



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
“ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ  
ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟΥ  
ΑΕΡΑ”

Σπουδαστής: Οικονομόπουλος Γεώργιος  
Επιβλέπων καθηγητής: Πολυζάκης Απόστολος

ΠΑΤΡΑ 2022

## Περίληψη

Στο Κεφάλαιο 1 εξηγείται η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση και περιγράφονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης περιγράφονται εν συντομία τρόποι και διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης και αναλύονται με σύντομο τρόπο τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται εκτενώς η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης. Αναλύονται οι διατάξεις των σταθμών αντλησιοταμίευσης, δηλαδή υδροστρόβιλοι, αντλίες, φράγματα και εξηγείται η λειτουργία τους.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η λειτουργία των σταθμών αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, τα είδη των σταθμών και οι βασικές αρχές λειτουργίας του κάθε είδους σταθμού, οι βασικές διατάξεις λειτουργίας όπως οι συμπιεστές και οι στρόβιλοι και ανάλυση των δεξαμενών αποθήκευσης αέρα, με παραδείγματα.

Στο κεφάλαιο 4 δίνεται μία περιγραφή των εργαλείων υπολογισμού των οικονομικών θεμάτων των έργων αυτού του τύπου, καθώς υπάρχει και παράδειγμα διαστασιολόγησης. Γίνεται σύγκριση των μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας, ενώ κλείνει το κεφάλαιο με πρόταση για τον ελλαδικό χώρο.

## Summary

Chapter 1 explains the need for energy storage and describes renewable energy sources. Energy storage modes and devices are also briefly described and hybrid energy systems are briefly analyzed.

Chapter 2 discusses the pumping storage method in detail. The provisions of the pumping stations, water turbines, pumps and dams are analyzed and their operation is explained.

Chapter 3 describes the operation of compressed air storage stations, the halves of the stations and the basic operating principles of each type of station, the basic operating arrangements such as compressors and turbines and analysis of caverns with examples.

Chapter 4 gives a description of the tools for calculating the financial issues of the project as there is also an example of dimensioning. The two methods of energy storage are compared while the chapter closes with a proposal for the Greek area.

## Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	3
Κεφάλαιο 1 .....	4
1.1 Η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση .....	4
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	5
1.3 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης .....	7
1.4 Υβριδικά ενεργειακά συστήματα .....	13
Κεφάλαιο 2 .....	16
2.1 Η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης .....	16
2.2 Υδροστρόβιλοι .....	22
2.3 Αντλίες .....	31
2.4 Φράγματα .....	34
Κεφάλαιο 3 .....	41
3.1 Η μέθοδος της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα .....	41
3.2 Συμπιεστές .....	50
3.3 Αεριοστρόβιλοι .....	52
3.4 Δεξαμενές αποθήκευσης αέρα .....	57
Κεφάλαιο 4 .....	60
4.1 Οικονομοτεχνικά .....	60
4.2 Σύγκριση των συστημάτων αντλησιοταμίευσης με τα CAES και λοιπών διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας .....	64
4.3 Η πρόταση για τον Ελλαδικό χώρο .....	68
Βιβλιογραφία .....	72

## Εισαγωγή

Είναι ευρέως γνωστό στις μέρες μας ότι οι απαιτήσεις για ενέργεια αυξάνονται συνεχώς. Η κλιματική αλλαγή μας έχει ωθήσει να στραφούμε σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας (Φ/Β συστήματα, ανεμογεννήτριες) έναντι των καθιερωμένων (Λιγνιτικές μονάδες, ΜΕΚ). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οικονομικές επιπτώσεις, καθώς και μία σειρά προβλημάτων όπου καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν μας εξασφαλίζουν σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με την τελευταία να αποθηκεύεται με δυσκολία και μεγάλο κόστος (μπαταρίες, υπερπυκνωτές), έτσι προκύπτει η ανάγκη για περαιτέρω τρόπους αποθήκευσης της ενέργειας. Έχοντας υπ' όψιν ότι οι ανάγκες του δικτύου δεν είναι όλες τις μέρες και ώρες το ίδιο, η αποθήκευση της ενέργειας θα διευκολύνει τα προβλήματα στο δίκτυο όταν υπάρχει υπερκατανάλωση απελευθερώνοντας την ενέργεια όταν την χρειαστούμε. Οι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας είναι αρκετοί και θα αναφερθούν ονομαστικά παρακάτω, ωστόσο εκτενέστερη ανάλυση θα γίνει για τα συστήματα που χρησιμοποιούν την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης και την μέθοδο του πεπιεσμένου αέρα. Η ενεργειακή κρίση που προέκυψε το 2022 από τον πόλεμο της Ρωσίας και της Ουκρανίας λόγω του περιορισμού του φυσικού αερίου και την αύξηση των τιμών σε όλες τις πρώτες ύλες και τα καύσιμα, μας δείχνει πόσο σημαντικό είναι για την οικονομική σταθερότητα η δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Είναι κάπως ειρωνικό αν σκεφτεί κάποιος την κατανάλωση ενός νοικοκυριού πριν από 20 με 30 χρόνια όπου ήταν πολύ μεγαλύτερη από την σημερινή, τα τελευταία χρόνια να αντιμετωπίζουμε ένα σωρό προβλήματα για την εξοικονόμηση και αποθήκευση της ενέργειας. Ως μηχανικοί έχουμε μία νέα εποχή καινοτομιών μπροστά μας και είναι χρέος μας στην επιστήμη μας και στον πλανήτη να ξεπεράσουμε τις προκλήσεις, τους έως τώρα περιορισμούς και να βοηθήσουμε για έναν καλύτερο κόσμο για τις επόμενες γενιές.

