύτεροι οφείλουν το πλεονέκτημα στην δυνατότητα περιστροφής των πτερυγίων του δρομέα έτσι ώστε να επιλέγεται κάθε φορά ο βέλτιστος συνδυασμός της κλίσης των πτερυγίων του δρομέα και των ρυθμιστικών πτερυγίων. Η καμπύλη μεταβολής του ολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου είναι πολύ μυτερή για τον υδροστρόβιλο τύπου έλικας (αξονικής ροής με

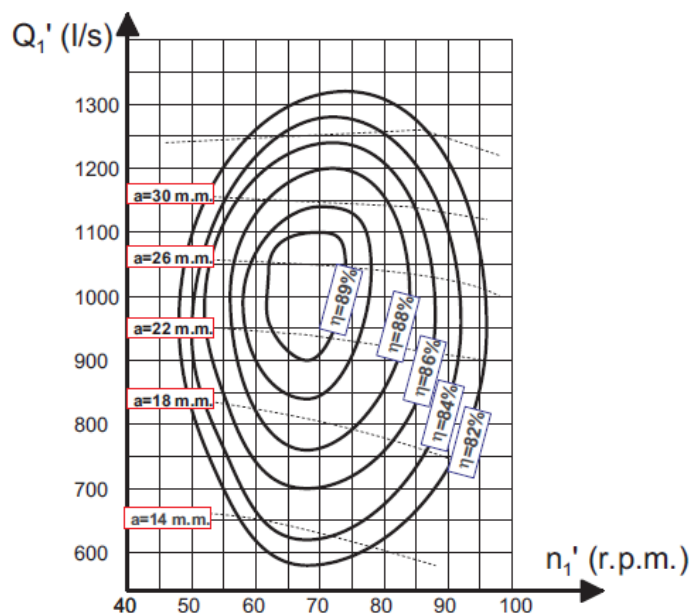
σταθερά τα πτερύγια του δρομέα) , δηλαδή ο υδροστροβίλος αυτός ενδείκνυται μόνο για στενό εύρος λειτουργίας. Τέλος, οι υδροστροβίλοι τύπου Pelton είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H , δηλαδή ο βαθμός τους μειώνεται έντονα για τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες της κανονικής τιμής H_K , φαινόμενο που δεν είναι τόσο έντονο για τους υδροστροβίλους Francis [9,20].

Στην συνέχεια, δίνονται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες (H, Q) ενός υδροστροβίλου (Σχήμα 2.8) με παραμέτρους το άνοιγμα $A(\%)$ των ρυθμιστικών πτερυγίων. Σε κάθε σημείο αντιστοιχεί μια τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης. Ενώνοντας τα σημεία λειτουργίας που έχουν τον ίδιο βαθμό απόδοσης σχηματίζονται στο διάγραμμα (H, Q) οι καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης που έχουν την μορφή ισουψών καμπυλών. Στην κορυφή τους αντιστοιχεί το κανονικό σημείο λειτουργίας, το σημείο δηλαδή στο οποίο έχουμε τον μέγιστο βαθμό απόδοσης. Το κανονικό σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε παροχή και υδραυλική πτώση τέτοια που η ροή στην είσοδο του δρομέα να γίνεται χωρίς κρούση και η συστροφή του υγρού στην έξοδο του δρομέα να είναι μηδενική.



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου για σταθερή ταχύτητα περιστροφής [9].

Σε περίπτωση που είτε η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H είτε η ισχύς P μεταβληθεί, μέσω των νόμων ομοιότητας μπορεί να υπολογιστεί η νέα ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου. Στο Σχήμα 2.9 δίνεται η μεταβολή της ανηγμένης παροχής Q_1' συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής n_1' του υδροστροβίλου.



Σχήμα 2.9: Καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης για υδροστρόβιλο Francis [21].

2.4 Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

2.4.1 Διαφορές μεταξύ ΥΗΣ και μικρών ΥΗΣ

Ένας μικρός ΥΗΣ δεν χαρακτηρίζεται ως «μικρός» επειδή αποτελεί μικρογραφία ενός μεγάλου ΥΗΣ. Οι κύριες διαφορές εντοπίζονται στην επιλογή και εγκατάσταση τυποποιημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού καθώς και στο πρόγραμμα εκμετάλλευσης, το οποίο έχει άμεσο αντίκτυπο στην διάταξη και διαστασιολόγηση των διάφορων στοιχείων που απαρτίζουν ένα ΥΗΕ. Ο χαρακτηρισμός ενός ΥΗΕ ως μικρού δεν αναφέρεται λοιπόν αποκλειστικά στην εγκατεστημένη ισχύ ή στις διαστάσεις των μονάδων. Σημειώνεται ότι από πλευράς αρχής λειτουργίας, τόσο στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική όσο και στην μετατροπή της τελευταίας σε ηλεκτρική, ένα μικρό ΥΗΕ δεν διαφέρει από ένα μεγάλο [9].

Το ποσοτικό όριο διάκρισης μεταξύ μικρών και μεγάλων ΥΗΣ για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (από την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Μικρών Υδροηλεκτρικών, ESHA) συνίσταται στο αν η ονομαστική ισχύς του σταθμού είναι μικρότερη των 10 MW. Αυτός ο περιορισμός στην ονομαστική ισχύ υπάρχει κυρίως γιατί η τυποποίηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τους μικρούς ΥΗΣ φτάνει συνήθως μέχρι την ισχύ των 10 MW, οπότε θεωρείται το πλέον αποδεκτό κριτήριο για τη διάκρισή τους. Έτσι, ως μικρός ΥΗΣ χαρακτηρίζονται αυτοί των οποίων η ισχύς δεν ξεπερνά τα 10 MW. Υπάρχουν βεβαίως, και άλλες υποκατηγορίες των ΥΗΕ, όπως mini ΥΗΣ (με ισχύ <1 MW), micro ΥΗΣ (με ισχύ <100 kW) και pico ΥΗΣ (με ισχύ <1 KW). Τα όρια αυτά μεταξύ micro, mini, pico δεν είναι απόλυτα και υπάρχουν αποκλίσεις σε διάφορες χώρες καθώς σχετίζονται κυρίως με τις διαδικασίες αδειοδότησης και τις προδιαγραφές σύνδεσης με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο.

Σε σύγκριση με τις αξιοποιήσιμες θέσεις για μεγάλους ΥΗΣ, οι μικροί ΥΗΣ πλεονεκτούν καθώς υπάρχει μεγάλο πλήθος διαθέσιμων θέσεων και έτσι, η κατασκευή τους ευνοείται. Με την αξιοποίηση των μικρών υδατοπτώσεων, γίνεται ολοένα και πιο αξιόλογη η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της κάθε χώρας. Βέβαια, τα μεγάλα ΥΗΕ είναι απαραίτητα σε ένα μεγάλο δίκτυο επειδή είναι τα μόνα που μπορούν να καλύψουν αποτελεσματικά τις αιχμές ζήτησης του δικτύου. Τα μικρά ΥΗΕ μπορούν να συνδυαστούν επίσης με άλλες διευθετήσεις όπως ύδρευση, άρδευση και κατ' επέκταση να αξιοποιήσουν υπάρχοντα μικρά αρδευτικά φράγματα για την παραγωγή ενέργειας. Ένα άλλο πλεονέκτημα τους είναι ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τους μεγάλους ΥΗΣ, καθώς η βασική περιβαλλοντική επιβάρυνσή οφείλεται στην κατασκευή μεγάλου ανάντι ταμιευτήρα ενώ τα μεγάλα φράγματα που χρειάζεται να κατασκευαστούν θεωρείται ότι μεταβάλλουν το οικοσύστημα. Οι ταμιευτήρες επίσης είναι φιλόξενοι για τα ενδημικά είδη ψαριών καθώς προκαλούν εναλλασσόμενες περιόδους λειψυδρίας ακολουθούμενες από ορμητικούς κυματισμούς που διαβρώνουν το έδαφος και τη βλάστηση. Επομένως, λόγω των δυσμενών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν για το περιβάλλον, οι ΥΗΣ δεν θεωρούνται, εν γένει, ως συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ [9,12,22].

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι τα ΥΗΕ διακρίνονται επίσης και με βάση το καθαρό ύψος της υδραυλικής πτώσης H , από την οποία εξαρτάται κατά κύριο λόγο και η επιλογή του υδροστροβίλου. Διακρίνονται 3 κατηγορίες [9]:

- ΥΗΕ μικρού ύψους όταν το ύψος H είναι μικρότερο των 20m.
- ΥΗΕ μεσαίου ύψους όταν $20 < H < 50$ m.
- ΥΗΕ μεγάλου ύψους όταν $H > 50$ m.

Τέλος, μια τελευταία περίπτωση διάκρισης των υδροηλεκτρικών έργων αποτελεί το αν το φράγμα των ΥΗΕ σχηματίζει ταμιευτήρα (δεξαμενή αποθήκευσης) μεγάλου όγκου ή αν ο σταθμός λειτουργεί κατά τον ρου του ποταμού, όπως συμβαίνει στα έργα μικρού ύψους πτώσεως [9].

2.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μικρών ΥΗΣ

Τα πλεονεκτήματα από την κατασκευή και αξιοποίηση ενός μικρού ΥΗΣ είναι αρκετά, μερικά από τα οποία είναι τα εξής [9,17]:

- Σε σύγκριση με τους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς, το «καύσιμο», δηλαδή οι υδατοπτώσεις, είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και δεν αντιμετωπίζει τον κίνδυνο εξάντλησης.
- Οι μικροί ΥΗΣ δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον, με επικίνδυνα κατάλοιπα ή απόβλητα.
- Η κατασκευή τους μπορεί να συνδυαστεί επωφελώς με άλλες διευθετήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, αλιεία και ρύθμιση πλημμύρας.

- Το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου. Επιπροσθέτως, το κόστος λειτουργίας του σταθμού είναι μικρό.
- Οι υδροστροβίλοι είναι αξιόπιστες μηχανές και απαιτούν πολύ μικρή συντήρηση και επίβλεψη (ο προληπτικός έλεγχος γίνεται ανά 5000 ώρες λειτουργίας περίπου και αρκεί ένας τεχνίτης για την επίβλεψη). Επίσης, έχουν πολύ γρήγορη ένταξη (μερικά λεπτά) σε περίπτωση που απαιτείται η άμεση λειτουργία τους.
- Συμβάλλουν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών καθώς για τις ανάγκες κατασκευής του, κατασκευάζονται έργα υποδομής όπως πχ. δρόμοι και γέφυρες.
- Η διάρκεια ζωής ενός μικρού ΥΗΕ είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 20-30 έτη και μπορεί να γίνει μεγαλύτερη με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των μικρών ΥΗΣ παρουσιάζει η χρήση τους ως αντλησιοταμιευτήρες (ΥΗΣ αναστρέψιμης λειτουργίας), ιδίως στα νησιωτικά δίκτυα, όπου από κοινού με άλλες ΑΠΕ και υβριδικά συστήματα θα μπορούσαν να προσφέρουν μία αξιόπιστη και καθαρή λύση στα προβλήματα ηλεκτροδότησης νησιών. Οι μικροί ΥΗΣ αναστρέψιμης λειτουργίας αντλούν νερό από ένα ταμιευτήρα που βρίσκεται χαμηλά και το στέλνουν σ' ένα δεύτερο ταμιευτήρα που βρίσκεται ψηλότερα τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Το νερό αυτό διοχετεύεται σε υδροστροβίλους τις ώρες της αιχμής ζήτησης και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, εξομαλύνονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις στη ζήτηση και διευκολύνονται οι θερμικές μονάδες να λειτουργούν με περίπου σταθερό φορτίο όπως επιβάλλεται. Το ρόλο του χαμηλού ταμιευτήρα μπορεί να παίξει και η θάλασσα εφόσον το επιτρέπει η γεωμορφολογία μιας περιοχής.

Κάποια μειονεκτήματα ενός μικρού ΥΗΣ παρουσιάζονται παρακάτω [9,17]:

- Έχει μεγάλη διάρκεια κατασκευής, περίπου 1-2 χρόνια, ενώ μεγάλη είναι και η διάρκεια των μελετών και της επεξεργασίας υδρολογικών και γεωλογικών στοιχείων στον τόπο κατασκευής.
- Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υφίσταται μερικές φορές διακυμάνσεις που έχουν σχέση με την ποσότητα των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων.
- Απαιτεί την διάθεση μεγάλων κεφαλαίων καθώς το κόστος του είναι πολύ υψηλό (περίπου 1500-4000 €/KW).

- Τέλος, στον τόπο κατασκευής, θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες υδατοπτώσεις και μεγάλες παροχές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται έργα υποδομής για τη μεταφορά της ενέργειας εξαιτίας της απομακρυσμένης θέσης τους από την κύρια ζήτηση.

2.5 Αναστρέψιμοι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

2.5.1 Γενικά

Με τον όρο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικά έργα νοείται η δυνατότητα λειτουργίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδροστροβίλου καθώς και για αποθήκευση υδραυλικής ενέργειας με άντληση νερού από τον κάτω στον άνω ταμιευτήρα μέσω αντλιών. Η άντληση του νερού γίνεται κατά την διάρκεια ωρών χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τις μονάδες βάσης (μεγάλες θερμικές ή πυρηνικές μονάδες). Αντιθέτως σε διαστήματα αυξημένης ζήτησης όπου οι μονάδες βάσης δεν επαρκούν, το σύστημα αποδίδει ενέργεια μέσω του υδροστροβίλου χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια του νερού [17].

Φυσικά η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική και στην συνέχεια εκ νέου σε ηλεκτρική παρουσιάζει απώλειες ενέργειας της τάξης περίπου του 25% , όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2.3 [17].

Ένα αναστρέψιμο ΥΗΕ είναι τόσο περισσότερο συμφέρον από οικονομικής πλευράς όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική πτώση (υψομετρική διαφορά μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρα): η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού είναι μεγαλύτερη οπότε η ίδια ισχύς επιτυγχάνεται με μικρότερες παροχές, άρα έργα προσαγωγής και υδροστροβίλοι μικρότερου όγκου και κατά συνέπεια μικρότερου κόστους. Στην Γαλλία θεωρείται ως συμφέρουσα η επένδυση για ένα αναστρέψιμο ΥΗΕ όταν η υδραυλική πτώση είναι μεγαλύτερη των 200m περίπου, στην Ελβετία (όπου υπάρχουν άφθονες θέσεις με μεγάλες υψομετρικές διαφορές) τα αναστρέψιμα ΥΗΕ κατασκευάζονται σε υδραυλικές πτώσεις μεγαλύτερες των 300m, ενώ στην Ιαπωνία κατασκευάζονται σε υδραυλικές θέσεις από 50 έως 200m.

Εξαίρεση στα προηγούμενα αποτελούν τα αναστρέψιμα ΥΗΕ που αξιοποιούν τη παλίρροια, όπως στο ΥΗΕ της Rance στην Γαλλία που είναι εξοπλισμένο με 24 βολβοειδείς υδροστροβίλους, κάθε ένας ονομαστικής ισχύος 10MW, που λειτουργούν σε πολύ μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ($H=3-11$ m) [17].

2.5.2 Αναστρέψιμα Υδροηλεκτρικά Έργα στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα υπάρχουν σήμερα 2 αναστρέψιμοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, όπως άλλωστε φαίνεται και στον Πίνακα 1.2 [13]:

- Ασώματα - Σφηκιά (ποταμός Αλιάκμονας, Σχήμα 2.10)
- Πλατανόβρυση – Θησαυρός (ποταμός Νέστος, Σχήμα 2.11)

Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) Σφηκιάς είναι εξοπλισμένος με τρεις αναστρέψιμες μονάδες εγκατεστημένης ισχύος 105 MW η καθεμία, ενώ η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα του είναι 20,0 εκ. m³. Η λειτουργία των στροβίλων αναστρέφεται, όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο, ώστε τη νύχτα να μπορούν να αντλούν νερό από την κατάντη λίμνη Ασωμάτων, όταν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τους λιγνιτικούς σταθμούς και να την αποδίδουν την ημέρα υπό συμφερότερους όρους [23]. Η συμβατική παραγωγή από τα νερά του ποταμού είναι 266 GWh και η παραγωγή από την αναστρέψιμη λειτουργία είναι 394 GWh [14]. Ο ταμιευτήρας των Ασωμάτων έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 14 εκ. m³, εφοδιάζει, όπως αναφέρθηκε, με νερό τον αντλητικό σταθμό του ΥΗΣ Σφηκιάς και ικανοποιεί τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του ΥΗΣ Ασωμάτων ανέρχεται σε 108 MW.



Σχήμα 2.10: Αναστρέψιμο ΥΗΣ Σφηκιάς στον Αλιάκμονα [23].

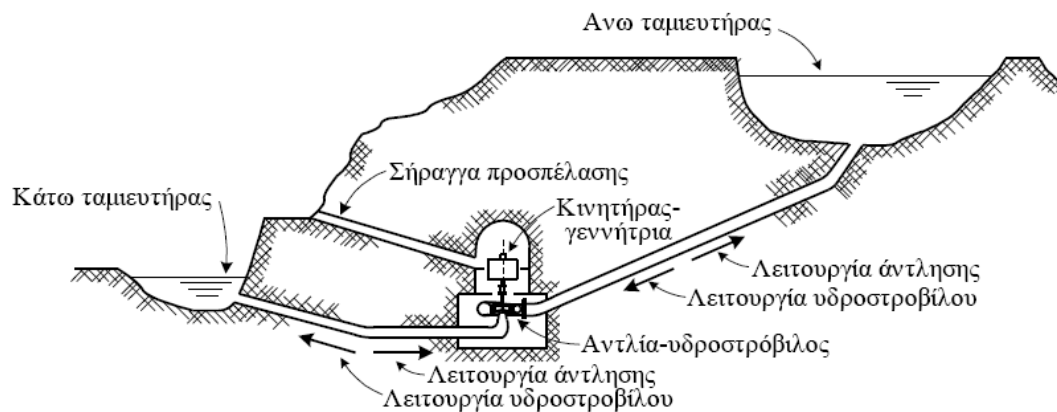
Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) Θησαυρού είναι αναστρέψιμος σταθμός και λειτουργεί ως αντλητικός το βράδυ, ανεβάζοντας το νερό του ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης στον ταμιευτήρα Θησαυρού. Όπως και στον ΥΗΣ Σφηκιάς, οι στρόβιλοι μπορούν και εδώ να αναστρέφονται τη νύχτα και να αντλούν νερό από τον κατάντη ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης, όταν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τους λιγνιτικούς σταθμούς, και να την αποδίδουν την ημέρα υπό συμφερότερους όρους. Η συμβατική παραγωγή από τα νερά του ποταμού είναι 440 GWh και η παραγωγή από την αναστρέψιμη λειτουργία είναι 615 GWh [14]. Ο ταμιευτήρας του ΥΗΣ Θησαυρού είναι ωφέλιμης χωρητικότητας 565 εκ. m³. Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση Η είναι 154m και το έργο είναι εξοπλισμένο με τρεις αναστρέψιμες μονάδες, τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 127 MW η καθεμία [4]. Ο ταμιευτήρας του ΥΗΣ Πλατανόβρυσης, με ωφέλιμη χωρητικότητα 12 εκ. m³, λειτουργεί τόσο για την παραγωγή ενέργειας όσο και ως κατάντη ταμιευτήρας για το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό έργο του Θησαυρού. Ο σταθμός διαθέτει 2 μονάδες τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 58 MW η καθεμία.



Σχήμα 2.11: Αναστρέψιμο ΥΗΣ Θησαυρού στον Νέστο [23].

2.5.3 Αρχή λειτουργίας

Την χρονιά του 1929, ξεκίνησε ο σχεδιασμός των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών μηχανών και από το 1950, αποτελούσε την επικρατούσα λύση στον σχεδιασμό των συστημάτων αντλησιοταμίευσης. Η νέα αυτή βασική δομή αποτελείται από τους 2 ταμιευτήρες νερού, μία αναστρέψιμη υδραυλική μηχανή, γνωστή ως στροβιλοαντλία, και μια ηλεκτρική μηχανή συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας στην περίπτωση άντλησης και σαν γεννήτρια, αλλάζοντας τη φορά περιστροφής της, στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [24]. Στο Σχήμα 2.12 δίνεται η δομή ενός τέτοιου αναστρέψιμου ΥΗΣ.



Σχήμα 2.12: Δομή ΥΗΣ με αναστρέψιμη υδραυλική μηχανή [17].

Ένας αναστρέψιμος ΥΗΣ αποτελεί ουσιαστικά ένα συνδυασμό μιας αντλητικής εγκατάστασης (αποταμίευση ενέργειας) και ενός υδροηλεκτρικού έργου (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος έχει ως εξής: Η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής ΑΠΕ αξιοποιείται για την άντληση νερού στον άνω ταμιευτήρα και άρα αποθηκεύεται με

τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Ανάλογα, κατά τις περιόδους αιχμής ελευθερώνεται νερό από τον άνω ταμιευτήρα το οποίο περιστρέφει τους υδροστροβίλους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και τελικά καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να καλύψει την έλλειψη ισχύος χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ποσό ενέργειας που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί. Με μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο ταμιευτήρων λιγότερος όγκος νερού παρέχει την ίδια χωρητικότητα και συνεπώς αγωγοί πτώσεως μικρότερης διαμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του ίδιου ποσού ισχύος [6,25].

Τα αναστρέψιμα ΥΗΕ έχουν λοιπόν διπλό όφελος [17]:

- Απορροφούν τη περίσσεια ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης μετατρέποντας την σε υδραυλική ενέργεια (και η οποία αποθηκεύεται στο πάνω ταμιευτήρα) και
- Αποδίδουν στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής την ενέργεια που έχουν αποταμιεύσει ενώ, στις περισσότερες περιπτώσεις, παράγουν και πρωτογενή ενέργεια από την αξιοποίηση των φυσικών εισροών στον άνω ταμιευτήρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα λόγω του μικρού χρόνου απόκρισης και της μεγάλης αυτονομίας συνδυάζονται ιδανικά με άλλες πηγές ενέργειας και μαζί με αιολικό πάρκο αποτελούν άριστο υβριδικό σύστημα. Σε αυτήν την περίπτωση καταφέρνουν να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα ασυνέχειας της αιολικής ενέργειας αφού παρέχουν εγγυημένη ηλεκτρική ισχύ, ενώ παράλληλα αντικαθιστούν τις συμβατικές μονάδες μειώνοντας την χρήση ορυκτού καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων.

Εκτός από τις τυπικές μορφές συστημάτων αντλησιοταμίευσης, υπάρχουν και κάποιες άλλες που συναντώνται πιο αραιά, όπως η offstream διαμόρφωση, η οποία αποτελείται από μια κάτω δεξαμενή σε ένα ρέμα, ποταμό ή άλλη πηγή νερού και μια δεξαμενή που βρίσκεται εκτός ρεύματος σε υψηλότερο επίπεδο και η pump-back διαμόρφωση, η οποία χρησιμοποιεί ως κάτω ταμιευτήρα δύο δεξαμενές σε σειρά και το άνω φράγμα στεγάζει την εγκατάσταση άντλησης και παραγωγής [26].

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της λειτουργίας των αναστρέψιμων ΥΗΕ είναι ο ρυθμός εναλλαγής της λειτουργίας τους μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εναλλαγή αυτή μπορεί να σημαίνει μία ή και περισσότερες φορές την ημέρα, μία φορά την εβδομάδα ή μία φορά το χρόνο [17].

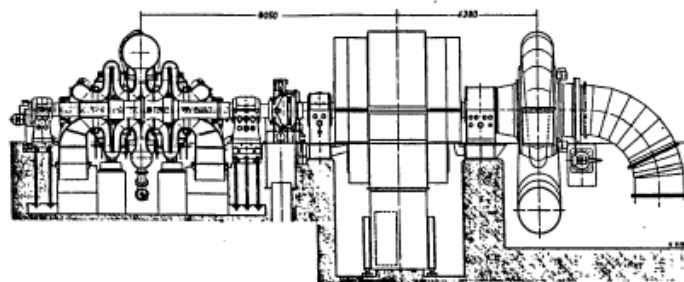
2.5.4 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

Όσον αφορά τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (υδροδυναμικές και ηλεκτρικές μηχανές), τα αναστρέψιμα ΥΗΕ διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την σύνθεση των μονάδων τους [4,17,27]:

- i) τις σύνθετες (ή τριπλές), αυτές δηλαδή που είναι εξοπλισμένες με υδροστροβίλο, φυγόκεντρη αντλία και ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια (Σχήμα 2.13). Και οι τρεις μηχανές έχουν

κοινή άτρακτο. Ανάλογα με την υδραυλική πτώση ο υδροστρόβιλος είναι δράσεως (Pelton) ή αντιδράσεως (Francis), ενώ η αντλία είναι πολυβάθμια, μονοβάθμια, μονής ή διπλής αναρρόφησης ανάλογα με την υψομετρική διαφορά και την παροχή. Στις μονάδες αυτού του τύπου η φορά περιστροφής είναι η ίδια και για τις δύο λειτουργίες. Με σκοπό την μείωση των φθορών τοποθετείται συμπλέκτης (συνήθως υδροδυναμικός) στα δύο άκρα της ατράκτου της ηλεκτρικής μηχανής, έτσι ώστε όταν λειτουργεί ο υδροστρόβιλος η αντλία να μην περιστρέφεται, και αντιστρόφως.

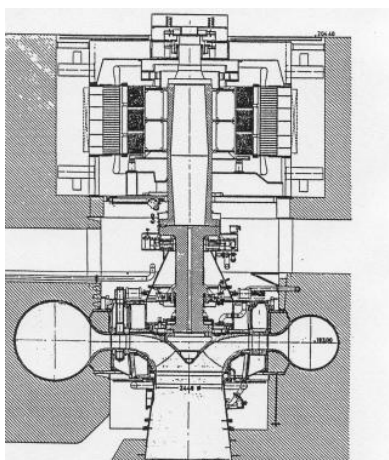
- ii) αυτές στις οποίες το αντλητικό συγκρότημα είναι ανεξάρτητο από το υδραυλικό συγκρότημα παραγωγής, δηλαδή τον υδροστρόβιλο και τη γεννήτριά του. Στην περίπτωση αυτή κάθε αντλία έχει τον δικό της κινητήρα και κάθε υδροστρόβιλος τη δική του γεννήτρια.
- iii) αυτές που είναι εξοπλισμένες με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή (στροβιλοαντλία) και ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια ή ως κινητήρας (Σχήμα 2.14). Η αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή έχει την δυνατότητα λειτουργίας ως αντλίας και ως υδροστρόβιλου με την αντιστροφή της φοράς περιστροφής της πτερωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής.



Σχήμα 2.13: Σύνθετη αναστρέψιμη μονάδα YHE Giems (Γερμανία), κατ. Voith 1961. Κανονικό σημείο λειτουργίας αντλίας $Q=9.6\text{m}^3/\text{s}$, $H=295\text{mSY}$, $n=600\text{rpm}$, $P=32.8\text{MW}$ [4].

Τα πλεονεκτήματα της πρώτης επιλογής συνίστανται στην γρήγορη μετάβαση από την λειτουργία άντλησης σε λειτουργία παραγωγής και αντίστροφα (λόγω της ίδιας φοράς περιστροφής), στην εύκολη εκκίνηση της αντλίας, στο ότι κάθε μηχανή (υδροστρόβιλος και αντλία) επιλέγεται ώστε να λειτουργεί στο αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της, χωρίς να είναι ανάγκη να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά (όπως συμβαίνει στην περίπτωση της στροβιλοαντλίας) και στο ότι η χρησιμοποίηση πολυβάθμιας αντλίας μειώνει την βύθιση του σταθμού για την αποφυγή σπηλαίωσης. Μειονεκτήματα της επιλογής αυτής είναι η πολυπλοκότερη διάταξη, η ανάγκη επιπλέον βοηθητικού εξοπλισμού (βάννες) και το σημαντικό κόστος του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (δύο υδροδυναμικές μηχανές συν συμπλέκτης αντί μίας αναστρέψιμης) ενώ επιπλέον κάθε μονάδα

καταλαμβάνει χώρο σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με την λύση της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής (iii) [4].



Σχήμα 2.14: Αναστρέψιμη υδροηλεκτρική μονάδα YHE Vianden, κατ. Voith 1969.
Περιοχή λειτουργίας ως αντλίας $Q=74.1-63.6\text{m}^3/\text{s}$, $H=271-294\text{m}\Sigma\text{Y}$, $n=333.3\text{rpm}$,
 $P=215-202.5\text{MW}$, Περιοχή λειτουργίας ως στροβίλου $Q=76.4\text{m}^3/\text{s}$, $H=286\text{m}\Sigma\text{Y}$,
 $n=333.3\text{rpm}$, $P=195.8\text{MW}$ [4].

Η δεύτερη επιλογή συνιστάται για έργα μικρής ισχύος (ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 10 MW) για τα οποία διατίθενται τυποποιημένοι μικροί υδροστροβίλοι και αντλίες, για την παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μικρότερο κόστος. Τα πλεονεκτήματα αυτής της επιλογής είναι ο τυποποιημένος εξοπλισμός (χαμηλό κόστος, μικρός χρόνος παράδοσης), η καλή προσαρμογή της λειτουργίας κάθε μηχανής, ο πολύ μικρός χρόνος αντιστροφής της λειτουργίας μεταξύ άντλησης και παραγωγής, η δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας παραγωγής ενέργειας στις περιόδους εγγυημένης παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας μέσω άντλησης. Μειονεκτήματα αποτελούν η κλιμακωτή μεταβολή της απορροφούμενης ισχύος (για σταθερή ταχύτητα περιστροφής των αντλιών) και η πολύπλοκη και δαπανηρή (περισσότερες μηχανές) διαμόρφωση σωληνώσεων και ηλεκτρικών πινάκων. Επίσης καταλαμβάνουν πολύ μεγαλύτερο χώρο σε σχέση με τις δύο άλλες τοπολογίες αφού αποτελούνται από 2 χωριστά συγκροτήματα [4].

Σε ό,τι αφορά την τρίτη επιλογή (Σχήμα 2.14), το κόστος είναι μικρότερο σε σχέση με τις άλλες δύο επιλογές και καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο. Όμως πρέπει να αναφερθεί ότι με την τοπολογία αυτή παρατηρείται δυσκολία στην εκκίνηση της αντλίας, ο εξοπλισμός γίνεται κατά παραγγελία οπότε υπάρχει υψηλότερο κόστος και χρόνος παράδοσης και υπάρχει και σχετικά αργή αντιστροφή της λειτουργίας λόγω της ανάγκης αντιστροφής της φοράς περιστροφής, αφού οι αναστρέψιμες μονάδες θα πρέπει πρώτα να σταματήσουν και στη συνέχεια να αρχίσουν να περιστρέφονται αντίστροφα. Άρα σε περιπτώσεις όπου η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας στροβίλου – αντλίας είναι υψηλή, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα (iii) μειονεκτεί έναντι του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης (i).

Σημειώνεται τέλος ότι όταν η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι σημαντική και έτσι αντιστοιχεί σε υδροστροβίλο τύπου Pelton (του οποίου η λειτουργία δεν μπορεί να αντιστραφεί ώστε να λειτουργήσει ως αντλία), είναι απαραίτητη η εγκατάσταση

ανεξάρτητης αντλίας που θα εξασφαλίζει τη λειτουργία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [27].

2.5.5 Εκκίνηση στους αναστρέψιμους ΥΗΣ

Όσον αφορά τη διάρκεια της διαδικασίας εκκίνησης υδροστροβίλου, αναφέρεται ότι αυτή διαρκεί 3-4 λεπτά για εκκίνηση από στάση, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας σύνδεσης στο δίκτυο και συγχρονισμού, ενώ για μεταβολή του σημείου λειτουργίας ή από την λειτουργία stand-by σε παραλαβή πλήρους φορτίου απαιτούνται περί τα 6 έως 10 s. Άρα η διαθεσιμότητα ενός τυπικού υδροστροβίλου είναι άμεση. Στην περίπτωση όμως που έχει εγκατασταθεί αναστρέψιμη μηχανή και εξετάζεται η περίπτωση αντιστροφής της λειτουργίας από αντλία σε υδροστροβίλο, η διάρκεια της διαδικασίας ένταξης του υδροστροβίλου είναι πολύ μεγαλύτερη, γιατί θα πρέπει πρώτα να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του δρομέα της μηχανής [27].

Στους αναστρέψιμους ΥΗΣ, τίθεται το πρόβλημα της εκκίνησης των αντλιών, το οποίο εντείνεται ακόμα περισσότερο λόγω του μεγάλου μεγέθους των μηχανών. Για την μείωση του απαιτούμενου ρεύματος εκκίνησης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι εκκίνησης που εμπλέκουν τόσο τις αντλίες όσο και για τους κινητήρες. Όσον αφορά τις πρώτες, η εκκίνηση μπορεί με δύο τρόπους [17]:

- Εκκίνηση με την πτερωτή γεμάτη (πλημμυρισμένη στο νερό) και τη στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων κλειστή (μηδενική παροχή).
- Εκκίνηση με την πτερωτή κενή (σε περιβάλλον αέρα), τα ρυθμιστικά πτερύγια κλειστά και ανοικτή την βάννα κατάθλιψης.

Για να γίνει περισσότερο σαφές το πρόβλημα αναφέρονται στη συνέχεια τα ακόλουθα στοιχεία [17,27]:

1. Η ισχύς η οποία απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της και με κλειστά τα ρυθμιστικά πτερύγια (μηδενική παροχή) είναι της τάξεως του 35% της ονομαστικής της ισχύος
2. Η ισχύς η οποία απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της και με ανοικτά τα ρυθμιστικά πτερύγια αλλά κλειστή τη βάννα της κατάθλιψης είναι της τάξεως του 65% της ονομαστικής της ισχύος
3. Το ολικό ύψος για μηδενική παροχή είναι μεγαλύτερο από το ολικό ύψος στο κανονικό σημείο λειτουργίας (για την κανονική ταχύτητα περιστροφής), διαφορετικά η χαρακτηριστική θα ήταν ασταθής
4. Η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής όταν είναι κενή από νερό (λειτουργία σε περιβάλλον αέρα) είναι της τάξεως του 1 – 3 % της ονομαστικής ισχύος (πρόκειται ουσιαστικά για τις μηχανικές απώλειες εδράνων)

Η πρώτη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί αφού προηγουμένως το στροφέιο της αντλίας φθάσει στη συνθήκη συγχρονισμού, δηλ. στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της. Σύμφωνα με την παρατήρηση 1, για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχει βοηθητικός υδροστροβίλος (στο ίδιο ή σε γειτονικό ΥΗΕ) που θα προσδώσει την απαιτούμενη ισχύ, της τάξεως του 35% της ονομαστικής ισχύος της αντλίας. Μετά την επίτευξη της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής ανοίγουν σταδιακά τα ρυθμιστικά πτερύγια μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού σημείου λειτουργίας. Η

μεταβατική αυτή κατάσταση λειτουργίας της αντλίας είναι θορυβώδης και ασταθής. Όσο διάστημα τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι κλειστά, η σημαντική ενέργεια που απορροφάται μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό της μηχανής και γι' αυτό, μέσω ανεξάρτητου κυκλώματος, διατηρείται μία μικρή παροχή νερού στο εσωτερικό της μηχανής, μέσω της οποίας απάγεται θερμότητα.

Σύμφωνα με την δεύτερη μέθοδο, η περωτή εκκενώνεται από το νερό μέσω πεπιεσμένου αέρα που εκχύεται από ακροφύσιο στο επίπεδο του σπειροειδούς κελύφους. Η πίεση ρυθμίζεται συνεχώς έτσι ώστε η ελεύθερη στάθμη του νερού στον αγωγό αναρρόφησης να είναι χαμηλότερη από το κατώτερο σημείο της περωτής. Στην συνέχεια το στροφείο τίθεται σε περιστροφή μέχρι την επίτευξη της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής μέσω βοηθητικού υδροστροβίλου ή με κατ' ευθείαν σύζευξη στο δίκτυο υπό χαμηλή τάση. Ο συγχρονισμός του στροφείου στην περίπτωση αυτή είναι σχετικά πιο εύκολος λαμβάνοντας υπόψη την πολύ μικρή ισχύ που απορροφά το στροφείο (παρατήρηση 4). Στην συνέχεια όμως η διαδικασία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη.

Ακολουθώντας την πλέον απλή διαδικασία, δηλ. μειώνοντας σταδιακά την πίεση του αέρα οπότε η στάθμη του νερού ανεβαίνει, το φαινόμενο εξελίσσεται κρουστικά την χρονική στιγμή κατά την οποία η στάθμη του νερού ξεπερνάει ολόκληρη την ακμή εισόδου των πτερυγίων. Λόγω της περιστροφής της περωτής το νερό φυγοκεντρείται, γεμίζει απότομα η περωτή και αυξάνει πολύ γρήγορα η απορροφούμενη ισχύς (από 1-3% φθάνει στο 30-40% της ονομαστικής ισχύος). Για την αποφυγή αυτών των κρουστικών φαινομένων έχουν δοκιμασθεί διάφοροι άλλοι τρόποι όπως η πλήρωση της περωτής από τον πάνω ταμιευτήρα μέσω του βοηθητικού αγωγού που καταλήγει στο σπειροειδές κέλυφος μεταξύ της περωτής και της στεφάνης των ρυθμιστικών πτερυγίων ή η τροφοδοσία με δέσμες νερού που προκαλούν περιστροφική κίνηση ενώ σταδιακά ο αέρας αφαιρείται από την κοίλη άτρακτο. Όταν πλέον έχει πληρωθεί η αντλία ανοίγουν σταδιακά τα ρυθμιστικά πτερύγια, όπως και κατά την προηγούμενη μέθοδο εκκίνησης [17,27].

Κατά την εκκίνηση της αντλίας, ιδιαίτερα όταν ο αγωγός αναρρόφησης έχει μεγάλο μήκος (αγωγός απαγωγής για την λειτουργία υδροστροβίλου) και με σκοπό την μείωση της έντασης του υδραυλικού πλήγματος που αναπτύσσεται κατασκευάζεται πύργος ανάπλασης (εκτονώσεως) ο οποίος όμως προκαλεί ταλαντώσεις μεγάλης περιόδου και διάρκειας, μέχρι την αποκατάσταση της τελικής μόνιμης κατάστασης.

Οι ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων ΥΗΣ είναι κατά κύριο λόγο σύγχρονες, λόγω της ικανότητάς τους να εναλλάσσουν εύκολα τη λειτουργίας τους. Οι διάφορες τεχνικές εκκίνησης κινητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής [27,28]:

- Ύπαρξη βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα
- Ύπαρξη βοηθητικού υδροστροβίλου
- Ασύγχρονη εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο
- Ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας

- Σύγχρονη εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

Στις πρώτες τέσσερις μεθόδους, κάθε μονάδα διαθέτει το δικό της εξοπλισμό εκκίνησης, ενώ στην εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας είναι δυνατή η εκκίνηση περισσότερων από μία μονάδων με κοινό εξοπλισμό. Αυτή αποτελεί και την πλέον διαδεδομένη μέθοδο, καθώς οι υπόλοιπες παρουσιάζουν μια σειρά σοβαρών μειονεκτημάτων.

Η εγκατάσταση βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα, συνεπάγεται αυξημένο όγκο εκσκαφών για την εγκατάσταση τόσο αυτού όσο και συμπληρωματικού εξοπλισμού (μειωτήρας, σύστημα λίπανσης κτλ). Συνοδεύεται από σημαντική αύξηση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας. Επιπρόσθετα κατά την λειτουργία του κινητήρα αναπτύσσονται στις ατράκτους κραδασμοί, δημιουργώντας προβλήματα στη λειτουργία της στροβιλοαντλίας.

Ο βοηθητικός στρόβιλος, απαιτεί επίσης αυξημένες εκσκαφές για την εγκατάστασή του και ενέχει αυξημένο κόστος. Επιπλέον, η εκκίνηση καθίσταται αδύνατη σε περίπτωση όπου ο στρόβιλος είναι εκτός λειτουργίας για τη συντήρησή του. Τέλος η τεχνική αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έργα όπου η άνω δεξαμενή είναι αρχικά άδεια και απαιτείται πλήρωσή της.

Η εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο, συνοδεύεται από υψηλές τιμές ρεύματος εκκίνησης και πιθανές βυθίσεις τάσης. Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι αναστρέψιμοι ΥΗΣ χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αιχμών ζήτησης και την σταθεροποίηση του δικτύου, αντιλαμβάνεται κανείς την ακαταλληλότητα της μεθόδου, αφού αυτή μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στο ήδη βεβαρημένο δίκτυο. Επιπλέον για την επίτευξη σταθερότητας κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, πραγματοποιούνται διάφορες αλλαγές στο σχεδιασμό της ηλεκτρικής μηχανής (π.χ. πιο συμπαγείς πόλοι) που όμως αυξάνουν το κόστος της και μειώνουν την αξιοπιστία και την απόδοσή της σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, η μέθοδος αυτή συνοδεύεται από υψηλά δυναμικά και θερμικά φορτία που μειώνουν τη διάρκεια ζωής της μηχανής και του όλου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

Η ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας γίνεται είτε μέσω αυτομετασχηματιστή είτε με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης. Στην πρώτη περίπτωση, εξακολουθούν να υπάρχουν υψηλοί παλμοί ρεύματος που επηρεάζουν την αντοχή του δικτύου τροφοδοσίας. Αυτό το πρόβλημα εξαλείφεται με τους ρυθμιστές τάσης. Η ανάγκη όμως ύπαρξης ενός εκκινητή για κάθε μονάδα, αυξάνει το κόστος της επιλογής αυτής.

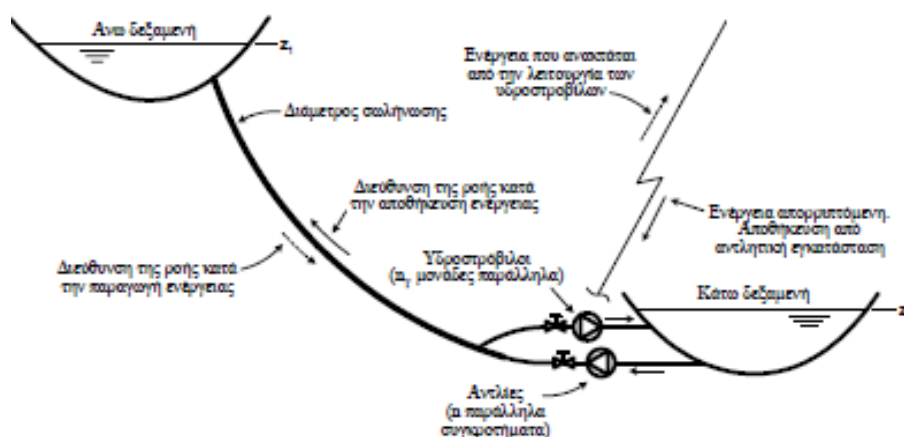
Έτσι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος για την εκκίνηση των ηλεκτρικών μηχανών στους υπάρχοντες ΥΗΣ, είναι η χρήση οδήγησης μεταβλητής συχνότητας. Αυτή παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία και είναι κατάλληλη για την αρχική πλήρωση της άνω δεξαμενής. Επίσης η δυνατότητα εκκίνησης περισσότερων των μία μονάδων από έναν εκκινητή, οδηγεί σε μείωση του κόστους εξοπλισμού και λειτουργίας καθώς και σε περιορισμένο συμπληρωματικό όγκο εκσκαφών. Η διαμόρφωση και το πλήθος

των εκκινήτων εξαρτάται από το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θέλουμε να ολοκληρωθεί το ξεκίνημα μιας μονάδας και όλης της εγκατάστασης. Μια συνήθης διαμόρφωση είναι η ύπαρξη δύο οδηγήσεων, έτσι ώστε όταν απαιτείται η συντήρηση μιας, να μην είναι αναγκαία η εκκίνηση με απ' ευθείας σύνδεση στο δίκτυο [27,28].

2.5.6 Κατάταξη των αναστρέψιμων ΥΗΣ ανάλογα με την σωλήνωση

Σε ένα αναστρέψιμο ΥΗΣ διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών.

Στην περίπτωση του αναστρέψιμου ΥΗΣ με μονή σωλήνωση, η άντληση και η υδροηλεκτρική παραγωγή γίνονται από την ίδια σωλήνωση, η οποία συνδέει τον άνω με τον κάτω ταμιευτήρα. Η αντλητική εγκατάσταση και το σύνολο των στροβίλων βρίσκονται σε παράλληλη σύνδεση μεταξύ τους μετά τον κόμβο που παρεμβάλλεται προς το τέλος της σωλήνωσης, πλησίον του κάτω ταμιευτήρα (Σχήμα 2.15).



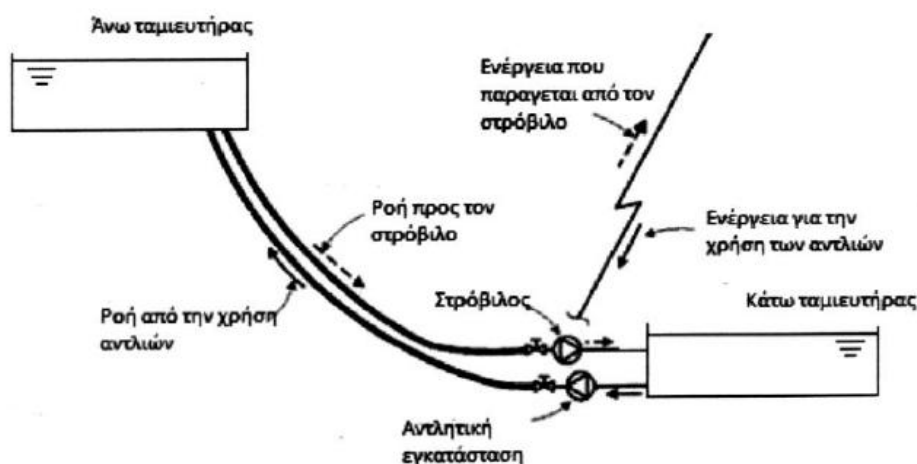
Σχήμα 2.15: Αναστρέψιμο ΥΗΣ μονής σωλήνωσης [4].

Η περίπτωση της μονής σωλήνωσης εμφανίζει ασφαλώς το πλεονέκτημα της πιο οικονομικής λύσης, δεδομένου ότι μειώνονται τα έξοδα της εγκατάστασης. Ωστόσο, θέτει περιορισμό ως προς τη λειτουργία, δεδομένου ότι δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου με τις αντλίες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται να καθοριστεί αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας το σύστημα στροβίλων ή αυτό των αντλιών, ανάλογα πάντα με την σχέση παραγωγής και ζήτησης της ενέργειας. Όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση, προτεραιότητα δίνεται στις αντλίες (ώρες χαμηλής ζήτησης). Σε αντίθετη περίπτωση, προτεραιότητα δίνεται στους υδροστροβίλους (ώρες αιχμής) [29].

Στην περίπτωση αυτή περιλαμβάνεται και η περίπτωση μονής σωλήνωσης με δυνατότητα διπλής λειτουργίας άντλησης – παραγωγής. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία (φάση αποθήκευσης) είτε ως στρόβιλος (φάση παραγωγής) με αντιστροφή της φοράς

περιστροφής της περρωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής (στροβιλοαντλία) [27].

Στον αναστρέψιμο ΥΗΣ με διπλή σωλήνωση, η άντληση και η υδροηλεκτρική παραγωγή γίνονται από δύο διαφορετικές και ανεξάρτητες σωληνώσεις και αποτελεί σαφώς πιο ακριβή λύση σε σχέση με την περίπτωση μονής σωλήνωσης, αφού το κατασκευαστικό κόστος είναι αρκετά υψηλό. Η πρώτη σωλήνωση συνδέει τον κάτω με τον άνω ταμιευτήρα, ενώ παρεμβάλλεται σε αυτήν η αντλητική εγκατάσταση. Η δεύτερη σωλήνωση συνδέει τον άνω με τον κάτω ταμιευτήρα, ενώ παρεμβάλλεται σε αυτήν το σύνολο των υδροστροβίλων (Σχήμα 2.16). Στην περίπτωση αυτή καθίσταται δυνατή η παράλληλη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών και δεν απαιτείται να δοθεί προτεραιότητα είτε στην λειτουργία άντλησης είτε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [27,29].