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς μια βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας. Η χώρα μας είναι προνομιούχα σε αυτό το πεδίο, λόγω της παρουσίας ανανεώσιμων πηγών (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) σε όλη την Επικράτεια και ιδιαίτερα στα νησιά της. Ωστόσο, η παραγόμενη ενέργεια από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αναντιστοιχία αυτή σημαίνει ότι η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις. 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. Εντούτοις, η ανάγκη αυτή θα μεγαλώσει στο μέλλον σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ. [3][4][12]

Στα αυτόνομα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ελπιδοφόρα ΑΠΕ για την ηλεκτροπαραγωγή. Η παραγόμενη όμως ενέργεια από τις αιολικές μηχανές και τα Φ/Β εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, δεδομένου ότι βασίζεται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ., ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία). Επομένως, σε τέτοια συστήματα η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμοποίησή της όταν υφίσταται έλλειμμα από ΑΠΕ (π.χ., σε περίπτωση άπνοιας, ή κατά τη διάρκεια της νύχτας). Μάλιστα, για την αύξηση της απόδοσης τέτοιων συστημάτων, η μονάδα αποθήκευσης συνδέεται με τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα, δηλαδή συστήματα τα οποία διαχειρίζονται περισσότερες της μίας μορφής ενέργεια. [3][52]

Στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση ανακύπτει από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών ισχύος. Σε τέτοια συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης προσθέτει αξία στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές, διευκολύνοντας τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση. Τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την ενεργειακή αποθήκευση είναι τα ακόλουθα:

Σε συνδυασμό με την ανανεώσιμη πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα Φ/Β και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την τροφοδοσία 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 διακοπτόμενων 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. [1][35][52]

Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει επίσης έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο 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 αυξήσουν τη χρησιμοποίηση του

υπάρχοντος εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής (M&Δ), μετατοπίζοντας ή εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για δαπανηρές προσθήκες M&Δ. [1][52]

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. Μεταξύ των ειδικών οφελών για τη μεταφορά και διανομή είναι η ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, η ρύθμιση της τάσης ώστε να μην ξεφεύγει από το 5% της καθορισμένης τιμής, και η αναβολή της κατασκευής ή αναβάθμισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών. Καθώς εξελίσσεται η αναδόμηση του συστήματος, μπορούν να ανακύψουν ευκαιρίες για τους χειριστές των ανεξάρτητων συστημάτων προκειμένου να εφαρμόσουν την αποθήκευση για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των περιφερειακών φορτίων. [35][36][52][59]

Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες ως μια επιλογή ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρος της ζήτησης, που επίσης μπορεί να παράσχει ανταποδοτικές υπηρεσίες, περιλαμβανομένων της ποιότητας ισχύος σε βυθίσεις ή κυματισμούς που διαρκούν λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα, της αδιάλειπτης τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα σε διακοπές λειτουργίας που διαρκούν για περίπου δέκα λεπτά, και τη μείωση της ζήτησης αιχμής ώστε να μειωθούν οι λογαριασμοί του ηλεκτρισμού. [52][59]

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

### Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά

Ηλιακή ενέργεια όπως αναφέρει και το όνομα της, είναι η ενέργεια που προέρχεται από την ακτινοβολία του ηλίου, αξιοποιείται η θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ηλίου με χρήση μηχανικών μέσων για την συλλογή, αποθήκευση και την διανομή της ενέργεια του.

Τα ποσά ηλιακής ενέργειας που φτάνουν στην επιφάνεια της γης εξαρτώνται από δύο βασικούς παράγοντες, το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής και τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτή. Δυο συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας είναι τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. [48][55]

### Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

Είναι εκείνα τα συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στην συνέχεια την μετατρέπουν σε μορφή θερμότητας, η οποία προσδίδεται σε ρευστά όπως το νερό, στον αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό μέσο. Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή ενός ενεργητικού συστήματος είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, γνωστό σε εμάς ως ηλιακός θερμοσίφωνας.

Ένα ενεργητικό ηλιακό σύστημα αποτελείται από τον ηλιακό συλλέκτη, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στην επίπεδη μαύρη επιφάνεια του συλλέκτη, κάτω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα συνήθως από γυαλί ή πλαστικό, που αφήνει τις ακτίνες να περάσουν, παγιδεύοντας όμως την θερμική τους ενέργεια. Οι τοποθετημένοι σωληνώσεις που έρχονται σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, απάγουν μέσω της κυκλοφορίας ρευστού που ρέει στο εσωτερικό τους, την εγκλωβισμένη θερμική ενέργεια η οποία στην συνέχεια μεταφέρεται στον τόπο που θα αποθηκευτεί ή θα καταναλωθεί. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται εκτός από το ζεστό νερό χρήσης ενός σπιτιού και για άλλες εφαρμογές όπως:

- Υποβοήθηση ενδοδαπέδιας θέρμανσης
- Θέρμανση πισίνας
- Συνδυαζόμενες εφαρμογές ηλιοθερμίας
- Ηλιοθερμία για μεγάλα κτίρια (ξενοδοχεία)

### Υποβοήθηση ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Η ενδοδαπέδια θέρμανση χώρου αποτελεί τον πλέον σύγχρονο και αποδοτικό τρόπο θέρμανσης σε κατοικίες και επαγγελματικούς χώρους. Το ζεστό νερό από το λέβητα ή την αντλία θερμότητας, κυκλοφορεί σε ειδικούς σωλήνες εγκιβωτισμένους στο δάπεδο και η θέρμανση εκπέμπεται μέσω ακτινοβολίας. Η θέρμανση διαχέεται στο χώρο ομοιόμορφα προσδίδοντας αίσθηση θαλπωρής. Το

σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες από 30 έως 45 βαθμούς Κελσίου, μειώνοντας δραστικά το κόστος λειτουργίας. Το χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας της ενδοδαπέδιας, την καθιστά απολύτως συμβατή και συνδέσιμη με τα ηλιακά θερμικά συστήματα. Συνεπώς όταν συνδέεται το σύστημα της ενδοδαπέδιας με ένα ηλιακό θερμικό σύστημα, επιτυγχάνεται πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά σε χώρες ή περιοχές όπου η ηλιοφάνεια είναι παρούσα και κατά τους μήνες του χειμώνα.

#### Θέρμανση πισίνας

Οι περισσότερες κολυμβητικές δεξαμενές (πισίνες) στην Ελλάδα είναι υπαίθριες μη θερμαινόμενες καθώς χρησιμοποιούνται μόνο κατά τους θερινούς μήνες. Η θέρμανση του νερού γίνεται με φυσικό τρόπο (μετάδοση θερμότητας μέσω άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος) γεγονός που περιορίζει την περίοδο λειτουργίας τους μόνο σε 1-2 θερινούς μήνες.

Η επιμήκυνση του χρόνου χρήσης της πισίνας, ιδιωτικής, επαγγελματικής ή αθλητικής μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την εγκατάσταση συμβατικού συστήματος θέρμανσης (λέβητας πετρελαίου ή φυσικού αερίου) είτε με την εγκατάσταση ηλιακού θερμικού συστήματος. Ωστόσο η εγκατάσταση συμβατικού συστήματος θέρμανσης επιφέρει υψηλότατο κόστος λειτουργίας και άμεση εξάρτηση από τη συνεχή άνοδο των τιμών των καυσίμων, καθιστώντας τη λύση αυτή, σχεδόν απαγορευτική. Κατά συνέπεια η θέρμανση της πισίνας για τη διατήρηση του νερού στις επιθυμητές θερμοκρασίες αποτελεί την πλέον δαπανηρή και ενεργοβόρα επιλογή.

Η σχετικά χαμηλή απαιτούμενη θερμοκρασία του νερού της πισίνας σε συνδυασμό με την έντονη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία και το ζεστό κλίμα της χώρας μας, προκρίνει την εγκατάσταση ηλιακού συστήματος θέρμανσης ως την πιο συμφέρουσα και ενεργειακά αποδοτική λύση.

#### Συνδυαζόμενες εφαρμογές ηλιοθερμίας

Αν χρειαστεί τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραπάνω από μία εργασία πχ ζεστό νερό χρήσης και θέρμανση πισίνας, ακόμα και να συνδυαστούν με άλλους τρόπους θέρμανσης του νερού.

#### Ηλιοθερμία για μεγάλα κτίρια (ξενοδοχεία)

Αρκετά ξενοδοχεία, καταλύματα και ενοικιαζόμενα δωμάτια στην χώρα μας λειτουργούν μόνο το καλοκαίρι, οπότε και οι ενεργειακές τους ανάγκες κορυφώνονται. Το ζεστό κλίμα της Ελλάδος με την έντονη ηλιοφάνεια συμπίπτουν χρονικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις των ξενοδοχείων, γεγονός που καθιστά τη χρήση των ηλιακών θερμικών συστημάτων, απολύτως αναγκαία καθώς επιτυγχάνεται μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας και μηδενική εκπομπή ρύπων.

Οι κύριες ενεργειακές εφαρμογές των ηλιακών συστημάτων στα ξενοδοχεία είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και η θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, υπαίθριων και εσωτερικών.[17][48][55]

#### Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια ηλεκτρονική διάταξη ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου), στην οποία η απορροφούμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω, της πρόσκρουσης των φωτονίων που εμπεριέχονται στο ηλιακό φως. Τα φωτόνια αυτά έχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος, όταν τα φωτόνια προσκρούσουν στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, κάποια ανακλώνται, κάποια άλλα το διαπερνούν και κάποια άλλα απορροφώνται. Αυτά που απορροφώνται αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια από τους ημιαγωγούς την φωτοβολταϊκών στοιχείων να κινηθούν, αυτή η κίνηση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. [48][55]

#### Αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια εκείνη η οποία παράγεται εκμεταλλεύομενη τον άνεμο. Ανήκει στις καθαρές πηγές ενέργειας (δηλαδή κατά την παραγωγή της δεν εκπέμπει ρύπους). Είναι ένας βασικός και σημαντικός τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην εποχή μας, καθώς εκμεταλλεύεται την κίνηση του ανέμου που είναι ελεύθερη και άφθονη στο περιβάλλον.

#### Κίνηση του Ανέμου

Η κίνηση του ανέμου είναι αποτέλεσμα της μορφολογίας του εδάφους της κίνησης του πλανήτη καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων δημιουργεί διαφορετικές θερμοκρασίες, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται θερμοί άνεμοι οι οποίοι έχουν μικρότερη πυκνότητα από τους ψυχρούς ανέμους. Λόγο αυτής της ιδιότητας οι θερμοί άνεμοι μετατοπίζονται σε μεγαλύτερα ύψη και την θέση τους την παίρνουν οι ψυχροί άνεμοι που με την σειρά τους θα γίνουν θερμοί και θα ανέλθουν και αυτοί. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται κατακόρυφη μεταφορά και σε συνδυασμό με την περιστροφή του πλανήτη οι άνεμοι κινούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις. [48][55]

Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική (περιστροφική) και μετέπειτα σε ηλεκτρική. Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από:

- Πτερύγια είναι εκεί που προσπίπτει ο άνεμος και μετατρέπουν την ταχύτητα του ανέμου σε περιστροφική στον άξονα.
- Στροφέιο είναι το μέρος που συνδέει τα πτερύγια.
- Συστροφή-κλίση αυτό περιστρέφει τα πτερύγια για την καλύτερη εκμετάλλευση του ανέμου.
- Φρένο.
- Άξονας χαμηλών ταχυτήτων είναι ο άξονας που δέχεται την μηχανική ενέργεια από το στροφέιο.
- Κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει την χαμηλή ταχύτητα σε υψηλή.
- Γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.
- Ελεγκτής στέλνει σήμα στο σερβοκινητήρα και δίνει εντολή να μετακινηθεί.
- Ανεμόμετρο μετράει την ταχύτητα του ανέμου
- Ουριαίο πτερύγιο-ανεμοδείκτης
- Νανσέλα
- Άξονας υψηλών ταχυτήτων
- Γρανάζι οδηγού περιστροφής γρανάζι για την κίνηση αριστερά και δεξιά
- Οδηγός περιστροφής σερβοκινητήρας που παίρνει σήμα από τον ελεγκτή
- Πύργος ο πυλώνας που στηρίζονται η νανσέλα και το στροφέιο [48][55][51]

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται πράσινη ενέργεια αφού κατά την παραγωγή της δεν παράγονται επιβλαβή αέρια. Ο τρόπος παραγωγής βασίζεται στην κίνηση του νερού που κατά το πλείστον γίνεται μέσω της πτώσης του, σε υδροστροβίλους που εκμεταλλεζόμενοι αυτήν την κίνηση παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα κύρια είδη υδροστροβίλων είναι οι Pelton, οι αξονικοί Kaplan και οι Francis. [48]

### 1.3 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης

Το ενδιαφέρον για την ενεργειακή αποθήκευση εστιάζεται στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της εύκολης μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά. Επειδή, όμως, δεν είναι εφικτή (οικονομικά) η απευθείας αποθήκευσή της, απαιτείται να μετατραπεί πρώτα σε άλλη μορφή και όταν χρειαστεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές ενεργειακής αποθήκευσης, βασιζόμενες σε σχεδόν όλες τις μορφές ενέργειας. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις ακόλουθες μορφές:

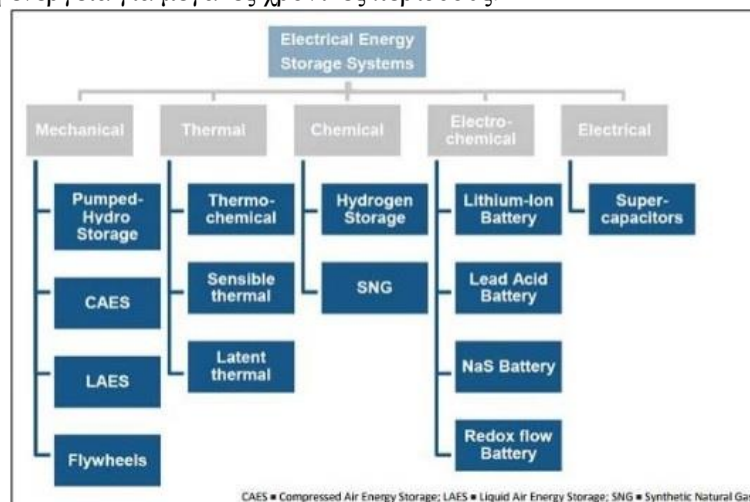
- Σε χημική μορφή (μπαταρίες).
- Σε μηχανική μορφή υπό την μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο.
- Υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπερπυκνωτές).



- Υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης).
- Υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα).
- Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης).
- Υπό μορφή υδρογόνου (H<sub>2</sub>) και συνθετικού Φυσικού Αερίου (SNG).
- Σε θερμότητα.

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης (σχήμα (1.3.a)) περιλαμβάνουν διάφορους τύπους, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Συνεπώς, μια συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών αυτών καθίσταται δύσκολη, δεδομένου ότι, μεταξύ των άλλων, τα επίπεδα ανάπτυξή τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους:

- Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε καταναμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα.
- Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους.



Σχήμα (1.3.a) Κατηγοριοποίηση των μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας[52]

Πιο συγκεκριμένα, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μικρής κλίμακας και είναι πιο κατάλληλες σε εφαρμογές για ποιότητα ισχύος. Οι διατάξεις αυτές τοποθετούνται για να βελτιώσουν την ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα. Ο στόχος είναι να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις αναταράξεων του ηλεκτρικού φορτίου, που διαρκούν για μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά. Η κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τους σφόνδυλους (flywheels), τους υπερπυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγωγίμο μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES). [33][48][52]

Εν συνεχεία, οι διατάξεις μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεγάλης κλίμακας όπου είναι κατάλληλες τόσο για την εξομάλυνση φορτίων, καθώς και για την αποθήκευση των αποθεμάτων αιολικής ενέργειας με υψηλή χωρητικότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται και να παρέχεται μέσω αυτών των διατάξεων κατά τη διάρκεια ωρών ή και ημερών, και με αυτόν τον τρόπο ομαλοποιείται και γίνεται ευκολότερη η διαχείριση της ενέργειας, η ρύθμιση της συχνότητας και η διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα

συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (fuel cells – hydrogen energy storage). [33][52]

Πιο αναλυτικά:

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική μορφή συσσωρευτές (μπαταρίες):

Η κατηγορία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτροχημικά μέσα περιλαμβάνει τα συστήματα δευτερογενών συσσωρευτών (secondary batteries) καθώς και τη νέα τεχνολογία των μπαταριών ροής (flow batteries). Παρόλο που το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αυτή τη στιγμή το έχουν οι σταθμοί αντλησιοταμίευσης, η μείωση του κόστους των διάφορων τύπων μπαταριών και η τεχνολογική εξέλιξη φαίνεται ότι μπορεί να τους δώσει ένα αρκετά μεγάλο μερίδιο στο μέλλον.

Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου (εικόνα (1.3.b)) είναι μία από τις πιο γρήγορα τεχνολογικά αναπτυσσόμενες κατηγορίες δευτερογενών συσσωρευτών και κατέχουν ένα πολύ μεγάλο μερίδιο στην αγορά συσσωρευτών. Οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας και απαιτούν ιδιαίτερη συσκευασία και ειδικά συστήματα ασφαλείας και προστασίας από εκρήξεις, λόγω της χημικής σύστασής τους.