Σχήμα 2.16: Αναστρέψιμο ΥΗΕ διπλής σωλήνωσης [29].

2.5.7 Βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε και στις παραγράφους 1.2.3, 2.5.1, κατά την διαδικασία αποθήκευσης της ενέργειας υπό υδραυλική μορφή και στη συνέχεια απόδοσής της στο ηλεκτρικό δίκτυο υπό μορφή ηλεκτρικής ενέργειας αναπτύσσονται ενεργειακές απώλειες, οι οποίες μειώνουν την αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Σε μία μεγάλης κλίμακας υδραυλική εγκατάσταση αποταμίευσης, η οποία αποταμιεύει την περίσσεια ισχύος των θερμικών σταθμών της ώρες χαμηλής ζήτησης, ο συνολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης είναι κατά μέσο όρο της τάξεως του 75%, δηλαδή περίπου 25% της προς αποθήκευση ενέργειας χάνεται σε απώλειες. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε υδραυλικές, μηχανικές και ηλεκτρικές. Σε μία εγκατάσταση υδραυλικής αποταμίευσης ενός υβριδικού σταθμού, οι συνολικές απώλειες θα είναι ακόμη μεγαλύτερες λόγω κλίμακας και λόγω της έντονης διακύμανσης της υπό αποθήκευση ενέργειας. Φυσικά αυτό δεν πρέπει να θεωρηθεί μειονέκτημα της μεθόδου γιατί σε κάθε άλλη περίπτωση που δε θα αποθηκεύονταν η περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια αυτή θα απορριπτόταν από το ηλεκτρικό δίκτυο αναξιοποίητη. Επομένως

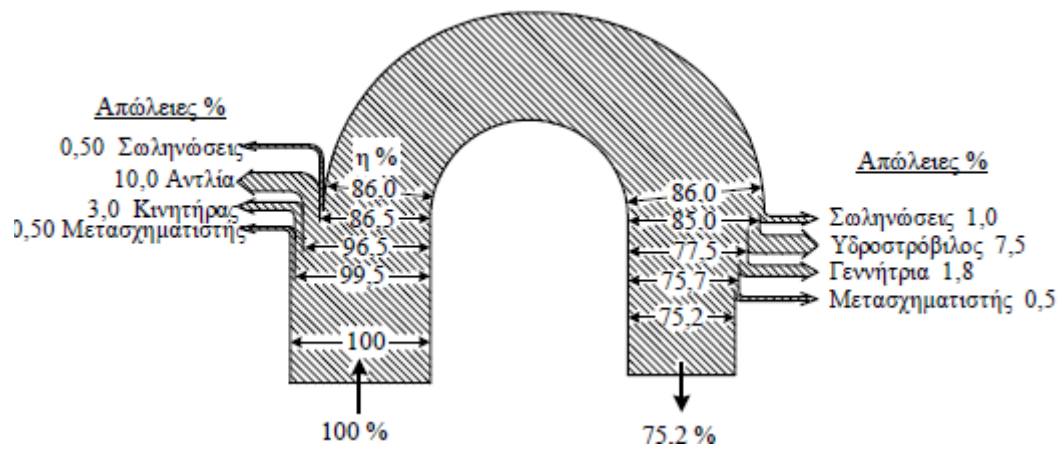
υπάρχει η δυνατότητα να διατηρηθεί ένα μεγάλο μέρος της περισσευούμενης ενέργειας και να αξιοποιηθεί όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο [4,17,27].

Οι ενεργειακές απώλειες που υπεισέρχονται και θα πρέπει κατά το δυνατό να ληφθούν υπόψη είναι [27]:

- 1) Υδραυλικές και μηχανικές απώλειες του αντλητικού συγκροτήματος (αντλίας και ηλεκτροκινητήρα). Εξαρτώνται από τον τύπο και το μέγεθος της αντλίας, τον τύπο και το μέγεθος του ηλεκτροκινητήρα και του σημείου λειτουργίας τους.
- 2) Υδραυλικές απώλειες στον αγωγό κατάθλιψης (άντλησης). Εξαρτώνται κυρίως από τη διάμετρο του αγωγού και το μήκος του, δηλ. το μήκος μεταξύ του κάτω και άνω ταμιευτήρα.
- 3) Υδραυλικές και μηχανικές απώλειες του συγκροτήματος υδροστροβίλου (υδροστροβίλου και γεννήτριας). Εξαρτώνται από τον τύπο και το μέγεθος του υδροστροβίλου, τον τύπο και το μέγεθος της γεννήτριας και του σημείου λειτουργίας τους.
- 4) Υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής (πτώσεως). Εξαρτώνται κυρίως από τη διάμετρο του αγωγού και το μήκος του, δηλαδή το μήκος της όδευσης μεταξύ του κάτω και άνω ταμιευτήρα. Ο αγωγός αυτός μπορεί να είναι ο ίδιος που εξυπηρετεί την άντληση ή διαφορετικός που οδεύει παράλληλα.

Επίσης ως απώλεια του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί η αδυναμία του συστήματος να αποθηκεύσει ενέργεια στην περίπτωση όπου ο άνω ταμιευτήρας είναι γεμάτος, καθώς και η αδυναμία χρονικής ή ποσοτικής ανταπόκρισης του αντλητικού συγκροτήματος στις μεταβολές της ενέργειας προς αποθήκευση, ή της προς αποθήκευση ισχύος, όταν αυτή είναι μικρότερη από την ελάχιστη στην οποία μπορεί να λειτουργήσει.

Οι συνολικές απώλειες ενέργειας λοιπόν σε έναν κύκλο άντλησης-παραγωγής ενέργειας φθάνουν στο 25% περίπου (σε ΥΗΕ μεγάλου μεγέθους). Όπως είναι αναμενόμενο, οι συνολικές απώλειες ενέργειας είναι αναλογικά μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών γίνεται μικρότερο [17]. Το Σχήμα 2.17 απεικονίζει εποπτικά τη ροή ενέργειας στον υδραυλικό κύκλο και τις αντίστοιχες μέσες απώλειες ενέργειας:



Σχήμα 2.17: Ενεργειακές απώλειες σε έναν κύκλο άντλησης – παραγωγής [4].

Κεφάλαιο 3

Αιολική ενέργεια

3.1 Γενικά

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη συνιστώσα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος. Προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία από την οποία ένα μικρό ποσοστό (περίπου 1-2%) αυτής που φτάνει στην ατμόσφαιρα μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανέμου. Συνεπώς, ο άνεμος προσφέρει μία τελείως καθαρή πηγή ενέργειας χωρίς να παράγει απόβλητα ενώ η κίνηση των στρωμάτων του θεωρείται ανεξάντλητη. Η εκμετάλλευση του δε ρυπαίνει το περιβάλλον, δεν απαιτεί περίπλοκες κατασκευές, δεν εμπεριέχει κόστος καυσίμου και δεν επηρεάζεται από τις ενεργειακές κρίσεις της παγκόσμιας αγοράς. Συγκεκριμένα, η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω ανεμοκινητήρων, που τη μετατρέπουν σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια. Καλύπτεται έτσι ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών: χρησιμοποιείται για τη λειτουργία αντλιών νερού στην ύδρευση και άρδευση περιοχών, για θέρμανση αγροτικών μονάδων και κατοικιών, για τη λειτουργία εγκαταστάσεων αφαλάτωσης νερού, παραγωγή καύσιμου υδρογόνου με την ηλεκτρόλυση νερού καθώς και φόρτιση συσσωρευτών για το εμπόριο, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί και να τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής. Για την παραγωγή αξιόλογων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούνται συγκροτήματα από πολλές ανεμογεννήτριες μαζί, τα οποία ονομάζονται αιολικά πάρκα [30].

Η ισχύς του ανέμου σε ολόκληρο τον πλανήτη εκτιμάται σε 3.6×10^8 MW με τις πλέον ευνοημένες περιοχές από πλευράς αιολικού δυναμικού να είναι οι χώρες της πολιτικής και εύκρατης ζώνης, ιδιαίτερα κοντά σε ακτές. Στη χώρα μας οι νησιωτικές περιοχές είναι από τις ευνοϊκότερες γεωγραφικές θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας [30].

Η συνεχώς αυξανόμενη αιολική διείσδυση όμως στα ΣΗΕ συνεπάγεται και την ανάγκη για συνεχή βελτίωση των μοντέλων αναπαράστασης των αιολικών πάρκων στα πλαίσια των μελετών ευστάθειας αλλά και ασφάλειας των συστημάτων. Και αυτό γιατί έχει παρατηρηθεί πως η επίδραση της αιολικής παραγωγής στην ασφάλεια και τη λειτουργία των ΣΗΕ δεν είναι μία στατική, μονόδρομη διαδικασία αλλά δυναμική και αμφίδρομη.

Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά σαν “αρνητικά φορτία”. Έτσι δεν συμμετείχαν καθόλου σε επικουρικές υπηρεσίες προς το δίκτυο και είχαν τις ίδιες υποχρεώσεις με τους καταναλωτές. Αυτές αφορούσαν κυρίως σε ζητήματα ποιότητας

ισχύος στο δίκτυο διανομής όπου συνδέονταν (π.χ. αρμονικές, αντιστάθμιση αέργου ισχύος). Στη συνέχεια, η αύξηση της αιολικής ισχύς τόσο σε συνολικό επίπεδο όσο και σε επιμέρους αιολικά πάρκα έκανε αισθητή την επίδρασή της στα συστήματα μεταφοράς. Έτσι ξεκίνησε μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών. Από τη μία υπάρχουν οι διάφοροι κανονισμοί που εκδίδουν οι διαχειριστές του δικτύου σχετικά με τις προδιαγραφές λειτουργίας των αιολικών πάρκων και από την άλλη η εξέλιξη των μοντέλων των κατασκευαστών ώστε να ανταποκρίνονται καλύτερα στις προδιαγραφές αυτές.

Έτσι παλιότερα σε περίπτωση εμφάνισης βραχυκυκλώματος οι ανεμογεννήτριες δεν ήταν υποχρεωμένες να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο και αποσυνδέονταν προς προστασία του εξοπλισμού τους. Δεδομένης και της συνεχώς αυξανόμενης αιολικής διείσδυσης έγινε φανερό ότι το γεγονός αυτό έθετε περιορισμό στη στιγμιαία αιολική διείσδυση, αφού ένα βραχυκύκλωμα μπορούσε να προκαλέσει την ξαφνική απώλεια μεγάλης ποσότητας ισχύος. Για το λόγο αυτό από το 2000 περίπου εμφανίστηκαν οι πρώτοι κανονισμοί που επέβαλαν ορισμένες υποχρεώσεις στα αιολικά πάρκα που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς. Μια βασική υποχρέωση αποτελεί και η αδιάλειπτη λειτουργία σε βυθίσεις τάσης ή αδιάλειπτη λειτουργία σε σφάλμα (Low Voltage Ride-Through ή Fault Ride Through), γεγονός που οδήγησε τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών στην ανάπτυξη της κατάλληλης τεχνολογίας. Μέχρι πρόσφατα, αυτοί οι κώδικες εφαρμόζονταν σε χώρες με πιο ισχυρά δίκτυα και υψηλή αιολική διείσδυση. Όμως η νέα φιλοσοφία των καινούριων κανόνων είναι χρήσιμη και σε ασθενή δίκτυα, όπου τα αιολικά πάρκα μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου. Έτσι τα αιολικά πάρκα τείνουν να αντιμετωπίζονται πλέον περισσότερο σαν συμβατικοί σταθμοί παραγωγής παρά ως “αρνητικά φορτία” που αντιμετωπιζόταν παλιότερα [31].

Τα βασικά ζητούμενα από τους κώδικες δικτύων σχετικά με τη σύνδεση αιολικών πάρκων στο σύστημα είναι [31]:

- Όρια τάσης σε μεγάλο εύρος, ανάλογα με το επίπεδο τάσης του σημείου διασύνδεσης.
- Όρια συχνότητας σε μεγάλο εύρος. Σε περίπτωση υπερσυχνότητας η παραγόμενη ισχύς πρέπει να μειωθεί.
- Απαιτείται μείωση της ενεργού ισχύος σε περίπτωση ανάγκης.
- Έλεγχος αέργου ισχύος: τα αιολικά πάρκα οφείλουν να ελέγχουν το συντελεστή ισχύος σε μεγάλο εύρος (επαγωγικό ή χωρητικό) ή να συμβάλλουν στη ρύθμιση της τάσης.
- Αδιάλειπτη λειτουργία σε βύθιση τάσης (LVRT): σε περίπτωση σύντομων βυθίσεων της τάσης, οι ανεμογεννήτριες δεν αποσυνδέονται. Μάλιστα υποστηρίζουν τοπικά την τάση παράγοντας άεργο ισχύ.
- Όρια ποιότητας ισχύος, π.χ. για φλίκερ (flicker), αρμονικές, μεταβολές τάσης.
- Στην περίπτωσης αυτόνομων κυρίως συστημάτων, μπορεί να ζητείται ο περιορισμός της παραγωγής των αιολικών πάρκων, ώστε να μπορούν να αυξήσουν την ισχύ τους σε περίπτωση πτώσης της συχνότητας, συμμετέχοντας έτσι στη διαδικασία πρωτεύουσας ρύθμισης της συχνότητας. Επίσης σε

αυτόνομα συστήματα μπορεί να απαιτείται προσωρινή αύξηση της ισχύς των αιολικών πάρκων ώστε να περιοριστεί η βύθιση της συχνότητας μετά από μια διαταραχή.

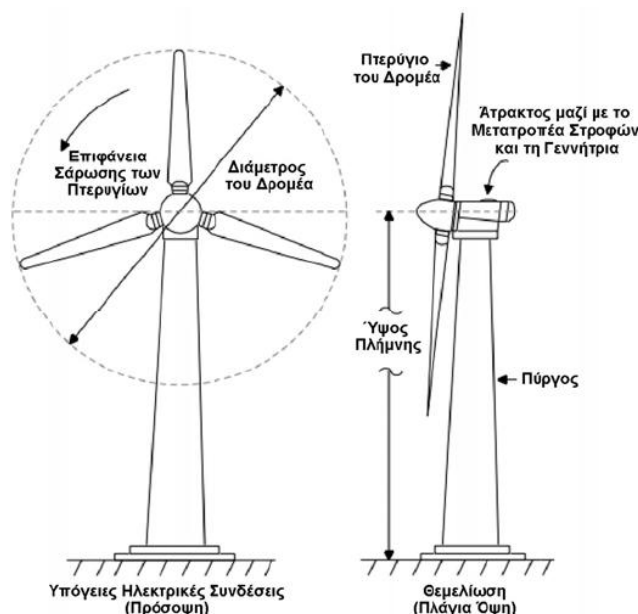
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι μπορεί, μέσω των ανεμογεννητριών, να μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενώ αποτελεί και μία από τις καθαρότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Αντίθετα, τα μειονεκτήματά της εντοπίζονται α) στη διακύμανση που παρουσιάζει ως προς την απόδοση ισχύος, διακύμανση που οφείλεται στη μεταβαλλόμενη -κατά τη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και του έτους- ένταση του ανέμου, β) στη χαμηλή πυκνότητα που παρουσιάζει ως μορφή ενέργειας με συνέπεια να απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος, γ) στο χρόνο που απαιτείται για την έρευνα και τη χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού μεγάλων περιοχών, ώστε να εντοπιστούν τα ευνοϊκά σημεία, δ) στο σχετικά υψηλό κόστος έρευνας και εγκατάστασης των αιολικών συστημάτων και ε) στις επιπτώσεις που έχουν για το περιβάλλον (κυρίως αλλοίωση τοπίου, ηχορύπανση), οι οποίες, όμως, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες των συμβατικών πηγών ενέργειας, θεωρούνται δευτερεύουσας σημασίας.

Βασικό χαρακτηριστικό της αιολικής παραγωγής είναι η μη αποθήκευση της πρωτογενούς ενέργειας. Λόγω αυτού οι ανεμογεννήτριες υποκαθιστούν περισσότερο ενέργεια και λιγότερο εγκατεστημένη ισχύ. Τα βασικότερα προβλήματα της αιολικής ενέργειας είναι η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου, η ασυνέχεια παραγωγής με πολλές διακυμάνσεις και η ανικανότητα παραγωγής ενέργειας κατά βούληση για την κάλυψη της στιγμιαίας ζήτησης. Όπως κάθε πηγή ενέργειας, η αιολική ενέργεια έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και η υψηλή συμμετοχή της στα ΣΗΕ επιφέρει αλλαγές στη συμπεριφορά των δικτύων. Αυτό δημιουργεί πιθανότητα υπερφόρτωσης του δικτύου, προβλήματα ευστάθειας του συστήματος και ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος. Επειδή δεν υπάρχουν δυνατότητες για οικονομική αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, επιβάλλεται να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών σταθμών για το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό η αιολική ισχύς πρέπει να εξισορροπείται με άλλες γρήγορες και ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής όπως θερμοηλεκτρικά ή μονάδες αποθήκευσης με μεγάλη απόκριση εξασφαλίζοντας την ασφάλεια του συστήματος. Για ηλεκτρικά συστήματα, όπως το σύστημα της Κρήτης, όπου οι αιχμές φορτίου καλύπτονται με αεροστρόβιλους ντίζελ και με υψηλό κόστος παραγωγής, θα μπορούσε να εξεταστεί η περίπτωση συνδυασμού ανεμογεννητριών με αντλητικά υδροηλεκτρικά έργα [10,30].

3.2 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών

Η ενέργεια του ανέμου (αιολική ενέργεια) μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των ανεμογεννητριών αν επιτραπεί η διέλευσή του από κινούμενα πτερύγια τα οποία κατά την περιστροφή τους εξασκούν ροπή στον δρομέα και μέσω των γεννητριών παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένα γενικό σύστημα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα. Μια εξίσου εφικτή εναλλακτική σχεδίαση είναι η ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα, που δεν είναι όμως τόσο συνήθης όσο η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα στα πρόσφατα έργα.

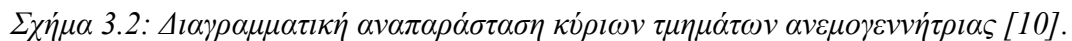


Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [12].

Οι συνιστώσες του Σχήματος 3.1 θα μπορούσαν να διαιρεθούν σε 6 βασικά υποσυστήματα [10,12,22,32]:

- Τον δρομέα (αεροδυναμικό μέρος της ανεμογεννήτριας), συνήθως αποτελούμενο από 2 ή 3 πτερύγια, μια πλήμνη μέσω της οποίας συνδέονται τα πτερύγια με τον χαμηλής ταχύτητας κινητήριο άξονα και μερικές φορές, υδραυλικά ή μηχανικά οδηγούμενα συστήματα συνδέσεων για την μεταβολή του βήματος του συνόλου ή μέρους των πτερυγίων.
- Την άτρακτο (μηχανικό σύστημα της ανεμογεννήτριας), η οποία γενικά περιλαμβάνει έναν μετατροπέα στροφών (προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας) και μια γεννήτρια (ως στρεφόμενο στοιχείο), άξονες και συνδέσμους, ένα κάλυμμα για ολόκληρη την άτρακτο και συχνά ένα μηχανικό δισκόφρενο (τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στο άξονα της γεννήτριας και αποτελεί το σύστημα πέδης) και ένα σύστημα εκτροπής.
- Την γεννήτρια (συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή στροφών μέσω ενός ελαστικού συνδέσμου) και τους μετατροπείς ισχύος που αποτελούν το ηλεκτρικό σύστημα της ανεμογεννήτριας.
- Τον πύργο και την θεμελίωση που στηρίζει τον δρομέα και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης (άτρακτος). Επάνω στον πύργο εδράζεται όλη η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.

- Τα παραπάνω απεικονίζονται καλύτερα στο Σχήμα 3.2.



Στην πραγματικότητα η ανεμογεννήτρια εκμεταλλεύεται ένα ποσοστό από την ισχύ του αέρα. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p της ανεμογεννήτριας, ο οποίος αποτελεί στην ουσία τον αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης της πτερωτής. Ακόμα και για μια ιδανική πτερωτή, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz, που δίνεται από την σχέση:

Η ισχύς $P_{A/G}$ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια δίνεται τελικά ως:

- ρ : η πυκνότητα του αέρα.
- C_p : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας.
- A : η επιφάνεια του δρομέα (πR^2).

- V_w : η ταχύτητα του ανέμου.
- η_{em} : ο ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Υπάρχουν περιορισμοί που μειώνουν σημαντικά το πραγματικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής από μία ανεμογεννήτρια [33]:

- Για μικρές ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια δεν περιστρέφεται επειδή οι απώλειες κενού φορτίου (τριβές στον άξονα, μειωτήρα, κλπ) είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της μηχανής. Η ταχύτητα στην οποία αρχίζει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας ονομάζεται ταχύτητα ένταξης V_{ci} (κυμαίνεται από 2 μέχρι 5 m/s).
- Από μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά η ωφέλιμη ισχύς της ανεμογεννήτριας παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες. Η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία έχουμε ονομαστική ισχύ της μηχανής ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας V_R (συνήθως $V_R=10\div 15$ m/s).
- Λόγοι ασφάλειας της εγκατάστασης επιβάλουν τη διακοπή λειτουργίας της μηχανής σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_{co} κυμαίνεται μεταξύ 20 m/s και 25 m/s.

Η ακολουθία των συμβάντων κατά την παραγωγή και μεταφορά της αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συνοψιστεί ως εξής [12]:

- Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με τον δρομέα της ανεμογεννήτριας παράγεται μια ροπή στον δρομέα.
- Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω του μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει την γεννήτρια.
- Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την γεννήτρια μετασχηματίζεται στην μέση τάση από τον μετασχηματιστή.
- Το δίκτυο διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια εκεί όπου απαιτείται.

3.3 Κατηγοριοποίηση Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την διεύθυνση του άξονα του δρομέα, το μέγεθος, την θέση εγκατάστασης τους, την ταχύτητα περιστροφής, την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους και τον τρόπο ελέγχου.

Ως προς την διεύθυνση του άξονα, συναντώνται οι μηχανές οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα, με τις πρώτες να είναι πιο εξελιγμένες και διαδεδομένες στην παγκόσμια αγορά. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον άξονα τους παράλληλα με την επιφάνεια της γης και την διεύθυνση του ανέμου. Μπορούν να έχουν από ένα έως δεκάδες πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε

μπροστά (ανάντη) είτε πίσω (κατάντη) από τον πύργο στήριξης. Αντίθετα οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από ένα σταθερό άξονα κάθετο στην επιφάνεια του εδάφους και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι μηχανές αυτές παρουσιάζουν αυτόματη προσαρμογή στη διεύθυνση του ανέμου λόγω γεωμετρίας της πτερωτής και έτσι αποτελούν πιο απλές κατασκευές. Επίσης έχουν καλή αεροδυναμική απόδοση, χαμηλό κόστος κατασκευής και σχετικά απλά συστήματα ελέγχου, αλλά παρουσιάζουν αρκετές ταλαντώσεις και καταπονήσεις [30].

Ως προς το μέγεθος της ονομαστικής ισχύος που παράγουν οι ανεμογεννήτριες στην έξοδο τους ταξινομούνται όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση των ανεμογεννητριών ανάλογα με την ισχύ εξόδου τους [33].

Μέγεθος Α/Γ	Ισχύς εξόδου (kW)	Ύψος πύργου (m)	Διάμετρος δρομέα (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m ²)
micro	Μικρότερη από 1	-	Μικρότερη από 1	Μικρότερη από 1
Μικρό	1 με 50	5 με 30	1 με 16	1 με 200
Μεσαίο	50 με 1000	30 με 70	16 με 55	200 με 2400
Μεγάλο	Πάνω από 1000	Πάνω από 50	Πάνω από 55	Πάνω από 2400

Ως προς τη θέση εγκατάστασης των ανεμογεννητριών διακρίνουμε τα χερσαία αιολικά πάρκα σε ορεινές περιοχές και συνήθως στις κορυφογραμμές, τα παράκτια σε χαμηλό έδαφος κοντά στη θάλασσα ή σε σημεία πάνω από αυτήν σε απόσταση λιγότερη των 10 χιλιομέτρων από την ακτή και τέλος τα θαλάσσια αιολικά πάρκα, τα οποία εγκαθίσταται στη θάλασσα και σε απόσταση από την ακτή μεγαλύτερη των 10 χιλιομέτρων. Τα τελευταία παρουσιάζουν αυξημένα κόστη εγκατάστασης λόγω μεγαλύτερων πύργων και αντιδιαβρωτικής προστασίας από το θαλασσινό νερό [30].

Ως προς την σύνδεση τους στο ηλεκτρικό δίκτυο οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε:

- Σταθερών στροφών (fixed speed)
- Μεταβλητών στροφών (variable speed)

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και λειτουργούν σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής, λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Πρακτικά, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης περίπου του 1%. Μπορούν να λειτουργούν είτε σε συνδυασμό με γεννήτριες επαγωγής είτε με σύγχρονες γεννήτριες, όμως επιλέγεται πάντα η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, κυρίως τύπου κλωβού, καθώς οι σύγχρονες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαίτερα έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά της απόκρισής τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου, καθώς και το αυξημένο κόστος και βάρος τους.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι:

- Το μικρό κόστος τους, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

Παρ' όλα αυτά, οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, όπως τα εξής [33,34]:

- Λειτουργώντας υπό μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και επειδή η ταχύτητα τους είναι πρακτικά ίση με σύγχρονη, δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τις ριπές του ανέμου υπό μορφή μηχανικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτές να εκφράζονται ως διακυμάνσεις ροπής και να προκαλούν συνεπώς διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.
- Η ασύγχρονη γεννήτρια που συνήθως χρησιμοποιείται απαιτεί την απορρόφηση αέργου ισχύος.
- Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη-απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών, παρατηρούνται έντονα μεταβατικά φαινόμενα.
- Η σύνδεση ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου με το δίκτυο γίνεται απευθείας και δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη επιλογή για τις νέες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών. Ένας από τους βασικότερους λόγους για τον οποίο προτιμώνται είναι η ύπαρξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να αποκτούν μεγαλύτερο έλεγχο και επίβλεψη της λειτουργίας τους. Χάρη στην παρουσία του μετατροπέα, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών μπορούν και λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Η ταχύτητα περιστροφής τους μεταβάλλεται με τη βοήθεια του μετατροπέα με βάση την ταχύτητα του ανέμου, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι μεταβολές του ανέμου παύουν να αποτελούν πρόβλημα και οι διακυμάνσεις ισχύος απορροφώνται μέσω των αλλαγών στην ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.

Ορισμένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι [33,34]:

- Μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και αυξημένη διάρκεια ζωής. Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και προσαρμογή της ανεμογεννήτριας στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες, καθώς, χάρη στη δυνατότητα λειτουργίας με μεταβλητή ταχύτητα, είναι δυνατή η συνεχής προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας στην ταχύτητα του ανέμου, προκειμένου να εξασφαλίζεται μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής.
- Μειωμένος ακουστικός θόρυβος, καθώς είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.

- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων (μόνο για πλήρη μετατροπέα).

Επίσης, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας προσφέρει πρόσθετα πλεονεκτήματα στη λειτουργία των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, όπως τα εξής:

- Έλεγχος της παραγόμενης ενεργού και αέργου ισχύος.
- Καλύτερης ποιότητας παρεχόμενη ισχύς εξόδου (μείωση διακυμάνσεων ισχύος, βελτιωμένο επίπεδο flicker, περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης) και γενικότερα καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.
- Γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα.

Παρ' όλα αυτά, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως [10,32,34]:

- Αυξημένο κόστος λόγω των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονικών ισχύος.
- Απώλειες που οφείλονται στον μετατροπέα ισχύος.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα.
- Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο λόγω του μετατροπέα και ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στο δίκτυο.

Ως προς την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε διάφορους τύπους, από τους οποίους οι συνηθέστεροι είναι [31]:

A. Σταθερών στροφών, με γεννήτρια επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα (Σχήμα 3.3 30%)

B. Ημι-μεταβλητών στροφών, με γεννήτρια επαγωγής με μεταβλητή αντίσταση δρομέα (Σχήμα 3.3, 10%)

Γ. Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (Σχήμα 3.4, 45%)

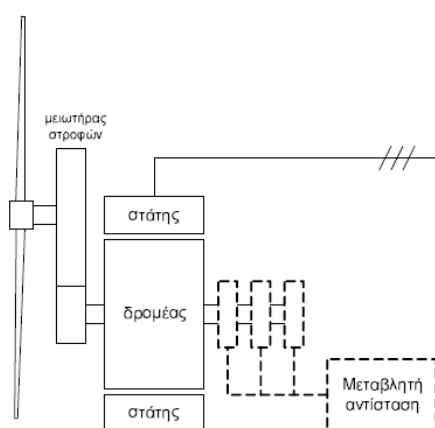
Δ. Μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα (Σχήμα 3.5, 15%).

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι σε παρένθεση φαίνεται η εκτίμηση του μεριδίου στην παγκόσμια αγορά το 2005.

Η πρώτη κατηγορία προέρχεται από την πρώτη “γενιά” ανεμογεννητριών η οποία χρησιμοποιεί απλές γεννήτριες επαγωγής, συνήθως κλωβού, απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο. Καθώς οι γεννήτριες επαγωγής συνδέονται απευθείας στο δίκτυο, η ταχύτητα περιστροφής τους μεταβάλλεται πολύ λίγο με το σημείο λειτουργίας και είναι πάντα πολύ κοντά στη σύγχρονη. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως “σταθερών στροφών”. Επειδή η περωτή στρέφεται με σχετικά χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, χρησιμοποιείται, επίσης, μειωτήρας στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων). Αρκετές ανεμογεννήτριες αυτού του είδους δουλεύουν σε δύο ταχύτητες. Η χαμηλή

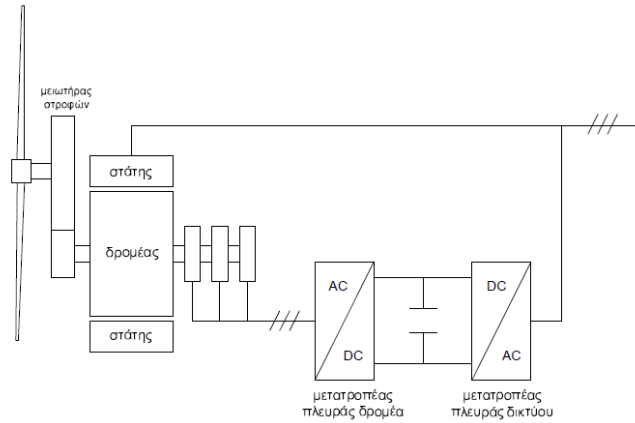
ταχύτητα που χρησιμοποιείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη απόδοση και μειωμένο θόρυβο. Στα νεότερα και μεγαλύτερα μοντέλα αυτού του είδους, χρησιμοποιείται συνήθως ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος. Δεδομένου ότι οι γεννήτριες επαγωγής καταναλώνουν άεργο ισχύ, τα αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών συνοδεύονται από διατάξεις αντιστάθμισης (π.χ. πυκνωτές) ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση του συντελεστή ισχύος.

Η δεύτερη κατηγορία αποτελεί παραλλαγή της πρώτης, όπου όμως χρησιμοποιείται τυλιγμένος δρομέας με μεταβλητή εξωτερική αντίσταση. Η μεταβολή της εξωτερικής αντίστασης επιτρέπει τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής μέχρι $\pm 10\%$.



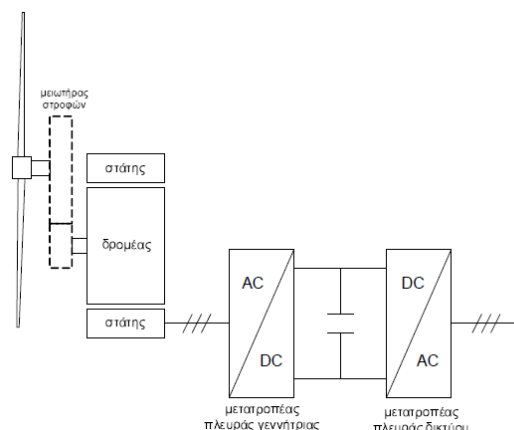
Σχήμα 3.3: Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής[31].

Η τρίτη κατηγορία είναι η πιο διαδεδομένη σήμερα. Η Ασύγχρονη Γεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ) είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα της οποίας και ο στάτης και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο μεν στάτης απευθείας, όπως στις κλασικές μηχανές επαγωγής, ο δε δρομέας μέσω ψηκτρών και ενός μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) οι οποίοι έχουν κοινή DC πλευρά. Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο από τον στάτη και -μέσω του μετατροπέα- από τον δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα (περίπου 25-30%), αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος και άρα μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος. Εκτός από τις στροφές, ο μετατροπέας πλευράς δρομέα ρυθμίζει την άεργο ισχύ που παράγει η μηχανή από τον στάτη. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει το ενεργό ρεύμα, που εγχέει στο δίκτυο έτσι ώστε η DC τάση να παραμένει σταθερή και μπορεί επίσης να παρέχει άεργο ισχύ. Συνήθως ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται από τον μετατροπέα πλευράς δρομέα.



Σχήμα 3.4: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης[31].

Στην τέταρτη κατηγορία των ανεμογεννητριών με πλήρη μετατροπέα σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες γεννήτριες για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή (ο μετατροπέας ισχύος απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου). Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να έχουν τύλιγμα διέγερσης ή να είναι μόνιμων μαγνητών και επιτρέπουν την αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια έχει μεγάλο αριθμό πόλων και μεγαλύτερη διάμετρο. Ένα διαδεδομένο σχήμα, σήμερα, χρησιμοποιεί γεννήτρια με τύλιγμα διέγερσης και ανορθωτή διόδων στην πλευρά της γεννήτριας. Σε άλλα σχήματα χρησιμοποιείται PWM μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας, οπότε η γεννήτρια μπορεί να είναι μηχανή επαγωγής. Ο PWM μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει την ενεργό και άεργο έγχυση στο δίκτυο. Ο έλεγχος στροφών πραγματοποιείται μέσω της ρύθμισης της ενεργού έγχυσης του μετατροπέα πλευράς δικτύου, ο οποίος επίσης ρυθμίζει την παραγωγή/κατανάλωση αέργου ισχύος.



Σχήμα 3.5: Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα πλήρους ισχύος[31].

Στις ανεμογεννήτριες τυλιγμένου δρομέα παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου της ηλεκτρικής ροπής μέσω μεταβαλλόμενης αντίστασης του δρομέα ενώ οι

ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών (οι πιο διαδεδομένες) αξιοποιούν βέλτιστα την αιολική ενέργεια με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αυξημένο βαθμό απόδοσης [32].

Άλλο κριτήριο κατηγοριοποίησης των ανεμογεννητριών είναι ο τρόπος ελέγχου του περιορισμού υψηλών αεροδυναμικών ροπών. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, διακρίνονται οι εξής δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών [10,32]:

- ανεμογεννήτρια με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control)
- ανεμογεννήτρια με έλεγχο της αεροδυναμικής ανυψώσεως ή αεροδυναμικό έλεγχο (stall control)

Οι ανεμογεννήτριες με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) εξασφαλίζουν την διατήρηση σταθερής παραγόμενης ισχύος στην ονομαστική τιμή για λειτουργία της ανεμογεννήτριας πάνω από την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου. Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από την ονομαστική του, η γωνία βήματος της έλικας ρυθμίζεται σε μια ελάχιστη τιμή, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη εκμετάλλευση της αεροδυναμικής ισχύος. Πρόκειται ουσιαστικά για ανεμογεννήτριες με πτερύγια, τα οποία μπορούν να περιστρέφονται κατά το διαμήκη άξονά τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας β που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Έτσι, όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με άνεμο πάνω από τον ονομαστικό, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου και εξασφαλίζεται ότι δε θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Δηλαδή, με το σύστημα μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control) μειώνουν την ισχύ μειώνοντας τη γωνία πρόσπτωσης και άρα τον αεροδυναμικό συντελεστή. Για να σταματήσει η περιστροφή της ανεμογεννήτριας όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας σε μηχανική καταπόνηση, τα πτερύγια στρέφονται στις 90, ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση.

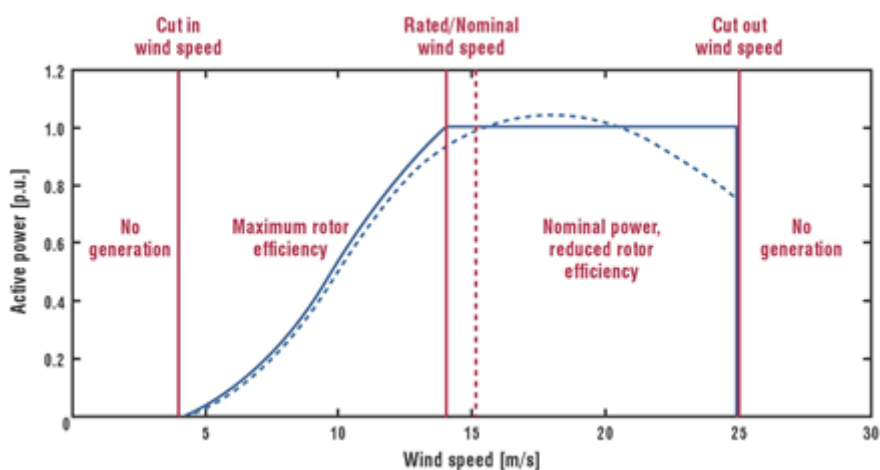
Από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control) αποτελεί το γεγονός ότι αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της ανεμογεννήτριας, περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς χωρίς διακοπή της λειτουργίας και επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλό άνεμο. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου των πτερυγίων καθώς και η καταπόνηση τους λόγω αδρανειακής φόρτισης.

Από την άλλη πλευρά, οι ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο (stall control) διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης, τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης με σκοπό τον περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος. Η απώλεια στήριξης εμφανίζεται καθώς μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια (angle of attack) αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου. Βασικό πλεονέκτημά των ανεμογεννητριών αυτών αποτελεί το γεγονός πως δεν απαιτούν μηχανισμό μεταβολής του βήματος της έλικας και

συνεπώς συνιστούν απλούστερες και στιβαρότερες κατασκευές. Μειονεκτήματα μίας ανεμογεννήτριας τέτοιου τύπου είναι το γεγονός ότι τα πτερύγια της υφίστανται μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις, ότι σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζεται μείωση της παραγόμενης ισχύος, καθώς και η αδυναμία ελέγχου της εξαγόμενης ισχύος [10].

Μία άλλη τεχνική ελέγχου είναι ο ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος (active stall control), κατά τον οποίο η γωνία βήματος μεταβάλλεται στην αντίθετη κατεύθυνση, ώστε η γωνία πρόσπτωσης να αυξηθεί και να μειωθεί ο αεροδυναμικός συντελεστής με την εκδήλωση του φαινομένου της απώλεια στήριξης. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται συνήθως με ανεμογεννήτριες με απλές μηχανές επαγωγής [31].

Για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου, η λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας με pitch control και μίας ανεμογεννήτριας με stall control φαίνονται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Τυπικές καμπύλες ισχύος ανεμογεννήτριας τύπου stall (διακεκομμένη γραμμή) και τύπου pitch-controlled (συνεχής γραμμή) [34].

3.4 Ταχύτητα ανέμου

Το μέτρο και η κατεύθυνσή της ταχύτητας ανέμου εμφανίζουν συχνές μεταβολές. Εμφανίζονται διακυμάνσεις της μέσης ημερήσιας ταχύτητας από μέρα σε μέρα μέσα στο έτος και της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου, από έτος σε έτος. Παρόλα αυτά, η άμεση σχέση του ανέμου και της περιοδικής εμφάνισης του ήλιου σε ένα τόπο, έχει ως αποτέλεσμα την εποχική και ετήσια περιοδικότητα της εμφάνισης της μέσης ταχύτητάς του. Συνεπώς για την μελέτη και τον υπολογισμό των κατάλληλων σε κάθε περίπτωση αιολικών συστημάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η γνώση της περιοδικής εμφάνισης της μέσης ταχύτητας του ανέμου, σε χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους π.χ. μέσα στο μήνα ή το έτος.

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει ο άνεμος. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης αιολικών συστημάτων θα πρέπει είναι γνωστά τα ακόλουθα:

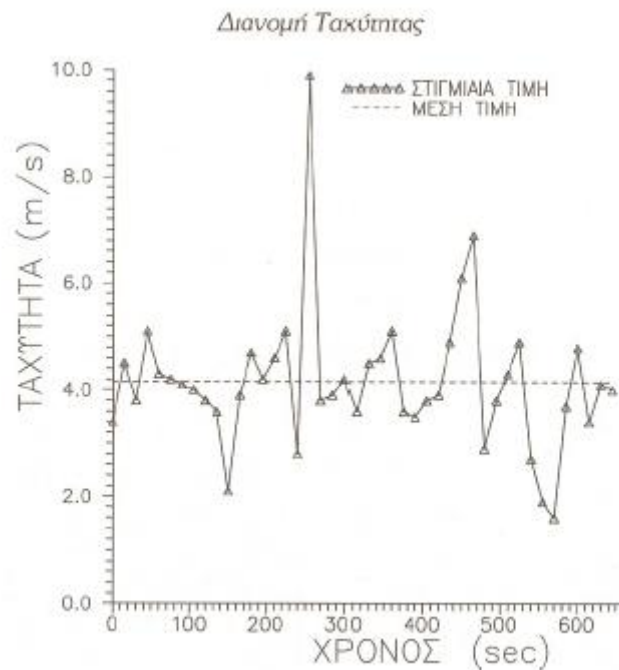
- Η ταχύτητα του ανέμου
- Η διεύθυνση του ανέμου
- Η επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη
- Ο στροβιλισμός του ανέμου
- Η μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου)

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί λοιπόν ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μέγεθος κατά μέτρο και κατεύθυνση. Αποτελείται από την μέση ταχύτητα και μία τυρβώδη συνιστώσα, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Σχήμα 3.7):

$$V_w(t) = \bar{v}_w + v(t) \quad (3.3)$$

Όπου

- $V_w(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου
- $\bar{v}_w$: η μέση ταχύτητα του ανέμου
- $v(t)$: η τυρβώδης συνιστώσα του ανέμου



Σχήμα 3.7: Χρονοσειρά με την μέση και τη στιγμιαία ταχύτητα ανέμου [35].

Κεφάλαιο 4

Υβριδικά Συστήματα Αιολικής ενέργειας με Αντλησιοταμίευση

4.1 Γενικά για την Αντλησιοταμίευση

Η αποθήκευση με άντληση υδάτων αποτελεί την παλιότερη από τις τεχνολογίες αποθήκευσης για ηλεκτροπαραγωγή μεγάλης κλίμακας, ξεκίνησε να εφαρμόζεται το 1929 και ουσιαστικά μέχρι το 1970 ήταν η μόνη εμπορικά διαθέσιμη επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Το 2001 η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων αντλησιοταμίευσης εκτιμήθηκε στα 82.800 MW [12]. Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την πιο ελκυστική μέθοδο αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας (100MW – 5000 MW) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα τόσο σε διασυνδεδεμένα όσο και σε αυτόνομα συστήματα. Η πιο γενική συγκρότηση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης (pumped hydro storage system) περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες νερού που έχουν υψομετρική διαφορά της τάξης των εκατοντάδων μέτρων, έναν αριθμό υδροστροβίλων με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές γεννήτριες, έναν αριθμό αντλιών με τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς κινητήρες, καθώς και ένα σύστημα ελέγχου [25,26]. Η επικοινωνία μεταξύ του άνω και του κάτω ταμιευτήρα μπορεί να γίνει με έναν ή με δύο αγωγούς πτώσης.

4.1.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδου

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε λίγα δευτερόλεπτα και η τυπική συνολική απόδοση του κύκλου άντλησης – παραγωγής κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77%, με τους υδροστροβίλους να εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις αντλίες [27]. Το βασικότερο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι παρέχει εγγυημένη ισχύ στο δίκτυο και γρήγορα (δεδομένου ότι οι υδροστροβίλοι έχουν άμεση απόκριση), γεγονός που παρέχει δυνατότητα υποκατάστασης της συμβατικής ισχύος, δυνατότητα που δεν έχουν οι ΑΠΕ λόγω της μεταβλητής φύσης τους [6]. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της αιολικής διείσδυσης και της διείσδυσης ΑΠΕ γενικότερα σε νησιωτικά συστήματα, που διαφορετικά περιορίζεται από τα όρια τεχνικού ελαχίστου και δυναμικής απόκρισης. Στην εργασία [6] εξετάζεται η βέλτιστη ενσωμάτωση συστήματος αντλησιοταμίευσης στο νησί Gran Canaria.

Με την αντλησιοταμίευση μπορούν να μειωθούν οι διαφορές που παρουσιάζονται στο σύστημα μεταξύ της βάσης και της αιχμής της ζήτησης. Ειδικά αφού η μονάδα αντλησιοταμίευσης τεθεί σε λειτουργία, θα μπορούσε αυτή να αναλάβει τις αιχμές ζήτησης του ηλεκτρικού φορτίου αντί να τις αναλάβουν οι υψηλού κόστους θερμικές μονάδες και να μειωθεί έτσι η κατανάλωση καυσίμου του συστήματος. Έτσι θα μπορούσε το δίκτυο να λειτουργεί κάτω από βέλτιστες συνθήκες, να βελτιωθεί ο βαθμός χρήσης και η απόδοση λειτουργίας των θερμικών μονάδων και να μειωθεί η

κατανάλωση άνθρακα. Το κέρδος θα προκύψει από την εξοικονόμηση άνθρακα και θα φέρει σημαντικό κέρδος [36].

Ένα άλλο πλεονέκτημα της μονάδας αντλησιοταμίευσης είναι η δυνατότητα χρήσης του αποθηκευμένου στους ταμιευτήρες νερού για σκοπούς ύδρευσης και άρδευσης. Το σύστημα αντλησιοταμίευσης μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιούν μέρος της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Έτσι εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του νερού και για ύδρευση-άρδευση [37]. Επίσης, δεν είναι απαραίτητη η συνεχής ροή νερού και το σπουδαιότερο είναι ότι το νερό δεν καταναλώνεται αλλά ανακυκλώνεται.

Από την άλλη μεριά, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης είναι οι γεωγραφικοί, γεωλογικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων, το υψηλό κόστος επένδυσης και οι μακροί χρόνοι υλοποίησης [12]. Τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα προκαλούν περιβαλλοντική ζημία που οφείλεται στους ταμιευτήρες και παρουσιάζουν δυσκολία εύρεσης τοπογραφικά κατάλληλων περιοχών, οι οποίες έχουν επαρκή χωρητικότητα νερού και καθιστούν έτσι κερδοφόρα την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων [6]. Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν παρά μόνο σε περιοχές που το επιτρέπει η φυσική και γεωλογική διαμόρφωση, δηλαδή σε θέσεις που κατά κανόνα βρίσκονται μακριά από την κατανάλωση, αλλά επιβαρύνονται με το κόστος των έργων μεταφοράς και τις σχετικές απώλειες.

4.2 Περιγραφή Υβριδικού Σταθμού

Ένας λόγος που κίνησε το ενδιαφέρον για την μεγάλης κλίμακας χρήση των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων από τη δεκαετία του 1970, ήταν η αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπό αυτή την έννοια, έχουν προταθεί διάφορα σχέδια, με στόχο την προσθήκη της χρήσης της αιολικής ενέργειας στους ήδη υπάρχοντες υδροηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς επίσης και σχέδια για μικρού μεγέθους υβριδικά συστήματα [6].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός δύο διαφορετικών μορφών ΑΠΕ [38]:

- Της αιολικής ενέργειας (ως μονάδας ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού) και
- Της υδροηλεκτρικής ενέργειας (ως μονάδας παραγωγής και αποθήκευσης του υβριδικού σταθμού).

Ο αποδοτικός αυτός συνδυασμός των δύο φυσικών πόρων, ο οποίος κερδίζει συνεχώς έδαφος σε παγκόσμιο αλλά και σε εθνικό επίπεδο, δίνει μια αξιόπιστη απάντηση στο πολύ σημαντικό ζήτημα της αποθήκευσης και ελεγχόμενης διανομής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης στα ελληνικά νησιά παραμένουν ακόμη χαμηλά, παρά το υψηλό αιολικό τους δυναμικό, λόγω των περιορισμών ισχύος που επιβάλλονται στα αιολικά πάρκα εξαιτίας των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Ένας αποτελεσματικός τρόπος αύξησης της αιολικής διείσδυσης είναι μέσω της τεχνολογίας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία αποτελούν συνδυασμό σταθμού παραγωγής από ΑΠΕ και διατάξεων αποθήκευσης της ενέργειας που μέχρι τώρα απορριπτόταν [37].

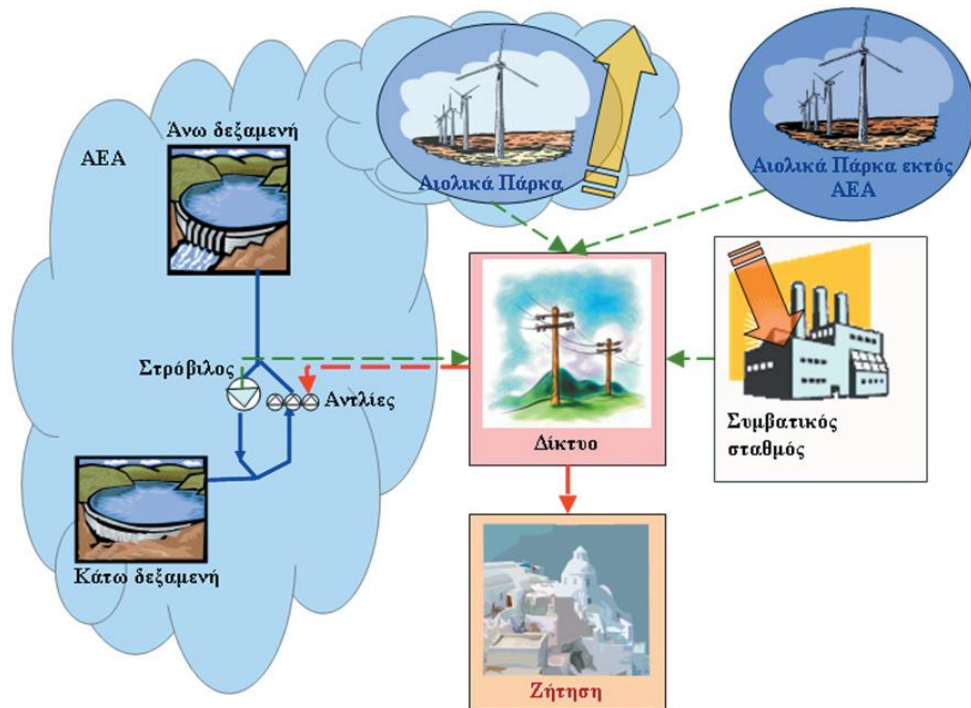
Ένας τυπικός υβριδικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αιολικής ενέργειας και αντλιοσταμίου περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα [37]:

- το αιολικό πάρκο, που αποτελεί τη μη ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή το αντλιοστάσιο, τους αγωγούς αναρρόφησης και κατάθλιψης, και τους ταμιευτήρες με την κατάλληλη υψομετρική διαφορά μεταξύ τους.
- το σύστημα των υδροστροβίλων που θα αποτελεί την ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος.
- τα συστήματα ελέγχου.
- τα συστήματα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

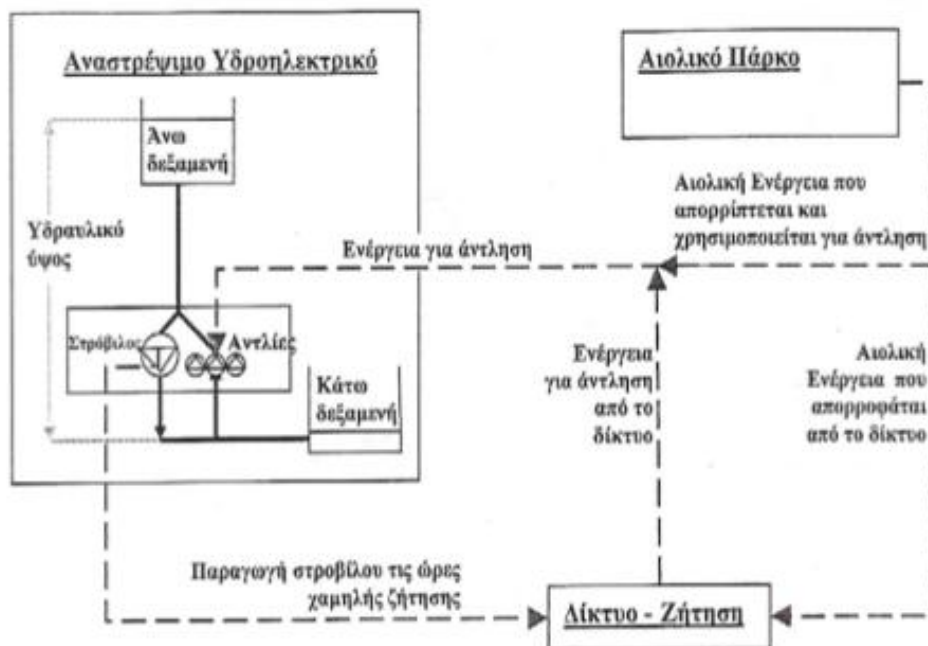
Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να εκμεταλλευτούν το πλούσιο αιολικό δυναμικό των νησιών. Επίσης σε αρκετές περιπτώσεις νησιών -όταν το επιτρέπει η τοπογραφία- μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες λίμνες, που έχουν κατασκευαστεί για αρδευτικούς-υδρευτικούς σκοπούς. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι σε μικρή απόσταση και με ικανή υψομετρική διαφορά να μπορεί να κατασκευαστεί η δεύτερη, συνήθως άνω, δεξαμενή [37].

Η φιλοσοφία των υβριδικών συστημάτων στηρίζεται στην αξιοποίηση της περίσσειας αιολικής ενέργειας που δεν καταναλώνεται από το δίκτυο, η οποία επιτυγχάνεται μέσω άντλησης νερού από τον κάτω ταμιευτήρα στον άνω.

Στο Σχήμα 4.1, απεικονίζεται ένα νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο εκτός από τον συμβατικό σταθμό παραγωγής (συνήθως Diesel) και των αιολικών πάρκων, εγκαθίσταται επιπλέον, υβριδικός σταθμός παραγωγής ενώ όλη η διαδικασία ενός κύκλου άντλησης – παραγωγής φαίνεται πιο αναλυτικά στο Σχήμα 4.2 και εξηγείται στην συνέχεια.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση ένταξης υβριδικού συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση σε μη διασυνδεδεμένο νησί [37].



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος με αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό και αιολικό πάρκο[38].

Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή παράγεται ηλεκτρική ισχύς P_w από τα αιολικά πάρκα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ελέγχει αν η στιγμιαία παραγωγή ισχύος

από τα αιολικά πάρκα P_w είναι μεγαλύτερη από τη στιγμιαία ζήτηση P_d . Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις [39,40]:

1. Αν $P_w > P_d$, η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από τα αιολικά πάρκα. Οι αντλίες του συστήματος αντλησιοταμίευσης τροφοδοτούνται με ισχύ $P_p = P_w - P_d$, με σκοπό να αποθηκευτεί το νερό με τη μορφή δυναμικής ενέργειας στην άνω δεξαμενή του ταμιευτήρα.
2. Αν $P_w < P_d$, η παραγόμενη αιολική ισχύς προσφέρεται ολόκληρη για την κάλυψη της ζήτησης. Την ίδια χρονική στιγμή, παράγεται από τους υδροστροβίλους συμπληρωματική ηλεκτρική ισχύς $P_h = P_d - P_w$, προκειμένου να συμπληρωθεί το έλλειμμα στην παραγωγή ισχύος. Στην περίπτωση που η άνω δεξαμενή του ταμιευτήρα δεν περιέχει ικανή ποσότητα νερού ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα παραγωγής ισχύος μέσω των υδροστροβίλων, τότε τίθενται σε λειτουργία οι θερμοηλεκτρικές μονάδες, οι οποίες παράγουν ισχύ $P_t = P_d - P_w - P_h$.

Ένα χαρακτηριστικό των Υβριδικών Συστημάτων είναι ο ρυθμός εναλλαγής της λειτουργίας τους μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εναλλαγή αυτή μπορεί να συμβαίνει μια ή περισσότερες φορές την ημέρα, μια φορά την εβδομάδα ή μια φορά το χρόνο. Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις εναλλαγής της λειτουργίας απαιτούν την ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης (άνω ταμιευτήρα) πολύ μεγάλης χωρητικότητας [27].

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο, την τιμολόγηση της παραγόμενης ενέργειας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του νησιού.

Μια τέτοια εφαρμογή συμβάλει στην αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και στη μείωση της λειτουργίας των συμβατικών μονάδων. Οι έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας περιορίζονται με την ύπαρξη του αποθηκευτικού συστήματος και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση και διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Παράλληλα, η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος αυξάνεται με την ένταξη του υδροστροβίλου, που αποτελεί μία ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ενέργειας με δυνατότητα άμεσης απόκρισης.

Υπό προϋποθέσεις, τα υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση μπορεί να συμβάλουν στη μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, το κόστος παραγόμενης ενέργειας ενός τέτοιου συστήματος είναι γνωστό κατά την υλοποίηση του και δεν επιφυλάσσει κινδύνους ανατιμήσεων κατά τη διάρκεια της ζωής της επένδυσης, όπως αντιθέτως συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, υπάρχουν σημαντικά κοινωνικά οφέλη, αφού το έργο συμβάλει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στη δημιουργία απασχόλησης.

Συνεπώς, η υιοθέτηση ενός στρατηγικού στόχου για την προώθηση τέτοιων λύσεων, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απεξάρτηση των νησιών από τα ορυκτά καύσιμα, στην εξοικονόμηση ακριβού καυσίμου και στη μείωση των ρύπων [27,37]

4.3 Εφαρμογές Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι [41]:

4.3.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Τα διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά δίκτυα απαρτίζονται από τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι ότι η τάση και η συχνότητα δεν επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία επιπρόσθετων γεννητριών ή φορτίων. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από τις άλλες γεννήτριες. Παρομοίως, η περίσσεια ενέργειας που ενδεχομένως παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο, ωστόσο πρέπει να τονιστεί ότι τίθενται περιορισμοί σχετικά με τη συμμετοχή του υβριδικού σταθμού στη στιγμιαία παραγωγή ισχύος. Σε μερικές περιπτώσεις η παρουσία του υβριδικού σταθμού επηρεάζει την ικανότητα του κεντρικού δικτύου να διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα, οπότε γίνεται λόγος για ασθενές δίκτυο και συνήθως απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.

4.3.2 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων ή νησιωτικών περιοχών που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η μετατροπή ενός συμβατικού αυτόνομου σταθμού σε υβριδικό αποσκοπεί κατά κύριο λόγο στην ελάττωση της κατανάλωσης καυσίμου και των ωρών λειτουργίας των συμβατικών γεννητριών. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, πρέπει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής έργου ισχύος ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ του συστήματος ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιον τρόπο ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Τα αυτόνομα δίκτυα επηρεάζονται έντονα από την σύνδεση επιπρόσθετου φορτίου ή γεννήτριας. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου.

4.3.3 Τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού

Υβριδικά συστήματα χωρίς δίκτυο διανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού, τα οποία μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, ή ακόμα και μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Παραδείγματα τέτοιων φορτίων αποτελούν οι ηλεκτρικοί φάροι, ο φωτισμός της σήμανσης στους αυτοκινητόδρομους, η άντληση νερού, τα συστήματα ασφαλήτωσης καθώς και οι ηλεκτρικοί μύλοι. Μία εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνδυασμό με μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αυτά τα συστήματα ο έλεγχος συχνότητας και τάσης καθώς και η διαχείριση της περίσσειας ισχύος δεν αποτελούν τις κύριες παραμέτρους σχεδίασης. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης και συμβατικής γεννήτριας που λειτουργεί όποτε η παραγωγή ΑΠΕ δεν επαρκεί, αλλά συνήθως δεν λειτουργεί παράλληλα με τις γεννήτριες ΑΠΕ.

4.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης με άντληση

Η αύξηση του ποσοστού της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από την αιολική ενέργεια προκαλεί νέα τεχνικά προβλήματα στην διαχείριση ενός ηλεκτρικού δικτύου, τα οποία οφείλονται στην έντονη χρονική διακύμανση που παρουσιάζει η παραγωγή των αιολικών πάρκων και στην αδυναμία πρόβλεψης της παραγωγής από τα αιολικά πάρκα.

Στην ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας που υπήρχε παραδοσιακά λόγω των τεχνικών ελαχίστων των μεγάλων θερμικών σταθμών παραγωγής και την κάλυψη των αιχμών ενός δικτύου προστίθεται μία καινούργια που προέρχεται από την αύξηση της συμμετοχής των αιολικών πάρκων στο σύστημα παραγωγής [4].

Στα συνήθη συστήματα αντλησιοταμίευσης, η άντληση γίνεται με σταθερές στροφές. Στην περίπτωση όμως που είναι επιθυμητή η μεταβολή της αποθηκευόμενης ισχύος, ώστε να απορροφάται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η έντονα μεταβαλλόμενη ενέργεια που παράγεται από ένα αιολικό πάρκο, η προσαρμογή της αντλητικής εγκατάστασης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους [4,27]:

- Την παράλληλη λειτουργία περισσότερων αντλιών
- Την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των αντλιών

Οι παραπάνω τρόποι αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

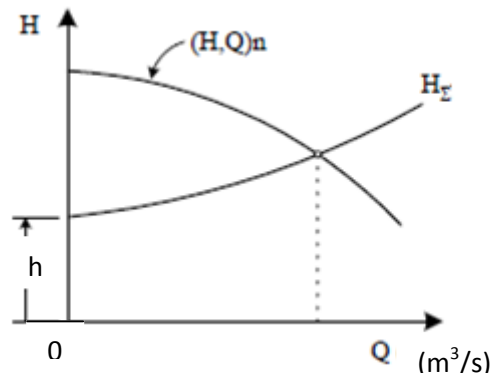
4.4.1 Άντληση με σταθερή ταχύτητα περιστροφής

Μία φυγόκεντρη αντλία εγκατεστημένη σε μία αντλητική εγκατάσταση (για δεδομένη υψομετρική διαφορά και δεδομένη σωλήνωση μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής), η οποία στρέφεται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής και με σταθερή κλίση των ρυθμιστικών πτερυγίων (εάν πρόκειται για αναστρέψιμη υδραυλική μηχανή τύπου Francis), λειτουργεί σε ένα σημείο λειτουργίας το οποίο είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής (H, Q) της αντλίας με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης H_s και δίνεται στην συνέχεια [17].

$$H_S = \Delta h + \Delta z = h + kQ^2 = H \quad (4.1)$$

στην οποία με (kQ^2) συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης και h η υψομετρική διαφορά.

Στο Σχήμα 4.3 δίνεται το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης που περιγράφηκε.



Σχήμα 4.3: Σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης[17].

Στο σημείο αυτό λειτουργίας με παροχή Q και ολικό ύψος H , αντιστοιχεί μία τιμή η του βαθμού απόδοσης της αντλητικής εγκατάστασης (αντλίας και ηλεκτροκινητήρα).

Επομένως η ισχύς που απορροφάται από το αντλητικό συγκρότημα δίνεται ως εξής:

$$P = \frac{\gamma H Q}{\eta} \quad (4.2)$$

Δεδομένου ότι η υψομετρική διαφορά μεταβάλλεται λίγο ανάλογα με τον βαθμό πλήρωσης των ταμιευτήρων, η απορροφούμενη ισχύς από ένα δεδομένο αντλητικό συγκρότημα σε μία συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι σταθερή [17]. Όταν η άντληση δηλαδή πραγματοποιείται με σταθερές στροφές, τότε υπάρχει ένα μόνο σημείο λειτουργίας και η τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος παραμένει σταθερή [4].

Σημειώνεται ότι στο σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, η διακινούμενη παροχή Q , θα είναι αυτή για την οποία η ενέργεια που προσδίδει η αντλία είναι ίση με αυτή που απαιτείται για την διακίνηση της παροχής στην αντλητική εγκατάσταση και η οποία περιγράφεται από την χαρακτηριστική της σωλήνωσης [17].

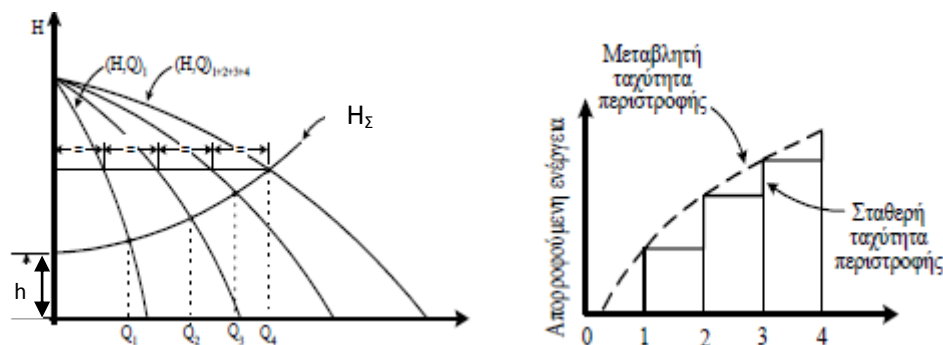
4.4.2 Συνεργασία αντλιών με σταθερή ταχύτητα περιστροφής

Πολλές φορές, είτε για καθαρά λειτουργικούς λόγους (π.χ. ανάγκη για αυξημένη παροχή), είτε απλά για λόγους αύξησης της ευελιξίας και της αξιοπιστίας της εγκατάστασης, εγκαθίστανται σε ένα αντλιοστάσιο περισσότερες από μία αντλίες. Οι αντλίες αυτές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να είναι όμοιες μεταξύ τους, μπορούν να συνδεθούν και να συνεργαστούν με δύο τρόπους [17]:

- Παράλληλη λειτουργία

Σε αυτήν, κάθε αντλία έχει τη δική της σωλήνωση αναρρόφησης, αλλά όλες καταθλίβουν το υγρό σε μία κοινή σωλήνωση κατάθλιψης. Είναι προφανές ότι η παροχή στη σωλήνωση αυτή θα ισούται με το άθροισμα των παροχών που διακινεί κάθε μηχανή. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η προηγούμενη συνθήκη, η τελική χαρακτηριστική του συνόλου των αντλιών προκύπτει από την κατά παροχή πρόσθεση των χαρακτηριστικών τους και αναφέρεται στον κοινό κόμβο Κ των σωληνώσεων κατάθλιψης κάθε αντλίας. Από την τομή αυτής της τελικής χαρακτηριστικής με την χαρακτηριστική του τμήματος της σωλήνωσης από τον κόμβο Κ μέχρι τη δεξαμενή κατάθλιψης, καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης και κάθε αντλίας ξεχωριστά [17].

Έστω ότι όταν λειτουργεί μία αντλία, η παροχή είναι ίση προς Q_1 και η απορροφούμενη ισχύς P_1 . Όταν λειτουργούν z αντλίες η διακινούμενη παροχή είναι ίση προς $Q_z < zQ_1$, ενώ η απορροφούμενη ισχύς θα είναι ίση προς $P_z < zP_1$. Άρα στην περίπτωση αυτή η αντλούμενη παροχή και η απορροφούμενη ισχύς είναι κλιμακωτές, με κλίμακα τόσο περισσότερο απότομη, όσο μικρότερο είναι το πλήθος των εγκατεστημένων αντλιών [27]. Η σχηματική αναπαράσταση δίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Παράλληλη λειτουργία περισσότερων αντλιών και απορροφούμενη ισχύς συναρτήσει του αριθμού των αντλιών[4].

Στην περίπτωση αυτή εντάσσεται και η εγκατάσταση περισσότερων ταυτόσημων μεγάλων αντλιών και ενός αριθμού (3 ή 4) μικρότερων αντλιών (jockey), όλες παράλληλα συνδεδεμένες. Με τον τρόπο αυτό οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές της απορροφούμενης ισχύος καλύπτονται από την λειτουργία των μεγάλων αντλιών (μεγάλα σκαλοπάτια της κλιμακωτής απόκρισης) και μεταξύ αυτών οι μικρότερες μεταβολές καλύπτονται από τη λειτουργία των μικρότερων αντλιών, οπότε ανάμεσα στα μεγάλα σκαλοπάτια διαμορφώνονται μικρότερα που προσομοιάζουν προς την συνεχή ανταπόκριση [27].

- Εν σειρά λειτουργία

Χαρακτηριστικό της είναι η ύπαρξη ενιαίας σωλήνωσης, κατά μήκος της οποίας τοποθετούνται οι αντλίες. Στην περίπτωση αυτή η παροχή καθ' όλο το μήκος της σωλήνωσης παραμένει αμετάβλητη, ενώ το συνολικό ύψος της εγκατάστασης θα

ισούνται με το άθροισμα των υψών κάθε αντλίας . Σύμφωνα με τις προηγούμενες συνθήκες, η τελική χαρακτηριστική του συνόλου των αντλιών προκύπτει από την καθ' ύψος πρόσθεση των χαρακτηριστικών τους. Από την τομή αυτής της τελικής χαρακτηριστικής με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης καθορίζεται το σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης και κάθε μηχανής ξεχωριστά.

Η διαμόρφωση αυτή παρέχει τη δυνατότητα τόσο ανύψωσης συγκεκριμένης παροχής σε μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με την λειτουργία μίας μόνο αντλίας, όσο και ανύψωσης σε συγκεκριμένο ύψος μεγαλύτερης παροχής. Έτσι απαντάται κυρίως σε εφαρμογές μεγάλου γεωμετρικού ύψους ανύψωσης ή με μεγάλο μήκος αγωγού κατάθλιψης και άρα αυξημένες υδραυλικές απώλειες. Ένα σημείο όμως που χρήζει προσοχής, είναι ότι πρέπει οι αντλίες να είναι περίπου ίδιου μεγέθους, διαφορετικά αν διακινούν μεγάλης απόκλισης παροχές είναι δυνατό να υπάρχει σημείο λειτουργίας στο οποίο η αντλία με τη μικρότερη παροχή να εργάζεται ως στρόβιλος.

Πέρα από τα προηγούμενα, η σύνδεση αυτή παρέχει στην εγκατάσταση ευελιξία στη ρύθμιση του επιθυμητού ύψους μέσω της λειτουργίας κατάλληλου συνδυασμού εργοστροβιλομηχανών και έτσι χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου το ύψος μεταβάλλεται (π.χ. σε άρδευση περιοχών διαφορετικής στάθμης). Επίσης εν σειρά εγκατάσταση μιας αντλίας, μπορεί να γίνει και εκ των υστέρων προκειμένου να αυξήσουμε τη διακινούμενη παροχή. Αυτό μπορεί να επιβάλλεται είτε λόγω αύξησης των αναγκών είτε λόγω σημαντικής μείωσης της παροχής εξαιτίας αύξησης των υδραυλικών απωλειών. Το τελευταίο φαινόμενο είναι αρκετά συχνό, καθώς με την πάροδο των χρόνων αυξάνεται η τραχύτητα στο εσωτερικό των αγωγών και μειώνεται η εσωτερική διάμετρός τους λόγω επικαθίσεων αλάτων (ανάλογα και με τη φύση του διακινούμενου υγρού).

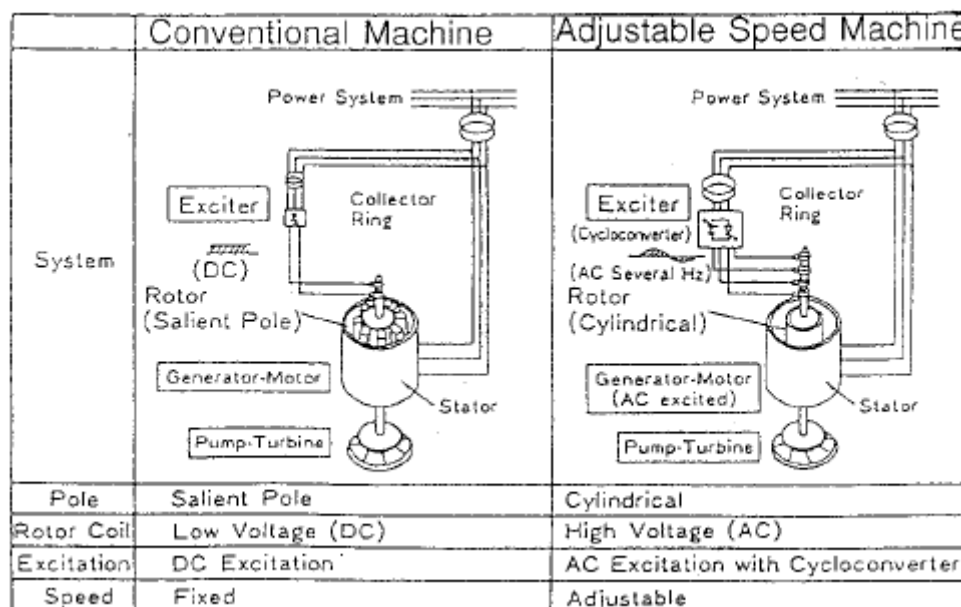
Συχνά οι αντλίες τοποθετούνται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, καθώς σε αντίθετη περίπτωση, η στατική πίεση στην κατάθλιψη των τελευταίων μηχανών μπορεί να είναι υπερβολικά μεγάλη. Έτσι για λόγους αντοχής θα απαιτείται μεγάλο πάχος τοιχωμάτων των αγωγών, πράγμα που συνεπάγεται αυξημένο κόστος κατασκευής. Με την διασπορά των αντλιών, επιτυγχάνεται η πτώση της στατικής πίεσης μεταξύ δύο διαδοχικών μηχανών λόγω των υδραυλικών απωλειών και η ανάπτυξη μικρότερων μέγιστων πιέσεων στη σωλήνωση. Τέλος εν σειρά λειτουργία υιοθετείται και στην περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε τη στατική πίεση στην αναρρόφηση μιας αντλίας, ώστε να αποφύγουμε το φαινόμενο της σπηλαίωσης σε αυτή. Το ρόλο αυτό επιτελεί η πρώτη αντλία (inducer), η οποία συνήθως δε χρειάζεται να είναι υψηλών δυνατοτήτων, ενώ η δεύτερη αναλαμβάνει τη διακίνηση του υγρού [17].

4.4.3 Αντληση με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής

Στην τεχνολογία μεταβλητών ταχυτήτων, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος για να μεταβάλουν την ταχύτητα της ηλεκτρικής μηχανής. Η προτιμότερη λύση είναι οι ασύγχρονες μηχανές διπλής τροφοδότησης (AMΔΤ), οι οποίες συνδέονται με ένα μετατροπέα συχνότητας που τροφοδοτεί τον δρομέα. Η τεχνολογία της AMΔΤ συνίσταται στην δημιουργία ενός στρεφόμενου πεδίου στον δρομέα, που επιτρέπει

στην μηχανή να λειτουργεί σε ένα ικανοποιητικό εύρος ταχύτητας γύρω από την σύγχρονη ταχύτητα, ενώ συνδέεται στο δίκτυο σταθερής συχνότητας. [42].

Οι δύο διαμορφώσεις για λειτουργία μεταβλητών στροφών με ΑΜΔΤ και λειτουργία σταθερών στροφών φαίνονται στο Σχήμα 4.5.



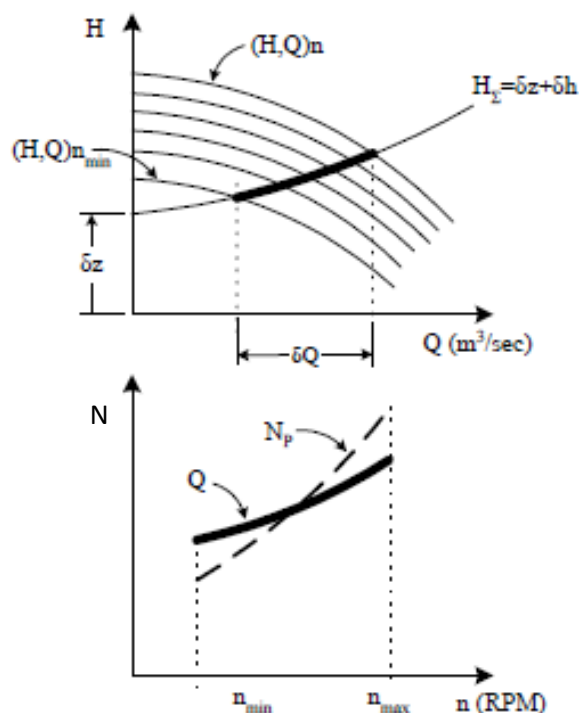
Σχήμα 4.5: Σύγκριση ΑΜΔΤ και μηχανής σταθερών στροφών [43].

Σε σύγκριση με τις μηχανές σταθερών στροφών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αντλησιοταμίευσης, οι ΑΜΔΤ εμφανίζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [44]:

- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλή απόδοση ακόμα και όταν δεν υπάρχει λειτουργία ονομαστικού φορτίου.
- Δυνατότητα ελέγχου έργου και ενεργού ισχύος.
- Δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος.
- Γρήγορη απόκριση στις απαιτήσεις του δικτύου, συμβάλλοντας στην βελτίωση της ευστάθειας του.
- Μείωση των εκκινήσεων της μηχανής.

Με την εγκατάσταση περισσότερων ταυτόσημων αντλιών παράλληλα συνδεδεμένων, με δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής τους, η αντλούμενη παροχή και η απορροφούμενη ισχύς είναι μία συνεχής καμπύλη, με παράμετρο τον αριθμό των εν λειτουργία αντλιών και την ταχύτητα περιστροφής. Η λύση αυτή, σε σύγκριση με τις προηγούμενες, βελτιώνει την ανταπόκριση της εγκατάστασης σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, όμως επιβαρύνει το κόστος εγκατάστασης [27].

Η μεταβολή της απορροφούμενης ισχύος αλλά και η χαρακτηριστική του συστήματος δίνονται στο Σχήμα 4.6.



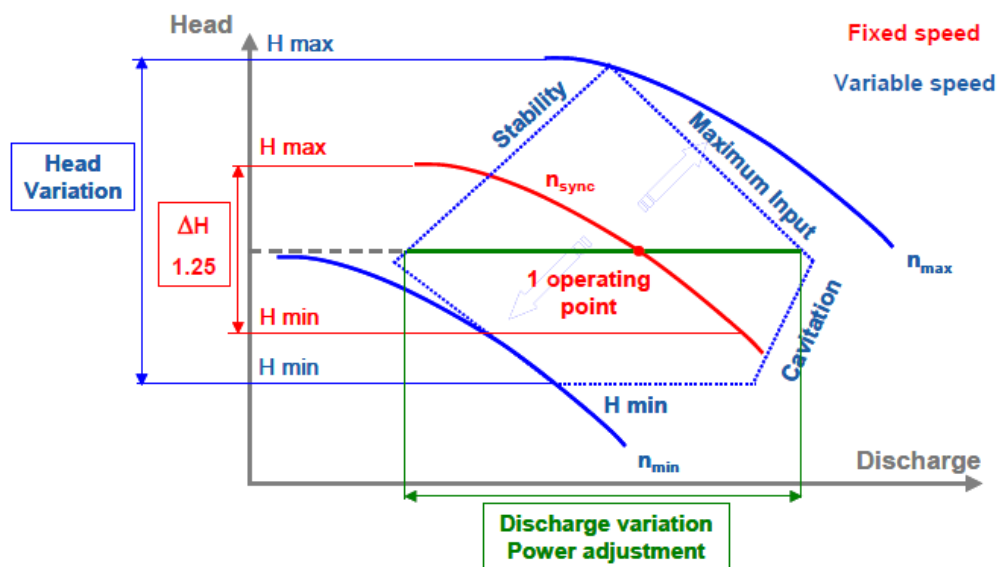
Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστική συστήματος και μεταβολή ισχύος συναρτήσει των στροφών για άντληση με μεταβλητές στροφές [4].

Ένα σημαντικό κίνητρο για την λειτουργία μεταβλητών στροφών αποτελεί η πιθανότητα βελτίωσης της απόδοσης της στροβιλοαντλίας, καθώς η ταχύτητα που αντιστοιχεί στην βέλτιστη απόδοση είναι διαφορετική για λειτουργία άντλησης και λειτουργία υδροστροβίλου και αλλάζει ανάλογα με το υδραυλικό ύψος. Οι μεταβλητές στροφές στην άντληση είναι κατάλληλες για συστήματα αντλησιοταμίευσης, με έντονες μεταβολές στο υδραυλικό ύψος [24].

Τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση μεταβλητών στροφών στην λειτουργία της αντλησιοταμίευσης είναι [26,45,46]:

- Ρύθμιση ενεργού ισχύος σε λειτουργία άντλησης (λειτουργία άντλησης σε μερικό φορτίο).
- Ρύθμιση συχνότητας στη λειτουργία της άντλησης.
- Μεγαλύτερο επιτρεπτό εύρος λειτουργίας.
- Αυξημένη συνολική ετήσια απόδοση της τάξης του 3% ή περισσότερο.
- Μειωμένες ταλαντώσεις και μειωμένη μηχανική φθορά.
- Αυξημένη διάρκεια ζωής της στροβιλοαντλίας.
- Εύκολη και γρήγορη εναλλαγή μεταξύ λειτουργίας άντλησης και παραγωγής.
- Συμβολή στην ευστάθεια του δικτύου μέσω έγχυσης ενεργού ισχύος.
- Ευκολότερη ενσωμάτωση/ένταξη της αιολικής ενέργειας και άλλων ΑΠΕ που παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις, στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Σε λειτουργία άντλησης, η απορροφούμενη ισχύς μπορεί να μεταβάλλεται σε σταθερό υδραυλικό ύψος, επιτρέποντας ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου. Αυτή η μεταβολή μπορεί να φτάσει μέχρι και $\sim 30\%$ της απορροφούμενης ισχύος. Το εύρος λειτουργίας επεκτείνεται σε σχέση με την σταθερή ταχύτητα περιστροφής, όπου έχουμε λειτουργία μόνο στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας (Σχήμα 4.7). Αυτό είναι ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις μονάδες σταθερών στροφών που μπορούν να ρυθμίσουν την ισχύ τους μόνο κατά την λειτουργία παραγωγής και λειτουργούν σε σταθερή ισχύ όταν βρίσκονται σε λειτουργία άντλησης [42].



Σχήμα 4.7: Πλεονεκτήματα χρήσης μεταβλητών στροφών σε σχέση με την λειτουργία σταθερών στροφών για την περίπτωση της άντλησης[46].

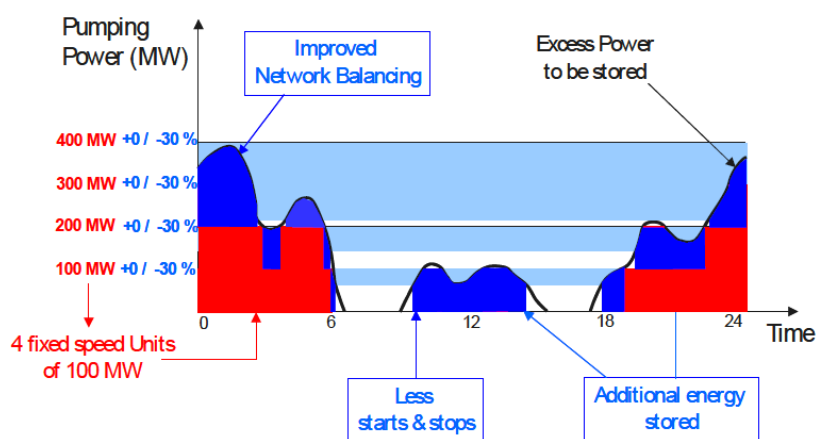
Με ρυθμιζόμενη ταχύτητα, είναι εφικτό να υπάρχει λειτουργία άντλησης με ένα εύρος μεταβολής από 60% ως 100% της ονομαστικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι μια μονάδα μεταβλητών στροφών μπορεί να αλλάξει την ενεργό ισχύ και να τροφοδοτήσει το φορτίο στην λειτουργία άντλησης. Έτσι, η λειτουργία των υψηλού κόστους γεννητριών πετρελαίου και φυσικού αερίου μπορεί να περιοριστεί, εφόσον η μονάδα ρυθμιζόμενης ταχύτητας αντλησιοταμίευσης μπορεί να αναλάβει τα καθήκοντα ρύθμισης του φορτίου [26].

Ένας συμβατικός σταθμός αντλησιοταμίευσης με σταθερή ταχύτητα περιστροφής μπορεί να παρέχει ρύθμιση συχνότητας μόνο σε κατάσταση παραγωγής. Με τις μεταβλητές στροφές, είναι δυνατόν να υπάρχει ρύθμιση συχνότητας τόσο κατά την φάση της άντλησης, όσο και κατά την φάση της παραγωγής. Έτσι οι υψηλού κόστους στρόβιλοι καύσης πετρελαίου και φυσικού αερίου, μπορούν είτε να κλείσουν ή να λειτουργούν στο μέγιστο σημείο απόδοσης τους. Σε μια ελεύθερη αγορά, αυτό σημαίνει επίσης επιπλέον έσοδα από την πώληση της ικανότητας ρύθμισης συχνότητας ως επικουρική υπηρεσία (Σχήμα 4.8) [45].

Η αυξημένη συνολική απόδοση προκύπτει από το γεγονός ότι οι υδροστρόβιλοι – αντλίες μεταβλητών στροφών, μπορούν να λειτουργούν στη σημείο μέγιστης απόδοσης τόσο στην διαδικασία άντλησης όσο και στην διαδικασία παραγωγής. Με μία συμβατική μηχανή σταθερής ταχύτητας, η αντλία - στρόβιλος μπορεί να δουλεύει στο σημείο βέλτιστης απόδοσης μόνο σε μία από τις 2 φάσεις, όχι και στις δύο [24].

Με τις μεταβλητές στροφές, η στροβιλοαντλία είναι δυνατόν να λειτουργήσει υπό συνθήκες ύψους και παροχής που σε διαφορετική περίπτωση δε θα ήταν δυνατό εξαιτίας των ταλαντώσεων. Αυτό οδηγεί σε μειωμένη φθορά στη μηχανή. Έτσι ο απαιτούμενος χρόνος μεταξύ παύσης λειτουργίας λόγω συντήρησης και επισκευών μπορεί να αυξηθεί και το ίδιο και η διάρκεια ζωής της μηχανής [26].

Η μεταβλητή ταχύτητα επιτρέπει μία πιο δυναμική ρύθμιση της ισχύος, χάρη στην επίδραση του σφονδύλου. Πράγματι, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η ισχύς αλλάζει μόνο προσαρμόζοντας την παροχή (αλλαγή του ανοίγματος των περυγίων), ενώ για τη μεταβλητή ταχύτητα, η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να προσαρμοστεί ταχύτερα στις νέες απαιτήσεις ισχύος και να αντισταθμίσει την αδράνεια του υδραυλικού συστήματος. Μία βελτιστοποίηση των υδραυλικών και ηλεκτρικών παραμέτρων πραγματοποιείται για τη διακύμανση του σημείου λειτουργίας. Επίσης, η λειτουργία μεταβλητών στροφών βελτιώνει το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ δικτύου και συστήματος αντλησιοταμίευσης, βελτιώνοντας έτσι την ισορροπία του δικτύου μέσω της αποθήκευσης της περίσσειας ισχύος σε υδραυλική ενέργεια και μειώνοντας τον αριθμό των εκκινήσεων -παύσεων των μηχανών (Σχήμα 4.8) [42].



Σχήμα 4.8: Λειτουργία άντλησης με μεταβλητές στροφές(μπλε) – Λειτουργία άντλησης με σταθερές στροφές (κόκκινο)[42]

Από το 1990 μέχρι σήμερα, έντεκα σταθμοί αντλησιοταμίευσης μεταβαλλόμενης ταχύτητας έχουν τεθεί σε εμπορική χρήση. Εννέα από αυτούς στην Ιαπωνία και δύο στη Γερμανία. Η ονομαστική ισχύς των μονάδων αυτών, κυμαίνεται από 85 MVA έως και 412 MVA. Το μέγιστο εύρος μεταβολής της ταχύτητας γύρω από την σύγχρονη ταχύτητα είναι $\pm 10\%$ [26].

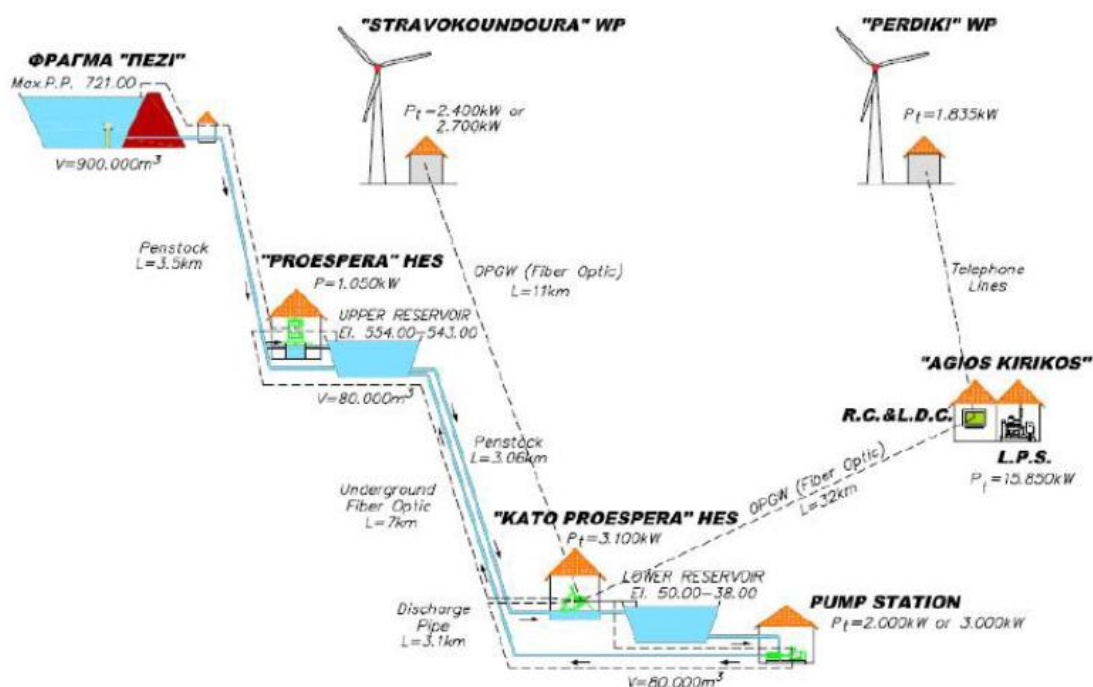
4.5 Υπάρχουσες εφαρμογές

4.5.1 Υβριδικό ενεργειακό έργο της ΔΕΗ στην Ικαρία

Το υβριδικό έργο στην Ικαρία είναι ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό με ανεμογεννήτριες. Αποτελεί πιλοτικό ερευνητικό έργο, καθώς είναι το πρώτο στην Ευρώπη στην κατηγορία αυτή. Ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου υβριδικού έργου, που το διαφοροποιεί από έναν συνήθη υβριδικό σταθμό, είναι ότι εκτός από τις δύο δεξαμενές που εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής, υφίσταται και ένας τρίτος ταμιευτήρας, στα ανάντη της άνω δεξαμενής αντλησιοταμίευσης, η περίσσεια υδάτων του οποίου εισρέει στην τελευταία μέσω ενός επιπλέον ΜΥΗΣ. Η διαμόρφωση δηλαδή του υβριδικού σταθμού της Ικαρίας επιτρέπει την αξιοποίηση δύο μορφών ΑΠΕ, της αιολικής, μέσω της αντλησιοταμίευσης, και της υδροηλεκτρικής, μέσω της εκμετάλλευσης των διαθέσιμων υδάτων του ταμιευτήρα [40].

Με το έργο αυτό θα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από τρεις ανεμογεννήτριες και τρεις υδροστροβίλους. Τους χειμερινούς μήνες θα τροφοδοτούνται τρεις υδροστροβίλοι από την υπερχειλίση ενός φράγματος και θα παράγεται με τον τρόπο αυτόν η απαιτούμενη ενέργεια. Τους υπόλοιπους μήνες θα εργάζονται μόνο οι δυο από τους τρεις υδροστροβίλους. Με τη βοήθεια του αντλιοστασίου θα ανυψώνεται το νερό μέχρι την άνω δεξαμενή και έπειτα θα πραγματοποιείται η παραγωγή όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Το αντλιοστάσιο θα τροφοδοτείται ηλεκτρικά από τρεις ανεμογεννήτριες. Δίνεται στο Σχήμα 4.9 η διαμόρφωση του υβριδικού έργου της Ικαρίας.



Σχήμα 4.9: Εσωτερική διαμόρφωση του υβριδικού έργου της Ικαρίας και λοιπές μονάδες παραγωγής του συστήματος [40].

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.9, το όλο σύστημα περιλαμβάνει τα εξής [40]:

- Το φράγμα στο Πέζι, το οποίο είναι χωρητικότητας 900000 κυβικών μέτρων και βρίσκεται σε υψόμετρο 720 μέτρα από το επίπεδο της θάλασσας. Η περίσσεια υδάτων του φράγματος αυτού θα αξιοποιείται από δυο μικρότερου μεγέθους δεξαμενές.
- Τις δεξαμενές της Άνω και Κάτω Προεσπέρας, οι οποίες είναι χωρητικότητας 80000 κυβικών μέτρων η κάθε μία. Η πρώτη βρίσκεται σε υψόμετρο 550 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας και η δεύτερη σε ακόμα πιο χαμηλό επίπεδο. Οι δυο αυτές δεξαμενές θα εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλιοσταμίας για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής.
- Τον μικρό υδροστροβίλο τύπου Pelton ισχύος 1.05 MW, ο οποίος τοποθετείται πλησίον της άνω δεξαμενής. Ο υδροστροβίλος αυτός θα αξιοποιεί μόνο περίσσεια νερών του ταμιευτήρα του Πεζίου (αφού πρώτα ικανοποιηθούν οι υποχρεώσεις για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση).
- Τους δυο υδροστροβίλους τύπου Pelton συνολικής ισχύος $2 \times 1.55 \text{ MW} = 3.1 \text{ MW}$, οι οποίοι τοποθετούνται στην περιοχή της Κάτω Προεσπέρας. Οι υδροστροβίλοι αυτοί θα αξιοποιούν τόσο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα του Πεζίου όσο και τα νερά που προέρχονται από την αντλιοσταμίας. Η λειτουργία των δυο υδροστροβίλων διέπεται και από υποχρεώσεις που τίθενται στην περιβαλλοντική αδειοδότηση του έργου και έχουν σκοπό την εξασφάλιση της αρδευτικής επάρκειας του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα, δεν επιτρέπεται η λειτουργία του ΜΥΗΣ Προεσπέρας την θερινή περίοδο, ενώ το υπόλοιπο διάστημα τίθενται απαιτήσεις ελάχιστης στάθμης νερού στον ταμιευτήρα Πεζίου.
- Το αντλιοστάσιο, το οποίο βρίσκεται πλησίον της άνω δεξαμενής. Αυτό θα αποτελείται από οχτώ αντλίες σταθερών στροφών παράλληλα συνδεδεμένες ισχύος $8 \times 250 \text{ KW} = 2000 \text{ KW}$.
- Τρεις ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 2.7 MW, οι οποίες εγκαθίστανται στην «Στραβοκουντούρα» που είναι περιοχή ισχυρή αιολικού δυναμικού.
- Τον υπάρχοντα θερμικό σταθμό παραγωγής Αγίου Κήρυκου.
- Το κέντρο ελέγχου και κατανομής Αγίου Κήρυκου.

Η λειτουργία του συστήματος διαφοροποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες (από τον Νοέμβριο έως και τον Μάρτιο) και κατά τους θερινούς μήνες (από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο) και εξηγείται αναλυτικά στην συνέχεια [40].