Εικόνα (1.3.b) Μπαταρίες ιόντων Λιθίου[19]

Πλεονεκτήματα:

- ο χρόνος εκφόρτισης, που μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές εβδομάδες.
- η απόδοσή τους που φτάνει το 98%.
- ο πολύ μεγάλος αριθμός των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης.
- Διακύμανση κόστους μπαταριών Li-ion σε \$/kWh.

Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Lead – Acid):

Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος είναι η πιο φτηνή και πιο παλιά τεχνολογία μπαταριών. Έχουν χρησιμοποιηθεί σαν συστήματα αποθήκευσης σε μικρής κλίμακας εφαρμογές. Η διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων μπαταριών κυμαίνεται από 6 – 15 χρόνια και έχουν περίπου 1500 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης. Το μεγαλύτερό τους πλεονέκτημα είναι το μικρό τους κόστος σε σχέση με τους άλλους τύπους συσσωρευτών. Η μικρή πυκνότητα ενέργειας που έχουν είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα (μεγάλος όγκος και βάρος) [33][59]

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου:

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου παρόλο που δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα σε σχέση με κάποιον άλλο τύπο συσσωρευτών, έχουν επιβιώσει στην αγορά με επιτυχία. Έχουν μέτρια πυκνότητα ενέργειας και μέτριο κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες ενώ παράλληλα είναι ο μόνος τύπος μπαταριών που μπορεί και λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες έως και  $-20^{\circ}\text{C}$ . Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι η παρουσία του καδμίου το οποίο είναι πολύ τοξικό στοιχείο. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής - η εγκατάσταση ενός συστήματος ισχύος 3 MW στο νησί Bonaire της Καραϊβικής, για τη σταθεροποίηση του αιολικού πάρκου του νησιού και την υποστήριξη του ηλεκτρικού του δικτύου [33][59]

Οι μπαταρίες NiMH:

- έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις μπαταρίες με κάδμιο δεν απαιτούν κάποιο είδος συντήρηση
- έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περισσότερους κύκλους φόρτισης εκφόρτισης

- μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και είναι περιβαλλοντικά φιλικοί
  - Όμως έχουν πολύ χαμηλή ικανότητα εκφόρτισης με υψηλά ρεύματα και αυτό περιορίζει το πεδίο εφαρμογής τους σε μικρών απαιτήσεων εφαρμογές
  - Το κόστος τους είναι περίπου ίδιο με το κόστος των συσσωρευτών ιόντων – λιθίου [33][59]
- Οι μπαταρίες θείου – νατρίου (NaS) βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε ηλεκτρικά δίκτυα και συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Πλεονεκτήματα:
- μεγάλη διάρκεια ζωής με πολλούς κύκλους φόρτισης εκφόρτισης (περίπου 4500) – μεγάλη διάρκεια εκφόρτισής τους.
- γρήγορη απόκρισή τους σε μεταβατικά φαινόμενα και η μεγάλη απόδοσή τους που φτάνει το 90%.
- Κύριο μειονέκτημά τους είναι η πού υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους που αγγίζει τους 350 °C.
- Οι συγκεκριμένες μπαταρίες κατασκευάζονται μόνο από μία κατασκευάστρια εταιρεία στην Ιαπωνία και έχουν εγκατασταθεί σε πάνω από 300 ενεργειακές εγκαταστάσεις σε όλον τον κόσμο [33][59]

Οι μπαταρίες ροής:

Οι μπαταρίες ροής είναι μπαταρίες που μπορούν να επαναφορτίζονται από δύο χημικά υλικά τα οποία είναι διαλυμένα σε υγρά συστατικά. Το μεγαλύτερό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να επαναφορτίζονται άμεσα με την αλλαγή του υγρού του ηλεκτρολύτη, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συλλέγεται ο χρησιμοποιημένος ηλεκτρολύτης και να φορτίζεται ηλεκτρικά εκ νέου. Η βασική τους διαφορά με τους δευτερογενείς συσσωρευτές είναι ότι η ενέργεια αποθηκεύεται στο υγρό του ηλεκτρολύτη, ενώ στις συμβατικές μπαταρίες αποθηκεύεται στα δύο ηλεκτρόδια.

Τα κύρια χημικά συστατικά, με τα οποία κατασκευάζονται οι μπαταρίες ροής, είναι βανάδιο (με οξειδοαναγωγή, Vanadium Redox), ψευδάργυρος με βρώμιο (Zinc Bromine) και βρωμιούχο πολυσουλφίδιο (PSB).

Πλεονεκτήματα:

- μπορούν να εκφορτιστούν με μεγάλο ρεύμα για αρκετό χρόνο, της τάξεως των 10 ωρών.
- Η χωρητικότητά τους και η δυνατή ισχύς τους είναι της τάξεως των μερικών MWh και MW αντίστοιχα.
- Δεν υφίστανται εσωτερική εκφόρτωση όταν είναι σε κατάσταση αναμονής, όπως στις συμβατικές μπαταρίες, αφού τότε δε συμβαίνει καμία εσωτερική αντίδραση μεταξύ των χημικών συστατικών τους.
- Το κόστος των μπαταριών ροής αναλόγως με τα χημικά συστατικά τους μπορεί να είναι μέτριο έως υψηλό σε σχέση με τις άλλες μπαταρίες.