Τους μήνες Απρίλιο έως και Οκτώβρη το νερό του φράγματος θα διατίθεται αποκλειστικά για την ύδρευση και άρδευση της περιοχής. Αντίθετα, το νερό που θα βρίσκεται στην δεξαμενή της Κάτω Προεσπέρας θα μεταφέρεται μετά τις μεταμεσονύχτιες ώρες ανυψούμενο στη δεξαμενή της Άνω Προεσπέρας μέσω του αντλιοστασίου. Η απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του αντλιοστασίου θα παρέχεται από την περίσσεια της ενέργειας του αιολικού πάρκου. Επομένως, τις ώρες αιχμής θα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια κατά την πτώση του νερού της δεξαμενής της Άνω Προεσπέρας στη δεξαμενή της Κάτω Προεσπέρας από τους δυο υδροστροβίλους συνολικής ισχύος 3.1 MW.

Πιο συγκεκριμένα, τους χειμερινούς μήνες όπου θα υπάρχει περίσσια νερού θα παρατηρείται υπερχειλίση του φράγματος του Πεζίου. Αρχικά το νερό της υπερχειλίσης θα διέρχεται μέσα από τον υδροστρόβιλο του 1.05 MW, ο οποίος με την σειρά του θα παράγει ενέργεια για να καταλήξει στη δεξαμενή της Άνω Προεσπέρας. Στη συνέχεια, θα διέρχεται μέσα από δυο υδροστρόβιλους συνολικής ισχύος 3.1 MW, οι οποίοι με την σειρά τους θα παράγουν και αυτοί ενέργεια, για να καταλήξει στη δεξαμενή της Κάτω Προεσπέρας και από εκεί με την υπερχειλίση προς την θάλασσα. Την περίοδο αυτή το αντλιοστάσιο θα παραμείνει εκτός λειτουργίας, ενώ η ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες θα εξυπηρετεί μόνο το ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού. Επομένως, κατά τους χειμερινούς μήνες θα διατίθεται ισχύς $1.05 + 3.1 + 2.7 = 6.85$ MW, η οποία θα υπερκαλύπτει την ζήτηση του νησιού.

Τελικώς, την περίοδο αυτή η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα θα κυμαίνεται μεταξύ 60-70 %.

Τα πλεονεκτήματα του ΥΒΕ της Ικαρίας είναι τα ακόλουθα [14]:

- Ενεργειακή επάρκεια του νησιού ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγάλη.
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από την μείωση της λειτουργίας του τοπικού Θερμικού Σταθμού.
- Αύξηση της απασχόλησης στο νησί, μέσα από τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.
- Βελτίωση και ανάπτυξη ηλεκτρικού και οδικού δικτύου.

4.5.2 Υβριδικό ενεργειακό έργο στο νησί El Hierro της Ισπανίας

Το νησί El Hierro βρίσκεται στα Κανάρια Νησιά, στην Ισπανία, με έκταση 276 km² και περίπου 10.000 κατοίκους και είναι το μικρότερο του συμπλέγματος των νησιών αυτών. Το νησί έχει δικό του ηλεκτρικό δίκτυο, είναι εντελώς απομονωμένο καθώς τα μεγάλα βάθη της θάλασσας κάνουν αδύνατη οποιαδήποτε ηλεκτρική διασύνδεσή του. Μέχρι πριν από λίγο καιρό η ζήτηση σε ηλεκτρισμό, η οποία καλύπτει το 65% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο νησί, καλυπτόταν κυρίως από συμβατικούς (θερμικούς) σταθμούς παραγωγής ισχύος 10MW. Η συνεισφορά των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα του νησιού ήταν μικρότερη από 5% και προέρχονταν από δύο ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες κοντά στην πρωτεύουσα, ισχύος 100kW και 180kW. Το νησί παρουσιάζει ένα αξιόλογο δυναμικό για την ανάπτυξη συστημάτων ΑΠΕ και κυρίως αιολικών. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η έναρξη ενός έργου που θα είχε σαν αποτέλεσμα την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νησιού από 100% ΑΠΕ. Αυτό αποτελεί θέμα – κλειδί στο “Πρόγραμμα Αειφόρου Ανάπτυξης” το οποίο ανακοινώθηκε από την κυβέρνηση του νησιού El Hierro το 1997 και έγινε πιο οικείο όταν το νησί χαρακτηρίστηκε από την UNESCO τον Ιανουάριο του 2000 σαν παγκόσμιο δίκτυο διατήρησης της βιόσφαιρας (World Wide Reserve of Biosphere) [47,48].

Με την οικονομική υποστήριξη του DG TREN της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, μία συνεργασία από 7 συμμετέχοντες με συντονιστή το ITC (Instituto Tecnológico de Canarias), διεξάγεται το πρόγραμμα που στοχεύει σε 100% ηλεκτρική παραγωγή από

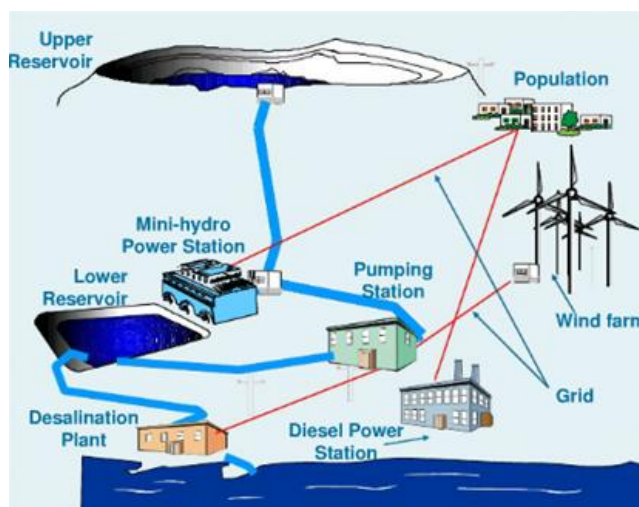
ΑΠΕ. Κατά την πρώτη φάση το πρόγραμμα στοχεύει σε κάλυψη 70-80% ηλεκτρικής ζήτησης του νησιού από διάφορες πηγές. Η πιο πρωτοποριακή λύση σχετίζεται με την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος με αντλιοσταμείωση με στόχο την κάλυψη του 75% της ηλεκτρικής ζήτησης του νησιού και 30% άμεση διείσδυση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο.

Το σύστημα αποτελείται από δύο κατηγορίες [48]:

- Την ηλεκτρική μονάδα παραγωγής, που περιλαμβάνει το αιολικό πάρκο, το συμβατικό σταθμό παραγωγής.
- Την υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής, που περιλαμβάνει τον αντλητικό σταθμό, τους υδροστροβίλους, την πάνω και την κάτω δεξαμενή, την μονάδα αφαλάτωσης και τους σωλήνες.

Τα φορτία του συστήματος είναι: η ηλεκτρική ζήτηση του νησιού, η μονάδα αφαλάτωσης και ο αντλητικός σταθμός. Το υβριδικό ενεργειακό έργο στο νησί El Hierro των Κανάριων νήσων στην Ισπανία είναι ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό με ανεμογεννήτριες.

Μια αναπαράσταση του υβριδικού αυτού έργου δίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Περιγραφή υβριδικού συστήματος στο νησί El Hierro της Ισπανίας[49].

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.10, το όλο σύστημα περιλαμβάνει τα εξής [49]:

- Την άνω δεξαμενή, η οποία είναι χωρητικότητας 200000 κυβικών μέτρων, 700m πάνω από την θάλασσα.
- Την κάτω δεξαμενή, η οποία είναι χωρητικότητας 200000 κυβικών μέτρων.
- Τους τρεις υδροστροβίλους τύπου “ Pelton” συνολικής ισχύος $3 \times 3.3 \text{ MW} = 9.9 \text{ MW}$.
- Το αντλιοστάσιο, το οποίο αποτελείται από εννέα συνολικές αντλίες συνολικής ισχύος $7 \times 800 \text{ KW} + 2 \times 200 \text{ KW} = 6 \text{ MW}$.

- Το αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 9.35 MW, το οποίο εγκαθίστανται σε περιοχή ισχυρού αιολικού δυναμικού.
- Συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής συνολικής ισχύος 8.3 MW
- Υδατοφράκτες
- Σύστημα διανομής
- Μονάδα αφαλάτωσης 5-10 m³/μέρα

Ένας φυσικός κρατήρας θα αποτελέσει την υψηλή δεξαμενή μετά από την ανάλογη στεγάνωση του. Η χαμηλή θα κατασκευαστεί κοντά στον υπάρχοντα συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ενώ το σύστημα αφαλάτωσης θα εγκατασταθεί στην ακτή και κοντά στον συμβατικό σταθμό.

Αρχικά, όπως αναφέρεται παραπάνω, επιδιώκεται το 30% της ζήτησης του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτεται απευθείας από το αιολικό πάρκο. Το ποσοστό αυτό είναι και το μέγιστο δυνατό. Ωστόσο, εάν εξαιτίας διακυμάνσεων της ζήτησης του ηλεκτρικού δικτύου αυτό δεν καταστεί εφικτό, τότε ολόκληρη η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του αντλιοστασίου. Το αντλιοστάσιο με τη σειρά του μεταφέρει το νερό από των κάτω στον άνω ταμιευτήρα, έτσι ώστε να αποταμιευτεί η ενέργεια μέσω της ανύψωσής του. Σε περίπτωση που η αιολική ενέργεια αδυνατεί να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση, τότε το νερό οδηγείται από τον πάνω στον κάτω ταμιευτήρα περνώντας μέσα από τους υδροστροβίλους. Οι υδροστροβίλοι αποδίδουν την ενέργειά τους στην ηλεκτρική γεννήτρια και από εκεί αυτή οδηγείται στο ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη των επιπλέον ενεργειακών αναγκών.

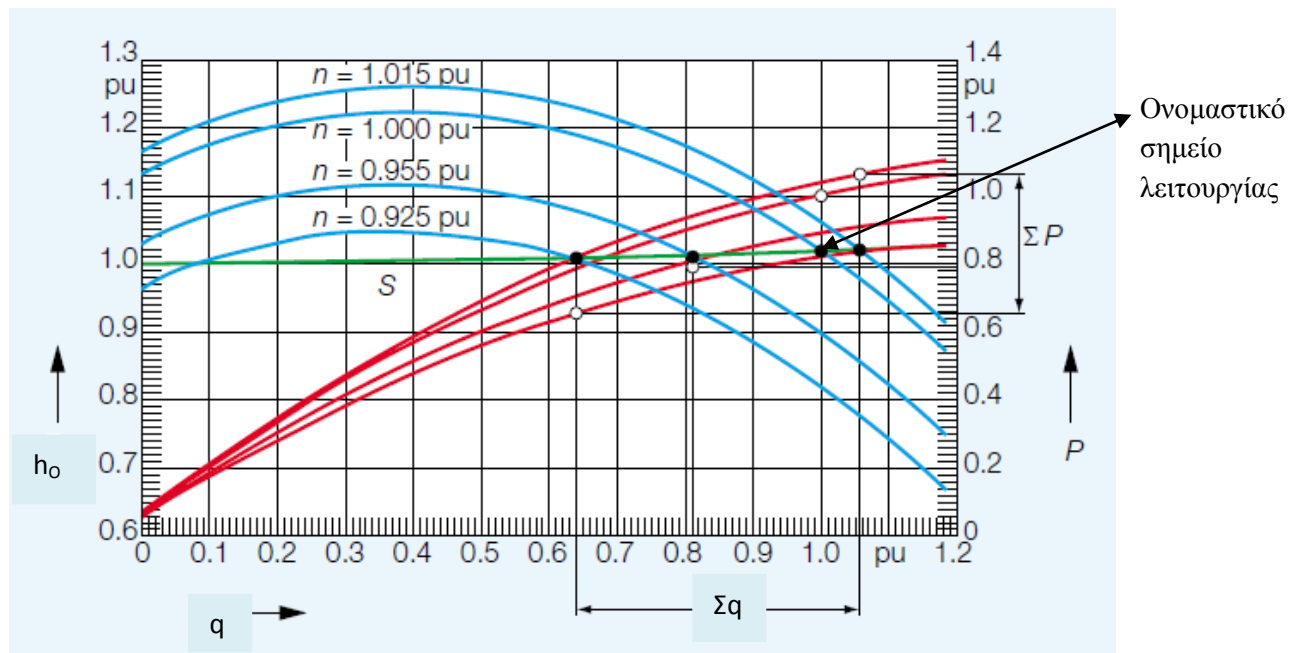
Βέβαια, στην περίπτωση που θα επικρατεί εκτεταμένη νηνεμία και ο συνολικός όγκος του νερού θα βρίσκεται στην κάτω δεξαμενή, τότε θα λειτουργεί ο ήδη υπάρχον σταθμός παραγωγής ενέργειας με καύσιμο diesel. Η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του νησιού για διάστημα μιας ολόκληρης εβδομάδας με νηνεμία.

Κεφάλαιο 5

Χαρακτηριστικές εξισώσεις αντλιών

5.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες

Από την δημοσίευση της ABB [50] λαμβάνεται το Σχήμα 5.1, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 5.1: Ολικό ύψος $h_0(\alpha\mu)$ και ισχύς $P(\alpha\mu)$ της αντλίας συναρτήσει της παροχής q .

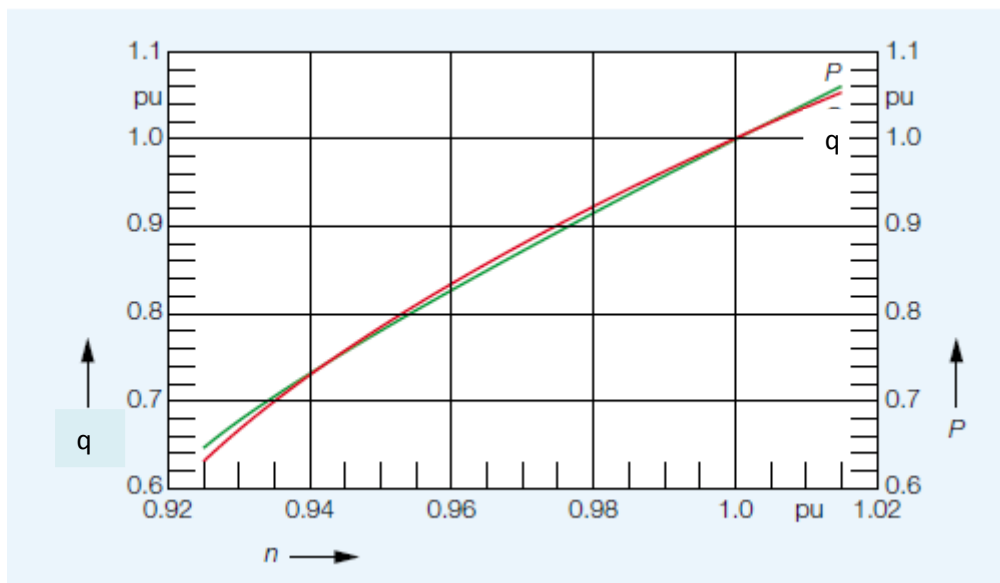
Το Σχήμα 5.1 δίνει το αμ ολικό ύψος h_0 της αντλίας συναρτήσει της παροχής q για 4 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής n μεταξύ 1.015 και 0.925 αμ αλλά και την ισχύ P που καταναλώνει η αντλία πάλι συναρτήσει της παροχής q . Σημειώνεται ότι το αμ ολικό ύψος h_0 αλλά και η ισχύς P παρουσιάζονται για το βέλτιστο ρυθμιστικό άνοιγμα περυγίων. Οι καμπύλες για το αμ ολικό ύψος h_0 (μπλε) και για την ισχύ P (κόκκινη) μελετώνται σαν ανεξάρτητες καμπύλες, παρόλο που βρίσκονται στο ίδιο διάγραμμα.

Το σημείο λειτουργίας της αντλίας, για κάθε μια από τις 4 ταχύτητες περιστροφής στο Σχήμα 5.1, δίνεται από την τομή της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης ($h=h_0+kq^2$), η οποία αντιστοιχεί στην πράσινη καμπύλη και δίνει το αμ ολικό ύψος h συναρτήσει της παροχής συμπεριλαμβανομένων των υδραυλικών απωλειών h_f , με την χαρακτηριστική της αντλίας (h_0, q) που αντιστοιχεί στην μπλε καμπύλη. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι το αμ ολικό ύψος h έχει κανονικοποιηθεί με βάση το ολικό ύψος H_N που αντιστοιχεί σε ονομαστική παροχή αντλίας ενώ το αμ ολικό ύψος h_0 έχει κανονικοποιηθεί με βάση το καθαρό ύψος πτώσης H_0 , το οποίο προφανώς

αντιστοιχεί σε μηδενική παροχή. Περαιτέρω ανάλυση για την κανονικοποίηση των εξισώσεων της αντλίας θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη Ενότητα.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι αν η αντλία ήταν σταθερών στροφών, θα είχε μόνο ένα σημείο λειτουργίας (για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής $n=1$) χωρίς καμία δυνατότητα ελέγχου.

Από την εργασία [50] λαμβάνεται και το Σχήμα 5.2, στο οποίο δίνεται η παροχή q αλλά και η ισχύς P της αντλίας συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής n .



Σχήμα 5.2: Παροχή $q(\alpha\mu)$ και ισχύς $P(\alpha\mu)$ της αντλίας συναρτήσει των στροφών n .

Όπως θα φανεί και στην συνέχεια, το Σχήμα 5.2 μπορεί να προκύψει με κατάλληλους υπολογισμούς από το Σχήμα 5.1.

5.2 Κανονικοποίηση εξισώσεων αντλίας

Αν είναι H_o το καθαρό ύψος πτώσης (χωρίς υδραυλικές απώλειες) και H_N το ύψος για ονομαστική παροχή της αντλίας, ισχύει:

$$H_N = H_o + k_1 Q_N^2 = 1.02 H_o \quad (5.1)$$

Όπου:

- H_N : το ολικό ύψος για ονομαστική παροχή της αντλίας (m).
- H_o : το καθαρό ύψος πτώσης (m).
- k_1 : ο συντελεστής υδραυλικών απωλειών.
- Q_N : η ονομαστική παροχή της αντλίας (m^3/s).

Σημειώνουμε ότι η τιμή 1.02 έχει ληφθεί από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας Σχήματος 5.1.

Είναι γνωστό για την ισχύ P_M που καταναλώνει κάθε αντλία ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$P_M = \frac{\gamma H Q}{\eta} \quad (5.2)$$

Όπου:

- P_M : η ισχύς που καταναλώνει η αντλία (kW).
- γ : το ειδικό βάρος του νερού ($9.81 \times 10^3 \text{ Nt/m}^3$).
- H : το ολικό ύψος (m).
- Q : η διακινούμενη παροχή της αντλίας (m^3/s).
- η : ο βαθμός απόδοσης της αντλίας.

Για το ονομαστικό N και ένα άλλο σημείο λειτουργίας M ισχύει κατ' αντιστοιχία σύμφωνα με την (5.2):

$$\eta_N P_N = \gamma H_N Q_N \quad (5.3)$$

$$\eta P_M = \gamma H Q \quad (5.4)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 2 παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ο σχετικός βαθμός απόδοσης ως εξής:

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_N} = \frac{h q}{P} \quad (5.5)$$

Όπου:

- η_r : ο σχετικός βαθμός απόδοσης της αντλίας.
- h : το αμ ολικό ύψος με βάση το ολικό ύψος H_N που αντιστοιχεί σε ονομαστική παροχή αντλίας.
- q : η αμ παροχή της αντλίας με βάση την ονομαστική παροχή Q_N της αντλίας.
- P : η αμ ισχύς που καταναλώνει η αντλία με βάση την ονομαστική ισχύ P_N της αντλίας.

Επειδή από το Σχήμα 5.1 για ονομαστική λειτουργία είναι $P=1\alpha\mu$ για $q=1\alpha\mu$ προκύπτει ότι η κανονικοποίηση για το αμ ολικό ύψος h πρέπει να γίνει με βάση το ολικό ύψος H_N και όχι το καθαρό ύψος πτώσης H_o .

Συνεπώς, για κάποιο σημείο λειτουργίας το οποίο αντιστοιχεί σε ολικό ύψος H , το κανονικοποιημένο ολικό ύψος h ως προς το ολικό ύψος H_N δίνεται ως εξής:

$$h = \frac{H}{H_N} = \frac{H_o + k_1 Q^2}{H_o + k_1 Q_N^2} = \frac{H_o + k_1 Q^2}{1.02 H_o}$$

$$h = \frac{1}{1.02} + \frac{k_1 Q^2}{1.02 H_o} \quad (5.6)$$

Δεδομένου ότι για την κανονικοποιημένη παροχή q ισχύει:

$$q = \frac{Q}{Q_N} \quad (5.7)$$

αντικαθιστώντας στην (5.6) προκύπτει :

$$h = \frac{1}{1.02} + \frac{k_1 q^2 Q_N^2}{1.02 H_o} \quad (5.8)$$

Ορίζοντας τον κανονικοποιημένο συντελεστή απωλειών k ως

$$k = \frac{k_1 Q_N^2}{1.02 H_o} \quad (5.9)$$

προκύπτει το κανονικοποιημένο ύψος h από την (5.8) ως εξής:

$$h = \frac{1}{1.02} + k q^2 \quad (5.10)$$

Επειδή σύμφωνα με την (5.5) για $q=1$ αμ είναι $h=1$ αμ, αντικαθιστώντας στην (5.10) προκύπτει ο κανονικοποιημένος συντελεστής απωλειών k ίσος με :

$$k = \frac{0.02}{1.02} \quad (5.11)$$

Αντικαθιστώντας πάλι στην (5.10) την τιμή του k που δίνεται από την (5.11), προκύπτει τελικά το κανονικοποιημένο ολικό ύψος ως εξής:

$$h = \frac{1 + 0.02 q^2}{1.02} \quad (5.12)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι η (5.12) αφορά την άντληση. Για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον στρόβιλο και θεωρώντας όμοια σωλήνωση, η (5.12) διαμορφώνεται ως εξής:

$$h = \frac{1 - 0.02 q^2}{1.02} \quad (5.13)$$

Όμοια με πριν, για λειτουργία στροβίλου η σχέση (5.1) διαμορφώνεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$H_N = H_o - k_1 Q_N^2 \quad (5.14)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.9), (5.11) η (5.14) γίνεται για λειτουργία στροβίλου:

$$H_N = H_o - 0.02 H_o = 0.98 H_o \quad (5.15)$$

Στα παραπάνω έχει θεωρηθεί ότι ο στρόβιλος και η αντλία χρησιμοποιούν την ίδια σωλήνωση και συνεπώς η παροχή είναι η ίδια.

5.3 Εξαγωγή χαρακτηριστικών αντλίας

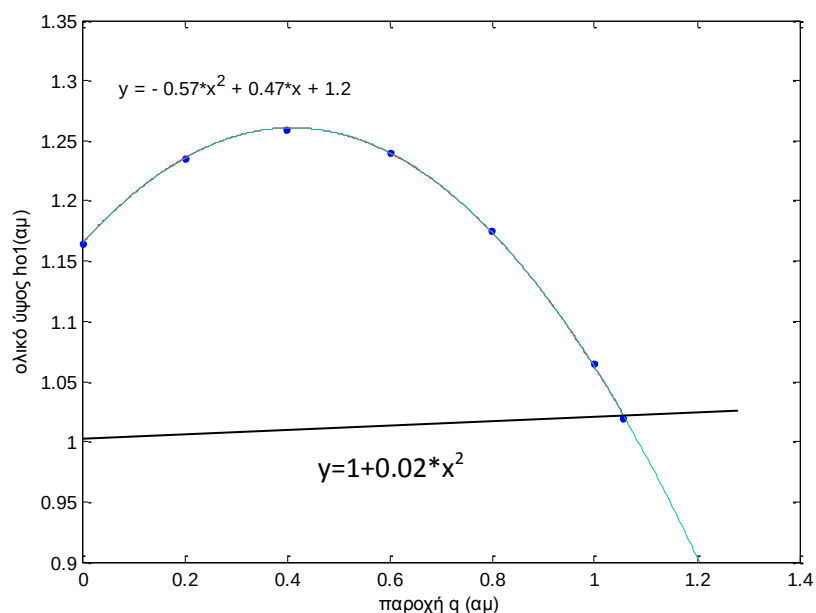
5.3.1 Χαρακτηριστικές πίεσης - παροχής

Από το Σχήμα 5.1, λήφθηκαν 7 σημεία για την παροχή q και το αμ ολικό ύψος h_o της αντλίας για κάθε μία από τις 4 ταχύτητες περιστροφής n_1 - n_4 , τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

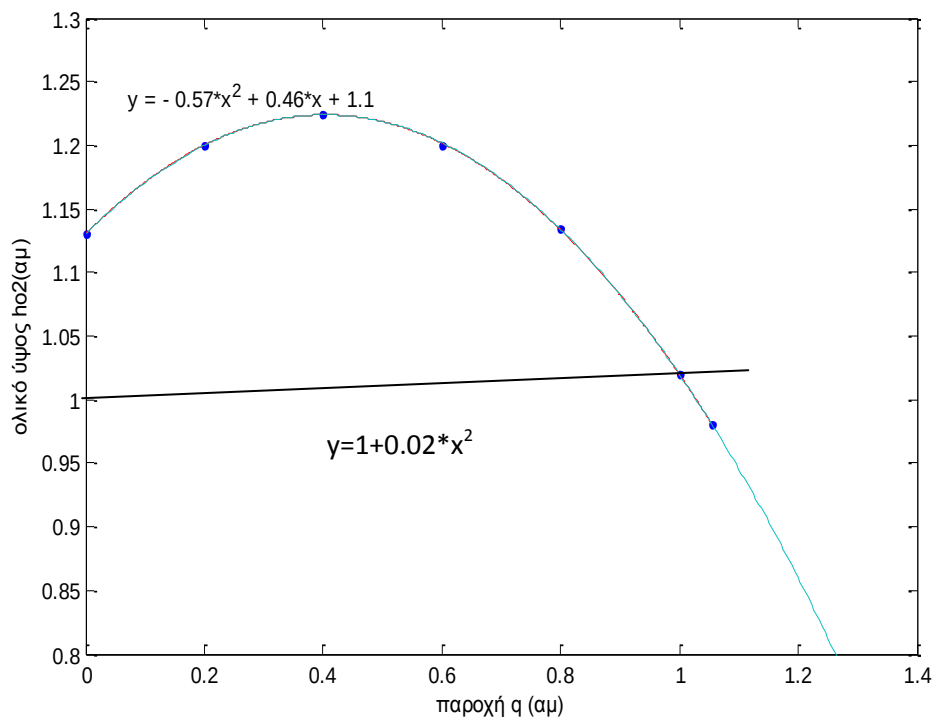
Πίνακας 5.1: Ολικό ύψος $h_o(\alpha\mu)$ συναρτήσει παροχής $q(\alpha\mu)$.

A.A.	Παροχή $q(\alpha\mu)$ Στροφές $n(\alpha\mu)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.055
1	1.015	1.165	1.235	1.26	1.24	1.175	1.065	1.02
2	1	1.13	1.2	1.225	1.2	1.135	1.02	0.98
3	0.955	1.03	1.1	1.12	1.09	1.015	0.9	0.86
4	0.925	0.96	1.03	1.048	1.02	0.94	0.82	0.775

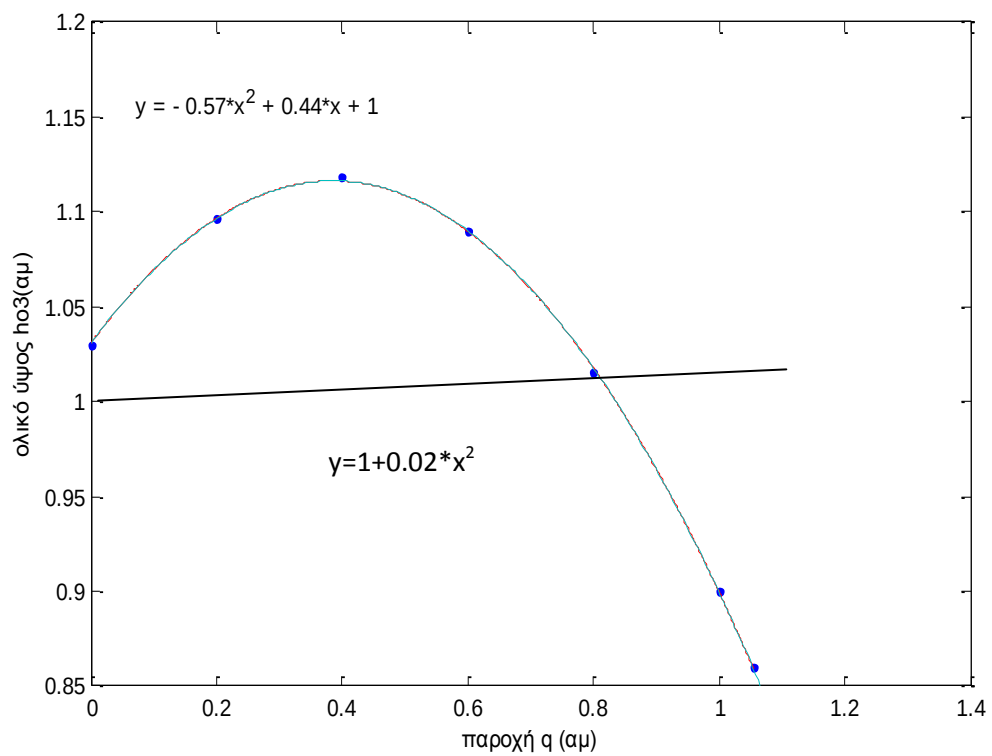
Με την βοήθεια της Matlab, μπορεί να προσεγγιστεί με πολυωνμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού (curve fitting) κάθε μία από τις 4 καμπύλες για το αμ ολικό ύψος h_o . Λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 5.1, προέκυψαν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας (h_o, q) με τις εξισώσεις τους, οι οποίες φαίνονται στα Σχήματα 5.3-5.6.



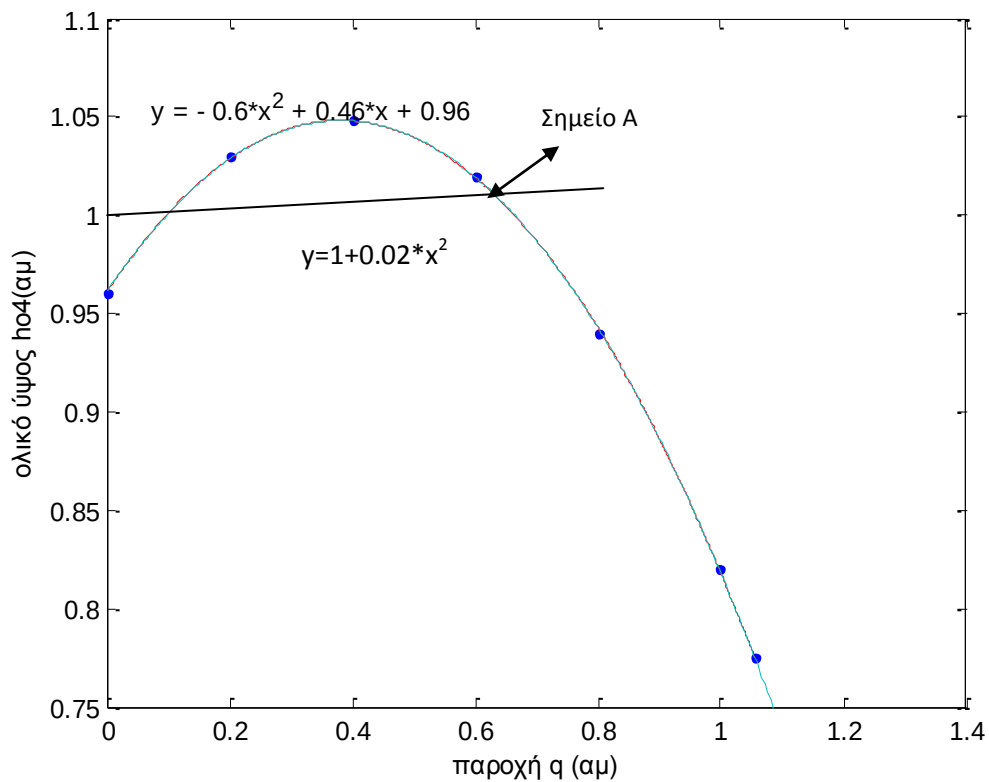
Σχήμα 5.3: Ολικό ύψος συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n_1 .



Σχήμα 5.4: Ολικό ύψος συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n2.



Σχήμα 5.5: Ολικό ύψος συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n3.



Σχήμα 5.6: Ολικό ύψος συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n4.

Δίνονται παρακάτω συγκεντρωτικά οι εξισώσεις για το αμ ολικό ύψος h_o της αντλίας συναρτήσει της παροχής q .

$$h_{o1} = -0.5724q^2 + 0.46995q + 1.1644 \quad (5.16)$$

$$h_{o2} = -0.5749q^2 + 0.4646q + 1.1303 \quad (5.17)$$

$$h_{o3} = -0.5746q^2 + 0.4434q + 1.0308 \quad (5.18)$$

$$h_{o4} = -0.6004q^2 + 0.4575q + 0.96099 \quad (5.19)$$

Όπου οι δείκτες 1-4 αναφέρονται στις ταχύτητες περιστροφής που δίνονται στον Πίνακα 5.1.

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι:

- Αν ο σταθερός όρος στις παραπάνω σχέσεις είναι μικρότερος του 1, τότε (για $h_o=1.02$) έχουμε 2 θετικές λύσεις για την παροχή q και αποδεκτή θεωρείται η μεγαλύτερη.
- Αν ο σταθερός όρος στις παραπάνω σχέσεις είναι μεγαλύτερος του 1, τότε για ($h_o=1.02$) έχουμε 2 ετερόσημες λύσεις για την παροχή q και αποδεκτή θεωρείται η θετική.

Από το Σχήμα 5.6, φαίνεται ότι για την ταχύτητα περιστροφής n_4 , για την οποία ισχύει η (5.19), όντως υπάρχουν 2 σημεία τομής της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης με την χαρακτηριστική της αντλίας και εντός του επιτρεπτού εύρους λειτουργίας για την παροχή είναι η μεγαλύτερη τιμή.

Γενικά, οι αντλίες λειτουργούν στο δεξί μέρος της καμπύλης h_0-q (σημείο Α), το οποίο είναι και ευσταθές (εκεί δηλαδή όπου παρατηρείται αρνητική κλίση). Αν παρατηρηθεί κάποια τυχαία παροδική αύξηση της παροχής κατά Δq , τότε μειώνεται και η πίεση της αντλίας και επειδή η αντλία δεν μπορεί να δώσει ενέργεια στο υγρό, η παροχή αναγκάζεται να μειωθεί περαιτέρω και έτσι το σύστημα επιστρέφει στο αρχικό σημείο ισορροπίας Α. Εφόσον μετά την διαταραχή το σύστημα επιστρέφει στο αρχικό σημείο ισορροπίας, το σημείο αυτό αποτελεί ευσταθές σημείο λειτουργίας. Αντίστοιχα, αν παρατηρηθεί παροδική μείωση της παροχής κατά Δq , τότε αυξάνει η διαφορά πιέσεως μεταξύ αντλίας και σωλήνωσης και η αντλία δίνει στο υγρό μεγαλύτερη ενέργεια από όση απορροφάται από αυτό, με αποτέλεσμα να έχουμε νέα αύξηση της παροχής και να επιστρέφουμε πάλι στο αρχικό σημείο ισορροπίας Α. Δηλαδή ανάλογα με το αν αυξάνει ή μειώνεται η πίεση, παρατηρείται αντίστοιχα και επιτάχυνση/επιβράδυνση της υδάτινης στήλης, ενώ οι στροφές διατηρούνται σταθερές από τον κινητήρα της αντλίας.

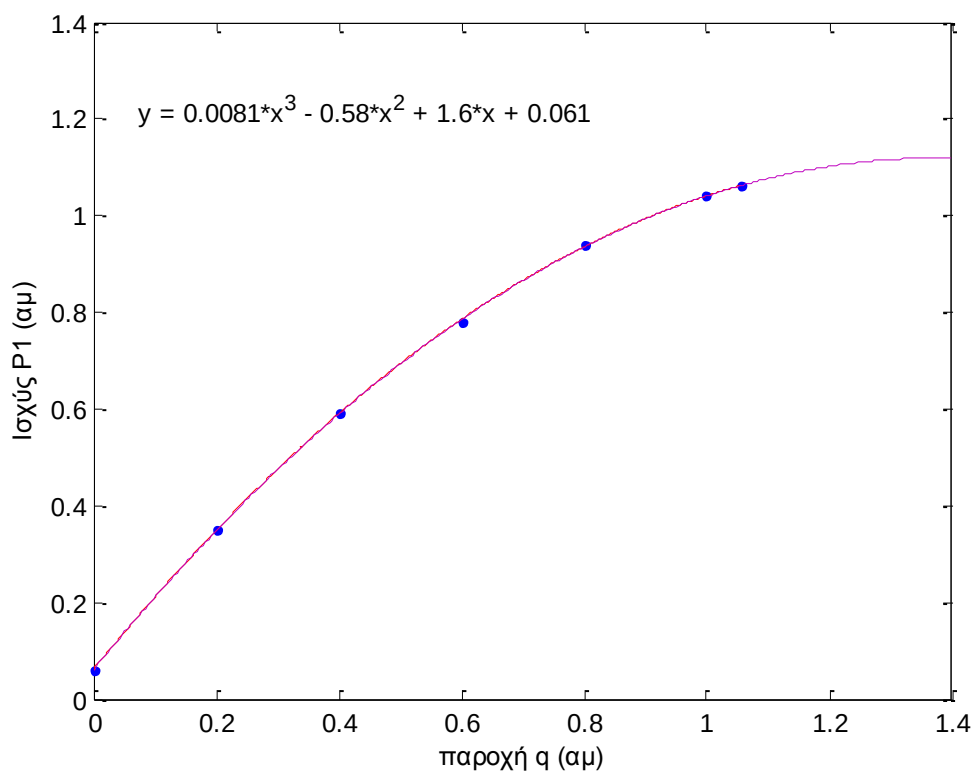
5.3.2 Χαρακτηριστικές ισχύος - παροχής

Από το Σχήμα 5.1, λήφθηκαν 7 σημεία για την παροχή q και την ισχύ P που καταναλώνει η αντλία για τις 4 ταχύτητες περιστροφής n_1-n_4 , τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

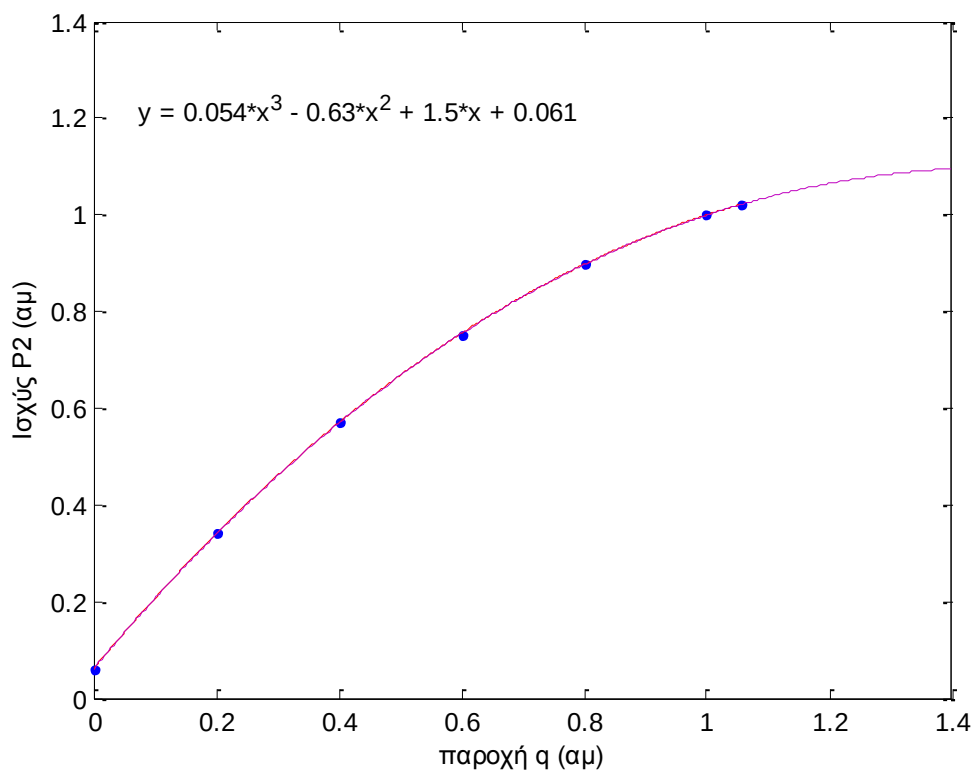
Πίνακας 5.2: Τιμές της ισχύος $P(\alpha\mu)$ συναρτήσει της παροχής $q(\alpha\mu)$.

A.A.	Παροχή $q(\alpha\mu)$ Ισχύς $P(\alpha\mu)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.055
1	1.015	0.06	0.35	0.59	0.78	0.94	1.04	1.062
2	1	0.06	0.34	0.57	0.75	0.9	1	1.02
3	0.955	0.06	0.31	0.51	0.68	0.8	0.89	0.91
4	0.925	0.06	0.282	0.48	0.63	0.74	0.82	0.84

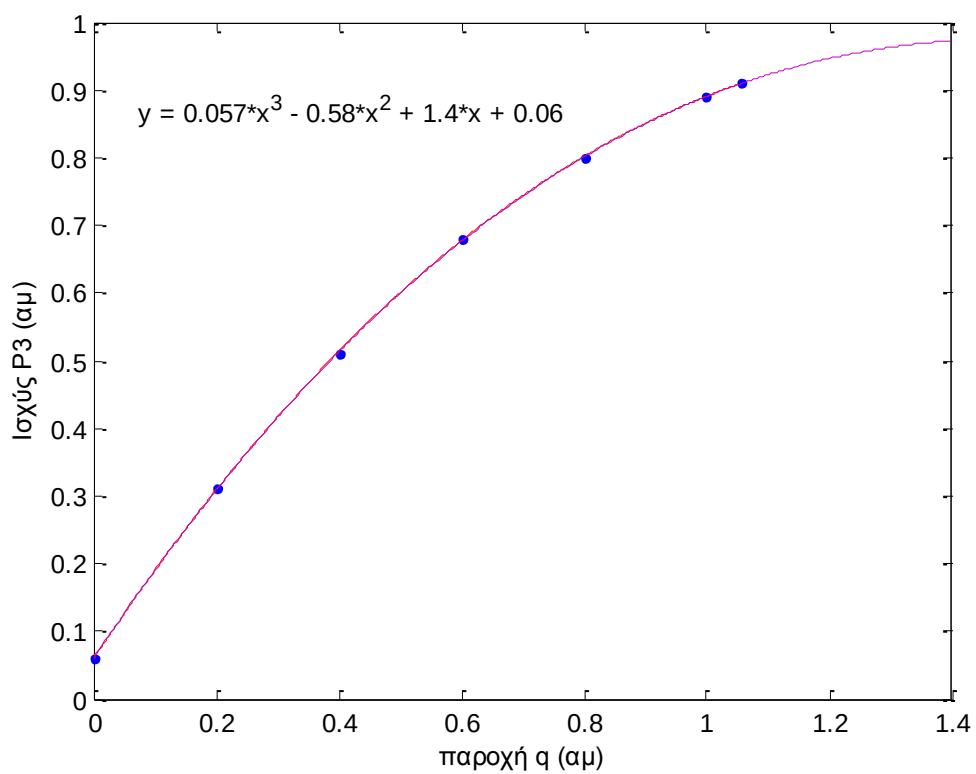
Όπως και προηγουμένως, με την βοήθεια της Matlab υπολογίζονται με πολυωνυμική προσέγγιση τρίτου βαθμού (curve fitting) οι εξισώσεις για τις χαρακτηριστικές ισχύος-παροχής. Λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 5.2, προέκυψαν οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας (P,q) με τις εξισώσεις τους, οι οποίες φαίνονται στα Σχήματα 5.7-5.10.



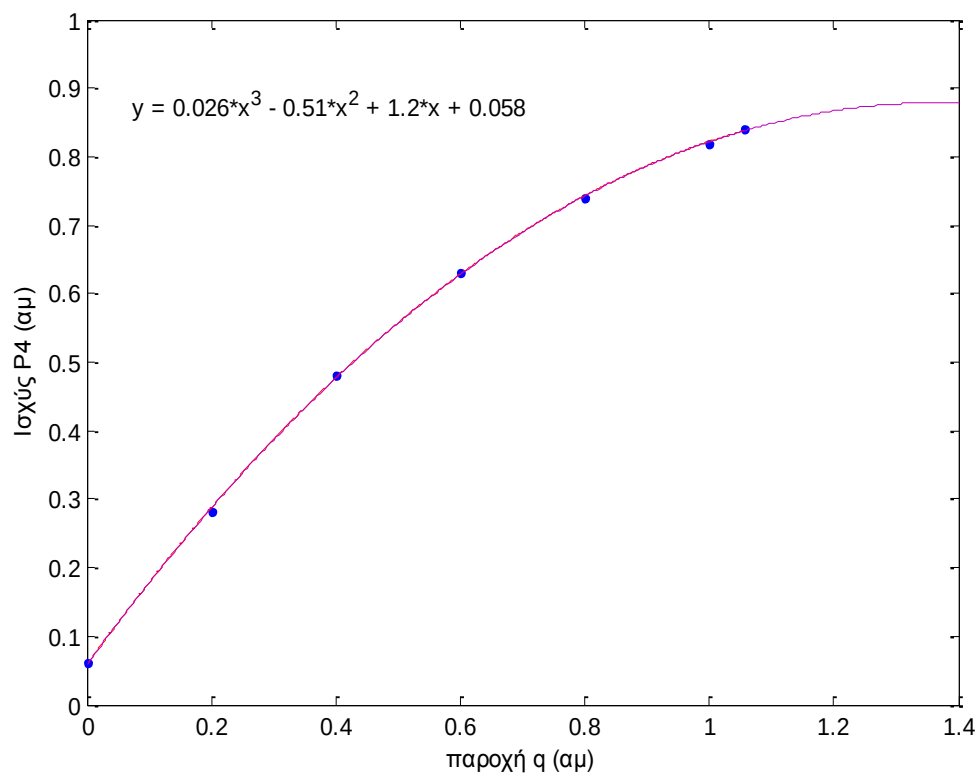
Σχήμα 5.7: Ισχύς συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n1.



Σχήμα 5.8: Ισχύς συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n2.



Σχήμα 5.9: Ισχύς συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n3.



Σχήμα 5.10: Ισχύς συναρτήσει της παροχής για την ταχύτητα περιστροφής n4.

Στην συνέχεια, δίνονται συγκεντρωτικά οι εξισώσεις που προέκυψαν για την αμ ισχύ P που καταναλώνει η αντλία συναρτήσει της παροχής της q.

$$P_1 = 0.0080699q^3 - 0.57986q^2 + 1.552q + 0.060829 \quad (5.20)$$

$$P_2 = 0.05406q^3 - 0.62921q^2 + 1.514q + 0.06115 \quad (5.21)$$

$$P_3 = 0.056627q^3 - 0.58261q^2 + 1.3564q + 0.060213 \quad (5.22)$$

$$P_4 = 0.025644q^3 - 0.50522q^2 + 1.2432q + 0.058338 \quad (5.23)$$

Όπου οι δείκτες 1-4 αναφέρονται στις ταχύτητες περιστροφής n1, n2, n3, n4 που δίνονται στον Πίνακα 5.2.

5.3.3 Εύρεση σχετικών βαθμών απόδοσης

Σε αυτήν την παράγραφο θα υπολογιστεί ο σχετικός βαθμός απόδοσης η_r για τα 4 σημεία λειτουργίας του Σχήματος 5.1.

Η παροχή για το κάθε σημείο λειτουργίας προκύπτει ως το σημείο τομής μίας από τις σχέσεις (5.16) - (5.19) που αντιστοιχεί στην επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής n, με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης

$$h_o = 1 + 0.02q^2 \quad (5.24)$$

Εφόσον λοιπόν η παροχή q προσδιορίζεται όπως εξηγήθηκε παραπάνω, αν αυτή αντικατασταθεί σε μία από τις (5.20) - (5.23) που αντιστοιχεί στην σωστή ταχύτητα περιστροφής n, προκύπτει η ζητούμενη ισχύς P που καταναλώνει η αντλία.

Για την εύρεση του κανονικοποιημένου ολικού ύψους h της αντλίας, χρησιμοποιείται η (5.12) που προσδιορίστηκε στην Ενότητα 5.2.

Τέλος, από την (5.5) υπολογίζεται ο σχετικός βαθμός απόδοσης της αντλίας η_r , εφόσον έχει πλέον προσδιοριστεί η παροχή q, η ισχύς P που καταναλώνει η αντλία αλλά και το αμ ολικό ύψος h.

Δίνονται ο σχετικός βαθμός απόδοσης για τα 4 σημεία λειτουργίας της αντλίας στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Σχετικός βαθμός απόδοσης η_r .

Στροφές n	Παροχή q	Ολικό ύψος h	Ισχύς P	η_r
1.015	1.055	1.0022	1.062	0.9956
1	1	1.0000	1	1.00000
0.955	0.812	0.9933	0.808	0.9982
0.925	0.64	0.9884	0.658	0.9614

Συμπεραίνουμε ότι :

- Σε μικρές στροφές (και παροχές) υπάρχουν λιγότερες υδραυλικές απώλειες, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.3 (στην στήλη του h), αλλά και πιο μικρός σχετικός βαθμός απόδοσης αντίστοιχα, ενώ στις υψηλότερες στροφές (και παροχές), ο σχετικός βαθμός απόδοσης αυξάνει αλλά αντίστοιχα αυξάνουν και οι υδραυλικές απώλειες.
- Ο σχετικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος στα ονομαστικά μεγέθη, όπως ήταν αναμενόμενο, και ίσος με 1.

5.4 Σχετικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει ταχύτητας περιστροφής

Σε αυτή την Ενότητα θα υπολογιστεί ο σχετικός βαθμός απόδοσης η_r συναρτήσει των στροφών n της αντλίας. Η εξίσωση του θα υπολογιστεί με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και με βάση τα 4 ζεύγη τιμών που υπάρχουν διαθέσιμα από τον Πίνακα 5.3.

Έστω ότι ο σχετικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών της αντλίας εκφράζεται με την ακόλουθη συνάρτηση:

$$\eta_r = \alpha n^2 + \beta n + \gamma \quad (5.25)$$

Για την παραπάνω σχέση απαιτείται για τιμή της ταχύτητας n ίση με 1 αμ να εμφανίζει μέγιστο σχετικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή $\eta_r=1$ αμ.

Από την παραπάνω απαίτηση προκύπτει:

$$-\frac{\beta}{2\alpha} = 1 \quad (5.26)$$

$$-\frac{\beta^2 - 4\alpha\gamma}{4\alpha} = 1 \quad (5.27)$$

Επιλύοντας από τις παραπάνω σχέσεις τους συντελεστές β , γ ως προς α και αντικαθιστώντας στην (5.25) προκύπτει η μονοπαραμετρική εξίσωση:

$$\eta_r = \alpha n^2 - 2\alpha n + (\alpha + 1) \quad (5.28)$$

Για την σχέση (5.28) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων έτσι ώστε να βρεθεί για ποιο α η ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται.

$$f(\alpha) = \sum_{i=1}^3 [\eta_i - (\alpha n_i^2 - 2\alpha n_i + \alpha + 1)]^2 \quad (5.29)$$

Αντικαθιστώντας στην (5.29) τα 3 ζεύγη τιμών που υπολογίστηκαν στην Ενότητα 5.3.3 και βρίσκονται στον Πίνακα 5.3, προκύπτει η συνάρτηση:

$$f(a) = 0.00003579a^2 + 0.000463365a + 0.00155421 \quad (5.30)$$

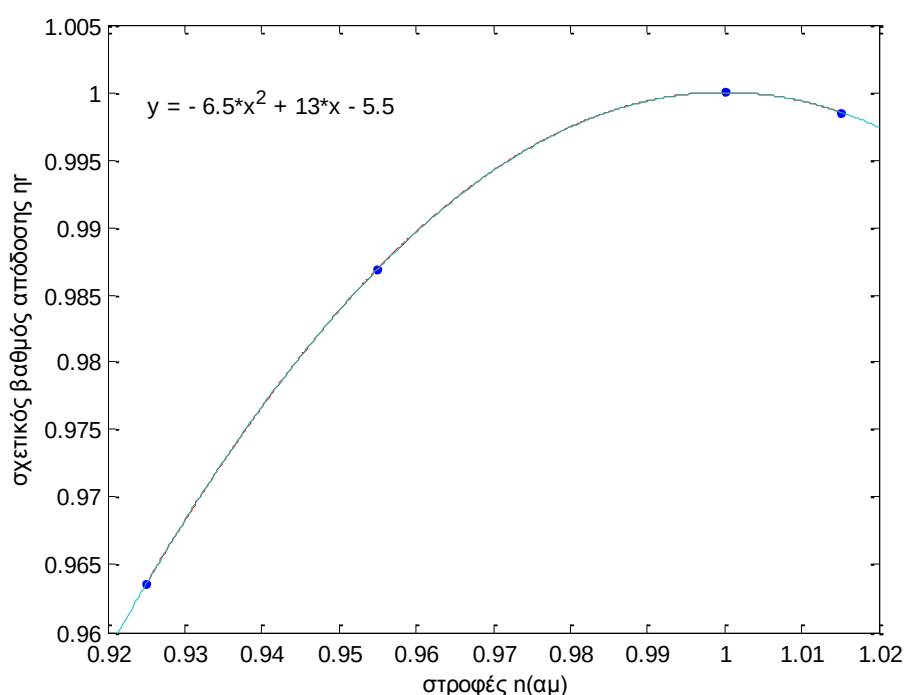
Παίρνοντας την παράγωγο της (5.30), θέτοντας την ίση με 0 και επιλύοντας ως προς a , βρέθηκε τελικά η τιμή του a για την οποία η (5.30) ελαχιστοποιείται.

$$a = -6.4734 \quad (5.31)$$

Η (5.28) διαμορφώνεται όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\eta_r = -6.4734n^2 + 12.9468n - 5.4734 \quad (5.32)$$

Προσδιορίστηκε λοιπόν ο σχετικός βαθμός απόδοσης η_r συναρτήσει των στροφών n της αντλίας και η αντίστοιχη διαγραμματική αναπαράσταση δίνεται στο Σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Σχετικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας.

5.5 Προσέγγιση αναλυτικής εξίσωσης αντλίας

Γενικά, για το αμ ολικό ύψος h_o της αντλίας ισχύει:

$$h_o = a(n)q^2 + b(n)q + c(n) = 1 + 0.02q^2 \quad (5.33)$$

Από τις σχέσεις (5.16) - (5.19) έχουν βρεθεί 4 τιμές για τους συντελεστές $a(n)$, $b(n)$, $c(n)$ και δίνονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Συντελεστές $a(n)$, $b(n)$, $c(n)$ του αμ ολικού ύψους h_o της αντλίας.

Στροφές n	$a(n)$	$b(n)$	$c(n)$
1.015	-0.5724	0.46995	1.1644
1	-0.5749	0.4646	1.1301
0.955	-0.5746	0.4434	1.0308
0.925	-0.6004	0.4575	0.96099

Χρησιμοποιώντας πολυωνυμική προσέγγιση πρώτου βαθμού (curve fitting) στη Matlab βρέθηκαν οι παρακάτω σχέσεις για τους συντελεστές $a(n)$, $b(n)$, $c(n)$:

$$a(n) = 0.3204n - 0.8966 \quad (5.34)$$

$$b(n) = 0.1243n + 0.3423 \quad (5.35)$$

$$c(n) = 2.258n - 1.128 \quad (5.36)$$

Οπότε η αναλυτική εξίσωση της αντλίας προκύπτει όπως δίνεται παρακάτω:

$$h_o = (0.3204n - 0.8966)q^2 + (0.1243n + 0.3423)q + (2.258n - 1.128) \quad (5.37)$$

Από την (5.33) με απαλοιφή του αμ ολικού ύψους h_o προκύπτει :

$$[a(n) - 0.02]q^2 + b(n)q + c(n) - 1 = 0$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς την παροχή q λαμβάνεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$q(n) = \frac{-((0.1243n + 0.3423) - ((0.1243n + 0.3423)^2 - 4(0.3204n - 0.9166)(2.258n - 1.128))^{1/2})}{2(0.3204n - 0.9166)} \quad (5.38)$$

Στην συνέχεια, προσδιορίζεται η ισχύς P της αντλίας συναρτήσει των στροφών n μέσω της (5.5) ως εξής:

$$P(n) = \frac{q(n)h(n)}{\eta_r(n)} \quad (5.39)$$

Όπου:

- $P(n)$: η ισχύς που καταναλώνει η αντλία συναρτήσει των στροφών n .
- $q(n)$: η διακινούμενη παροχή q συναρτήσει των στροφών n , η οποία προσδιορίζεται από την (5.38).

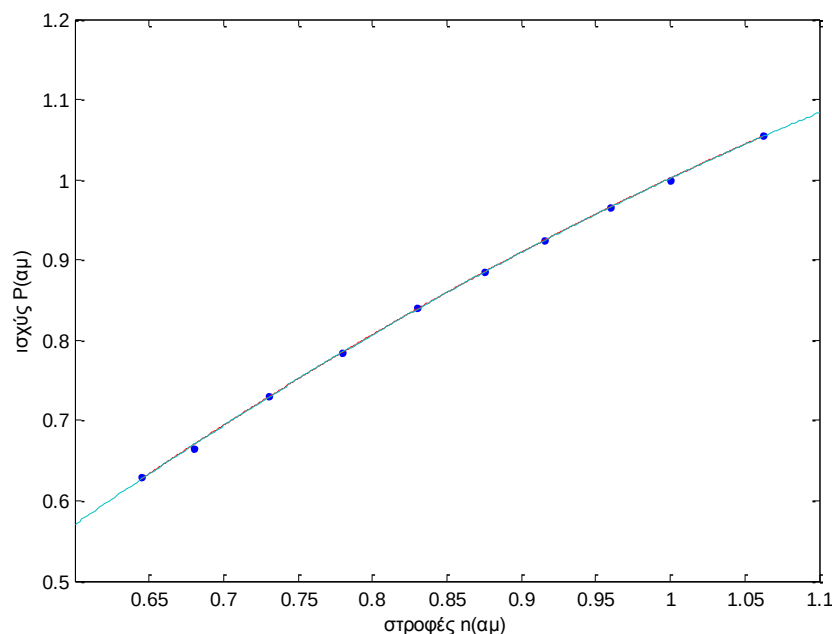
- $h(n)$: το αμ ολικό ύψος συναρτήσει των στροφών n , το οποίο δίνεται από την (5.12), με την παροχή q να αντικαθίστανται από την (5.38).
- $\eta_r(n)$: ο σχετικός βαθμός απόδοσης η_r συναρτήσει των στροφών n της αντλίας, ο οποίος δίνεται από την (5.32) που προσδιορίστηκε στην Ενότητα 5.4.

Στον Πίνακα 5.5 δίνεται η παροχή q και η ισχύς P της αντλίας, όπως προσδιορίστηκαν από τις (5.38), (5.39) αντίστοιχα, για 10 ταχύτητες περιστροφής που λήφθηκαν από το Σχήμα 5.2.

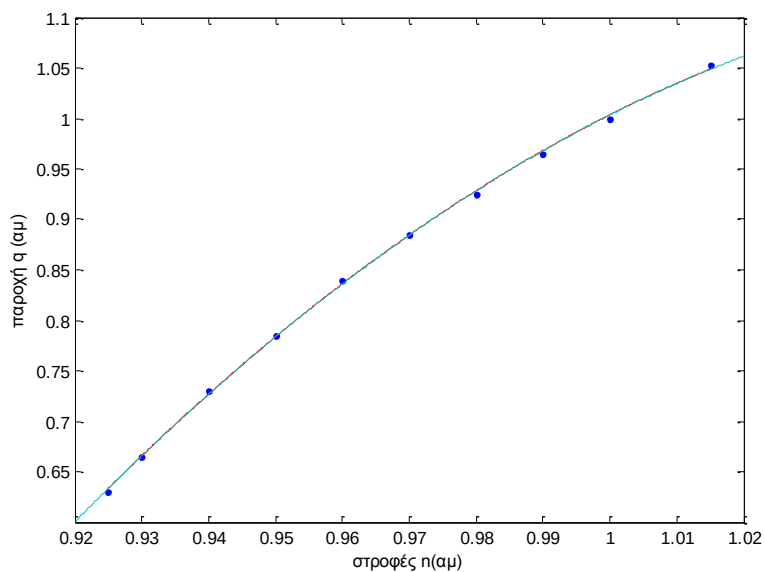
Πίνακας 5.5: Ισχύς $P(\alpha\mu)$ και παροχή $q(\alpha\mu)$ συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $n(\alpha\mu)$.

n	1.015	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.925
P	1.061	1	0.963	0.915	0.878	0.834	0.78	0.73	0.68	0.649
q	1.058	1	0.963	0.923	0.889	0.84	0.785	0.734	0.665	0.637

Στα Σχήματα 5.12, 5.13 δίνονται τα διαγράμματα ισχύος - στροφών και παροχής - στροφών, στα οποία φαίνονται τα αρχικά σημεία από τις καμπύλες του Σχήματος 5.2 και οι καμπύλες που προέκυψαν με βάση τον Πίνακα 5.5.



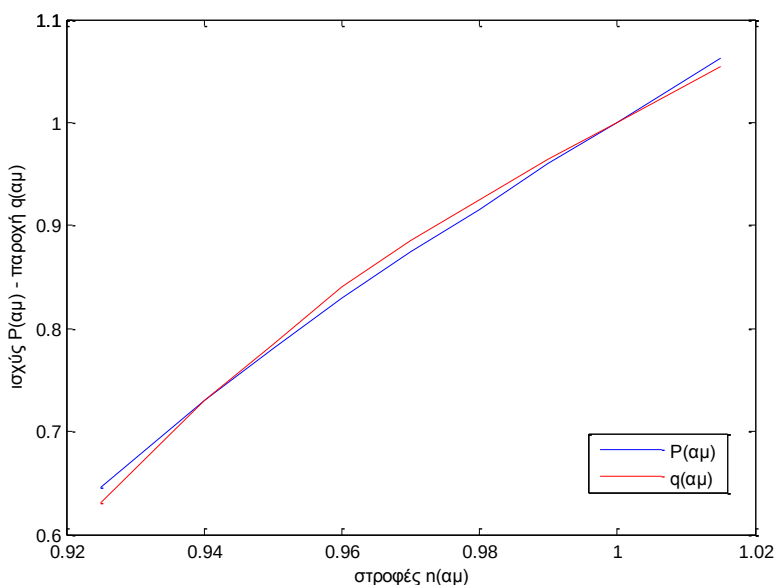
Σχήμα 5.12: Καμπύλη ισχύος – στροφών με προσθήκη σημείων του Σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.13: Καμπύλη παροχής – στροφών με προσθήκη σημείων του Σχήματος 5.2.

Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.12, 5.13 υπάρχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αρχικών καμπυλών του Σχήματος 5.2 αλλά και των καμπυλών της αντλίας που προσδιορίστηκαν στην Ενότητα αυτή λαμβάνοντας υπόψη την αναλυτική εξίσωση της.

Τέλος, δίνονται στο Σχήμα 5.14 οι προσεγγιστικές καμπύλες παροχής – στροφών και ισχύος – στροφών που προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη την αναλυτική χαρακτηριστική εξίσωση της αντλίας, δηλαδή οι καμπύλες που προέκυψαν με βάση τον Πίνακα 5.5.



Σχήμα 5.14: Παροχή και ισχύς της αντλίας συναρτήσει των στροφών (προσέγγιση του Σχήματος 5.2).

5.6 Προσδιορισμός βέλτιστης ταχύτητας άντλησης

Παρόλο που στην προηγούμενη Ενότητα πραγματοποιήθηκε μια προσέγγιση της αναλυτικής χαρακτηριστικής εξίσωσης της αντλίας, επειδή οι σχέσεις που προέκυψαν είναι αρκετά πολύπλοκες, στην Ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μια πολυωνυμική προσέγγιση για την ισχύ και την παροχή συναρτήσει των στροφών της αντλίας, λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 5.2 της Ενότητας 5.1.

Από το Σχήμα 5.2 λαμβάνονται δέκα τιμές για την παροχή, την ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Τιμές της ισχύος $P(\alpha\mu)$ και της παροχής $q(\alpha\mu)$ συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής $n(\alpha\mu)$.

$n(\alpha\mu)$	1.015	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.925
$P(\alpha\mu)$	1.062	1	0.96	0.915	0.875	0.83	0.78	0.73	0.68	0.645
$q(\alpha\mu)$	1.055	1	0.965	0.925	0.885	0.84	0.785	0.73	0.665	0.63

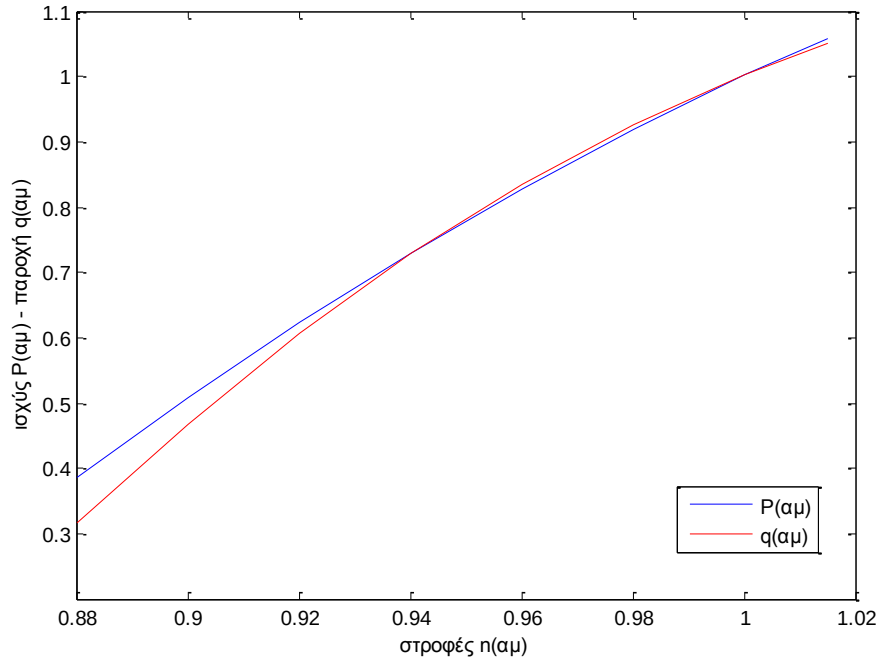
Με την βοήθεια της Matlab, κάνοντας πολυωνυμική προσέγγιση δευτέρου βαθμού και λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 5.6, προέκυψαν οι ακόλουθες σχέσεις για την ισχύ P και την παροχή q της αντλίας συναρτήσει των στροφών n .

$$P(n) = -9.901n^2 + 23.74n - 12.839 \quad (5.40)$$

$$q(n) = -19.148n^2 + 41.725n - 21.577 \quad (5.41)$$

Είναι δυνατόν λοιπόν να υπολογιστεί η ισχύς P και η παροχή q της αντλίας και για ενδιάμεσες στροφές n (εκτός δηλαδή από τα 4 σημεία λειτουργίας του Σχήματος 5.1) ή δοθέντος της μηχανικής ισχύος P να υπολογιστούν οι στροφές n και κατ' επέκταση η παροχή q της αντλίας. Οι (5.40), (5.41) θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της άντλησης που μπορεί να πραγματοποιηθεί με δεδομένη ισχύ, όπως θα φανεί στο Κεφάλαιο 6.

Δίνονται στο Σχήμα 5.15 οι καμπύλες παροχής – στροφών και ισχύος – στροφών που προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τις (5.40), (5.41) και τον Πίνακα 5.6. Ουσιαστικά δηλαδή, το Σχήμα 5.15 έχει προκύψει από το Σχήμα 5.2 αλλά έχει προεκταθεί και για μικρότερες παροχές μέσω των (5.40), (5.41) για να μπορεί να καλύψει το εύρος μεταβολής των παροχών που εμφανίζεται στο Κεφαλαίο 6.



Σχήμα 5.15: Παροχή και ισχύς της αντλίας συναρτήσει των στροφών (προέκταση του Σχήματος 5.2 προς μικρότερες παροχές).

Θα προσδιοριστεί στην συνέχεια σε ποια ταχύτητα περιστροφής, εντός του διαστήματος μεταβολής (0.945-0.995) της ταχύτητας, για το οποίο η παροχή υπερβαίνει την ισχύ που καταναλώνει η αντλία όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.15, το πηλίκο της παροχής προς την ισχύ μεγιστοποιείται. Το ζητούμενο πηλίκο $A(n)$ δίνεται στην συνέχεια:

$$A(n) = \frac{-19.148n^2 + 41.725n - 21.574}{-9.901n^2 + 23.74n - 12.837} \quad (5.42)$$

Με την βοήθεια της Matlab βρέθηκε ότι η τιμή για την οποία το παραπάνω πηλίκο μεγιστοποιείται είναι:

$$n_{opt} = 0.972\alpha\mu \quad (5.43)$$

Η (5.43) αποτελεί λοιπόν την βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής της αντλίας και η βέλτιστη ισχύς και παροχή P_{opt} , q_{opt} προκύπτουν από αντικατάσταση της βέλτιστης ταχύτητας στις (5.40), (5.41) αντίστοιχα:

$$P_{opt} = 0.88\alpha\mu \quad (5.44)$$

$$q_{opt} = 0.89\alpha\mu \quad (5.45)$$

Κεφάλαιο 6

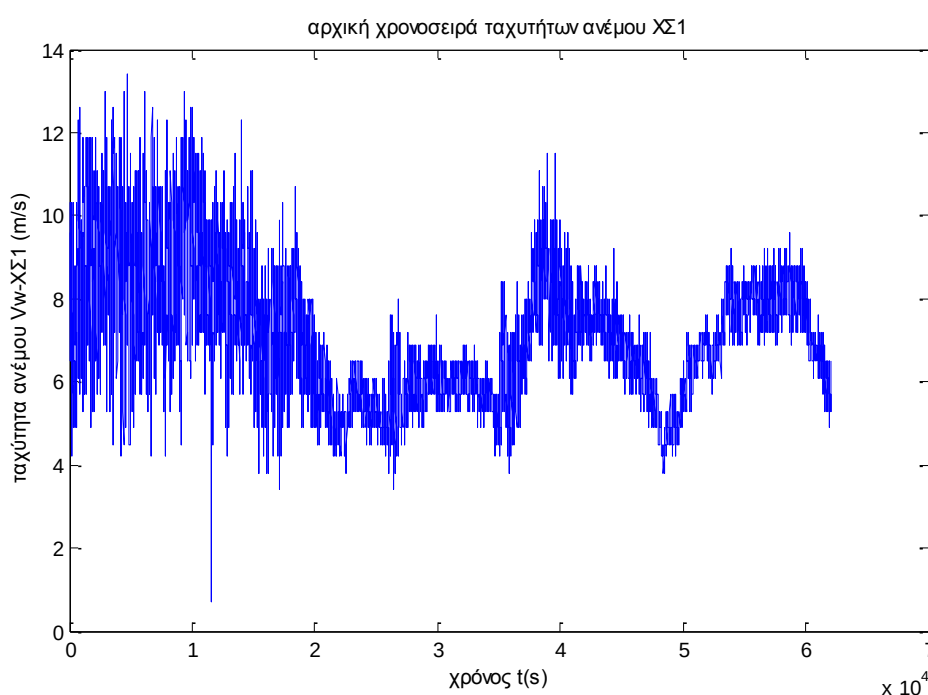
Αξιοποίηση αιολικής παραγωγής για Αντλησιοταμίευση

6.1 Χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου

Από το ερευνητικό έργο [51] λαμβάνονται οι χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση. Οι χρονοσειρές αυτές έχουν περίοδο ενός δευτερολέπτου και ο συνολικός αριθμός των σημείων δειγματοληψίας ανά δευτερόλεπτο είναι ίσος με 62112.

6.1.1 Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1

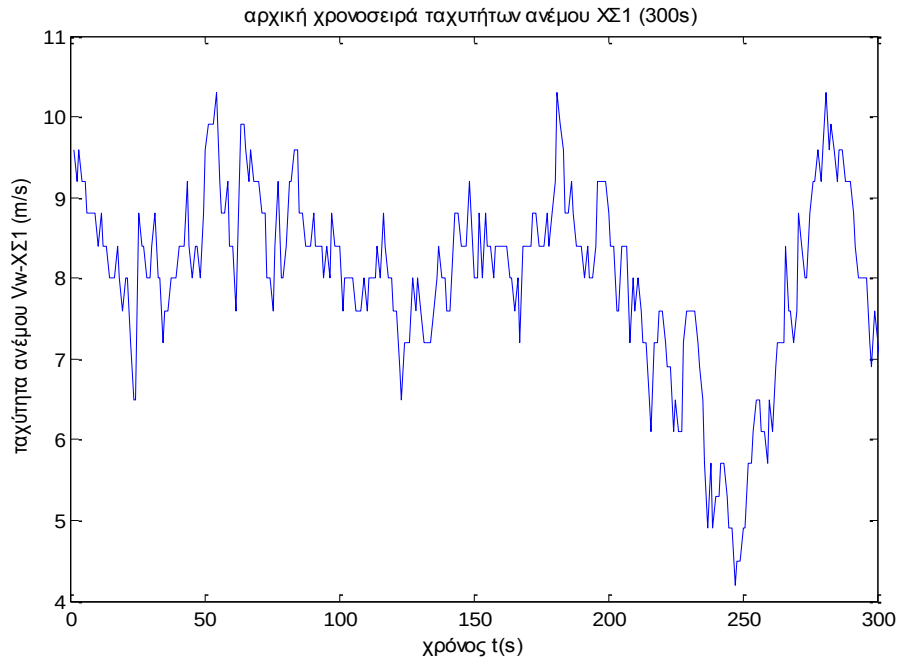
Η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.

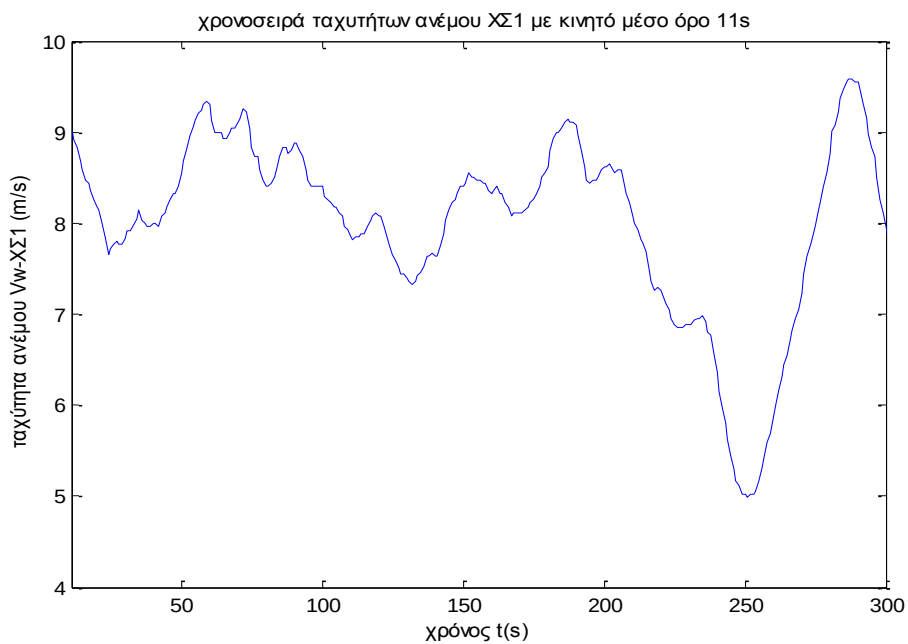
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ανέμου που παρατηρείται στην χρονοσειρά αυτή είναι ίση με 13.4 m/s.

Στο Σχήμα 6.2 δίνονται τα 300 πρώτα δευτερόλεπτα της χρονοσειράς ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.



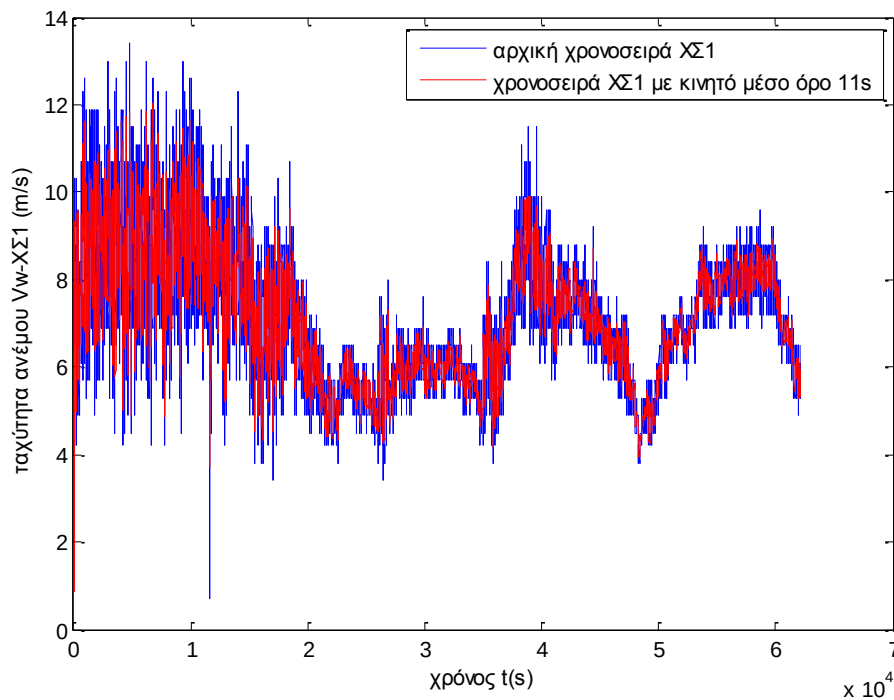
Σχήμα 6.2: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, αλλά την μέση τιμή αυτών. Για αυτό τον λόγο, στο Σχήμα 6.3 έχει υπολογιστεί η μέση ταχύτητα ανέμου ανά 11 δευτερόλεπτα. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται με χρήση της συνάρτησης κινητού μέσου όρου (moving average) στη Matlab. Πάλι δίνονται τα 300 πρώτα δευτερόλεπτα της χρονοσειράς ΧΣ1.

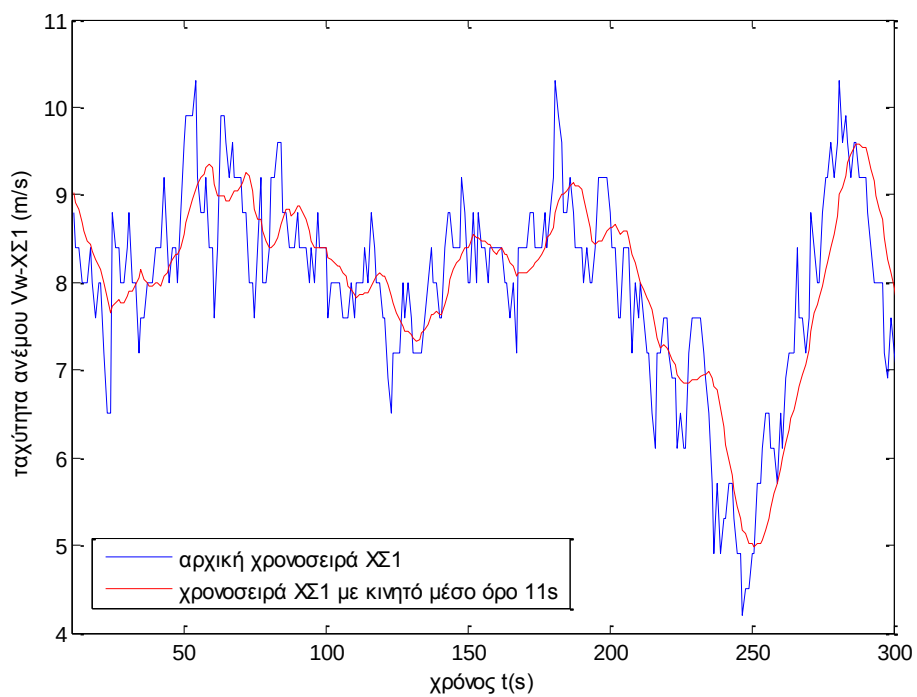


Σχήμα 6.3: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1 με κινητό μέσο όρο 11s.

Στα Σχήματα 6.4, 6.5 δίνεται η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, χωρίς και με κινητό μέσο όρο, για 62112s και 300s αντίστοιχα.



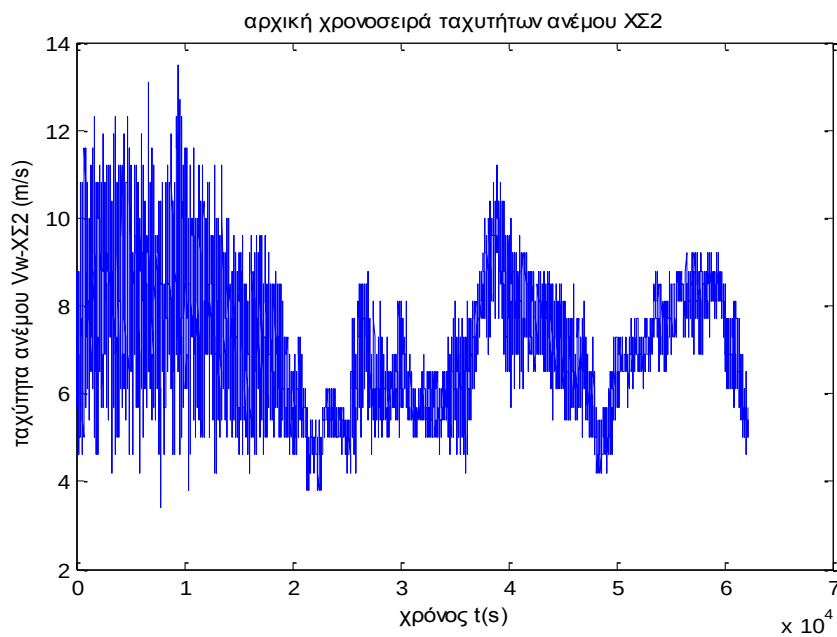
Σχήμα 6.4: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1 χωρίς και με κινητό μέσο όρο 11s.



Σχήμα 6.5: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1 χωρίς και με κινητό μέσο όρο 11s.

6.1.2 Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2

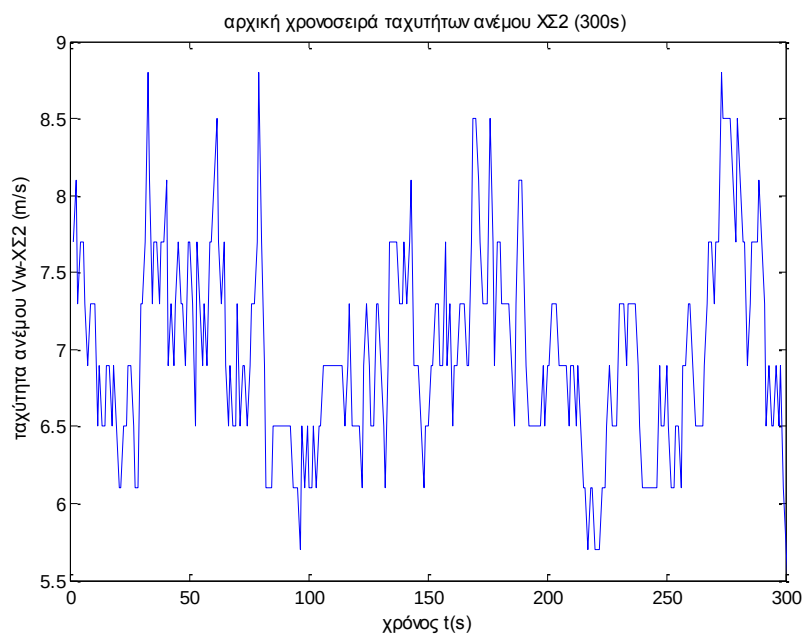
Όμοια με πριν, η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2 η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ανάλυση δίνεται στο Σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2.

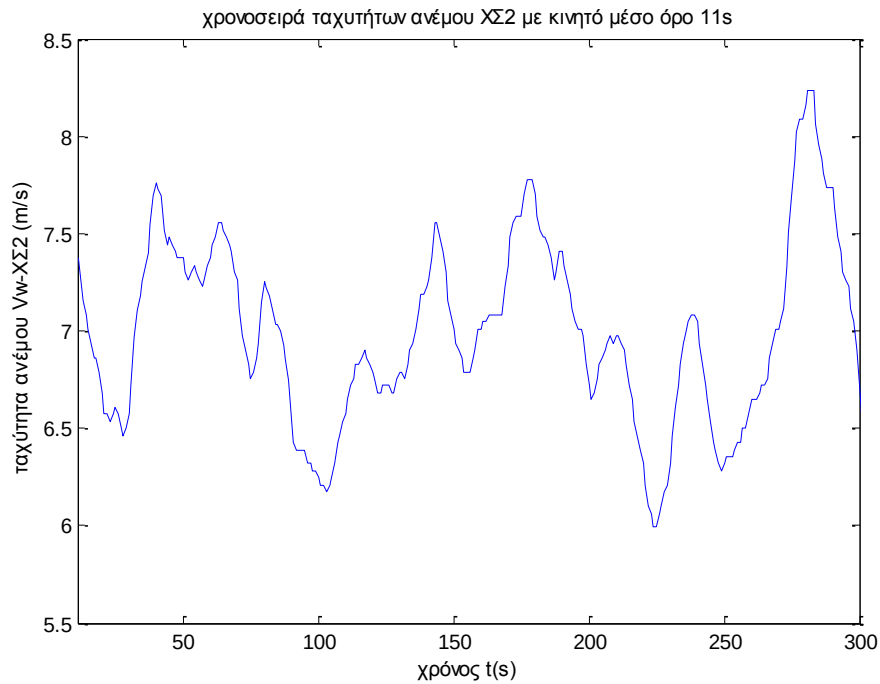
Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ανέμου που παρατηρείται στην χρονοσειρά αυτή είναι ίση με 13.5 m/s.

Στο Σχήμα 6.7 δίνονται τα 300 πρώτα δευτερόλεπτα της χρονοσειράς ταχυτήτων του ανέμου ΧΣ2.



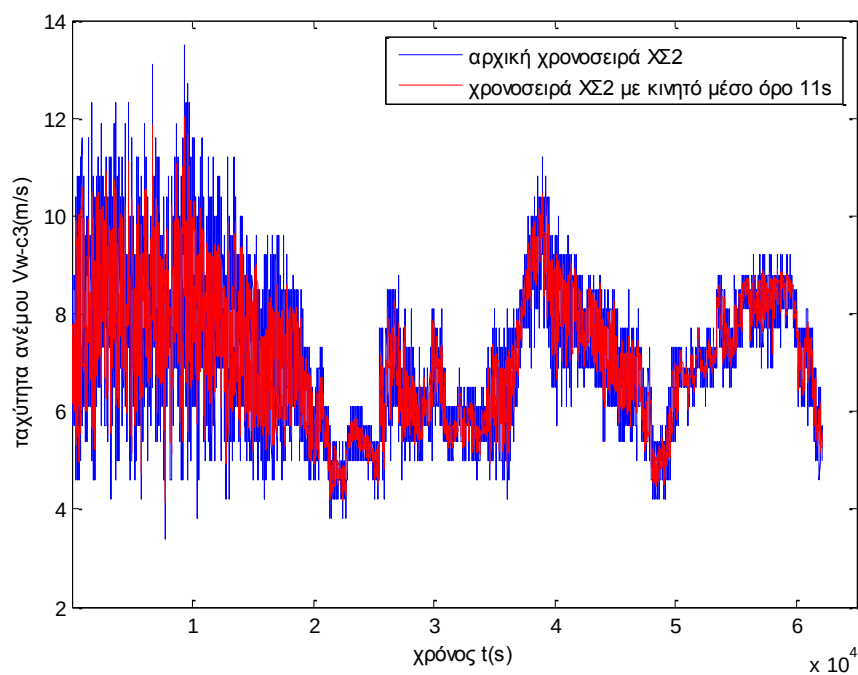
Σχήμα 6.7: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2.

Στο Σχήμα 6.8 έχει υπολογιστεί η μέση ταχύτητα ανέμου ανά 11 δευτερόλεπτα. Πάλι δίνεται η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2 για τα πρώτα 300s.

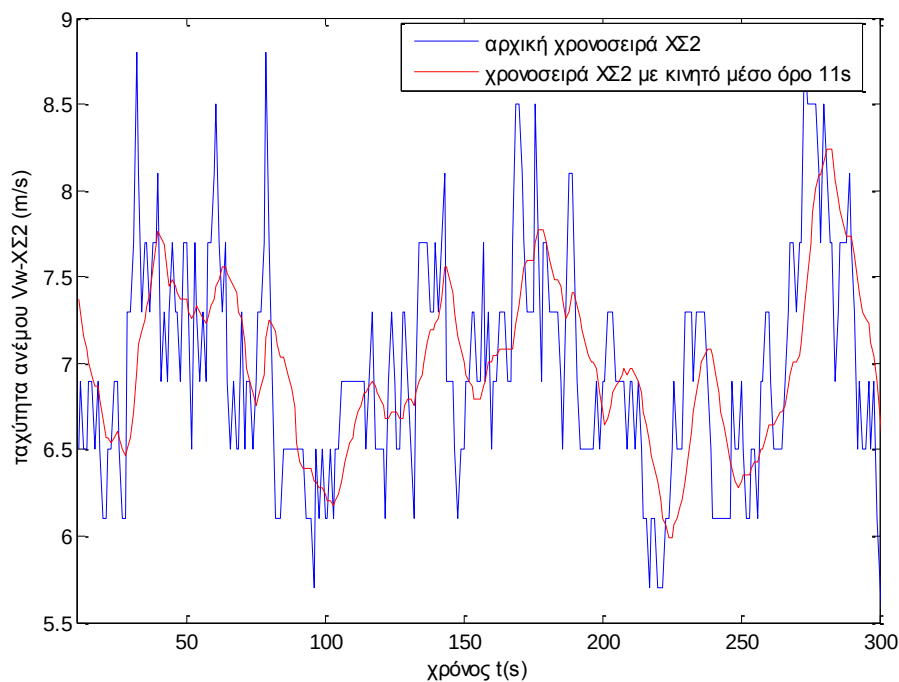


Σχήμα 6.8: χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2 με κινητό μέσο όρο 11s.

Στα Σχήματα 6.9, 6.10 δίνεται η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2, με και χωρίς κινητό μέσο όρο, για 62112s και 300s αντίστοιχα.



Σχήμα 6.9: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2 με και χωρίς κινητό μέσο όρο 11s.



Σχήμα 6.10: Χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου XΣ2 με και χωρίς κινητό μέσο όρο 11s.

6.2 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρούνται 2 ανεμογεννήτριες: Μία ανεμογεννήτρια μεταβλητών και μια σταθερών στροφών. Τα δεδομένα αλλά και οι καμπύλες ισχύος για τις ανεμογεννήτριες αυτές λαμβάνονται από τις σημειώσεις του μαθήματος “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας” [32]. Η πορεία υπολογισμού της καμπύλης ισχύος της κάθε μίας από αυτές αλλά και τα χαρακτηριστικά τους δίνονται αναλυτικά στην συνέχεια.

6.2.1. Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

Στην μελέτη που πραγματοποιείται, χρησιμοποιείται τρίπτερη ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών – μεταβλητού βήματος (pitch controlled), εφοδιασμένη με ασύγχρονη γεννήτρια, η οποία έχει τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών

Ονομαστική (μέγιστη) ταχύτητα περιστροφής	25 ΣΑΛ
Ακτίνα έλικας	29 m
Ταχύτητα ένταξης (V_{cut-in})	4 m/s
Ταχύτητα αποσύνδεσης ($V_{cut-out}$)	25 m/s
Διάστημα μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας	$0^{\circ} - 35^{\circ}$

Σύγχρονη ταχύτητα	20 ΣΑΛ
Συχνότητα τροφοδοσίας	50Hz

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p των πτερυγίων προσεγγίζεται από τη συνάρτηση:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.21 \left(\frac{116}{\lambda_\alpha} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_\alpha}} \quad (6.1)$$

όπου β η γωνία βήματος της έλικας, λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και ισχύει η ακόλουθη σχέση:

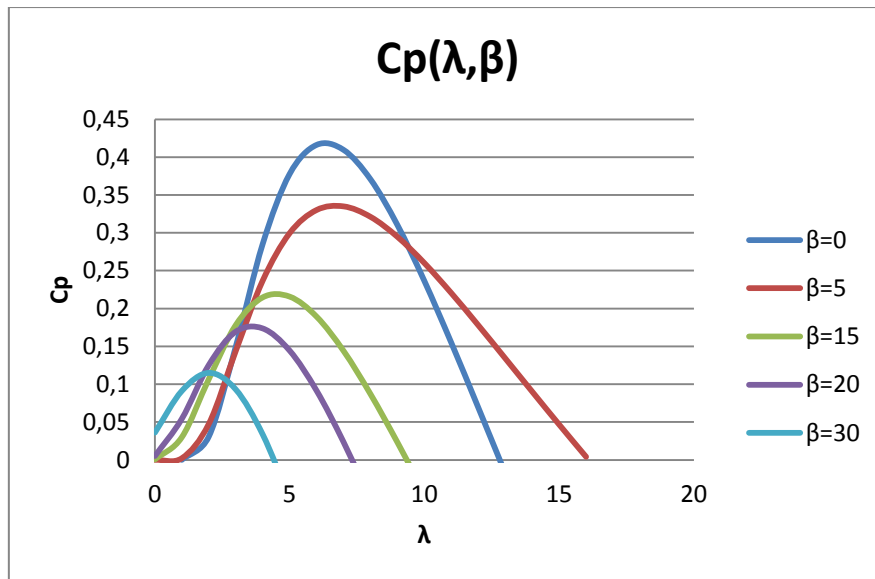
$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6.2)$$

Επίσης, για την ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών ισχύουν τα ακόλουθα:

- Οι απώλειες περιστροφής του μηχανικού μέρους δίνονται από τη σχέση $P_{απ,μην}(kW) = -5.6 + 2.448N_R$, όπου N_R (ΣΑΛ) η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.
- Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού μέρους (γεννήτρια και μετατροπείς) εξαρτάται από την ισχύ εξόδου $P_{εξ}$ της ανεμογεννήτριας και προσεγγίζεται από τη σχέση $\eta_{el}(\%) = 57 + 0.031 P_{εξ}$, όπου η ισχύς εξόδου $P_{εξ}$ σε kW.
- Στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου από V_{cut-in} μέχρι V_n το βήμα της έλικας παραμένει σταθερό και ίσο με τιμή του β τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή, εντός του διαστήματος ρύθμισης $0^\circ - 35^\circ$.
- Στο παραπάνω διάστημα ταχυτήτων ανέμου, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος.

6.2.2 Υπολογισμός γωνίας βήματος έλικας

Για να υπολογιστεί η τιμή του β , για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή εντός του διαστήματος ρύθμισης $0^\circ - 35^\circ$, σχεδιάζεται πρώτα η γραφική παράσταση του αεροδυναμικού συντελεστή C_p ως προς τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ για γωνία βήματος έλικας $0^\circ - 5^\circ - 15^\circ - 20^\circ - 30^\circ$ μέσω των (6.1), (6.2) και κατόπιν υπολογίζεται η τιμή του β που ζητείται. Η γραφική παράσταση, όπως προέκυψε με χρήση του Excel για τα διάφορα β , φαίνεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11: Διαγραμματική αναπαράσταση του αεροδυναμικού συντελεστή C_p συναρτήσει του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , για διάφορες γωνίες βήματος έλικας β

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι κρατήθηκαν μόνο οι θετικές τιμές του C_p για τα διάφορα β .