Μειονεκτήματα:

- η τοξικότητα των χημικών συστατικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.
- η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας[33][59]

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε σφονδύλους (flywheels):

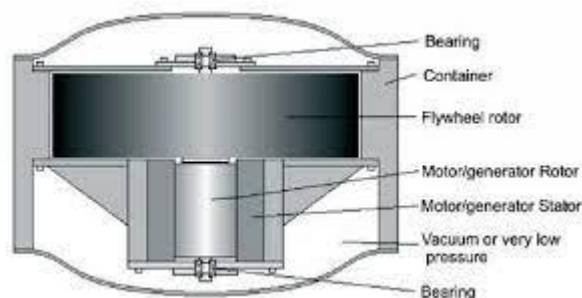
Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με σφονδύλους αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Ένα flywheel (εικόνα (1.3.c)) περιλαμβάνει ένα δρομέα και μια ηλεκτρική μηχανή. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια εισέρχεται στο flywheel, επιταχύνεται ο δρομέας και ο ενσωματωμένος κινητήρας φτάνει κάποια περιστροφική ταχύτητα και όταν χρειάζεται να επιστρέψει την ηλεκτρική ενέργεια η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια.

Τα συστήματα αποθήκευσης με flywheels είναι ιδανικά στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και στην τροφοδότηση του ηλεκτρικού συστήματος για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και να την επιστρέψουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα της τάξης των δευτερολέπτων.

Ιδανικά για εφαρμογές όπως:

- διατήρηση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου
  - ταχύτερη ρύθμιση της ποιότητας της συχνότητας του δικτύου μιας περιοχής
  - σύντομη εφεδρεία σε περιπτώσεις εκκίνησης συμβατικών γεννητριών του συστήματος
- Σαν μηχανικά συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα:

- μηδαμινή ανάγκη συντήρησης.
- η μεγάλη διάρκεια ζωής (μέχρι και 175,000 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης).
- αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις \*Ένα σύγχρονο σύστημα αποθήκευσης με flywheels έχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας τέτοια ώστε να μπορεί να επιστρέψει ηλεκτρική ισχύ από 100 kW σε μερικά λεπτά έως και 2 MW σε χρονικό διάστημα έως 10 δευτερόλεπτα



Εικόνα (1.3.c) Τα βασικά μέρη ενός σφονδύλου[64]

Εν κατακλείδι, λόγω της έλλειψης εμπειρίας η χρήση τους δεν είναι διαδεδομένη σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου ή συστήματος μεταφοράς ωστόσο πολλοί κατασκευαστές υβριδικών και ηλεκτρικών αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τα flywheels σαν μέσο αποθήκευσης. [33][59][61][64] Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπερπυκνωτές).

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) (εικόνα (1.3.d)) είναι η μοναδική αμιγώς ηλεκτρική μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σαν τους κλασσικούς πυκνωτές με τη διαφορά ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και πολύ μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης με μεγαλύτερη ισχύ. Αυτό οφείλεται στο πορώδες μονωτικό υλικό του ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια του υπερπυκνωτή. Η πυκνότητα ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από αυτή των κλασσικών μπαταριών.

Μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν με εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς. Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής έχουν όμως πολύ μεγάλους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής. Κατά τη διάρκεια εκφόρτισής τους η τάση λειτουργίας του μειώνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς οπότε αναγκαστικά ο έλεγχος της λειτουργίας τους οδηγεί σε αυξημένο κόστος. Νέες έρευνες για χρήση γραφένιου ως υλικό κατασκευής των υπερπυκνωτών θα αυξήσει την πυκνότητα ενέργειάς τους και θα μειώσει το κόστος τους.



Εικόνα (1.3.d) Υπερπυκνωτές[65]

Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μπαταρίες – πρώτοι καλύπτουν τις γρήγορες μεταβολές της ζήτησης ισχύος και οι μπαταρίες την απαίτηση για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Εφαρμογή βρίσκουν επίσης σε μεγάλα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα - μπορούν να καλύψουν μικρά διαστήματα αυξομειώσεων της τάσης και να μετριάσουν την επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου στο ηλεκτρικό δίκτυο. [63][65]

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης):

Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο με τη μορφή DC μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει μηδενικές απώλειες . Ο βαθμός απόδοσης της αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά τα συστήματα είναι πάρα πολύ υψηλός , η απόκριση τους είναι ταχύτατη, αλλά μπορεί να διαρκέσει πολύ μικρά χρονικά διαστήματα . Έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά πολύ μικρή πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με άλλες μορφές αποθήκευσης, όπως είναι οι μπαταρίες. [33][52]

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με υδρογόνο (H<sub>2</sub> και SNG):

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα περιλαμβάνει κυρίως την αποθήκευση μέσω υδρογόνου και μέσω συνθετικού φυσικού αερίου (εικόνα (1.3.e)). Και οι δύο τρόποι περιλαμβάνουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού και διαφορετικής επόμενης χρήσης του κάθε φορά . Η απόδοση αυτής της μετατροπής είναι πολύ χαμηλή αλλά τα συγκεκριμένα μέσα αποθήκευσης επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλη κλίμακα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους . Η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειάς τους είναι αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες μεθόδους αποθήκευσης.



Εικόνα (1.3.e) Σύστημα με αποθήκευση ενέργειας σε μορφή υδρογόνου[33]

Μια τυπική μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και κάποιο μέσο καύσης (κυψέλη καυσίμου) ως πηγή θερμότητας . Για το συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), η διαδικασία αποθήκευσης με αυτό απαιτεί ένα δεύτερο βήμα μετά την ηλεκτρόλυση του νερού. Μετά την παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση, το υδρογόνο αντιδρά με διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν μεθάνιο ή SNG . Το πλεονέκτημα του SNG είναι ότι μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από το υδρογόνο . Το ότι υφίσταται επιπλέον διεργασία για την παραγωγή και αποθήκευσή του, καθιστά τη χρησιμοποίησή του λιγότερο αποδοτική. [33][52]

Αποθήκευση ενέργειας σε θερμότητα .