Διαπιστώνεται εύκολα από το Σχήμα 6.11 ότι η τιμή του β για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή εντός του διαστήματος ρύθμισης $0^\circ - 35^\circ$ είναι $\beta = 0^\circ$ και η αντίστοιχη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή προκύπτει ως εξής: Παρατηρώντας ότι η μέγιστη τιμή του C_p προκύπτει για $\lambda=6$ περίπου, λαμβάνουμε 10 τιμές πριν και μετά το $\lambda=6$ με βήμα 0.1 και προκύπτει τελικά η μέγιστη τιμή του C_p ίση με 0.4183 για $\lambda=6.3$. Άρα, η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή προέκυψε ίση με

$$C_p = C_{pmax} = 0.4183 \quad (6.3)$$

για λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου ίσο με

$$\lambda = \lambda_{opt} = 6.3 \quad (6.4)$$

6.2.3 Υπολογισμός ονομαστικής ταχύτητας ανέμου

Εφόσον είναι γνωστό ότι η ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών λειτουργεί υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος, υπολογίζεται η ονομαστική ταχύτητα ανέμου V_n μέσω της ισοδυναμίας (6.4).

Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου ισούται με:

$$\lambda = \frac{\omega_{Rn} R}{V_n} \quad (6.5)$$

και η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής με

$$\omega_{Rn} = \frac{2\pi N_{Rn}}{60} \quad (6.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 6.1, στον οποίο δίνονται τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τις (6.4), (6.5), (6.6) προκύπτει η ονομαστική ταχύτητα ανέμου ίση με:

$$V_n = 12 \frac{m}{s} \quad (6.7)$$

6.2.4 Υπολογισμός ονομαστικής ισχύος εξόδου

Η αεροδυναμική ισχύς P_R της ανεμογεννήτριας για ονομαστική λειτουργία, δηλαδή στροφές δρομέα $N_{Rn} = 25$ ΣΑΛ και ταχύτητα ανέμου $V_n = 12 \text{ m/s}$ (δεδομένου ότι στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου από $V_{\text{cut-in}}$ μέχρι V_n το βήμα της έλικας παραμένει σταθερό και ίσο με αυτό που υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.2.2 και ότι στο παραπάνω διάστημα ταχυτήτων ανέμου η ανεμογεννήτρια λειτουργεί υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος, δηλαδή $C_p = C_{p\text{max}} = 0.4183$) δίνεται παρακάτω:

$$P_R = \frac{1}{2} \rho C_{p\text{max}} A V_n^3 \quad (6.8)$$

όπου $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα και $A = \pi R^2$ το εμβαδόν της έλικας.

Αντικαθιστώντας τα γνωστά μεγέθη από τον Πίνακα 6.1 και την τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή για την οποία μεγιστοποιείται η ισχύς στην (6.8), προκύπτει η ονομαστική τιμή της αεροδυναμικής ισχύος ως εξής:

$$P_R = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 0.4183 \times \pi \times 29^2 \times 12^3 = 1193.6 \text{ kW} \quad (6.9)$$

Οι μηχανικές απώλειες περιστροφής περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} = -5.6 + 2.448 N_{Rn} \quad (6.10)$$

Αντικαθιστώντας στην (6.10) την μέγιστη ταχύτητα περιστροφής (25 ΣΑΛ) προκύπτει η τιμή των απωλειών περιστροφής που δίνεται παρακάτω:

$$P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} = -5.6 + 2.448 \times 25 = 55.6 \text{ kW} \quad (6.11)$$

Η μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας δίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$P_{\mu\eta\chi} = P_R - P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} \quad (6.12)$$

Αντικαθιστώντας την ονομαστική τιμή της αεροδυναμικής ισχύος από την (6.9) και την ονομαστική τιμή των απωλειών περιστροφής από την (6.11) στην (6.12) προκύπτει η ονομαστική τιμή της μηχανικής ισχύος όπως δίνεται παρακάτω:

$$P_{\mu\eta\chi} = 1193.6 - 55.6 = 1138 \text{ kW} \quad (6.13)$$

Για την ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$P_{εξ} = \frac{n_{el}}{100} P_{μηχ} \quad (6.14)$$

Όπου ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού μέρους δίνεται από την σχέση:

$$n_{el}(\%) = 57 + 0.031 P_{εξ} \quad (6.15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις (6.13), (6.14), (6.15) υπολογίζεται η ονομαστική ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας ίση με:

$$P_{εξ} = 1MW \quad (6.16)$$

6.2.5 Σχεδιασμός καμπύλης ισχύος

Όμοια με την παράγραφο 6.2.3, με τη διαφορά ότι τώρα εξετάζεται για κάθε ταχύτητα ανέμου και κάθε ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 6.1 και τις (6.4), (6.5), (6.6) προκύπτει η παρακάτω σχέση για κάθε ταχύτητα ανέμου:

$$N_R = 2.0745V_w \quad (6.17)$$

Όπου N_R σε ΣΑΛ και V_w σε m^3/s .

Η παραπάνω σχέση ισχύει βέβαια για ταχύτητες ανέμου $V_{cut-in} < V_w \leq V_n$.

Για $V_w \leq V_{cut-in}$, η ανεμογεννήτρια δε στρέφεται και είναι $N_R = 0$, ενώ για $V_n < V_w \leq V_{cut-out}$ οι στροφές διατηρούνται σταθερές και ίσες με $N_R = N_{Rn} = 25 \text{ ΣΑΛ}$.

Με δεδομένο ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού μέρους δίνεται από την (6.15) και λαμβάνοντας υπόψη την (6.14) που ισχύει για την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας, διαμορφώνεται η ισχύς εξόδου ως εξής:

$$P_{εξ} = \frac{57P_{μηχ}}{(100 - 0.031P_{μηχ})} \quad (6.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την (6.12) η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_{εξ} = \frac{57(P_R - P_{απ,μηχ})}{(100 - 0.031(P_R - P_{απ,μηχ}))} \quad (6.19)$$

Αντικαθιστώντας την αεροδυναμική ισχύ P_R και την ισχύ απωλειών $P_{απ,μηχ}$ για κάθε ταχύτητα ανέμου από τις (6.8), (6.10) αντίστοιχα και την ταχύτητα περιστροφής με την (6.17), προκύπτει η ισχύς εξόδου όπως δίνεται παρακάτω:

$$P_{εξ} = \frac{39.37V_w^3 - 289.467V_w + 319.2}{-0.0213V_w^3 + 0.157V_w + 99.826} \quad (6.20)$$

Όπου $P_{εξ}$ σε kW και V_w σε m^3/s .

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η παραπάνω σχέση, ισχύει για ταχύτητες ανέμου $V_{cut-in} < V_w \leq V_n$ ενώ για $V_w \leq V_{cut-in}$ η ανεμογεννήτρια δε στρέφεται και είναι $P_{εξ} = 0$ και για $V_n < V_w \leq V_{cut-out}$, οι στροφές διατηρούνται σταθερές και ίσες με $N_R = N_{Rn} = 25$ ΣΑΛ (σταθερή διατηρείται και η ισχύς εξόδου στην ονομαστική τιμή των 1000 kW).

Η γραφική παράσταση της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών, όπως προέκυψε με χρήση του Excel μέσω της (6.20) για διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου δίνεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12: Καμπύλη ισχύος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών.

6.3 Ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών

6.3.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννήτριας

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών παραμένουν ίδια με αυτά που δόθηκαν στον Πίνακα 6.1. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε λειτουργία σταθερών στροφών της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας με επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής δρομέα 20 ΣΑΛ. Σημειώνεται επίσης ότι το βήμα της έλικας για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής παραμένει σταθερό και ίσο με αυτό που υπολογίστηκε για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών στην παράγραφο 6.2.2, δηλαδή ίσο με $\beta = 0^\circ$. Επίσης, η ονομαστική ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας παραμένει ίση με αυτή που υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.2.4 και δίνεται στην (6.14).

Για την ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$P_R = \frac{\frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta = 0^\circ) \pi R^2 V_w^3}{1000} \quad (6.21)$$

$$C_p(\lambda, \beta = 0^\circ) = 0.21 \left(\frac{116}{\lambda_\alpha} - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_\alpha}} \quad (6.22)$$

$$\frac{1}{\lambda_\alpha} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 \quad (6.23)$$

$$\lambda = \frac{\frac{2\pi 20}{60} R}{V_w} \quad (6.24)$$

$$P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} = -5.6 + 2.448 N_R = -5.6 + 2.448 \times 20 = 43.36 \text{ kW} \quad (6.25)$$

$$P_{\mu\eta\chi} = P_R - P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} \quad (6.26)$$

$$P_{\varepsilon\xi} = \frac{57 + 0.031 P_{\varepsilon\xi}}{100} P_{\mu\eta\chi} \quad (6.27)$$

Σημειώνεται ότι οι σχέσεις (6.22), (6.23) προκύπτουν από τις (6.1), (6.2) που δόθηκαν στην παράγραφο 6.2.1 για γωνία βήματος έλικας $\beta = 0^\circ$.

6.3.2 Υπολογισμός ταχύτητας ένταξης και ονομαστικής ταχύτητας ανέμου

Η ταχύτητα ένταξης ανέμου $V_{\text{cut-in}}$ είναι η ταχύτητα εκείνη στην οποία η ανεμογεννήτρια δίνει αεροδυναμική ισχύ τέτοια που να μπορεί να καλύπτει μόνο την ισχύ απωλειών. Όπως προκύπτει από τις (6.25), (6.26) έχουμε:

$$P_R = P_{\alpha\pi, \mu\eta\chi} = 43.36 \text{ kW} \quad (6.28)$$

Αντικαθιστώντας τις (6.23), (6.24) στην (6.22) και έπειτα την προκύπτουσα στην (6.21) και θέτοντας την αεροδυναμική ισχύ ίση με την τιμή που προσδιορίστηκε στην (6.28) προκύπτει μια μη γραμμική εξίσωση από την οποία προσδιορίζεται τελικά η ταχύτητα ένταξης της ανεμογεννήτριας. Εξετάζοντας προσεγγιστικά διάφορες τιμές στο Excel, προέκυψε ότι η ταχύτητα ένταξης ανέμου είναι ίση με:

$$V_{\text{cut-in}} = 5.525 \frac{m}{s} \quad (6.29)$$

Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου V_n είναι η ταχύτητα εκείνη στην οποία η ανεμογεννήτρια δίνει στην έξοδο ονομαστική ισχύ. Θέτοντας λοιπόν $P_{\varepsilon\xi} = 1000 \text{ kW}$ στην (6.27) προκύπτει η ονομαστική τιμή της μηχανικής ισχύος ως εξής:

$$P_{\mu\eta\chi} = \frac{100 P_{\varepsilon\xi}}{57 + 0.031 P_{\varepsilon\xi}} = \frac{100 \times 1000}{57 + 0.031 \times 1000} = 1136.36 \text{ kW} \quad (6.30)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις (6.25), (6.30) και αντικαθιστώντας στην (6.26) προκύπτει η ονομαστική τιμή της αεροδυναμικής ισχύος, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P_R = 1179.72 \text{ kW} \quad (6.31)$$

Όμοια με πριν, αντικαθιστώντας τις (6.23), (6.24) στην (6.22) και έπειτα την προκύπτουσα στην (6.21) και θέτοντας την αεροδυναμική ισχύ ίση με την τιμή που βρέθηκε στην (6.31), προκύπτει μια μη γραμμική εξίσωση από την οποία προσδιορίζεται η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου. Εξετάζοντας προσεγγιστικά διάφορες τιμές στο Excel, προσδιορίστηκε ότι η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι ίση με:

$$V_n = 12.5 \frac{m}{s} \quad (6.32)$$

6.3.3 Σχεδιασμός καμπύλης ισχύος

Η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα ανέμου σε κάθε χρονική στιγμή αλλά και από τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p , ο οποίος αλλάζει με την ταχύτητα ανέμου V_w και δίνεται από την (6.22).

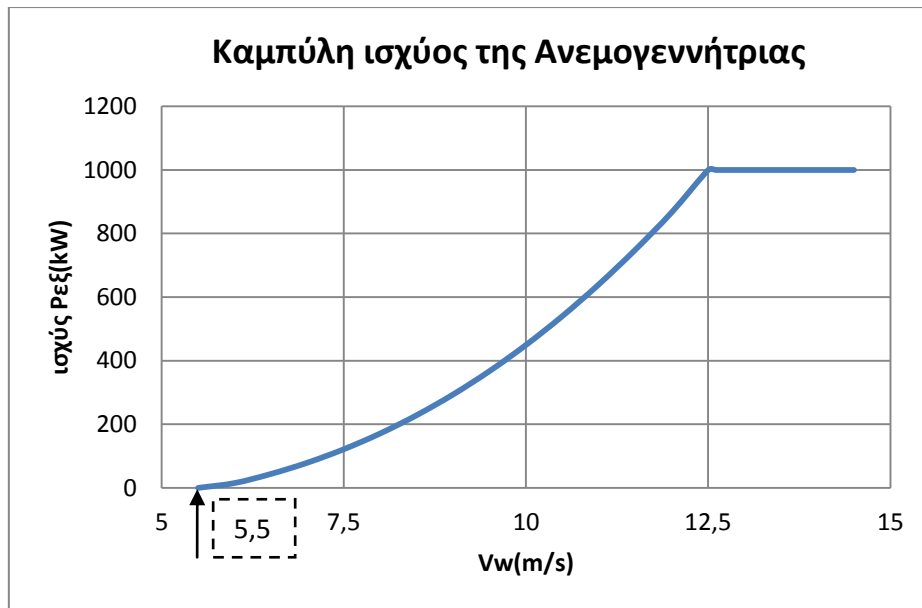
Για τον σχεδιασμό της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών εφαρμόζεται ο παρακάτω αλγόριθμος έτσι ώστε για κάθε διαθέσιμη ταχύτητα ανέμου V_w , να υπολογίζεται η ισχύς εξόδου $P_{\xi,i}$ της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών σε κάθε χρονική στιγμή i :

$$V_w \rightarrow \lambda_i \rightarrow \frac{1}{\lambda_{\alpha,i}} \rightarrow C_{p,i} \rightarrow P_{R,i} \rightarrow P_{\mu\chi,i} \rightarrow P_{\xi,i}$$

Όπου:

- V_w : η ταχύτητα ανέμου, η οποία λαμβάνει τιμές από 5.5 μέχρι 12.5 m/s.
- λ_i : ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου που δίνεται από την (6.24).
- $\frac{1}{\lambda_{\alpha,i}}$: ο λόγος που υπολογίζεται από την (6.23), λαμβάνοντας υπόψη την (6.24).
- $C_{p,i}$: ο αεροδυναμικός συντελεστής, ο οποίος δίνεται από την (6.22).
- $P_{R,i}$: η αεροδυναμική ισχύς της ανεμογεννήτριας (kW), η οποία δίνεται από την (6.21).
- $P_{\mu\chi,i}$: η μηχανική ισχύς (kW), η οποία δίνεται από την σχέση (6.26), λαμβάνοντας υπόψη την (6.25).
- $P_{\xi,i}$: η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας (kW), η οποία δίνεται από την (6.27).

Με χρήση του Excel για τιμές της ταχύτητας ανέμου από 5.5 ως 12.5 m/s και λαμβάνοντας υπόψη τον παραπάνω αλγόριθμο υπολογισμού της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα ανέμου, προέκυψε η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών που δίνεται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Καμπύλη ισχύος Ανεμογεννήτριας Σταθερών Στροφών.

6.4 Υπολογισμός αιολικής ισχύος και ενέργειας

6.4.1 Διατύπωση σεναρίων

Όπως αναφέρθηκε στις Ενότητες 6.1, 6.2, 6.3, στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρούνται δύο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 και 2 είδη ανεμογεννητριών (μεταβλητών και σταθερών στροφών) ονομαστικής ισχύος 1MW η κάθε μια.

Επιλέγονται 4 διαφορετικά σενάρια μελέτης, τα οποία δίνονται παρακάτω.

- Α. 2 ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.
- Β. 2 ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.
- Γ. 1 ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1 και 1 ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2.
- Δ. 1 ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ2 και 1 ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με είσοδο την χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις Α, Β θεωρείται ότι οι ανεμογεννήτριες δέχονται την ίδια χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1.

6.4.2 Υπολογισμός αιολικής ισχύος και ενέργειας για όλα τα σενάρια

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται 2 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 1MW η καθεμία. Άρα, η συνολική ονομαστική ισχύς από τις 2 ανεμογεννήτριες για κάθε σενάριο μελέτης προκύπτει ίση με:

$$P_{ολ,N} = 2MW \quad (6.33)$$

Όπως έχει προσδιορισθεί στην παράγραφο 6.2.5, η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών δίνεται από την (6.20) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Δεδομένου λοιπόν ότι σε κάθε χρονική στιγμή είναι διαθέσιμη η ταχύτητα ανέμου από τις χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου $P_{εξ1,i}$ της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών για κάθε διαθέσιμη ταχύτητα ανέμου V_w μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$P_{εξ1,i} = \frac{39.37V_w^3 - 289.467V_w + 319.2}{-0.0213V_w^3 + 0.157V_w + 99.826} \quad (6.34)$$

Όπου:

- $P_{εξ1,i}$: η διαθέσιμη ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών κάθε χρονική στιγμή i (kW).
- V_w : η ταχύτητα ανέμου που λαμβάνεται από τις χρονοσειρές ΧΣ1, ΧΣ2 κάθε χρονική στιγμή i (m/s).

Σε ό,τι αφορά την ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, η ισχύς εξόδου της δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου αλλά και από την τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p , ο οποίος αλλάζει με την ταχύτητα ανέμου, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.3.3. Δεδομένου ότι υπάρχουν διαθέσιμες οι τιμές της ταχύτητας ανέμου V_w από τις χρονοσειρές ΧΣ1, ΧΣ2 προσδιορίζεται τελικά η διαθέσιμη ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών $P_{εξ2,i}$ σε κάθε χρονική στιγμή μέσω του αλγορίθμου της παραγράφου 6.3.3.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι όλες οι τιμές της ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 με τον κινητό μέσο όρο 11s, καθώς όπως έχει αναφερθεί η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου αλλά την μέση τιμή αυτών.

Η ολική ισχύς εξόδου από τις δύο ανεμογεννήτριες σε κάθε χρονική στιγμή προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους ισχύων εξόδου των 2 ανεμογεννητριών που συμμετέχουν σε κάθε σενάριο, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P_{ολ,i} = P_{εξ1,i} + P_{εξ2,i} \quad (6.35)$$

Όπου:

- $P_{o\lambda,i}$: η συνολική ισχύς εξόδου (kW) από τις 2 ανεμογεννήτριες κάθε χρονική στιγμή i .
- $P_{εξ2,i}$: η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών (kW) κάθε χρονική στιγμή i , η οποία υπολογίζεται από το αλγόριθμο της παραγράφου 6.3.3 για τις διαθέσιμες χρονοσειρές ΧΣ1, ΧΣ2.

Επειδή στην παρούσα ανάλυση θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις για την παροχή και την ισχύ άντλησης που προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5, απαιτείται να υπολογιστούν οι αμ τιμές της ολικής ισχύος εξόδου σε κάθε χρονική στιγμή μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$P_{o,i} = \frac{P_{o\lambda,i}}{P_{o\lambda,N}} \quad (6.36)$$

Όπου:

- $P_{o,i}$: η αμ τιμή της ολικής ισχύος εξόδου κάθε χρονική στιγμή i .
- $P_{o\lambda,N}$: η ονομαστική ισχύς (kW) που μπορούν να δώσουν οι δύο ανεμογεννήτριες μαζί, η οποία δίνεται στην (6.33) και ισούται και με την ονομαστική ισχύ του αντλιοστασίου, όπως θα φανεί στην συνέχεια.

Η ενέργεια που παράγεται από τις 2 ανεμογεννήτριες προσδιορίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$E = \int_1^T P_{o\lambda,i} dt = \sum_{i=1}^N P_{o\lambda,i} \Delta t \quad (6.37)$$

Όπου:

- E : η διαθέσιμη αιολική ενέργεια σε kJ.
- N : ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας ανά δευτερόλεπτο, ο οποίος είναι ίσος με 62112.

Σημειώνεται ότι για να μετατραπεί η παραπάνω ενέργεια σε kWh απαιτείται να διαιρεθεί με 3600. Επίσης, επειδή είναι $\Delta t=1s$ ο όρος αυτός παραλείπεται στην (6.37). Η διαθέσιμη αιολική ενέργεια διαμορφώνεται ως εξής:

$$E = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^N P_{o\lambda,i} \quad (6.38)$$

Όπου:

- E : η διαθέσιμη αιολική ενέργεια σε kWh.

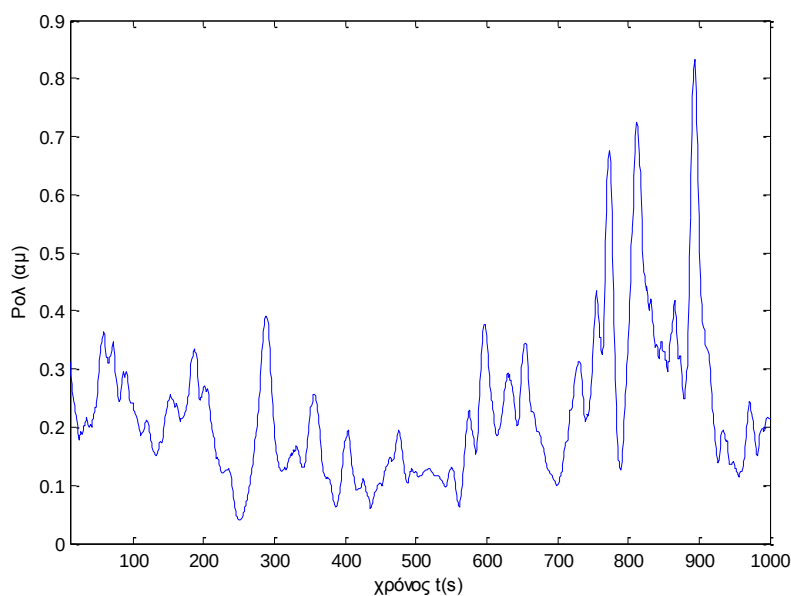
Δίνεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 6.2 με την διαθέσιμη αιολική ενέργεια που υπολογίστηκε για κάθε σενάριο μέσω της (6.38). Σημειώνεται ότι η ολική ισχύς

εξόδου από τις δύο ανεμογεννήτριες προσδιορίζεται από την (6.35) και εξαρτάται από το σενάριο που εξετάζεται και κατ' επέκταση από το ποιες ανεμογεννήτριες συμμετέχουν σε αυτό.

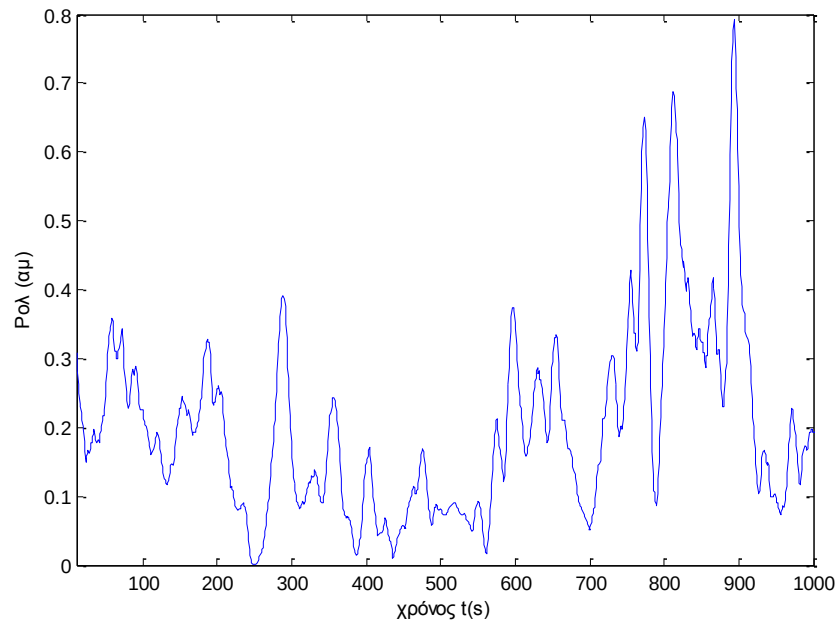
Πίνακας 6.2: Διαθέσιμη αιολική παραγωγή.

Σενάρια	Αιολική παραγωγή E (kWh)
A	5487.78
B	4331.94
Γ	4839.72
Δ	4840.00

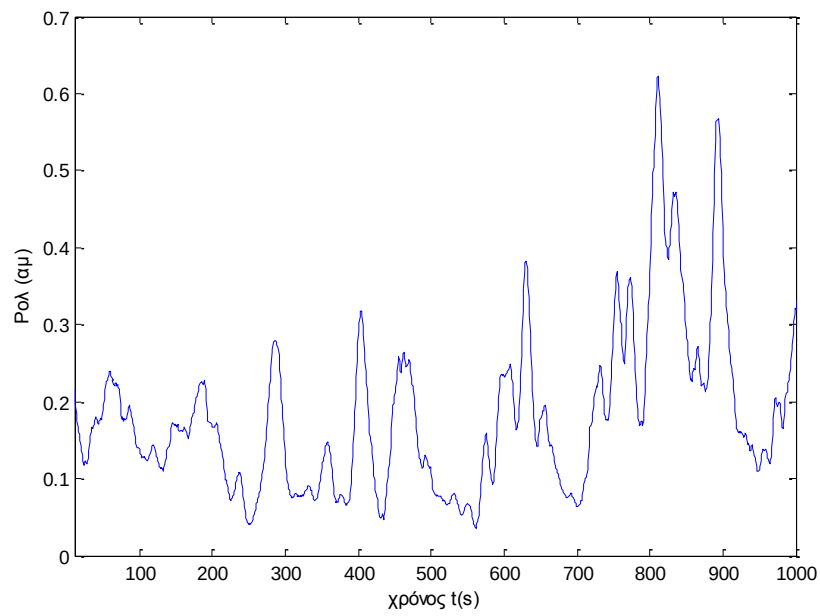
Στη συνέχεια δίνεται στα Σχήματα 6.14 - 6.17 (για κάθε σενάριο της παραγράφου 6.4.1) η αμ ολική ισχύς εξόδου με τον κινητό μέσο όρο 11 δευτερολέπτων που υπολογίστηκε μέσω της (6.36), λαμβάνοντας υπόψη ποιες ανεμογεννήτριες συμμετέχουν σε κάθε σενάριο.



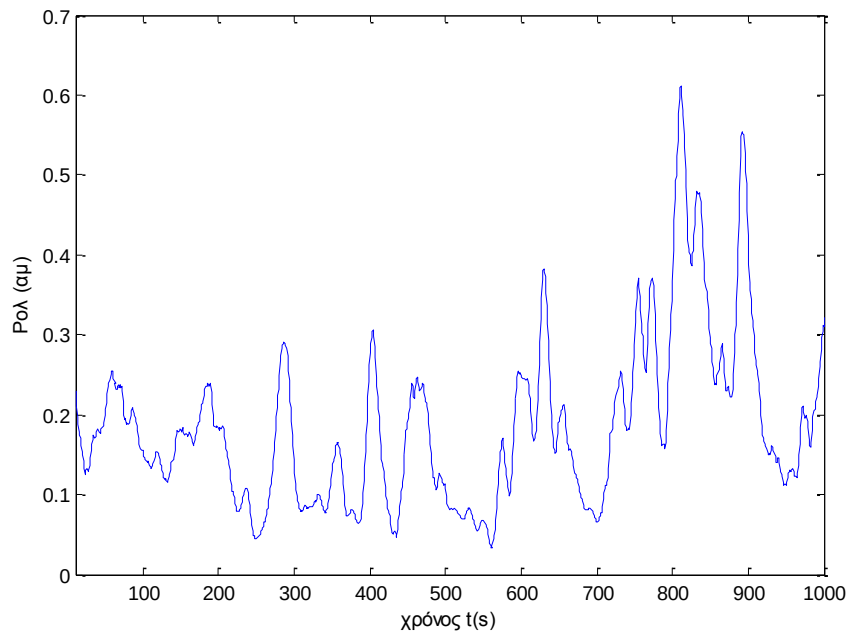
Σχήμα 6.14: Ολική ισχύς εξόδου με κινητό μέσο όρο 11s (σενάριο A).



Σχήμα 6.15: Ολική ισχύς εξόδου με κινητό μέσο όρο 11s (σενάριο Β).



Σχήμα 6.16: Ολική ισχύς εξόδου με κινητό μέσο όρο 11s (σενάριο Γ).



Σχήμα 6.17: Ολική ισχύς εξόδου με κινητό μέσο όρο 11s (σενάριο Δ).

6.5 Υπολογισμός παροχής και όγκου άντλησης

6.5.1 Περιγραφή αντλιοστασίου

Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται αντλιοστάσιο με 8 αντλίες ονομαστικής ισχύος 250kW. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε η ονομαστική ισχύς του αντλιοστασίου να είναι ίση με την ονομαστική ισχύ εξόδου των δύο ανεμογεννητριών. Τα ονομαστικά μεγέθη του αντλιοστασίου φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Ονομαστικά μεγέθη αντλιοστασίου.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟΥ	
Καθαρό ύψος πτώσης $H_o(m)$	580
Ονομαστική παροχή $Q_N (m^3/s)$	8×0.03155
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης $\eta_{ολ}(\%)$	72%
Ονομαστική ισχύς $P_N (kW)$	8×250
Αριθμός αντλιών	8

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι ο παραπάνω βαθμός απόδοσης αποτελεί τον συνολικό ονομαστικό βαθμό απόδοσης και περιλαμβάνει τις απώλειες του κινητήρα, της αντλίας αλλά και της σωλήνωσης (υδραυλικές απώλειες), που θεωρούμε ότι αντιστοιχούν στο συντελεστή 2% επί των ονομαστικών μεγεθών που έχουν υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 5 και πιο συγκεκριμένα στην Ενότητα 5.2.

Πιο αναλυτικά ο συνολικός ονομαστικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται παρακάτω:

$$\eta_{ολ} = \frac{\gamma Q_N H_o}{P_N} = \frac{9.81 \times 10^3 \frac{Nt}{m^3} \times 0.03155 \frac{m^3}{s} \times 580m}{250 \times 10^3 W} = 72\%$$

Για τον βαθμό απόδοσης της αντλίας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\eta_{\alpha} = \eta_r \eta_o \quad (6.39)$$

Όπου :

- η_r : ο σχετικός βαθμός απόδοσης που έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 5.3.3 του Κεφαλαίου 5.
- η_o : ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης της αντλίας, χωρίς τις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες υπολογίζονται από τον αναλυτικό τύπο που έχει προσδιορισθεί στην Ενότητα 5.2 του Κεφαλαίου 5.

Πιο αναλυτικά ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης η_o της αντλίας δίνεται στην συνέχεια:

$$\eta_o = \frac{\gamma Q_N (H_o + 0.02 H_o)}{P_N} = \frac{1.02 \gamma Q_N H_o}{P_N} = \frac{9.81 \times 10^3 \frac{Nt}{m^3} \times 0.03155 \frac{m^3}{s} 591.6m}{250 \times 10^3 W} = 73.2\%$$

6.5.2 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με μεταβλητές στροφές

Στην Ενότητα αυτή θεωρούμε ότι για λειτουργία μεταβλητών στροφών οι αντλίες απορροφούν όλη την ισχύ που παράγεται κάθε χρονική στιγμή από τις δύο ανεμογεννήτριες. Αυτό είναι άλλωστε και το πλεονέκτημα των μεταβλητών στροφών, ότι απορροφάται και αξιοποιείται όλη η διαθέσιμη ισχύς από τον άνεμο χωρίς να απορρίπτεται τίποτα.

Στην περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές που μελετάται σε αυτή την παράγραφο θεωρήθηκε ότι λειτουργούν ταυτόχρονα και οι οκτώ αντλίες του αντλιοστασίου. Συνεπώς, στην παράγραφο αυτή τα αποτελέσματα ισχύουν και για την περίπτωση μιας μεγάλης αντλίας ισχύος 2MW, ή για οποιοδήποτε αριθμό αντλιών που λειτουργούν παράλληλα σε ένα αντλιοστάσιο της ίδιας ισχύος. Σημειώνεται ότι για να γίνει αυτό δυνατό, το εύρος ταχυτήτων είναι από $n_{min} = 0.9\alpha\mu$, που αντιστοιχεί σε $P_{min} = 0.51\alpha\mu$, μέχρι $n_{max} = 1\alpha\mu$, που αντιστοιχεί σε $P_{max} = 1\alpha\mu$ (για τις δεδομένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου). Σε οποιαδήποτε περίπτωση, τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου είναι μόνο θεωρητικά και θα χρησιμοποιηθούν για σύγκριση. Σε επόμενη παράγραφο, θα πραγματοποιηθεί μια διαφορετική προσέγγιση της άντλησης με μεταβλητές στροφές, στην οποία κάθε χρονική στιγμή θα υπολογίζεται και θα λαμβάνεται υπόψη πόσες αντλίες πρέπει να λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή για να αποφευχθεί απόρριψη αιολικής ισχύος.

Η ισχύς άντλησης στην περίπτωση που εξετάζουμε εδώ συμπίπτει με την αμ ισχύ $P_{o,i}$ που παρέχεται σε κάθε χρονική στιγμή από τις δύο ανεμογεννήτριες και δίνεται στην Ενότητα 6.4.2 για κάθε σενάριο από την (6.36).

Εφόσον είναι δεδομένη η ισχύς άντλησης $P_{o,i}$ μπορούν να υπολογιστούν οι στροφές n_i της αντλίας κάθε χρονική στιγμή μέσω της (5.40) που έχει προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 5 και δίνεται στην συνέχεια:

$$P_{o,i} = -9.901n_i^2 + 23.74n_i - 12.837 \quad (6.40)$$

Όπου:

- $P_{o,i}$: η αμ τιμή της διαθέσιμης αιολικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή i , η οποία υπολογίζεται από την (6.36).
- n_i : οι αμ στροφές της αντλίας σε κάθε χρονική στιγμή i .

Από την επίλυση της παραπάνω σχέσης, κάθε χρονική στιγμή προκύπτουν δύο λύσεις. Αποδεκτή θεωρείται η μικρότερη από τις δύο, η οποία αντιστοιχεί στο αύξων τμήμα της καμπύλης ισχύος – στροφών της αντλίας.

Έχοντας υπολογίσει τις στροφές n_i της αντλίας, υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.41), η οποία έχει προσδιοριστεί στην Ενότητα 5.6, η αμ παροχή των αντλιών κάθε χρονική στιγμή:

$$q_i = -19.148n_i^2 + 41.725n_i - 21.574 \quad (6.41)$$

Όπου:

- q_i : η αμ παροχή των αντλιών σε κάθε χρονική στιγμή i .

Ο συνολικός όγκος αποθήκευσης στην περίπτωση αντλιών μεταβλητών στροφών που μελετάται στην περίπτωση αυτή δίνεται παρακάτω:

$$V_\mu = \int_1^T q_i Q_N dt = \sum_{i=1}^N q_i Q_N \Delta t \quad (6.42)$$

Όπου:

- V_μ : ο όγκος άντλησης (m^3).
- q_i : η αμ διακινούμενη παροχή από τις αντλίες σε κάθε χρονική στιγμή i .
- Q_N : η ονομαστική παροχή του αντλιοστασίου, η οποία δίνεται στον Πίνακα 6.3.
- N : ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας ανά δευτερόλεπτο, ο οποίος είναι ίσος με 62112.

Επειδή στην παρούσα μελέτη είναι $\Delta t=1s$, ο όρος Δt παραλείπεται στην (6.42) και τελικά ο συνολικός όγκος για άντληση στην περίπτωση αντλιών μεταβλητών στροφών δίνεται παρακάτω:

$$V_{\mu} = \sum_{i=1}^N q_i Q_N \quad (6.43)$$

Στον Πίνακα 6.4 δίνεται για κάθε σενάριο ο όγκος V_{μ} που υπολογίστηκε για την διαθέσιμη αιολική παραγωγή E με βάση την (6.43) στην περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές.

Πίνακας 6.4: Διαθέσιμος όγκος (άντληση με μεταβλητές στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ		
Σενάριο	E (kWh)	Όγκος $V_{\mu}(m^3)$
A	5487.78	2253.02
B	4331.94	1735.60
Γ	4839.72	1950.90
Δ	4840.00	1951.13

Στη συνέχεια, μελετάται η άντληση με τις βέλτιστες στροφές οι οποίες έχουν υπολογιστεί στην Ενότητα 5.6 και δίνονται στην (5.43). Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι υπάρχει σύμβαση με το δίκτυο η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Δεν υπάρχει συνεπώς περιορισμός στην παροχή των αντλιών κάθε χρονική στιγμή, όπως παραπάνω και το αντλιοστάσιο θα λειτουργεί με την βέλτιστη παροχή (βέλτιστες στροφές) για όσο χρόνο χρειαστεί ώστε να χρησιμοποιήσει όλη την διαθέσιμη ενέργεια των ανεμογεννητριών.

Η βέλτιστη παροχή q_{opt} και η βέλτιστη ισχύς άντλησης P_{opt} δίνονται αντίστοιχα από τις (5.45), (5.44) που προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Οι σχέσεις αυτές όμως καθώς και τα διαγράμματα του Κεφαλαίου 5 αναφέρονται στο αντλιοστάσιο των οκτώ αντλιών και άρα κατ' επέκταση η βέλτιστη παροχή και ισχύς άντλησης διαμορφώνονται ως εξής:

$$P_{op} = P_{opt} P_N = 1760kW \quad (6.44)$$

Όπου:

- P_{op} : η βέλτιστη ισχύς άντλησης (kW).
- P_N : η ονομαστική ισχύς του αντλιοστασίου (kW) που δίνεται στον Πίνακα 6.3.

$$Q_{opt} = q_{opt} Q_N = 0.2246m^3/s \quad (6.45)$$

Όπου:

- Q_{opt} : η βέλτιστη παροχή άντλησης (m^3/s).

Στην περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές, ένα δεδομένο ποσό αιολικής ενέργειας χρησιμοποιείται ώστε να αντλούμε συνεχώς με την βέλτιστη ισχύ P_{op} για χρόνο άντλησης T_{opt} . Ουσιαστικά, προσδιορίζεται ο καλύτερος δυνατός όγκος άντλησης V_{opt} που μπορεί να αποθηκευτεί για δεδομένη ενέργεια με συνεχή παροχή Q_{opt} .

Ο βέλτιστος χρόνος και όγκος άντλησης προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{op}T_{opt} = E \quad (6.46)$$

Όπου:

- T_{opt} : ο βέλτιστος χρόνος άντλησης (h).
- E : η διαθέσιμη αιολική παραγωγή (kWh), η οποία δίνεται στον Πίνακα 6.2 για κάθε σενάριο.

$$V_{opt} = Q_{opt}T_{opt} \quad (6.47)$$

Στον Πίνακα 6.5 δίνεται για κάθε σενάριο η διαθέσιμη αιολική παραγωγή E , ο βέλτιστος χρόνος T_{opt} και όγκος άντλησης V_{opt} καθώς και η βελτίωση του όγκου ΔV που προέκυψε για την άντληση με βέλτιστες στροφές σε σχέση με την άντληση με μεταβλητές στροφές.

Πίνακας 6.5: Διαθέσιμος όγκος άντλησης (άντληση με βέλτιστες στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ				
Σενάρια	E (kWh)	$T_{opt}(h)$	$V_{opt}(m^3)$	$\Delta V(\%)$
A	5487.78	3.12	2521.14	11.90
B	4331.94	2.46	1990.13	14.67
Γ	4839.72	2.75	2223.41	13.97
Δ	4840.00	2.75	2223.54	13.96

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 6.5 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 6.4, η άντληση με βέλτιστες στροφές συντελεί σε αύξηση του όγκου άντλησης κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 12% μέχρι 14.7% περίπου. Αυτό είναι απόλυτα λογικό γιατί με τις βέλτιστες στροφές επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση των αντλιών, οι οποίες δουλεύουν με τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης και αξιοποιείται έτσι με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η διαθέσιμη τεχνολογία, γεγονός που συντελεί στην άντληση ακόμα μεγαλύτερου όγκου.

6.5.3 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με σταθερές στροφές

Στην περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες δεν απορροφάται πλήρως από τις αντλίες που λειτουργούν

παράλληλα γιατί λόγω των σταθερών στροφών η κατανάλωση τους είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος κάθε αντλίας, που στην περίπτωση μας επιλέχθηκε ίση με 250kW, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.3. Για να μην απορριφθεί η αιολική ενέργεια που περισσεύει, η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται έτσι ώστε να λειτουργήσει μία ακόμη αντλία σε κάθε χρονική στιγμή πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται στο Κεφάλαιο 7, ενώ στην παρούσα παράγραφο θεωρείται ότι η επιπλέον αιολική ισχύς απορρίπτεται.

Εφόσον είναι γνωστή η ολική ισχύς εξόδου $P_{ολ,i}$ των δύο ανεμογεννητριών για κάθε σενάριο από την (6.35) και δεδομένου ότι στην παρούσα ανάλυση υπάρχουν διαθέσιμες αντλίες ονομαστικής ισχύος 250kW η κάθε μία, υπολογίζεται η αιολική ισχύς που απορρίπτεται μέσω της συνάρτησης υπολοίπου (mod):

$$P_{v,i} = mod[\frac{P_{ολ,i}}{\frac{P_N}{8}}] \quad (6.48)$$

Όπου:

- $P_{v,i}$: η αιολική ισχύς που απορρίπτεται κάθε χρονική στιγμή (kW).
- $P_{ολ,i}$: η διαθέσιμη αιολική παραγωγή σε κάθε χρονική στιγμή (kW), η οποία έχει προσδιοριστεί στην παράγραφο 6.4.2 για κάθε σενάριο μέσω των διαθέσιμων χρονοσειρών ταχυτήτων ανέμου και της καμπύλης ισχύος των διαθέσιμων ανεμογεννητριών.

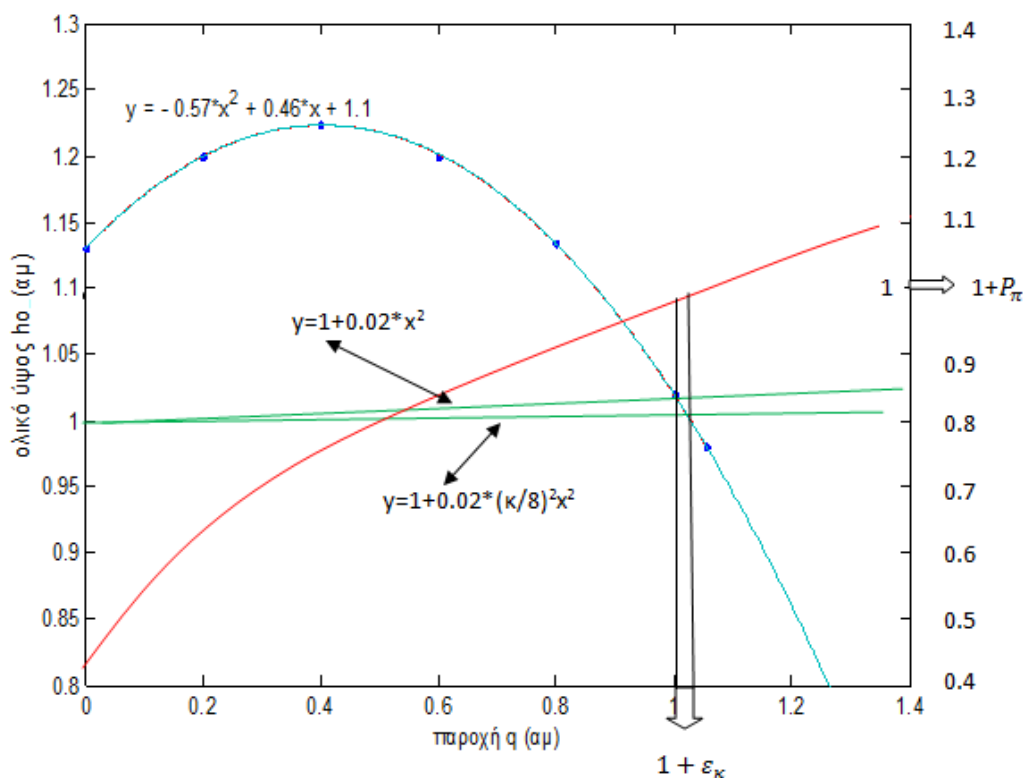
Ο αριθμός των αντλιών κ που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται όπως δίνεται παρακάτω:

$$\kappa_i = \frac{P_{ολ,i} - P_{v,i}}{\frac{P_N}{8}} \quad (6.49)$$

Στην συνέχεια θα εξεταστεί η επίδραση του αριθμού των αντλιών που λειτουργούν παράλληλα στην μεταβολή των υδραυλικών απωλειών και κατ' επέκταση στην μεταβολή της παροχής, του όγκου άντλησης και της αιολικής ισχύος που καταναλώνεται και απορρίπτεται.

Το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του Σχήματος 5.4 του Κεφαλαίου 5, το οποίο δίνει την τομή της χαρακτηριστικής της αντλίας (h_o, q) για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής που δίνεται από την (5.17) με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης που δίνεται από την (5.24), αναφέρεται στην λειτουργία όλου του αντλιοστασίου, δηλαδή στην περίπτωση που λειτουργούν και οι οκτώ αντλίες παράλληλα. Όμως στην περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, όπως φαίνεται και από την (6.49), κάθε χρονική στιγμή ο αριθμός των αντλιών μεταβάλλεται. Η μεταβολή του αριθμού των αντλιών δεν μεταβάλλει την χαρακτηριστική της αντλίας (h_o, q) αλλά μόνο τα ονομαστικά μεγέθη, τα οποία γίνονται $\kappa P_N/8$ και $\kappa Q_N/8$ αντί για P_N και Q_N που αναφέρονται σε λειτουργία οκτώ αντλιών. Μεταβάλλεται ωστόσο η χαρακτηριστική

της σωλήνωσης αφού ο αριθμός των αντλιών, οι οποίες καταλήγουν στον ίδιο αγωγό κατάθλιψης, επηρεάζει τις υδραυλικές απώλειες και το αμ ολικό ύψος h_o , όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.18.



Σχήμα 6.18: Σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης για μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών και ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

Ουσιαστικά, ούτε οι στροφές παραμένουν εντελώς σταθερές γιατί υπάρχει μια μικρή ολίσθηση, η οποία όμως δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η χαρακτηριστική της σωλήνωσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$h_o = 1 + 0.02 \left(\frac{Q_{\kappa,i}}{Q_N} \right)^2 \quad (6.50)$$

Όπου:

- h_o : το αμ ολικό ύψος της αντλίας που έχει κανονικοποιηθεί με βάση το καθαρό ύψος πτώσης H_o .
- $Q_{\kappa,i}$: η συνολική παροχή από τις κ αντλίες που λειτουργούν παράλληλα (m^3/s).

Η συνολική παροχή $Q_{\kappa,i}$ από τις κ_i αντλίες που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή δίνεται παρακάτω:

$$Q_{\kappa,i} = \frac{\kappa_i}{8} Q_N q_\kappa \quad (6.51)$$

Όπου:

- q_κ : η αμ παροχή της αντλίας που αποτελεί το νέο σημείο τομής της χαρακτηριστικής της αντλίας για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης που αντιστοιχεί σε κ αντλίες.

Αντικαθιστώντας την συνολική παροχή $Q_{\kappa,i}$ από την (6.51) στην (6.50), η χαρακτηριστική της σωλήνωσης γίνεται:

$$h_o = 1 + 0.02 \left(\frac{\kappa_i}{8} \right)^2 q_\kappa^2 \quad (6.52)$$

Στην παρούσα μελέτη, βρέθηκε μέσω της (6.49) ότι ο ελάχιστος αριθμός αντλιών που λειτουργούν παράλληλα για τις δεδομένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου είναι τρεις αντλίες και ο μέγιστος οκτώ. Έτσι, θα βρεθεί το νέο σημείο τομής της χαρακτηριστικής της αντλίας που δίνεται από την (5.17) για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής με την νέα χαρακτηριστική της σωλήνωσης που δίνεται από την (6.52), για αριθμό αντλιών από τρεις ως επτά. Το νέο αυτό σημείο τομής προσδιορίζει ουσιαστικά την νέα παροχή, η οποία δίνεται από την (6.51). Προσδιορίζεται δηλαδή το νέο σημείο λειτουργίας της εγκατάστασης όταν δεν λειτουργεί όλο το αντλιοστάσιο και προκύπτει ένας συντελεστής διόρθωσης για την παροχή, ο οποίος δίνεται παρακάτω:

$$\varepsilon_\kappa = q_\kappa - q \quad (6.53)$$

Όπου:

- q : η αμ παροχή που προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 και αναφέρεται στην λειτουργία όλου του αντλιοστασίου με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (1 αμ).

Προφανώς για λειτουργία οκτώ αντλιών ο συντελεστής διόρθωσης είναι μηδενικός. Επίσης, αν ο συντελεστής διόρθωσης είναι μικρότερος του 1% δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της παροχής. Σε αντίθετη περίπτωση, συμπεριλαμβάνεται κανονικά στους υπολογισμούς, όπως θα φανεί στην συνέχεια.

Στον Πίνακα 6.6 δίνεται ο συντελεστής διόρθωσης ε_κ , όπως προέκυψε από την (6.53), λαμβάνοντας υπόψη ότι η αμ παροχή q_κ προέκυπτε κάθε φορά από την επίλυση του συστήματος της χαρακτηριστικής της αντλίας για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής που δίνεται από την (5.17) με την χαρακτηριστική της σωλήνωσης που δίνεται από την (6.52) για συγκεκριμένο αριθμό αντλιών κ που κυμαίνονταν από 3-7.

Πίνακας 6.6: Συντελεστής διόρθωσης ε_k .

αριθμός αντλιών k	συντελεστής διόρθωσης ε_k
3	0.024
4	0.02
5	0.017
6	0.012
7	0.0067

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.6, όταν λειτουργούν 7 αντλίες ο συντελεστής διόρθωσης προκύπτει $<1\%$ και κατ' επέκταση δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς ενώ για αριθμό αντλιών από 3-6 ο συντελεστής διόρθωσης συμπεριλαμβάνεται κανονικά στους υπολογισμούς της παροχής.

Η διορθωμένη παροχή στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές δίνεται παρακάτω:

$$Q_{k,i} = \kappa_i \frac{Q_N}{8} (1 + \varepsilon_k) \quad (6.54)$$

Ο όγκος στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών δίνεται παρακάτω:

$$V_\sigma = \int_1^T Q_{k,i}(t) dt = \sum_{i=1}^N Q_{k,i} \Delta t \quad (6.55)$$

Όμοια με πριν, επειδή $\Delta t = 1s$ ο όρος Δt μπορεί να παραληφθεί στο άθροισμα της (6.55).

Η αμ ισχύς $P_{k,i}$ που καταναλώνουν οι αντλίες σταθερών στροφών κάθε χρονική στιγμή προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 και δίνεται από την σχέση (5.5) με το αμ ολικό ύψος h να αντικαθίστανται από την (5.12), όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P_{k,i} = \frac{[1 + 0.02 \left(\frac{\kappa_i}{8}\right)^2 q_k^2] q_k}{1.02 \eta_r} \quad (6.56)$$

Όπου:

- $P_{k,i}$: η αμ ισχύς που καταναλώνουν οι αντλίες σταθερών στροφών κάθε χρονική στιγμή i .
- η_r : ο σχετικός βαθμός απόδοσης, ο οποίος για άντληση με σταθερές στροφές ισούται με 1αμ, αφού η εγκατάσταση λειτουργεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη την διόρθωση P_{π} (Σχήμα 6.18) ως προς την ισχύ που καταναλώνει κάθε αντλία και προκύπτει όταν μεταβάλλεται ο αριθμός των αντλιών που λειτουργούν παράλληλα. Θεωρούμε δηλαδή ότι η ισχύς που καταναλώνει κάθε αντλία είναι 250kW, παρότι αυτό δεν είναι εντελώς ακριβές γιατί το σημείο τομής της χαρακτηριστικής της αντλίας με την νέα χαρακτηριστική της σωλήνωσης (που αντιστοιχεί στον αριθμό των αντλιών που λειτουργούν παράλληλα) οδηγεί σε ισχύ $1 + P_{\pi}$, η οποία όμως είναι πολύ κοντά στην μονάδα.

Η ισχύς P_i που καταναλώνουν οι αντλίες κάθε χρονική στιγμή i σε kW δίνεται παρακάτω:

$$P_i = P_{\kappa,i} \left(\kappa_i \frac{P_N}{8} \right) \quad (6.57)$$

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνουν οι αντλίες δίνεται στη συνέχεια:

$$E_{\kappa} = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^N P_i \Delta t \quad (6.58)$$

Συνεπώς, η αιολική ενέργεια που απορρίπτεται σε kWh προκύπτει ως εξής:

$$E_v = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^N (P_{o\lambda,i} - P_i) \Delta t \quad (6.59)$$

Επειδή στην παρούσα μελέτη είναι $\Delta t=1s$, ο όρος Δt παραλείπεται στην (6.59).

Στον Πίνακα 6.7 δίνεται για κάθε σενάριο η διαθέσιμη αιολική παραγωγή E , η απορριπτόμενη αιολική παραγωγή E_v , η ενέργεια που καταναλώνεται από τις αντλίες E_{κ} και ο όγκος V_{σ} που αποθηκεύεται στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές.

Πίνακας 6.7: Διατιθέμενος όγκος (άντληση με σταθερές στροφές).

Σενάρια	E (kWh)	E_v (kWh)	E_{κ}(kWh)	V_{σ} (m³)
A	5487.78	1828.01	3659.77	1514.35
B	4331.94	1247.43	3084.51	1270.12
Γ	4839.72	1770.54	3069.18	1296.21
Δ	4840.00	1756.21	3083.79	1302.79

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.7 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 6.5, στην άντληση με μεταβλητές στροφές απορροφάται πλήρως η διαθέσιμη αιολική ισχύς και κατ' επέκταση αυξάνεται ο όγκος άντλησης σε σχέση με την άντληση με σταθερές στροφές κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 36.7% μέχρι 50.5% περίπου. Αυτό οφείλεται στο ότι οι αντλίες μεταβλητών στροφών μπορούν να προσαρμόσουν την παραγωγή τους μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής τους και έτσι να

αποφεύγεται απόρριψη αιολικής ισχύος. Επίσης, η άντληση με βέλτιστες στροφές συντελεί σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του όγκου άντλησης που κυμαίνεται 56.7% - 71.5% αν συγκρίνουμε τους Πίνακες 6.6, 6.7. Αυτό οφείλεται στο ότι με την άντληση με βέλτιστες στροφές επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή λειτουργία και απόδοση της αντλίας που συντελεί στην άντληση του μεγαλύτερου δυνατού όγκου.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ο όγκος άντλησης που υπολογίστηκε σε αυτή την παράγραφο λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή των υδραυλικών απωλειών σε σχέση με αυτόν που θα προέκυπτε αν δεν είχε ληφθεί υπόψη η διόρθωση για τον υπολογισμό της παροχής (δηλαδή για αμελητέα μεταβολή των υδραυλικών απωλειών) προκύπτει μεγαλύτερος κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 2.58% μέχρι 2.7%, ανάλογα με το σενάριο που εξετάζεται.

Ακόμη, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4, θα μπορούσε παράλληλα με την εγκατάσταση των μεγάλων αντλιών να εγκατασταθεί και ένας αριθμός (3 ή 4) μικρότερων αντλιών (jockey), όλες παράλληλα συνδεδεμένες. Με τον τρόπο αυτό οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές της απορροφούμενης ισχύος καλύπτονται από την λειτουργία των μεγάλων αντλιών (μεγάλα σκαλοπάτια της κλιμακωτής απόκρισης) και μεταξύ αυτών οι μικρότερες μεταβολές καλύπτονται από τη λειτουργία των μικρότερων αντλιών, οπότε ανάμεσα στα μεγάλα σκαλοπάτια διαμορφώνονται μικρότερα που προσομοιάζουν προς την συνεχή ανταπόκριση και έτσι απορρίπτεται τελικά μικρότερο ποσό αιολικής ισχύος.

6.5.4 Υπολογισμός παροχής και όγκου για άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες

Στην παράγραφο 6.5.2, θεωρήθηκε ότι λειτουργούσε όλο το αντλιοστάσιο, δηλαδή και οι οκτώ αντλίες.

Στην παράγραφο αυτή, θα πραγματοποιηθεί μια διαφορετική προσέγγιση της άντλησης με μεταβλητές στροφές, στην οποία κάθε χρονική στιγμή θα υπολογίζεται και θα λαμβάνεται υπόψη πόσες αντλίες λειτουργούν παράλληλα. Στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, κάθε χρονική στιγμή λειτουργεί ακέραιος αριθμός αντλιών και είτε αγοράζεται από το δίκτυο το υπόλοιπο ενέργειας που απαιτείται για να λειτουργήσει ακόμα μία αντλία και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς είτε απορρίπτεται η αιολική ισχύς που περισσεύει αν δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίστοιχα στην περίπτωση των αντλιών μεταβλητών στροφών, κάθε χρονική στιγμή δεν είναι απαραίτητο να δουλεύουν όλες οι αντλίες ταυτόχρονα αλλά αρκεί να δουλεύει ένας συγκεκριμένος αριθμός αντλιών ικανός να απορροφήσει την διαθέσιμη αιολική ισχύ και μία ακόμη αντλία έτσι ώστε να αποφεύγεται η απόρριψη της αιολικής ισχύος που περισσεύει και να δουλεύουν οι αντλίες πιο κοντά στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Όμοια με την περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, η αιολική ισχύς που περισσεύει κάθε χρονική στιγμή αλλά και ο αριθμός των αντλιών που δουλεύουν παράλληλα υπολογίζονται από τις (6.48), (6.49) αντίστοιχα, οι οποίες προσδιορίστηκαν στην παράγραφο 6.5.3.

Η ισχύς που προορίζεται για άντληση κάθε χρονική στιγμή στην περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές που μελετάται στην παράγραφο αυτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

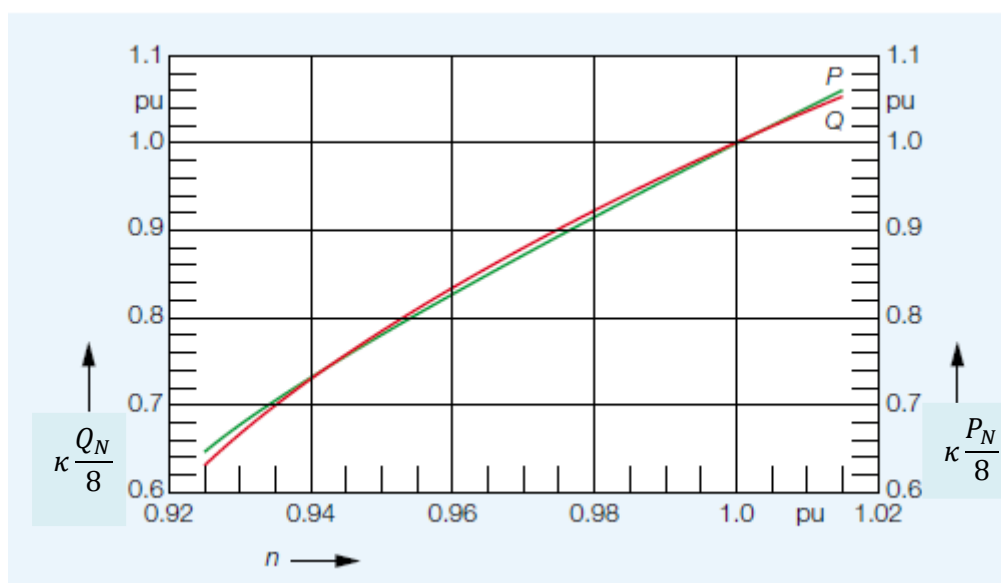
$$P_i = \frac{P_{oλ,i}}{\frac{P_N}{8}(\kappa_i + 1)} \quad (6.60)$$

Όπου:

- P_i : η αμ ισχύς που προορίζεται για άντληση.
- $P_{oλ,i}$: η διαθέσιμη αιολική παραγωγή σε κάθε χρονική στιγμή (kW), η οποία έχει προσδιοριστεί στο Κεφάλαιο 6 για κάθε σενάριο μέσω των διαθέσιμων χρονοσειρών ταχυτήτων ανέμου και της καμπύλης ισχύος των διαθέσιμων ανεμογεννητριών.
- κ_i :ο αριθμός των αντλιών που δίνεται από την (6.49).

Εφόσον είναι δεδομένη η ισχύς άντλησης P_i μπορούν να υπολογιστούν οι στροφές n_i της αντλίας κάθε χρονική στιγμή μέσω της (6.40) που έχει δοθεί στην παράγραφο 6.5.2. Στην συνέχεια, έχοντας υπολογίσει τις στροφές n_i της αντλίας, υπολογίζεται μέσω της (6.41) η παροχή των αντλιών που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το Σχήμα 5.15 του Κεφαλαίου 5 και κατ' επέκταση οι σχέσεις (6.40), (6.41) αναφέρονται σε λειτουργία όλου του αντλιοστασίου, δηλαδή σε λειτουργία και των οκτώ αντλιών. Παρολ' αυτά επειδή το Σχήμα 5.15 δίνεται σε αμ τιμές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για λειτουργία κ αντί οκτώ αντλιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.19, όπου Q_N , P_N η ονομαστική παροχή και ισχύς του αντλιοστασίου αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 6.3.



Σχήμα 6.19: Παροχή και ισχύς συναρτήσει των στροφών n για λειτουργία κ αντλιών.

Μπορούν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις για τον υπολογισμό των στροφών και της παροχής που προσδιοριστήκαν στο Κεφάλαιο 5 και στην παράγραφο αυτή, στην οποία ο αριθμός των αντλιών μεταβάλλεται.

Η παροχή των κ_i αντλιών στην περίπτωση που μελετάται στην παράγραφο αυτή δίνεται παρακάτω:

$$Q_i = (\kappa_i + 1)q_i \frac{Q_N}{8} \quad (6.61)$$

Όπου:

- q_i : η αμ παροχή που αντιστοιχεί στην αμ ισχύ P_i της (6.60) από το Σχήμα 6.19.

Ο συνολικός όγκος άντλησης δίνεται στη συνέχεια:

$$V_K = \sum_{i=1}^N Q_i \Delta t = \sum_{i=1}^N (\kappa_i + 1)q_i \frac{Q_N}{8} \Delta t \quad (6.62)$$

Επειδή στην παρούσα μελέτη $\Delta t=1s$, ο όρος Δt παραλείπεται στην (6.62).

Στον Πίνακα 6.8 δίνεται ο όγκος άντλησης V_K που προέκυψε μέσω της (6.62) για διαθέσιμη αιολική παραγωγή E στην περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές που μελετάται εδώ, στην οποία ο αριθμός των αντλιών κ_i προσαρμόζεται κάθε χρονική στιγμή ανάλογα με την διαθέσιμη αιολική ισχύ.

Πίνακας 6.8: Διαθέσιμος όγκος (άντληση με μεταβλητές στροφές και μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ		
Σενάρια	E (kWh)	Όγκος V_K (m^3)
A	5487.78	2491.84
B	4331.94	1960.32
Γ	4839.72	2193.87
Δ	4840.00	2193.98

Αναφέρουμε στο σημείο αυτό ότι για την περίπτωση που εξετάζεται στην παράγραφο αυτή δεν γίνεται η διόρθωση για την παροχή που πραγματοποιήθηκε στην περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές γιατί έχει ήδη ληφθεί υπόψη η μεταβολή των υδραυλικών απωλειών μέσω του Σχήματος 5.15. Άλλωστε όπως διαπιστώνεται από τους Πίνακες 6.5, 6.8, στην άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες πλησιάζουμε ήδη τον βέλτιστο όγκο άντλησης. Συνεπώς, δεν πραγματοποιείται περαιτέρω διόρθωση της παροχής για να αποφευχθεί ο κίνδυνος να οδηγηθούμε σε υπεραισιόδοξα αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 6.9 δίνονται ο όγκος V_{μ} που προσδιορίστηκε στην παράγραφο 6.5.2 για άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία ολόκληρου του αντλιοστασίου, ο όγκος V_{σ} που προσδιορίστηκε για άντληση με σταθερές στροφές στην παράγραφο 6.5.3, ο όγκος V_{κ} που προσδιορίστηκε μέσω της (6.63) για άντληση με μεταβλητές στροφές και μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών.

Πίνακας 6.9: Διαθέσιμος όγκος (άντληση με μεταβλητές και σταθερές στροφές).

Σενάρια	$V_{\mu}(m^3/s)$	$V_{\sigma}(m^3/s)$	$V_{\kappa}(m^3/s)$
<i>A</i>	2253.02	1514.35	2491.84
<i>B</i>	1735.60	1270.12	1960.32
<i>Γ</i>	1950.90	1296.21	2193.87
<i>Δ</i>	1951.13	1302.79	2193.98

Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 6.9, ο μεγαλύτερος όγκος άντλησης παρατηρείται για την περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές με αριθμό αντλιών που προσαρμόζεται κάθε χρονική στιγμή ώστε να απορροφάται όλη η διαθέσιμη αιολική ισχύς. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4, στην περίπτωση που εξετάζεται στην παράγραφο 6.5.2, στην οποία έχουμε λειτουργία ολόκληρου του αντλιοστασίου, ουσιαστικά είναι σαν να λειτουργεί μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία και αντλείται μικρότερη ποσότητα σε σχέση με την περίπτωση λειτουργίας λιγότερων αντλιών, όπως αυτή που εξετάζεται στην παράγραφο αυτή. Για την περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, διαπιστώνεται από τον Πίνακα 6.9, ότι έχουμε τον μικρότερο όγκο άντλησης. Αυτό όπως έχει αναφερθεί οφείλεται στο ότι στην άντληση με σταθερές στροφές ποσό αιολικής ενέργειας απορρίπτεται επειδή δεν αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος των αντλιών.

6.6 Υπολογισμός ηλεκτροπαραγωγής και βαθμού απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής

6.6.1 Περιγραφή υδροηλεκτρικής μονάδας

Στην παρούσα μελέτη θεωρείται υδροηλεκτρική μονάδα που αποτελείται από έναν υδροστρόβιλο με βαθμό απόδοσης 0.89, εφοδιασμένο με σύγχρονη γεννήτρια. Ο υδροστρόβιλος λειτουργεί πάντα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του, στο οποίο έχει την καλύτερη δυνατή απόδοση.

Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι για την λειτουργία του υδροστροβίλου θεωρήθηκε όμοιος αγωγός (δηλαδή σωλήνωση) με αυτόν του αντλιοστασίου και η ονομαστική παροχή του υδροστροβίλου είναι ίση με την ονομαστική παροχή του αντλιοστασίου.

Η ονομαστική ισχύς του υδροστροβίλου δίνεται στην συνέχεια:

$$P_{Y,N} = 8.7(H_o - k_1 Q_N^2) Q_N \quad (6.63)$$

Όπου:

- $P_{Y,N}$: η ονομαστική ισχύς του υδροστροβίλου (kW).
- H_o : το καθαρό ύψος πτώσης (m).
- k_1 : ο συντελεστής υδραυλικών απωλειών.
- Q_N : η ονομαστική παροχή του υδροστροβίλου (m^3/s), η οποία όπως έχει αναφερθεί είναι ίση με την ονομαστική παροχή του αντλιοστασίου που δίνεται στον Πίνακα 6.3.

Το καθαρό ύψος πτώσης είναι $H_o = 580m$ και το ολικό ύψος για ονομαστική παροχή του αντλιοστασίου υπολογίζεται σύμφωνα με την Ενότητα 5.2 ως εξής:

$$H_N = H_o - 0.02H_o = 580 - 11.6 = 568.4m \quad (6.64)$$

Αντικαθιστώντας τα ονομαστικά μεγέθη του υδροστροβίλου στην (6.63), προκύπτει η ονομαστική ισχύς του υδροστροβίλου ίση με:

$$P_{Y,N} = 8.7 \times 568.4 \times 0.2524 = 1248kW$$

Δίνεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 6.10 με τα ονομαστικά μεγέθη της υδροηλεκτρικής μονάδας.

Πίνακας 6.10 Ονομαστικά μεγέθη υδροηλεκτρικής μονάδας.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	
Καθαρό ύψος πτώσης H_o (m)	580
Ονομαστική παροχή Q_N (m^3/s)	0.2524
Ονομαστικός βαθμός απόδοσης η_N (%)	89%
Ονομαστική ισχύς $P_{Y,N}$ (kW)	1248
Κανονικοποιημένος συντελεστής υδραυλικών απωλειών	0.02

6.6.2 Υπολογισμός υδροηλεκτρικής παραγωγής

Η ενέργεια που παράγεται από την υδροηλεκτρική μονάδα την επόμενη μέρα κατά τις ώρες αιχμής δίνεται παρακάτω:

$$E_Y = 8.7(H_o - k_1 Q_N^2)V \quad (6.65)$$

Όπου:

- E_Y : η ενέργεια που δίνει ο υδροηλεκτρικός σταθμός (kJ).
- V : ο διατιθέμενος όγκος ύδατος (m^3).

[Η παραπάνω σχέση πρέπει να διαιρεθεί με 3600 ώστε να προκύψουν kWh].

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον στρόβιλο, το ύψος πτώσης για ονομαστική παροχή δίνεται και εδώ από την (6.64).

Στους Πίνακες 6.11 - 6.13 δίνεται η υδροηλεκτρική παραγωγή, όπως υπολογίστηκε για όλες τις περιπτώσεις άντλησης μέσω της (6.65) και λαμβάνοντας υπόψη τον διαθέσιμο όγκο άντλησης που έχει υπολογιστεί για κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα 6.11 δίνεται η υδροηλεκτρική παραγωγή $E_{Y,\mu}$ για τον όγκο V_μ που υπολογίστηκε για την περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές και μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία (Πίνακας 6.4), καθώς επίσης και η υδροηλεκτρική παραγωγή $E_{Y,\kappa}$ για τον όγκο V_κ που υπολογίστηκε στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες (Πίνακας 6.8). Στον Πίνακα 6.12 δίνεται η υδροηλεκτρική παραγωγή $E_{Y,\beta}$ για την περίπτωση της άντλησης με βέλτιστες στροφές που αναλύθηκε στην παράγραφο 6.5.2. Τέλος, στον Πίνακα 6.13 δίνεται η υδροηλεκτρική παραγωγή $E_{Y,\sigma}$ για την περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές που μελετήθηκε στην παράγραφο 6.5.3.

Πίνακας 6.11: Υδροηλεκτρική παραγωγή (άντληση με μεταβλητές στροφές).

Σενάρια	$V_\mu (m^3)$	$E_{Y,\mu}(kWh)$	$V_\kappa (m^3)$	$E_{Y,\kappa}(kWh)$
A	2253.02	3094.82	2491.84	3422.87
B	1735.60	2384.08	1960.32	2692.76
Γ	1950.90	2679.82	2193.87	3013.57
Δ	1951.13	2680.14	2193.98	3013.72

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.11, η υδροηλεκτρική παραγωγή προέκυψε μεγαλύτερη στην περίπτωση που προσαρμόζεται ο αριθμός των αντλιών που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 10.6% μέχρι 13%. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί στην περίπτωση που λειτουργούν λιγότερες αντλίες, όπως στην παράγραφο 6.5.4, υπάρχει μια καλύτερη κλιμάκωση της απορροφούμενης ισχύος και αντλείται μεγαλύτερη ποσότητα αιολικής ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία, όπως αυτή που μελετάται στην παράγραφο 6.5.2.

Πίνακας 6.12: Υδροηλεκτρική παραγωγή (άντληση με βέλτιστες στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ		
Σενάρια	$V_{opt}(m^3)$	$E_{Y,\beta}(kWh)$
A	2521.14	3463.12
B	1990.13	2733.71
Γ	2223.41	3054.15
Δ	2223.54	3054.33

Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 6.12 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 6.11, η υδροηλεκτρική παραγωγή στην άντληση με βέλτιστες στροφές προέκυψε μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές, στην οποία έχουμε μια

ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία κατά 11.9 – 14%. Αυτό είναι λογικό γιατί με την άντληση με βέλτιστες στροφές γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της υπάρχουσας εγκατάστασης και επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση της αντλίας, η οποία συντελεί στην άντληση του μεγαλύτερου δυνατού όγκου. Επίσης, η υδροηλεκτρική παραγωγή στην άντληση με τις βέλτιστες στροφές προέκυψε μεγαλύτερη κατά 1.5% σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες, ποσοστό που επιβεβαιώνει το γεγονός ότι δεν χρειάζεται περαιτέρω διόρθωση της παροχής στην περίπτωση άντλησης που μελετήθηκε στην παράγραφο 6.5.4, καθώς ήδη προσεγγίζει τον βέλτιστο όγκο άντλησης.

Πίνακας 6.13: Υδροηλεκτρική παραγωγή (άντληση με σταθερές στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ		
Σενάρια	$V_{\sigma}(m^3)$	$E_Y(kWh)$
A	1476.04	2080.16
B	1238.15	1744.68
Γ	1262.75	1780.52
Δ	1269.16	1789.56

Συγκρίνοντας τον Πίνακα 6.13 με τους Πίνακες 6.11, 6.12 συμπεραίνουμε πως η υδροηλεκτρική παραγωγή στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές προέκυψε μικρότερη κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 26.8 μέχρι 33.6% σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία (Πίνακας 6.11) και κατά 36.2 – 41.7% σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές (Πίνακας 6.12). Επίσης, η υδροηλεκτρική παραγωγή προέκυψε μικρότερη στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών σε σύγκριση με την άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες κατά 35.2 – 40.9%, όπως προκύπτει πάλι από σύγκριση των Πινάκων 6.11, 6.13. Αυτό οφείλεται όπως έχει αναφερθεί στην απόρριψη ποσότητας αιολικής ισχύος στην περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, η οποία δεν μπορεί να απορροφηθεί επειδή δεν αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος των αντλιών. Ενδεχομένως, με την επιλογή αντλιών μικρότερης ονομαστικής ισχύος να απορρίπτονταν μικρότερο ποσό αιολικής ενέργειας.

6.6.3 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης - παραγωγής ισούται με το λόγο της υδροηλεκτρικής παραγωγής προς την αρχική ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\eta_{AT} = \frac{E_Y}{E} \quad (6.66)$$

Όπου:

- η_{AT} : ο βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης – παραγωγής (%).

- E_Y : η υδροηλεκτρική παραγωγή (kWh), η οποία υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.6.2.
- E : η διαθέσιμη αιολική παραγωγή (kWh), η οποία δίνεται στον Πίνακα 6.2.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης-παραγωγής ισούται με τον λόγο της ονομαστικής ισχύος του υδροστροβίλου προς την μέγιστη αιολική παραγωγή από τις δύο ανεμογεννήτριες και δίνεται στην συνέχεια:

$$\eta_{AT,N} = \frac{P_{Y,N}}{P_{o\lambda,N}} = \frac{1248}{2000} = 0.624 \text{ ή } 62.4\% \quad (6.67)$$

Δίνεται στους Πίνακες 6.14 – 6.17, ο βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης – παραγωγής η_{AT} που υπολογίστηκε μέσω της (6.66) για την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές και βέλτιστες στροφές, λαμβάνοντας υπόψη τους Πίνακες 6.11, 6.12, οι οποίοι δίνουν την υδροηλεκτρική παραγωγή E_Y για κάθε σενάριο (για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις άντλησης) και τον Πίνακα 6.2, ο οποίος δίνει την διαθέσιμη αιολική παραγωγή E .

Πίνακας 6.14: Βαθμός απόδοσης κύκλου (άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μίας ισοδύναμης αντλίας).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ				
Σενάρια	$E(kWh)$	Όγκος $V_{\mu}(m^3)$	$E_{Y,\mu}(kWh)$	$\eta_{AT}(\%)$
A	5487.78	2253.02	3094.82	56.39
B	4331.94	1735.60	2384.08	55.03
Γ	4839.72	1950.90	2679.82	55.37
Δ	4840.00	1951.13	2680.14	55.37

Πίνακας 6.15: Βαθμός απόδοσης κύκλου (άντληση με μεταβλητές στροφές και μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών).

Σενάρια	$E(kWh)$	Όγκος $V_{\kappa}(m^3)$	$E_{Y,\kappa}(kWh)$	$\eta_{AT}(\%)$
A	5487.78	2491.84	3422.87	62.37
B	4331.94	1960.32	2692.76	62.16
Γ	4839.72	2193.87	3013.57	62.27
Δ	4840.00	2193.98	3013.72	62.27

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.15 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 6.14, η άντληση με μεταβλητές στροφές, όταν προσαρμόζεται ο αριθμός των αντλιών που δουλεύουν παράλληλα έτσι ώστε να λειτουργούν λιγότερες αντλίες κάθε χρονική στιγμή σε σχέση με την περίπτωση όπου λειτουργεί μία μεγαλύτερη ισοδύναμη αντλία, συντελεί στην καλύτερη δυνατή απορρόφηση της αιολικής ισχύος με μια

βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κύκλου κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 10.6% μέχρι 13% περίπου. Γενικά, η ύπαρξη πολλών μικρότερων αντλιών κλιμακώνει την απορρόφηση της αιολικής ισχύος και συντελεί σε αύξηση του όγκου άντλησης και κατ' επέκταση της υδροηλεκτρικής παραγωγής και του βαθμού απόδοσης του κύκλου.

Πίνακας 6.16: Βαθμός απόδοσης κύκλου (άντληση με βέλτιστες στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ				
Σενάρια	$E(kWh)$	Όγκος $V(m^3)$	$E_Y(kWh)$	$\eta_{opt}(\%)$
A	5487.78	2521.14	3463.12	63.11
B	4331.94	1990.13	2733.71	63.11
Γ	4839.72	2223.41	3054.15	63.11
Δ	4840.00	2223.54	3054.33	63.11

Όταν έχουμε άντληση με βέλτιστες στροφές, γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης τεχνολογίας για δεδομένη ενέργεια και ο βαθμός απόδοσης αυξάνει σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 11.9% μέχρι 14.7% όταν λειτουργεί μια μεγαλύτερη ισοδύναμη αντλία, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.14 και κατά 2% όταν λειτουργούν λιγότερες αντλίες, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.15. Από αυτό προκύπτει ότι όταν έχουμε άντληση με λιγότερες αντλίες, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου βελτιώνεται αισθητά και πλησιάζει την λειτουργία της άντλησης με βέλτιστες στροφές, αφού λειτουργούν ακριβώς όσες αντλίες απαιτείται για να απορροφήσουν την αιολική ισχύ και μια ακόμη για να απορροφήσει την αιολική ισχύ που περισσεύει. Όταν έχουμε λειτουργία ολόκληρου του αντλιοστασίου, οι αντλίες δουλεύουν κάτω από τον ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους και για αυτό τον λόγο μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ο βαθμός απόδοσης που υπολογίστηκε για τις βέλτιστες στροφές προέκυψε μεγαλύτερος από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης της παραγράφου 6.6.3, ο οποίος ισούται με 62.4%. Αυτό είναι λογικό γιατί στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση της αντλίας και παράγεται παραπάνω όγκος απ' ότι στην περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές και κατ' επέκταση αναλογικά μεγαλύτερο ποσό υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Στον Πίνακα 6.17 δίνεται ο βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής για την περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές. Για την άντληση με σταθερές στροφές δίνεται επίσης και ο Πίνακας 6.19, στον οποίο φαίνεται η διαθέσιμη αιολική παραγωγή E , τα απορριπτόμενα ποσά αιολικής ενέργειας E_v , η ενέργεια που προορίζεται για άντληση E_k , ο όγκος άντλησης V_σ και ο βαθμός απόδοσης η_{AT} .

Πίνακας 6.17: Βαθμός απόδοσης κύκλου (άντληση με σταθερές στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ				
Σενάρια	$E(kWh)$	Όγκος $V(m^3)$	$E_Y(kWh)$	$\eta_{AT}(\%)$
A	5487.78	1514.35	2080.16	37.91
B	4331.94	1270.12	1744.68	40.27
Γ	4839.72	1296.21	1780.52	36.79
Δ	4840.00	1302.79	1789.56	36.97

Πίνακας 6.18: Απορριπτόμενα ποσά αιολικής ενέργειας και βαθμός απόδοσης κύκλου (άντληση με σταθερές στροφές).

ΑΝΤΛΗΣΗ - ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ				
Σενάρια	A	B	Γ	Δ
Αιολική παραγωγή $E(kWh)$	5487.78	4331.94	4839.72	4840.00
Απόρριψη αιολικής ενέργειας $E_v(kWh)$	1828.01	1247.43	1770.54	1756.21
Κατανάλωση ενέργειας $E_k(kWh)$	3659.77	3084.51	3069.18	3083.79
Όγκος $V_\sigma(m^3)$	1514.35	1270.12	1296.21	1302.79
Βαθμός απόδοσης $\eta_{AT}(\%)$	37.91	40.27	36.79	36.97

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.17 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 6.14, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου για άντληση με σταθερές στροφές προέκυψε αρκετά μικρότερος σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργίας μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας κατά ένα ποσοστό μεταξύ 36.7% και 51%. Σε σύγκριση με τον Πίνακα 6.15, παρατηρούμε μια ακόμα μεγαλύτερη μείωση του βαθμού απόδοσης που κυμαίνεται από 54.3% μέχρι 69% όταν λειτουργούν λιγότερες αντλίες. Σε σύγκριση με την άντληση με βέλτιστες στροφές, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μειώνεται κατά 56.7 – 71.5%, αν συγκρίνουμε τους Πίνακες 6.16, 6.17. Αυτή η μείωση του βαθμού απόδοσης στην περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές οφείλεται όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.18 στο ότι μεγάλο ποσό αιολικής ενέργειας διαφεύγει αναξιοποίητο στην περίπτωση της άντλησης με σταθερές στροφές επειδή δεν μπορεί να αντληθεί αφού δεν αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος των αντλιών.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως αν υπολογιστεί ο λόγος της υδροηλεκτρικής παραγωγής προς την αξιοποιήσιμη αιολική παραγωγή στην άντληση με σταθερές στροφές, δηλαδή της ενέργειας που καταναλώνεται από τις αντλίες, σε όλα τα σενάρια προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής ίσος με 62.4%, γεγονός που ήταν και αναμενόμενο, σύμφωνα με την Ενότητα 6.6.3.

6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συμπεραίνουμε ότι:

- Οι μεταβλητές στροφές στην άντληση συντελούν στην καλύτερη απορρόφηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος και κατ' επέκταση στην αύξηση του διαθέσιμου όγκου άντλησης σε σχέση με την άντληση με σταθερές στροφές. Αυτό οφείλεται στο ότι οι αντλίες μεταβλητών στροφών μπορούν να προσαρμόσουν την παραγωγή τους μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής τους και έτσι αποφεύγεται απόρριψη αιολικής ισχύος.
- Η άντληση με βέλτιστες στροφές συντελεί σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του όγκου άντλησης και κατ' επέκταση και της υδροηλεκτρικής παραγωγής κατά ένα ποσοστό ανάλογο αφού με τις βέλτιστες στροφές επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή απόδοση της αντλίας και αξιοποιείται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η διαθέσιμη τεχνολογία, γεγονός που συντελεί στην άντληση του μεγαλύτερου δυνατού όγκου.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, για όλα τα σενάρια (Α-Δ) που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο αυτό, ο βαθμός απόδοσης που υπολογίστηκε για την άντληση με βέλτιστες στροφές προέκυψε μεγαλύτερος και ίσος με 63.11%. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι ο βαθμός απόδοσης στην άντληση με βέλτιστες στροφές προέκυψε μεγαλύτερος από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής της Ενότητας 6.6.3, ο οποίος ισούται με 62.4%. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση της άντλησης με βέλτιστες στροφές επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της διαθέσιμης τεχνολογίας (μεγαλύτερο όγκος άντλησης) και αναλογικά μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή από τον υδροηλεκτρικό σταθμό και βαθμός απόδοσης του κύκλου.
- Ο βαθμός απόδοσης στην άντληση με μεταβλητές στροφές όταν λειτουργούσε μία ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες δεν προέκυψε σε καμία περίπτωση ίσος με τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή 62.4%. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: Πρώτον, στο γεγονός ότι με τις χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου που υπήρχαν διαθέσιμες, λαμβάνονταν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη ηλεκτροπαραγωγή τους να είναι αναλογικά μικρότερη, όπως άλλωστε προκύπτει από τις καμπύλες ισχύος των δύο ανεμογεννητριών. Δεύτερον, στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές που λειτουργεί όλο το αντλιοστάσιο, οι αντλίες εργάζονται με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης. Για τους δύο αυτούς λόγους, ο βαθμός απόδοσης κύκλου προέκυψε μικρότερος από τον ονομαστικό στην άντληση με μεταβλητές στροφές στην οποία

λειτουργούσε μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία και κυμαίνονταν από 55% μέχρι 56.4%.

- Η άντληση με μεταβλητές στροφές, στην οποία κάθε χρονική στιγμή λαμβάνεται υπόψη και υπολογίζεται ο αριθμός των αντλιών που είναι απαραίτητες να λειτουργούν για να απορροφήσουν όλη την διαθέσιμη αιολική ισχύ συντελεί στην αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση αυτή κάθε χρονική στιγμή δεν δουλεύουν όλες οι αντλίες ταυτόχρονα αλλά ένας συγκεκριμένος αριθμός αντλιών ικανός να απορροφήσει την διαθέσιμη αιολική ισχύ και μία ακόμη αντλία έτσι ώστε να αποφεύγεται η απόρριψη αιολικής ισχύος. Έτσι, οι αντλίες δουλεύουν πιο κοντά στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Επίσης, με την λειτουργία λιγότερων αντλιών αντί μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας παρατηρείται καλύτερη κλιμάκωση της απορροφούμενης ισχύος με κλίμακα τόσο περισσότερο απότομη, όσο μικρότερο είναι το πλήθος των εγκατεστημένων αντλιών. Με την παραλλαγή αυτή της άντλησης με μεταβλητές στροφές, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής αυξάνεται κατά 10.6 – 13% για τις αντλίες μεταβλητών στροφών.
- Για την περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών προέκυψε ο βαθμός απόδοσης του κύκλου αρκετά μικρότερος σε σχέση με τις αντλίες μεταβλητών στροφών, όπως δίνεται στον Πίνακα 6.17. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί μεγάλο ποσό της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής απορρίπτεται όταν έχουμε άντληση με σταθερές στροφές, διότι η ισχύς που καταναλώνεται από τις αντλίες αποτελεί ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος κάθε αντλίας με αποτέλεσμα η αιολική ισχύς που δεν αποτελεί πολλαπλάσιο να πρέπει αναγκαστικά να απορριφθεί.
- Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης (μεταβλητές, σταθερές, βέλτιστες) τα σενάρια Γ, Δ είχαν πολύ κοντινούς βαθμούς απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 είχαν αρκετά κοντινές τιμές και κατ' επέκταση οι ανεμογεννήτριες έδιναν παραπλήσια αιολική παραγωγή.
- Το σενάριο Α είχε τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης κύκλου από όλα τα σενάρια για όλες τις περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές στροφές. Αυτό ερμηνεύεται ως εξής: στο σενάριο Α συμμετείχαν δύο ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών που συμμετείχαν στο σενάριο Β. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο σενάριο Α να είναι μεγαλύτερη η διαθέσιμη αιολική παραγωγή και αναλογικά μεγαλύτερη και η ισχύς που αντλείται. Αντίστοιχα μεγαλύτερη προκύπτει και η ηλεκτροπαραγωγή από τον υδροηλεκτρικό σταθμό, εφόσον γίνεται πλήρης απορρόφηση της αιολικής

ισχύος στην άντληση με μεταβλητές στροφές και δεν απορρίπτεται αιολική ενέργεια.

- Για το σενάριο Β από την άλλη, ο καλύτερος βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια προέκυψε στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι στην περίπτωση του σεναρίου Α απορρίπτεται μεγαλύτερο ποσό αιολικής ενέργειας άρα προκύπτει μικρότερη ενέργεια που προορίζεται για άντληση και μικρότερος βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.18. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στην επιλογή της ονομαστικής ισχύος των αντλιών. Ενδεχομένως με επιλογή μιας αντλίας άλλης ονομαστικής ισχύος, να επιτυγχάνονταν μεγαλύτερη άντληση στο σενάριο Α σε σχέση με το σενάριο Β.

Κεφάλαιο 7

Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση

7.1 Τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας

Στο Κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα οικονομικά οφέλη από την αντλησιοταμίευση, για τα συγκεκριμένα σενάρια του Κεφαλαίου 6 (παράγραφος 6.4.1), με χρήση αντλιών σταθερών ή μεταβλητών στροφών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο περιπτώσεις σε κάθε σενάριο με και χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Για το σκοπό αυτό θεωρούνται οι ενδεικτικές τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας που δίνονται στον Πίνακα 7.1. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι η αιολική ενέργεια θεωρείται ότι παράγεται χωρίς κόστος, δεδομένου ότι οι αποσβέσεις κεφαλαίου και τα λοιπά κόστη δεν λαμβάνονται υπόψη εκτός από το κόστος καυσίμου, το οποίο για την αιολική ενέργεια είναι μηδενικό.

Πίνακας 7.1: Τιμές αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

C_{ay}	Τιμή αγοράς για άντληση (€/MWh)	70
C_{π}	Τιμή πώλησης παραγωγής των υδροστροβίλων (€/MWh)	100
	Κόστος αιολικής ενέργειας (€/MWh)	0

Θεωρούμε ότι η άντληση γίνεται στη χαμηλή τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (που δίνεται στον Πίνακα 7.1), δηλαδή στο χαμηλό φορτίο και πιο συγκεκριμένα τις νυχτερινές ώρες ή τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Οι τιμές που έχουν θεωρηθεί στον Πίνακα 7.1 αντιστοιχούν σε οριακή ζημία από την άντληση, δεδομένου ότι ο λόγος τιμής αγοράς προς πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερος του μέγιστου βαθμού απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής, που προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 6:

$$\eta_{opt} = \frac{E_Y}{E} < \frac{C_{ay}}{C_{\pi}} \quad (7.1)$$

Όπου:

- η_{opt} : ο μέγιστος βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης-παραγωγής.
- E_Y : η ενέργεια που παράγεται από τον υδροηλεκτρικό σταθμό (MWh).
- E : η διαθέσιμη αιολική παραγωγή που χρησιμοποιείται για άντληση (MWh) και δίνεται στον Πίνακα 6.3 του Κεφαλαίου 6.
- C_{ay} : η τιμή αγοράς για άντληση (€/MWh) που δίνεται στον Πίνακα 7.1.
- C_{π} : η τιμή πώλησης παραγωγής των υδροστροβίλων (€/MWh) που δίνεται στον Πίνακα 7.1.

Όπως είδαμε ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης-παραγωγής υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 6 (Ενότητα 6.6.3) και προέκυψε ίσος με $0.6311 < 70/100$.

Παρά το γεγονός ότι η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση είναι ζημιογόνα, είναι συμφέρον να αγοράζεται η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργεί ακέραιος αριθμός αντλιών, έτσι ώστε να αποφεύγεται απόρριψη αιολικής ισχύος. Η εγκατάσταση δηλαδή έχει γίνει για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και όχι επειδή η διαφορά της τιμής είναι τέτοια ώστε να συνεπάγεται όφελος από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για άντληση. Το τελικό όφελος από την αγορά προκύπτει προφανώς από την αξιοποίηση της δωρεάν αιολικής ενέργειας.

Στην συνέχεια εξετάζονται για όλα τα σενάρια της παραγράφου 6.4.1 οι δύο παραπάνω περιπτώσεις άντλησης, δηλαδή άντληση χωρίς και με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

7.2 Υπολογισμοί χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση

Στην Ενότητα αυτή, υπολογίζεται το κέρδος που προκύπτει από την πώληση της υδροηλεκτρικής παραγωγής που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 6, όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές, η αιολική ενέργεια απορροφάται πλήρως από τις αντλίες κάθε χρονική στιγμή, αφού οι αντλίες μεταβλητών στροφών μπορούν να μεταβάλλουν την παραγωγή τους ανάλογα με την διαθέσιμη αιολική ενέργεια, προσαρμόζοντας την ταχύτητα περιστροφής τους. Αντιθέτως, στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, η αιολική ενέργεια δεν απορροφάται πλήρως από τις αντλίες που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή αλλά κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος των αντλιών, που στην περίπτωση που εξετάζεται εδώ λήφθηκε ίση με 250kW, όπως φαίνεται άλλωστε και από τον Πίνακα 6.3. Κατ' επέκταση στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, μέρος της αιολικής παραγωγής αναγκαστικά απορρίπτεται εάν δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση, αφού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον λόγο που προαναφέρθηκε.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι η παραγόμενη υδροηλεκτρική ενέργεια E_Y για την περίπτωση των αντλιών μεταβλητών και σταθερών στροφών έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 6.6.2 και δίνεται στους Πίνακες 6.11 και 6.13 αντίστοιχα.

Το κέρδος από την πώληση υδροηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή πώλησης παραγωγής από υδροστροβίλους C_π του Πίνακα 7.1, δίνεται παρακάτω:

$$K_Y = C_\pi E_Y \quad (7.2)$$

Όπου:

- K_Y : το κέρδος από την υδροηλεκτρική παραγωγή (€).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, δίνεται στον Πίνακα 7.2 το κέρδος K_Y που προέκυψε από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής για κάθε σενάριο με βάση την (7.2) στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές.

Πίνακας 7.2: Κέρδος από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής (άντληση με σταθερές στροφές) χωρίς αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σενάρια	Υδροηλεκτρική παραγωγή $E_Y(MWh)$	Κέρδος $K_Y(€)$
A	2.0802	208.02
B	1.7447	174.47
Γ	1.7805	178.05
Δ	1.7896	178.96

Παρομοίως, στον Πίνακα 7.3 δίνεται το κέρδος K_Y που προέκυψε από την πώληση παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας για κάθε σενάριο, με βάση την (7.2) στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές που μελετήθηκε στην παράγραφο 6.5.2 και στην οποία θεωρήθηκε ότι λειτουργούσε όλο το αντλιοστάσιο, δηλαδή και οι οκτώ αντλίες σαν μία ισοδύναμη μεγαλύτερη.

Πίνακας 7.3: Κέρδος από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής (άντληση με μεταβλητές στροφές) χωρίς αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σενάρια	Υδροηλεκτρική παραγωγή $E_Y(MWh)$	Κέρδος $K_Y(€)$
A	3.0948	309.48
B	2.3841	238.41
Γ	2.6798	267.98
Δ	2.6801	268.01

Όπως φαίνεται στους Πίνακες 7.2, 7.3, η άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με την άντληση με σταθερές στροφές και αύξηση του κέρδους κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 40.2% μέχρι 54.5%. Αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, σημαντικό μέρος της αιολικής παραγωγής απορρίπτεται όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Αυτό είναι απόλυτα λογικό γιατί όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην άντληση με σταθερές στροφές η αιολική ισχύς απορροφάται κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος κάθε αντλίας και η ποσότητα της αιολικής ισχύος που περισσεύει αναγκαστικά πρέπει να απορριφθεί όταν δεν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Συνεπώς, οι αντλίες σταθερών στροφών παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση κόστους σε σχέση με τις αντλίες

μεταβλητών στροφών και το όφελος που προκύπτει από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι αναλογικά μικρότερο στις πρώτες.

Στην συνέχεια, δίνεται στον Πίνακα 7.4 το κέρδος K_Y που προέκυψε από την πώληση παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίστηκε στην παράγραφο 6.6.2 για την περίπτωση της άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μικρότερου αριθμού αντλιών.