Η αποθήκευση ενέργειας σε θερμότητα γίνεται με τους εξής τρόπους:

i. με άντληση θερμότητας (pumped heat energy storage):

Ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει μια μηχανή αποθήκευσης η οποία είναι συνδεδεμένη με δύο μεγάλες θερμικές δεξαμενές .Για την αποθήκευση ενέργειας η μηχανή αποθήκευσης λειτουργεί σαν μια αντλία θερμότητας, η οποία αντλεί τη θερμότητα από την ψυχρή στη θερμή δεξαμενή .Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, η μηχανή λειτουργεί σαν μια θερμική μηχανή, η οποία αντλεί θερμότητα από τη θερμή δεξαμενή, δίνει κίνηση στο δρομέα μιας γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού (μηχανικό έργο) και απορρίπτει την περίσσεια θερμότητας στην ψυχρή δεξαμενή.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που μπορεί να έχει, λόγω της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική μέσω της αντλίας θερμότητας. Η έλλειψη εμπειρίας πάνω σε αυτή την τεχνολογία είναι εξίσου ένα μειονέκτημα. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποια εμπορική εφαρμογή αυτού του είδους, αλλά μόνο πειραματικές εφαρμογές σε ερευνητικό στάδιο.

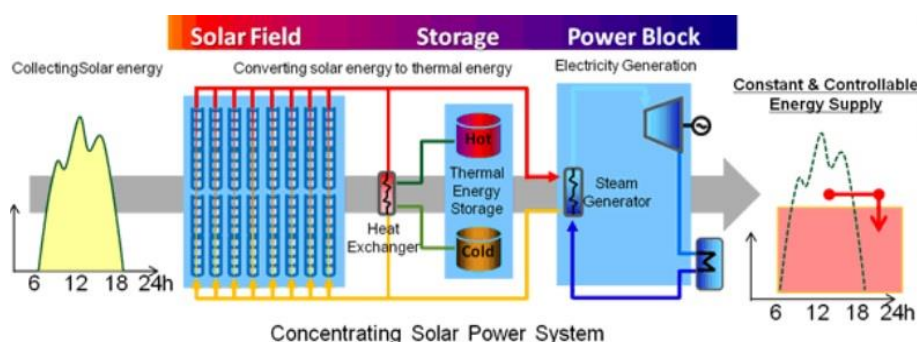
Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας που έχει η συγκεκριμένη τεχνολογία, η οποία μπορεί να είναι 3 φορές μεγαλύτερη από μια μπαταρία ιόντων-λιθίου. Δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη μορφολογία εδάφους για να εγκατασταθεί και η απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης αυξάνεται με το μέγεθος της εγκατεστημένης χωρητικότητας. [33][52]

ii. Αποθήκευση ενέργειας με υγραποίηση αέρα ή κρυογενική αποθήκευση ενέργειας:

Η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου χρησιμοποιείται για την ψύξη του αέρα, μέχρι αυτός να υγραποιηθεί και να αποθηκευτεί σε κατάλληλες δεξαμενές. Όταν υπάρχει η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας, ο υγραποιημένος αέρας επανέρχεται σε αέρια μορφή με θέρμανση και χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση ενός στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεννήτριας. Έχουν αρκετά καλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας και πολύ χαμηλή απόδοση των πρωτότυπων ερευνητικών συσκευών στις οποίες διεξάγονται τα πειράματα.

iii. Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power):

Τα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση κάποιου υγρού μέσου, το οποίο αεριοποιείται και χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας θερμικής μηχανής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια συγκεντρώνεται μέσω κάποιων κάτοπτρων και θερμαίνει το υγρό μέσο ενώ δεν υπάρχει άμεση αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αποθήκευση θερμικής ηλιακής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



Σχήμα (1.3.f) Σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας με χρήση ηλιακής ενέργειας [33]

Η τεχνολογία των συγκεντρωμένων ηλιακών σταθμών (σχήμα (1.3.f)) είναι ήδη αρκετά ώριμη, αφού οι σταθμοί που βρίσκονται σε λειτουργία μέχρι τώρα ξεπερνούν τους 100 σε όλο τον κόσμο εκ των οποίων το 50% αυτούς εφαρμόζουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Προβλέπεται όμως ότι μελλοντικά θα μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα από την αποθηκευμένη τους ενέργεια μέχρι και 4 ώρες.

Στα επόμενα κεφάλαια, θα εξεταστούν αναλυτικά τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES) οι αποθηκευτικές τεχνολογίες με Φ/Β συστήματα και αιολικά πάρκα (υβριδικά συστήματα). [59][61][63]

#### 1.4 Υβριδικά ενεργειακά συστήματα

Το Υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΥΣΗΕ) αυξάνει το ποσοστό ασφαλείας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και φροντίζει να υπάρχει κάλυψή της όταν υπάρχει αυξημένη ζήτηση. Αυτό το επιτυγχάνει όταν η συμμετοχή μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής (μονάδων ΑΠΕ) φτάσει στο ζενίθ της παραγωγής, για να καλύψουν μια συγκεκριμένη ζήτηση ισχύος, δίχως τα γνωστά προβλήματα που προκύπτουν από αυτή τη συμμετοχή.

Επειδή είναι αδύνατο να αλλάξει η ανάγκη του καταναλωτή, η μόνη λύση συμπαραγωγής των δύο εντελώς ανεξάρτητων μεταξύ τους χρονοσειρών (δηλαδή η διαθέσιμη ισχύς από τις μονάδες ΑΠΕ και η ζήτηση ισχύος) είναι να μπορεί να τιθασευθεί η τυχαία παραγωγή ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ στη ζήτηση ισχύος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, με δύο τρόπους:

- Με αποθήκευση ενέργειας σε μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, όταν η παραγωγή ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση ισχύος και η επιστροφή τους στην κατανάλωση τις χρονικές στιγμές που η ζήτηση ισχύος είναι μεγαλύτερη από τη διαθεσιμότητα παραγωγής ισχύος από τις μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής.
- Με χρήση μονάδων εφεδρείας ή εισαγωγές από κοντινούς ΣΗΕ που θα μπορούν να καλύψουν την ζήτηση ενέργειας όταν ούτε οι μη εγγυημένες μονάδες ούτε και η αποθηκευμένη ενέργεια επαρκούν. Η εμφάνιση ενός τέτοιου ενδεχόμενου εξαρτάται από το μέγεθος της ζήτησης ισχύος και από τη ενεργειακή διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού.