Πίνακας 7.4: Κέρδος από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής (άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες) χωρίς αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σενάρια	Υδροηλεκτρική παραγωγή $E_Y(MWh)$	Κέρδος $K_Y(€)$
A	3.4229	342.29
B	2.6928	269.28
Γ	3.0136	301.36
Δ	3.0137	301.37

Όπως διαπιστώνεται από τον Πίνακα 7.4 και συγκρίνοντας με τον Πίνακα 7.3, το κέρδος στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία λιγότερων αντλιών αυξάνεται κατά ένα ποσοστό μεταξύ 10.6% και 13% σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και μιας ισοδύναμης μεγαλύτερης αντλίας. Αυτή η αύξηση οφείλεται στο ότι στην άντληση με μεταβλητές στροφές στην οποία χρησιμοποιείται μικρότερος αριθμός αντλιών παρατηρείται καλύτερος βαθμός απόδοσης σε σχέση με την περίπτωση όπου υπάρχει μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία, με αποτέλεσμα το σύστημα να παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση, να αντλείται μεγαλύτερος όγκος και κατ' επέκταση να αυξάνεται και η υδροηλεκτρική παραγωγή. Ακόμη, συγκρίνοντας τον Πίνακα 7.4 με τον Πίνακα 7.2 προκύπτει ότι η άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία πολλών μικρότερων αντλιών υπερτερεί έναντι της άντλησης με σταθερές στροφές. Αυτό φαίνεται αν συγκρίνουμε το κέρδος που δίνεται στον Πίνακα 7.2 και αφορά τη άντληση με σταθερές στροφές, με το κέρδος που δίνεται στον Πίνακα 7.4 αντίστοιχα, όπου παρατηρούμε βελτίωση του κέρδους κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 54.3 % μέχρι 69.2%. Αυτή η μεγάλη αύξηση κέρδους οφείλεται στο ότι στην άντληση με μεταβλητές στροφές επιτυγχάνεται πλήρης απορρόφηση της αιολικής ισχύος κάθε χρονική στιγμή. Ειδικότερα, όταν λειτουργούν πολλές μικρότερες αντλίες αντί μιας ισοδύναμης μεγαλύτερης το σύστημα παρουσιάζει ακόμη πιο βελτιωμένη απόδοση, όπως έχει αναφερθεί.

7.3 Υπολογισμοί με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση

7.3.1 Περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 6, στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες δεν απορροφάται πλήρως από τις

αντλίες που λειτουργούν παράλληλα γιατί λόγω των σταθερών στροφών η κατανάλωση τους είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ονομαστικής ισχύος των αντλιών, που στην περίπτωση μας επιλέχθηκε ίση με 250kW, όπως προαναφέρθηκε. Για να μην απορριφθεί λοιπόν η αιολική ενέργεια που περισσεύει, η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται έτσι ώστε να λειτουργήσει μία ακόμη αντλία κάθε χρονική στιγμή πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο.

Εφόσον είναι γνωστή η ολική ισχύς εξόδου $P_{o\lambda,i}$ των δύο ανεμογεννητριών για κάθε σενάριο από το Κεφάλαιο 6 και πιο συγκεκριμένα από την παράγραφο 6.4.2 και δεδομένου ότι στην παρούσα ανάλυση θεωρούνται αντλίες ονομαστικής ισχύος $P_N/8 = 250$ kW, υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή η αιολική ισχύς $P_{υπ,i}$ που περισσεύει και ο αριθμός των αντλιών κ_i που λειτουργούν παράλληλα μέσω των σχέσεων (6.48), (6.49) αντίστοιχα, οι οποίες προσδιορίστηκαν στην παράγραφο 6.5.3.

Για την περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές, η επιπλέον ισχύς $P_{E,i}$ που απαιτείται κάθε χρονική στιγμή για να λειτουργήσει μία ακόμη αντλία υπολογίζεται ως η διαφορά της ονομαστικής ισχύος κάθε αντλίας από την αιολική ισχύ που περισσεύει και δίνεται από την (6.48):

$$P_{E,i} = \frac{P_N}{8} - P_{υπ,i} \quad (7.3)$$

Όπου:

- $P_{E,i}$: η επιπλέον ισχύς που απαιτείται για να λειτουργήσει μία ακόμη αντλία κάθε χρονική στιγμή (kW).
- P_N : η ονομαστική ισχύς του αντλιοστασίου, που δίνεται στον Πίνακα 6.3.
- $P_{υπ,i}$: η αιολική ισχύς που περισσεύει κάθε χρονική στιγμή (kW) και δίνεται από την (6.48).

Το άθροισμα όλων των επιμέρους διαφορών δίνει την επιπλέον ενέργεια E_α (MWh) που πρέπει να αγοραστεί από το σύστημα έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή μία ακόμη αντλία να τεθεί σε λειτουργία και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς, όπως φαίνεται στην συνέχεια:

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^N P_{E,i} \Delta t = \sum_{i=1}^N \left[(\kappa_i + 1) \frac{P_N}{8} - P_{o\lambda,i} \right] \Delta t \quad (7.4)$$

Σημειώνεται ότι στην παρούσα μελέτη είναι $\Delta t = 1s$, άρα ο όρος Δt μπορεί να παραληφθεί στην (7.4).

Το κόστος αγοράς της επιπρόσθετης ενέργειας E_α (€) που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο για να λειτουργήσει μια ακόμη αντλία κάθε χρονική στιγμή προκύπτει με βάση την τιμή $C_{\alpha\gamma}$ που δόθηκε στον Πίνακα 7.1, όπως δίνεται παρακάτω:

$$K_\alpha = C_{\alpha\gamma} E_\alpha \quad (7.5)$$

Στην συνέχεια αναφέρουμε ότι θα ληφθεί υπόψη η διόρθωση της παροχής που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 6.5.3 για τον υπολογισμό του όγκου άντλησης και πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές διόρθωσης που δίνονται στον Πίνακα 6.6. Όπως έχει αναφερθεί, για λειτουργία όλου του αντλιοστασίου, ο συντελεστής διόρθωσης είναι μηδενικός. Επίσης, ο συντελεστής διόρθωσης δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της παροχής όταν είναι μικρότερος του 1% .

Η διορθωμένη παροχή στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές που εξετάζεται στην περίπτωση αυτή, στην οποία αγοράζεται η ενέργεια που απαιτείται για να ενταχθεί άλλη μια αντλία και να μην απορρίπτεται η αιολική ισχύς που περισσεύει, δίνεται παρακάτω:

$$Q_{\kappa,i}' = (\kappa_i + 1) \frac{Q_N}{8} (1 + \varepsilon_\kappa) \quad (7.6)$$

Όπου:

- $Q_{\kappa,i}'$: η συνολική παροχή από τις $\kappa_i + 1$ αντλίες που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή (m^3/s).
- Q_N : η ονομαστική παροχή του αντλιοστασίου, η οποία δίνεται στον Πίνακα 6.3.
- ε_κ : ο συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από τον Πίνακα 6.6 ανάλογα με τον αριθμό των αντλιών κ που λειτουργούν παράλληλα.

Ο αντίστοιχος όγκος άντλησης στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές στην οποία υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση προκύπτει ως εξής:

$$V_\sigma' = \int_1^T Q_{\kappa,i}'(t) dt = \sum_{i=1}^N Q_{\kappa,i}' \Delta t \quad (7.7)$$

Όμοια με πριν, επειδή $\Delta t = 1\text{s}$ ο όρος Δt παραλείπεται στο άθροισμα της (7.7).

Η ενέργεια που παράγεται από την υδροηλεκτρική μονάδα την επόμενη μέρα κατά τις ώρες αιχμής, για τον όγκο που υπολογίστηκε από την (7.7), λαμβάνοντας υπόψη την ένταξη μίας ακόμη αντλίας κάθε χρονική στιγμή, δίνεται από την (6.65) που έχει προσδιοριστεί στην παράγραφο 6.6.2 του Κεφαλαίου 6.

Στον Πίνακα 7.5 δίνεται η αιολική παραγωγή E , η αγορά της επιπρόσθετης ενέργειας E_α , ο νέος όγκος προς αποθήκευση V_σ' αλλά και η νέα υδροηλεκτρική παραγωγή E_γ μετά την ένταξη της επιπρόσθετης αντλίας για την περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Πίνακας 7.5: Υδροηλεκτρική παραγωγή με δυνατότητα αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση (άντληση με σταθερές στροφές).

Σενάρια	$E(MWh)$	$E_a(MWh)$	$V_{\sigma'}(m^3)$	$E_Y(MWh)$
A	5.4878	2.0747	3522.04	4.8379
B	4.3319	2.7066	3278.82	4.5039
Γ	4.8397	2.2532	3305.12	4.5400
Δ	4.8400	2.2668	3311.68	4.5490

Το κέρδος από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής υπολογίζεται από την (7.2) που προσδιορίστηκε στην παράγραφο 7.2 και το συνολικό κέρδος για την περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών μετά την ένταξη της επιπρόσθετης αντλίας κάθε χρονική στιγμή προκύπτει ως εξής:

$$K_{\Sigma} = K_Y - K_{\alpha} \quad (7.8)$$

Όπου:

- K_{Σ} : το συνολικό κέρδος για την περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (€).

Στον Πίνακα 7.6 δίνεται για κάθε σενάριο η επιπρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια E_a που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο για να ενταχθεί ακόμη μια αντλία κάθε χρονική στιγμή και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς, το αντίστοιχο κόστος αγοράς της K_{α} , η νέα υδροηλεκτρική παραγωγή E_Y , το κέρδος από την πώληση της νέας υδροηλεκτρικής παραγωγής K_Y και το συνολικό κέρδος K_{Σ} , για την περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Πίνακας 7.6: Κέρδος για άντληση με σταθερές στροφές και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σενάρια	$E_a(MWh)$	$K_{\alpha}(€)$	$E_Y(MWh)$	$K_Y(€)$	$K_{\Sigma}(€)$
A	2.0747	145.22	4.8379	483.79	338.57
B	2.7066	189.46	4.5039	450.39	260.93
Γ	2.2532	157.72	4.5400	454.00	296.28
Δ	2.2668	158.68	4.5490	454.90	296.22

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.6 και σε σύγκριση με τον Πίνακα 7.2, παρατηρείται μία αύξηση του κέρδους για την περίπτωση των αντλιών σταθερών στροφών, όταν υπάρχει δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση από το δίκτυο, που κυμαίνεται από 49.6 μέχρι 66.4%. Αυτή η αύξηση του κέρδους οφείλεται στο ότι δεν απορρίπτεται η αιολική ισχύς που περισσεύει.

7.3.2 Περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές

Όταν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές, όπως στην περίπτωση που μελετάται στην παράγραφο αυτή, επιλέγεται η λειτουργία να γίνεται με τις βέλτιστες στροφές n_{opt} που δίνονται από την (5.43) του Κεφαλαίου 5 και επιτρέπουν την άντληση συνεχώς με την βέλτιστη παροχή κάθε αντλίας Q_{opt}' που δίνεται παρακάτω:

$$Q_{opt}' = q_{opt} \frac{Q_N}{8} = 0.89 \times \frac{Q_N}{8} = 0.02808 m^3/s \quad (7.9)$$

Συνεπώς, όπως και στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, πάλι πρέπει να λειτουργεί ακέραιος αριθμός αντλιών κάθε χρονική στιγμή και η κατανάλωση της αντλίας πρέπει να αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο της βέλτιστης ισχύος άντλησης P_{opt}' που ισούται με:

$$P_{opt}' = P_{opt} \frac{P_N}{8} = 0.88 \times \frac{P_N}{8} = 220 kW \quad (7.10)$$

Σημειώνεται ότι η αμ βέλτιστη παροχή q_{opt} και η αμ βέλτιστη ισχύς άντλησης P_{opt} δίνονται από τις (5.44), (5.45) του Κεφαλαίου 5. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το Σχήμα 5.15 του Κεφαλαίου 5 και οι (5.44), (5.45) αναφέρονται σε λειτουργία όλου του αντλιοστασίου, δηλαδή σε λειτουργία και των οκτώ αντλιών. Παρολ' αυτά επειδή το Σχήμα 5.15 δίνεται σε αμ τιμές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για λειτουργία κ αντί οκτώ αντλιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.19 του Κεφαλαίου 6. Μπορούν λοιπόν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις για την αμ βέλτιστη παροχή και ισχύ άντλησης που προσδιοριστήκαν στο Κεφάλαιο 5 και στην παράγραφο αυτή, στην οποία ο αριθμός των αντλιών μεταβάλλεται.

Όμοια με την παράγραφο 7.3.1, θα εφαρμοσθεί ο ίδιος αλγόριθμος για τον υπολογισμό της επιπρόσθετης ενέργειας που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο, έτσι ώστε μία ακόμη αντλία να τεθεί σε λειτουργία κάθε χρονική, καθώς επίσης και για τον υπολογισμό του κέρδους που προκύπτει στην περίπτωση της άντλησης με βέλτιστες στροφές και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Εφόσον είναι γνωστή η ολική ισχύς εξόδου $P_{ολ,i}$ των δύο ανεμογεννητριών για κάθε σενάριο από την (6.35) και δεδομένου ότι στην παρούσα ανάλυση θεωρούνται διαθέσιμες αντλίες ονομαστικής ισχύος $P_N/8 = 250$ kW η κάθε μία, η αιολική ισχύς $P_{υπ,i}$ (kW) που περισσεύει κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται μέσω της (6.48) του Κεφαλαίου 6 με την μόνη διαφορά ότι η ονομαστική ισχύς κάθε αντλίας $P_N/8$ αντικαθίστανται από την βέλτιστη ισχύ άντλησης P_{opt}' , που δίνεται από την (7.10):

$$P_{υ,i} = mod\left[\frac{P_{ολ,i}}{P_{opt}'}\right] \quad (7.11)$$

Ο αριθμός των αντλιών κ που λειτουργούν παράλληλα κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται αντίστοιχα μέσω της (6.49), πάλι με αντικατάσταση της ονομαστικής ισχύος κάθε αντλίας $P_N/8$ με την βέλτιστη ισχύ άντλησης P_{opt}' , ως εξής:

$$\kappa_i = \frac{P_{ol,i} - P_{v,i}}{P_{opt}'} \quad (7.12)$$

Για την περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές, η επιπλέον ισχύς $P_{E,i}$ (kW) που απαιτείται κάθε χρονική στιγμή για να λειτουργήσει μία ακόμη αντλία με βέλτιστες στροφές υπολογίζεται ως η διαφορά της βέλτιστης ισχύος άντλησης που δίνεται από την (7.10) μείον την αιολική ισχύ που περισσεύει και δίνεται από την (7.11) όπως φαίνεται στην συνέχεια:

$$P_{E,i} = P_{opt}' - P_{v\pi,i} \quad (7.13)$$

Η επιπλέον ενέργεια E_α (MWh) που πρέπει να αγοραστεί από το σύστημα έτσι ώστε κάθε χρονική στιγμή μία ακόμη αντλία να τεθεί σε λειτουργία και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύ αποτελεί το άθροισμα όλων των επιμέρους διαφορών που δίνονται από την (7.13) και προκύπτει πάλι με αντικατάσταση της ονομαστικής ισχύος της αντλίας $P_N/8$ με την βέλτιστη ισχύ άντλησης P_{opt}' στην (7.4) όπως δίνεται παρακάτω:

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^N P_{E,i} \Delta t = \sum_{i=1}^N [(\kappa_i + 1)P_{opt}' - P_{ol,i}] \Delta t \quad (7.14)$$

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, στην παρούσα μελέτη είναι $\Delta t = 1s$ και ο όρος Δt μπορεί να παραληφθεί στην (7.14).

Με βάση την τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση C_{ay} που δίνεται στον Πίνακα 7.1, το κόστος αγοράς K_α της επιπρόσθετης ενέργειας E_α προκύπτει όπως δίνεται από την (7.5) της παραγράφου 7.3.1, όπου η επιπρόσθετη ενέργεια που απαιτείται να αγοραστεί από το σύστημα για να λειτουργεί μία ακόμη αντλία κάθε χρονική στιγμή και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς δίνεται από την (7.14).

Ο όγκος που προορίζεται για άντληση στην περίπτωση που μελετάται στην παράγραφο αυτή, δηλαδή στην άντληση με βέλτιστες στροφές, λαμβάνοντας υπόψη την βέλτιστη παροχή Q_{opt}' κάθε αντλίας που δίνεται από την (7.9), δίνεται παρακάτω:

$$V_{opt}' = \sum_{i=1}^N Q_{\kappa,i} \Delta t = \sum_{i=1}^N (\kappa_i + 1) Q_{opt}' \Delta t \quad (7.15)$$

Όπου:

- $Q_{\kappa,i}$: η παροχή μετά την ένταξη της νέας αντλίας κάθε χρονική στιγμή (m^3/s).

Επειδή στην παρούσα μελέτη $\Delta t=1s$, ο όρος Δt παραλείπεται στην (7.15).

Η ενέργεια που παράγεται από την υδροηλεκτρική μονάδα την επόμενη μέρα κατά τις ώρες αιχμής, για τον όγκο που υπολογίζεται από την (7.15) δίνεται από την (6.65) που προσδιορίστηκε στην παράγραφο 6.6.2 του Κεφαλαίου 6.

Στον Πίνακα 7.7 δίνεται η αιολική παραγωγή E , η αγορά της επιπρόσθετης ενέργειας E_α , ο νέος όγκος προς αποθήκευση V_{opt}' αλλά και η νέα υδροηλεκτρική παραγωγή E_Y μετά την ένταξη της επιπρόσθετης αντλίας για την περίπτωση της άντλησης με βέλτιστες στροφές και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Πίνακας 7.7: Υδροηλεκτρική παραγωγή με δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση (άντληση με βέλτιστες στροφές).

<i>Σενάρια</i>	<i>$E(MWh)$</i>	<i>$E_\alpha(MWh)$</i>	<i>$V_{opt}'(m^3)$</i>	<i>$E_Y(MWh)$</i>
<i>A</i>	5.4878	1.7892	3381.98	4.6456
<i>B</i>	4.3319	2.2827	3074.28	4.2229
<i>Γ</i>	4.8397	1.9864	3172.51	4.3579
<i>Δ</i>	4.8400	1.9696	3164.92	4.3474

Το κέρδος από την υδροηλεκτρική παραγωγή που υπολογίζεται μέσω της (6.65) υπολογίζεται από την (7.2) και το συνολικό κέρδος για την περίπτωση αντλιών μεταβλητών στροφών προκύπτει ως εξής:

$$K_M = K_Y - K_\alpha \quad (7.16)$$

Όπου:

- K_M : το συνολικό κέρδος για την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές (βέλτιστες) στροφές και αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (€).

Στον Πίνακα 7.8 δίνεται η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια E_α που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο για να ενταχθεί ακόμη μια αντλία κάθε χρονική στιγμή και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς, το αντίστοιχο κόστος αγοράς της K_α , η νέα υδροηλεκτρική παραγωγή E_Y , το κέρδος από την πώληση της νέας υδροηλεκτρικής παραγωγής K_Y και το συνολικό κέρδος K_M για την περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση.

Πίνακας 7.8: Κέρδος για άντληση με βέλτιστες στροφές και αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σενάρια	$E_a(MWh)$	$K_a(€)$	$E_r(MWh)$	$K_r(€)$	$K_M(€)$
<i>A</i>	1.7892	125.24	4.6456	464.56	339.32
<i>B</i>	2.2827	159.79	4.2229	422.29	262.50
<i>Γ</i>	1.9864	139.05	4.3579	435.79	296.74
<i>Δ</i>	1.9696	137.87	4.3474	434.74	296.87

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 7.3, 7.8, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία αύξηση του κέρδους που κυμαίνεται από 9.6% μέχρι 10.8%, στην περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές, λειτουργία λιγότερων αντλιών και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας. Επίσης, προέκυψε πως η άντληση με βέλτιστες στροφές έχει μικρότερο κέρδος σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών χωρίς δυνατότητα αγοράς, όπως προκύπτει αν συγκρίνουμε το κέρδος που προέκυψε στην παράγραφο αυτή και δίνεται στον Πίνακα 7.8 με το κέρδος που προέκυψε στον Πίνακα 7.4. Αυτό οφείλεται όπως έχουμε αναφέρει στο ότι όταν έχουμε λειτουργία μικρότερου αριθμού αντλιών μεταβλητών στροφών, οι αντλίες δουλεύουν πιο κοντά στον βέλτιστο βαθμό απόδοσης τους. Έτσι έχουν παραπλήσιο κέρδος με την περίπτωση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή όπως υποτέθηκε σε αυτό το Κεφάλαιο ισχύει η σχέση $\eta_{opt} < C_{ay}/C_{\pi}$. Ουσιαστικά, παρόλο που στην περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές παρατηρείται καλύτερος βαθμός απόδοσης, πρέπει να αγοραστεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια για να προκύψει κέρδος και το κέρδος αυτό προκύπτει μικρότερο σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με λιγότερες αντλίες χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι στην άντληση με μεταβλητές στροφές και μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών, χωρίς να δουλεύουμε στις βέλτιστες στροφές και χωρίς να αγοράζουμε ενέργεια, παρατηρείται μεγαλύτερο κέρδος και πλησιάζουμε στην βέλτιστη απόδοση.

Τέλος, σημειώνεται ότι η άντληση με μεταβλητές στροφές υπερτερεί έναντι της άντλησης με σταθερές στροφές κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται γύρω στο 1%, όπως προκύπτει συγκρίνοντας τα κέρδη που προέκυψαν στους Πίνακες 7.6, 7.8.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και προοπτικές

8.1 Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια εκτενής επισκόπηση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται, με ιδιαίτερη έμφαση στην αντλησιοταμίευση με αντλίες μεταβλητών και σταθερών στροφών. Επίσης, μελετήθηκε η αποθήκευση αιολικής ενέργειας μέσω ενός υβριδικού συστήματος αντλησιοταμιευτικού σταθμού με χρήση αντλιών σταθερών και μεταβλητών στροφών και έγινε μια ποσοτική σύγκριση των δύο τεχνολογιών αποθήκευσης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν διάφοροι υπολογισμοί που αφορούσαν την αιολική παραγωγή, λαμβάνοντας υπόψη τις διαθέσιμες ανεμογεννήτριες [32] και τις διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου [51], τον κύκλο άντλησης - παραγωγής του σταθμού αλλά και το οικονομικό όφελος που προκύπτει ανάλογα με το αν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση από το δίκτυο σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα αυτή.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφηκαν οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με ιδιαίτερη έμφαση στην ηλεκτροπαραγωγή από αιολική και υδραυλική ενέργεια, εξηγήθηκε η αναγκαιότητα της αποθήκευσης ενέργειας και περιγράφηκαν οι διάφορες διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 2 έγινε μια περιγραφή των υδροηλεκτρικών σταθμών και των υδροδυναμικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στην αντλησιοταμίευση και στην ηλεκτροπαραγωγή γενικότερα. Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρθηκαν αρχικά οι προκλήσεις με τις οποίες έρχονται αντιμέτωποι οι διαχειριστές των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στην συνέχεια, παρουσιάστηκε η τυπική δομή μιας ανεμογεννήτριας και ο τρόπος λειτουργίας της και έγινε μια κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών ανάλογα με την διεύθυνση του άξονα του δρομέα τους, το μέγεθος τους, την θέση εγκατάστασης τους, την ταχύτητα περιστροφής τους, την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους και τον τρόπο ελέγχου που χρησιμοποιούν. Στην συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4 αναλύθηκαν τα υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση και παρουσιάστηκε η λειτουργία ενός υβριδικού σταθμού καθώς και κάποιες εφαρμογές του. Ακόμη, έγινε μια εκτενής περιγραφή της τεχνολογικής προσέγγισης της αποθήκευσης με έμφαση στις περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές και σταθερές στροφές, οι οποίες άλλωστε εξετάστηκαν περαιτέρω στα Κεφάλαια 5, 6 και 7, στα οποία γίνεται μια ειδικότερη εφαρμογή σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις των αντλιών, και πιο συγκεκριμένα οι σχέσεις παροχής – στροφών και ισχύος – στροφών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

του Κεφαλαίου 6 για τον υπολογισμό της παροχής και του όγκου άντλησης για δεδομένη ηλεκτροπαραγωγή. Έπειτα, προσδιορίστηκε η ηλεκτροπαραγωγή μέσω του υδροηλεκτρικού σταθμού, λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί μέσω του διαθέσιμου αντλιοστασίου, αξιοποιώντας τη διαθέσιμη αιολική παραγωγή και τις διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου, τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για 4 διαφορετικά εξεταζόμενα σενάρια και τρεις διαφορετικές περιπτώσεις άντλησης: περίπτωση άντλησης με μεταβλητές, βέλτιστες και σταθερές στροφές. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 εξετάστηκε το οικονομικό όφελος που προκύπτει όταν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση σε σύγκριση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, για την περίπτωση άντλησης με σταθερές και μεταβλητές στροφές. Για κάθε εξεταζόμενο σενάριο και περίπτωση άντλησης υπολογίστηκε το κέρδος από την πώληση της παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας και για τις δύο περιπτώσεις.

Στην Ενότητα 8.2 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία αλλά και το οικονομικά οφέλη που προκύπτουν όταν υπάρχει η δυνατότητα να αγοραστεί η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια για άντληση από το δίκτυο. Τέλος, στην Ενότητα 8.3 συνοψίζονται οι προοπτικές για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης.

8.2 Συμπεράσματα

Όπως εξάγεται από τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 6, η άντληση με μεταβλητές στροφές συντελεί στην καλύτερη απορρόφηση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος και κατ' επέκταση στην αύξηση του διαθέσιμου όγκου αποθήκευσης σε σχέση με την άντληση με σταθερές στροφές. Αυτό οφείλεται στο ότι οι αντλίες μεταβλητών στροφών μπορούν να προσαρμόσουν την παραγωγή τους μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής τους και έτσι αποφεύγεται απόρριψη αιολικής ισχύος. Ακόμη, για την περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών προέκυψε ο βαθμός απόδοσης του κύκλου αρκετά μικρότερος σε σχέση με τις αντλίες μεταβλητών στροφών, όπως ήταν αναμενόμενο, γιατί μεγάλο ποσό της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής απορρίπτεται στην άντληση με σταθερές στροφές, αφού η ισχύς που καταναλώνεται από τις αντλίες αποτελεί ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της ισχύος κάθε μιας από αυτές με αποτέλεσμα η αιολική ισχύς που περισσεύει να πρέπει αναγκαστικά να απορριφθεί.

Όπως ήταν αναμενόμενο και προέκυψε από τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 7, η άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας παρουσιάζει μεγαλύτερο κέρδος σε σχέση με την άντληση με σταθερές στροφές όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών σημαντικό μέρος της αιολικής παραγωγής απορρίπτεται, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Συνεπώς, οι αντλίες σταθερών στροφών παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση κόστους

σε σχέση με τις αντλίες μεταβλητών στροφών και το όφελος που προκύπτει από την πώληση υδροηλεκτρικής παραγωγής είναι αναλογικά μικρότερο στις πρώτες. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές, το κέρδος αυξάνει όταν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση, όπως είναι αναμενόμενο, και αυτό οφείλεται στο ότι δεν παρατηρείται απόρριψη αιολικής ισχύος.

Ακολουθώντας, η άντληση με μεταβλητές στροφές και μικρότερο αριθμό αντλιών συντελεί σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του όγκου άντλησης και κατ' επέκταση της υδροηλεκτρικής παραγωγής και του βαθμού απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση αυτή κάθε χρονική στιγμή δεν δουλεύουν όλες οι αντλίες ταυτόχρονα αλλά ένας συγκεκριμένος αριθμός αντλιών ικανός να απορροφήσει την διαθέσιμη αιολική ισχύ και μία ακόμη αντλία έτσι ώστε να αποφεύγεται η απόρριψη αιολικής ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αντλίες να δουλεύουν πιο κοντά στον βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Επίσης, με την λειτουργία λιγότερων αντλιών αντί μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας παρατηρείται καλύτερη κλιμάκωση της απορροφούμενης ισχύος με κλίμακα τόσο περισσότερο απότομη, όσο μικρότερο είναι το πλήθος των εγκατεστημένων αντλιών.

Στη συνέχεια, διαπιστώνεται ότι το κέρδος στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία λιγότερων αντλιών αυξάνεται σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας ισοδύναμης μεγαλύτερης αντλίας. Αυτή η αύξηση οφείλεται στο ότι στην άντληση με μεταβλητές στροφές με λιγότερες αντλίες παρατηρείται καλύτερος βαθμός απόδοσης σε σχέση με την περίπτωση όπου υπάρχει μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία, με αποτέλεσμα το σύστημα να παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση, να αντλείται μεγαλύτερος όγκος και κατ' επέκταση να αυξάνεται και η υδροηλεκτρική παραγωγή, όπως άλλωστε έχει αναφερθεί. Όπως είναι προφανές, στην άντληση με μεταβλητές στροφές και λειτουργία πολλών μικρότερων αντλιών παρατηρείται αυξημένο κέρδος σε σχέση με τη άντληση με σταθερές στροφές. Αυτή η αύξηση του κέρδους οφείλεται στο ότι στην άντληση με μεταβλητές στροφές επιτυγχάνεται πλήρης απορρόφηση της αιολικής ισχύος κάθε χρονική στιγμή και ειδικότερα όταν λειτουργούν πολλές μικρότερες αντλίες αντί μιας ισοδύναμης μεγαλύτερης αντλίας το σύστημα παρουσιάζει ακόμη πιο βελτιωμένη απόδοση κέρδους.

Ακολουθώντας, σημειώνεται ότι για όλα τα σενάρια (Α-Δ) που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, ο βαθμός απόδοσης που υπολογίστηκε για την άντληση με βέλτιστες στροφές προέκυψε ίσος με 63.11% και μάλιστα μεγαλύτερος από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής της Ενότητας 6.6.3, ο οποίος ισούται με 62.4%. Αυτό είναι απόλυτα λογικό αφού όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση της άντλησης με βέλτιστες στροφές επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της διαθέσιμης τεχνολογίας (μεγαλύτερο όγκος άντλησης) και αναλογικά μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή από τον υδροηλεκτρικό σταθμό και βαθμός απόδοσης του κύκλου.

Επίσης, διαπιστώνεται πως στην άντληση με βέλτιστες στροφές και δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση υπάρχει αύξηση του κέρδους σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας μεγαλύτερης ισοδύναμης αντλίας χωρίς δυνατότητα αγοράς. Αντίθετα, για την άντληση με βέλτιστες στροφές παρατηρείται μικρότερο κέρδος σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με λιγότερες αντλίες χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση. Αυτό οφείλεται όπως έχει αναφερθεί στο ότι όταν έχουμε λειτουργία μικρότερου αριθμού αντλιών μεταβλητών στροφών, οι αντλίες δουλεύουν πολύ κοντά στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης. Ουσιαστικά, παρόλο που στην περίπτωση άντλησης με βέλτιστες στροφές παρατηρείται καλύτερος βαθμός απόδοσης, πρέπει να αγοραστεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια για να προκύψει κέρδος και το κέρδος αυτό προκύπτει μικρότερο σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με λιγότερες αντλίες χωρίς δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι με την άντληση με μεταβλητές στροφές και μεταβαλλόμενο αριθμό αντλιών, χωρίς να δουλεύουμε στις βέλτιστες στροφές και χωρίς να αγοράζουμε ενέργεια, έχουμε μεγαλύτερο κέρδος και πλησιάζουμε στην βέλτιστη απόδοση.

Συνεχίζοντας, στο Κεφάλαιο 6 ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής στην άντληση με μεταβλητές στροφές όταν λειτουργούσε μία ισοδύναμη αντλία αντί για πολλές μικρότερες δεν προέκυψε σε καμία περίπτωση ίσος με τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή 62.4%. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: Πρώτον, στο γεγονός ότι με τις χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου που υπήρχαν διαθέσιμες, λαμβάνονταν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη ηλεκτροπαραγωγή τους να είναι αναλογικά μικρότερη, όπως άλλωστε προκύπτει από τις καμπύλες ισχύος των δύο ανεμογεννητριών. Δεύτερον, στην περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές που λειτουργεί όλο το αντλιοστάσιο, οι αντλίες εργάζονται με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης απ' ότι στην περίπτωση λιγότερων αντλιών μεταβλητών στροφών. Για τους δύο αυτούς λόγους, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής προέκυψε μικρότερος από τον ονομαστικό στην άντληση με μεταβλητές στροφές στην οποία λειτουργούσε μια ισοδύναμη μεγαλύτερη αντλία και κυμαίνονταν από 55.03% μέχρι 56.39% για όλα τα σενάρια ενώ για την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες προέκυψε μεταξύ 62.16% – 62.37%, πολύ κοντά δηλαδή στον ονομαστικό βαθμό απόδοσης.

Χαρακτηριστικό είναι επίσης ότι σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης (μεταβλητές, σταθερές, βέλτιστες στροφές) τα σενάρια Γ, Δ είχαν πολύ κοντινούς βαθμούς απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου ΧΣ1, ΧΣ2 είχαν αρκετά κοντινές τιμές και κατ' επέκταση οι ανεμογεννήτριες έδιναν παραπλήσια αιολική παραγωγή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το σενάριο Α είχε τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης κύκλου από όλα τα σενάρια για όλες τις περιπτώσεις άντλησης με μεταβλητές στροφές. Αυτό ερμηνεύεται ως εξής: στο σενάριο Α συμμετέχουν δύο ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις

ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών που συμμετέχουν στο σενάριο Β. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο σενάριο Α να είναι μεγαλύτερη η διαθέσιμη αιολική παραγωγή και αναλογικά μεγαλύτερη και η ισχύς που αντλείται. Αντίστοιχα μεγαλύτερη προκύπτει και η ηλεκτροπαραγωγή εφόσον γίνεται πλήρης απορρόφηση της αιολικής ισχύος στην άντλησης με μεταβλητές στροφές και δεν απορρίπτεται αιολική ισχύς. Για το σενάριο Β από την άλλη, ο καλύτερος βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης – παραγωγής σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια προέκυψε στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι στην περίπτωση του σεναρίου Α απορρίπτεται μεγαλύτερο ποσό αιολικής ενέργειας άρα προκύπτει μικρότερη ενέργεια που προορίζεται για άντληση και άρα μικρότερος βαθμός απόδοσης κύκλου άντλησης - παραγωγής. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στην επιλογή της ονομαστικής ισχύος των αντλιών. Ενδεχομένως με επιλογή μιας αντλίας άλλης ονομαστικής ισχύος, να επιτυγχάνονταν μεγαλύτερη άντληση στο σενάριο Α σε σχέση με το σενάριο Β.

Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι η άντληση με μεταβλητές στροφές και μικρότερο αριθμό αντλιών παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση και αυξημένο κέρδος σε σχέση με την περίπτωση άντλησης με μεταβλητές στροφές και λειτουργία μιας ισοδύναμης μεγαλύτερης αντλίας και μάλιστα απόδοση και κέρδος που πλησιάζουν τις τιμές της άντλησης με βέλτιστες στροφές. Επίσης, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, η άντληση με μεταβλητές στροφές υπερτερεί έναντι της άντλησης με σταθερές στροφές για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία.

8.3 Προοπτικές για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την άντληση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν ξεχωριστά συγκροτήματα αντλιοστασίου και υδροηλεκτρικού σταθμού αντίστοιχα. Αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής μελέτης θα μπορούσε να αποτελέσει η χρήση μιας στροβιλοαντλίας στον αντλησιοταμιευτικό σταθμό, η οποία αποτελεί αναστρέψιμη υδραυλική μηχανή και αλλάζοντας την φορά περιστροφής της εναλλάσσει την λειτουργία παραγωγής και άντλησης.

Επίσης, ένα θέμα προς μελλοντική διερεύνηση αναφορικά με την άντληση με μεταβλητές στροφές και λιγότερες αντλίες που εξετάστηκε στην παράγραφο 6.5.4, θα μπορούσε να αποτελέσει ο υπολογισμός του νέου όγκου άντλησης λαμβάνοντας υπόψη την διορθωμένη παροχή με όμοια διαδικασία με αυτή που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 6 και πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο 6.5.3. Η τομή της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης με την χαρακτηριστική της αντλίας για δεδομένες στροφές αποτελεί το σημείο λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5. Στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών, η χαρακτηριστική της αντλίας παραμένει ίδια όταν αλλάζει ο αριθμός των αντλιών γιατί στην περίπτωση αυτή οι αντλίες εργάζονται με τις ονομαστικές στροφές κάθε χρονική στιγμή. Η μεταβολή του αριθμού των αντλιών δεν μεταβάλλει λοιπόν την

χαρακτηριστική της αντλίας στην περίπτωση αντλιών σταθερών στροφών αλλά μόνο τα ονομαστικά μεγέθη της εγκατάστασης ανάλογα με τον αριθμό των αντλιών που λειτουργούν. Μεταβάλλεται ωστόσο η χαρακτηριστική της σωλήνωσης αφού ο αριθμός των αντλιών, οι οποίες καταλήγουν στον ίδιο αγωγό κατάθλιψης, επηρεάζει τις υδραυλικές απώλειες και το αμολικό ύψος. Αντίθετα, όταν έχουμε αντλίες μεταβλητών στροφών, κάθε χρονική στιγμή η ταχύτητα περιστροφής τους αλλάζει, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται εκτός από την χαρακτηριστική της σωλήνωσης και η χαρακτηριστική της αντλίας. Αν λοιπόν υπάρχουν διαθέσιμες οι χαρακτηριστικές της αντλίας και για ενδιάμεσες στροφές ή ενδεχομένως αν μπορούν να προσδιοριστούν, θα μπορούσε κάθε χρονική στιγμή να προσδιοριστεί η νέα χαρακτηριστική σωλήνωσης και η νέα χαρακτηριστική της αντλίας που αντιστοιχεί στην σωστή ταχύτητα περιστροφής και κατ' επέκταση το νέο σημείο τομής τους, το οποίο προσδιορίζει την διορθωμένη παροχή κάθε χρονική στιγμή. Συνοψίζοντας, μια πιθανή προοπτική είναι να προσδιοριστούν οι καμπύλες ολικού ύψους στροφών ή η αντίστοιχη σχέση τους για όλες τις πιθανές ταχύτητες περιστροφής έτσι ώστε να μπορεί να προσδιορίζεται το νέο σημείο λειτουργίας κάθε χρονική στιγμή, το οποίο δίνει την διορθωμένη παροχή. Το άθροισμα όλων αυτών των ενδιάμεσων παροχών δίνει τον ζητούμενο όγκο άντλησης για δεδομένη ηλεκτροπαραγωγή. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και διόρθωση της ισχύος που καταναλώνουν οι αντλίες, πράγμα το οποίο στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν αναλύθηκε.

Ακόμη, αναφέρουμε πως θα μπορούσε να επιλεγθεί αντλιοστάσιο με διαφορετικό αριθμό αντλιών και κατ' επέκταση διαφορετική ονομαστική ισχύ κάθε αντλίας έτσι ώστε να εξεταστεί κατά πόσο στην περίπτωση άντλησης με σταθερές στροφές απορρίπτεται μικρότερο ποσό αιολικής ενέργειας. Επίσης, θα μπορούσε να επιλεγθεί ένας τυποποιημένος υδροστρόβιλος του εμπορίου, ενδεχομένως με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή 89%, με στόχο την αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον υδροηλεκτρικό σταθμό και κατ' επέκταση την αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής.

Τέλος, αναφέρουμε ότι στο Κεφάλαιο 7 θεωρήθηκε ότι η άντληση γίνεται συνεχώς στην χαμηλή τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή στο χαμηλό φορτίο και πιο συγκεκριμένα τις νυχτερινές ώρες ή τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί υπολογισμός της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση ανά ώρα σύμφωνα με διαθέσιμες καμπύλες κόστους που υπάρχουν και έτσι για κάθε ώρα να προκύπτει η νέα τιμή αγοράς ανάλογα με την απαιτούμενη ενέργεια που απαιτείται να αγοραστεί από το δίκτυο για να ενταχθεί μία αντλία ακόμη και να μην απορρίπτεται αιολική ισχύς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, τόμος 1, “Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1985.
- [3] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας - Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
- [4] Δ. Παπαντώνης, “Τεχνολογικές επιλογές και τεχνολογικοί περιορισμοί του εξοπλισμού της Μονάδας Αντλησιοταμίευσης Υβριδικών Σταθμών Παραγωγής”, Τεχνολογίες και εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Κρήτη, ΤΕΕ & ΤΕΕ – Τμ. Δυτικής Κρήτης, 22 – 23 Μαΐου 2009, Χανιά.
- [5] Δ. Κουτσογιάννης, “Σημειώσεις για το Μάθημα διαχείριση Υδάτινων Πόρων”, Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
- [6] C. Bueno, J. A. Carta, “Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, No. 4 (2006) : 312-340.
- [7] J. Makansi, “Energy Storage, The Sixth Dimension of the Electricity Production and Delivery Value Chain”, Energy Storage Council, San Francisco 2004.
- [8] Α. Σαγάνη, “ Η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας – Μέθοδοι αποθήκευσης και εφαρμογές”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2009.
- [9] Δ. Ε. Παπαντώνης, “Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα”, Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα 2008.
- [10] Μιχ. Π. Παπαδόπουλου, “Παραγωγή Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [11] Wind in power, “2012 European Statistics”, EWEA, February 2013.

- [12] ΚΑΠΕ, “Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”, Αθήνα 2001.
- [13] Ι. Γ. Αργυράκης, “Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί της ΔΕΗ Α.Ε. και η συμβολή τους στην κάλυψη των Ενεργειακών Αναγκών της Χώρας”, Αθήνα 2006.
- [14] Ν. Μαμάσης, Ι. Στεφανάκος, “Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία: Υδροηλεκτρική ενέργεια”, Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- [15] Κ. Στεφανάκης, “Μελέτη αντλησιοταμίευσης για εξοικονόμηση καυσίμου στο ενεργειακό σύστημα της Κρήτης”, Διπλωματική Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, ΕΜΠ, Ηράκλειο 2005.
- [16] American Hellenic Enterprise Initiative, “Υδροηλεκτρική Ενέργεια”, 2010.
(available from: ahei.amcham.gr/?page_id=703)
- [17] Δ. Ε. Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες – Υδροστρόβιλοι Υδροδυναμικές Μεταδόσεις”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009.
- [18] European Small Hydropower Association, “Guide on how to Develop a Small Hydropower Plant”, 2004.
- [19] Σ. Φραγκόπουλος, “Ιστορία της Τεχνολογίας με παρεκβάσεις σε συνεχή γεγονότα που επηρέασαν την επιστήμη και τον πολιτισμό”, Αθήνα 2007.
- [20] CONVERTEAM, The Power Conversion Company, “Variable Speed Hydro Machinery – a new beginning”, MPG, September 2011.
- [21] J. R. Wilhelmi, J. Fraile-Ardanuy, J. J. Fraile-Mora, J. I. Perez, “Variable Speed Hydro Generation: Operational Aspects and Control”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, no. 2, p.p. 569-574, June 2006.
- [22] ΚΑΠΕ, “Εγχειρίδιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για δυνητικούς χρήστες”, Αθήνα 2006.
- [23] Γ. Τριανταφύλλης, “Η ανάπτυξη του Ελληνικού Υδροδυναμικού και η τεχνογνωσία της ΔΕΗ Α.Ε.”, EnergyTec 2006, Αθήνα 23-26 Νοεμβρίου 2006.
- [24] J. A. Suul, “Variable speed pumped storage hydropower plants for integration of wind power in isolated power systems”, Norwegian University of Science and Technology, Norway 2006.

[25] J. K. Kaldellis, D. Zafirakis, K. Kavadias, “Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13 (2009) : 378-392.

[26] D. Altinbilek, R. Abdel - Malek, J-M. Devernay, R. Gill, S. Leney, T. Moss, H. P. Schiffer, R. M. Taylor, “Hydropower’s Contribution to Energy Security”, *World Energy Congress*, Rome 2007.

[27] Δ. Παπαντώνης, Ι. Αναγνωστόπουλος, Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Παπαθανασίου, Ε. Καραμάνου, Σ. Παπαευθυμίου, “Διερεύνηση τεχνικών και οικονομικών ζητημάτων ένταξης Υβριδικών Σταθμών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά”, Αθήνα 2008.

[28] Α. Νεσιάδης, “Προσομοίωση διαδοχικής εκκίνησης αντλιών”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.

[29] Ζ. Μαντάς, Π. Θεοδωρόπουλος, Γ. Μπέτζιος, Α. Ζερβός, “Υβριδικό σύστημα με χρήση Αντλησιοταμίευσης για μέγιστη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στη νήσο Σέριφο”, Μάιος 2010.

[30] Ι. Κ. Καλδέλλης, “Διαχείριση της αιολικής ενέργειας”, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2005.

[31] Γ. Τσουράκης, “Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.

[32] Σ. Παπαθανασίου, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων”, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.

[33] Γ. Κατσιγιάννης, “Ανεμογεννήτριες - Σημειώσεις Εργαστηρίου Ήπιων μορφών ενέργειας Ι”, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2012.

[34] H. Slootweg, E. de Vries, “Fixed Vs Variable”, *Renewable Energy World*, Jan-Feb 2003.

[35] Γ. Κατσιγιάννης, “Άνεμος - Σημειώσεις Εργαστηρίου Ήπιων μορφών ενέργειας ΙΙ”, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, 2012.

[36] Μ. Γερανάκη, “Μελέτη της επίδρασης συστήματος αντλησιοταμίευσης στην δυναμική ασφάλεια του ΣΗΕ της Ικαρίας”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα 2009.

[37] Ενεργειακό Γραφείο Ίου - Αιγαίου, “Ενημερωτικό δελτίο”, Ιούνιος 2009.

[38] Β. Κρούσκα, “Προσομοίωση συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας με χρήση θαλασσινού νερού”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Νοέμβριος 2011.

[39] ΤΕΙ Κρήτης, “Η Αντλησιοταμίευση”, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, Ιούλιος 2009(available from: www.wel.teiher.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=80&lang=el)

[40] Σ. Παπαευθυμίου Ε. Καραμάνου, Σ. Παπαθανασίου, Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Ροντήρης, Ι. Δρυμωνίτης, “Αρχές Διαχείρισης Υβριδικών Σταθμών: Εφαρμογή στο Σύστημα της Ικαρίας”, Πρακτικά Συνόδου της Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, Δεκέμβριος 2009.

[41] Ε. Βρεττός, “Ενεργειακή προσομοίωση και βέλτιστη διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών –Υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2010.

[42] G.D. Ciocan, O. Teller, F. Czerwinski, “Variable speed pump turbines technology”, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 74, Iss. 1, pp. 33-42, 2012.

[43] T. Kuwabara, A. Shibuya, H. Furuta, E. Kita, K. Mitsuhashi, “Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for Ohkawachi power station”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996.

[44] M. Johar, A. Radan , M. R. Miveh, S. Mirsaeidi, “Comparison of DFIG and Synchronous Machine for Storage Hydro-Power Generation”, Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., pp. 48-58, 2011.

[45] Steve Aubert, “Power on tap - A pumped storage solution to meet energy and tariff demands”, ABB review, p.p. 26-31, 2011.

- [46] C. Nicolet, Y. Pannatier, B. Kawkabani, A. Schwery, F. Avellan, J.-J. Simond, “Benefits of variable speed pumped storage units in mixed island power network during transient operation”, HYDRO 2009, 16th annual Hydro Conference, Lyon, France, October 26-28, 2009.
- [47] G. P. Izquierdo, “El Hierro, 100% RES island, Wind-hydro power system Integration of renewable energy sources”, Spain 2005.
- [48] C. Marín, L. M. Alves, A. Zervos, “100% RES: A challenge for Island Sustainable Development”, 2005.
- [49] G. P. Izquierdo, “Renewable Energies in the Canary Islands: Present and Future”, European RE Islands Conference, Brussels, 21 September 2005.
- [50] J. M. Merino, A. Lopez, “Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant”, ABB review 3, p.p. 33-38, 1996.
- [51] Ν. Χατζηαργυρίου (Επιστ. Υπεύθυνος), Ερευνητικό Έργο, “Ανάλυση Ευστάθειας Διασυνδεδεμένου Συστήματος υπό μεγάλη Αιολική Διείσδυση και Αξιολόγηση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Ανεμογεννητριών σε βυθίσεις τάσεως”, Κεφάλαιο 5, “Επίδραση μεταβλητότητας ανέμου”, Ε.Μ.Π., Τελική Έκθεση, Αθήνα 2007.
- [52] Ι. Κανδηλώρος, “Χρήση Αεροφυλακίου σε Αεριοστροβιλικές Μονάδες για Ρύθμιση Συχνότητας και Αποθήκευση Ενέργειας σε Ηλεκτρικά Συστήματα με Μεγάλη Αιολική Διείσδυση – Εφαρμογή στο Αυτόνομο Σύστημα της Ρόδου”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα Νοέμβριος 2012.