Συνεπώς, σε αντίθεση με τα ΣΣΗΕ, τα ΎΣΗΕ στηρίζονται απόλυτα στις μονάδες ΑΠΕ, έπειτα στις μονάδες αποθήκευσης και στο τέλος οι εφεδρικές μονάδες όπου είναι μονάδες εγγυημένης παραγωγής και οι εισαγωγές ισχύος από ΣΗΕ. Για να ελαχιστοποιήσουμε τη συμμετοχή των συμβατικών μονάδων στην κάλυψη της ζήτησης είμαστε υποχρεωμένοι για την σωστή διαστασιολόγηση του υβριδικού σταθμού. [52][59][63][69]

Οι βασικές μονάδες, είναι μη εγγυημένης παραγωγής (ΑΠΕ) καθώς και οι κύριες μονάδες παραγωγής του συστήματος. Ανάλογα το σύστημα και το είδος της ενέργειας παραγωγής του έχουμε τις εξής περιπτώσεις: σε περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αυτές συνήθως είναι αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Ενώ στην περίπτωση ενός συστήματος παραγωγής θερμικής ενέργειας οι μονάδες αυτές κατά πάσα πιθανότητα είναι ηλιακοί συλλέκτες. Οι μονάδες αποθήκευσης, μπορούν να προσαρμόσουν την τυχαία παραγωγή ισχύος από τις μονάδες βάσης στη ζήτηση ισχύος και είναι ο πιο βασικός λόγος που τις χρησιμοποιούμε. Για σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό (αντλησιοταμιευτήρας), ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές μονάδα παραγωγής υδρογόνου και μονάδες συμπίεσης αέρα. Για σύστημα θερμικής ενέργειας, οι μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι θερμοδοχεία μία μεγάλη βαριά μονωμένη δεξαμενή νερού ή δεξαμενές κρυογενικής αποθήκευσης. [59][61][63]



Σχήμα (1.4.a) Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού της Ικαρίας[62]

Οι μονάδες εφεδρείας υπάρχουν για την εξασφάλιση ισχύος σε περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας από τις βασικές μονάδες και στην περίπτωση εξάντλησης των αποθεμάτων ενέργειας στις μονάδες αποθήκευσης. Για σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι αεριοστρόβιλοι, ντιζελογεννήτριες CCGT, ΑΗΣ. Για σύστημα θερμικής ενέργειας, οι μονάδες εφεδρείας μπορεί να είναι καυστήρες κεντρικής θέρμανσης ή πιο σπάνια ηλεκτρικές αντιστάσεις. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, οι μονάδες αποθήκευσης μπορεί να είναι δέκτες και πλεονάζουσας ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας και των μονάδων εφεδρείας. [52]

Ένα παράδειγμα ΥΣΗΕ είναι ο σταθμός που λειτουργεί με βάση την αιολική ενέργεια (σχήμα (1.4.a)). Η αιολική ενέργεια είναι σχετικά οικονομική σε περιοχές με σταθερούς ανέμους. Όταν μειώνονται οι άνεμοι, τότε υπάρχει ανάγκη για την ηλεκτρική ισχύ να παραχθεί από άλλο σύστημα ή να αντληθεί από ένα σύστημα αποθήκευσης που περιέχει ισχύ (ηλεκτρική ή δυναμική ή χημική) η οποία εκ των προτέρων παράχθηκε από την αιολική και αποθηκεύτηκε σε κάποια μορφή ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο μπορεί να:

- χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή καύσιμου υδρογόνου από νερό ή τεχνητού φυσικού αερίου (SNG) μέσω υδρογόνου, το οποίο θεωρείται αποθηκευμένη αιολική ενέργεια.
- να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές.
- μέσω αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών σταθμών να μετατραπεί σε υδραυλική ενέργεια.
- Για την συμπίεση αέρα που βρίσκεται βαθιά σε υδροφορείς, σπήλαια και εγκαταλελειμμένα φρεάτια φυσικού αερίου. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον πεπιεσμένο αέρα θα μπορούσε στη συνέχεια να απελευθερωθεί, όπως απαιτείται για την περιστροφή στροβίλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, όταν η αιολική ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.
- Το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα θα μπορούσε, επίσης, να αποθηκευτεί στα εκατομμύρια υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, όταν επαναφορτίζονται. Εξιδανικευμένα, όλοι αυτοί οι συσσωρευτές θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα γιγαντιαίο εθνικό συσσωρευτή αποθήκευσης.

Ένα υπαρκτό παράδειγμα ΥΣΗΕ είναι ο σταθμός στην Ικαρία, ο οποίος συνδυάζει αιολικό πάρκο ως κύριο σύστημα παραγωγής και σύστημα αποθήκευσης με την μεθοδο της αντλησιοταμίευσης. [52][60][62][69]



## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Η μέθοδος της αντλιοσταμείωσης

Η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας με αντλιοσταμείωση είναι η πιο ώριμη και διαδεδομένη τεχνολογία παγκοσμίως. Χαρακτηριστικό είναι ότι η χωρητικότητα αποθήκευσης των έργων αντλιοσταμείωσης είναι περίπου το 97% της χωρητικότητας των έργων αποθήκευσης παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή έχει ως βάση της τα υδροηλεκτρικά έργα παραγωγής ενέργειας, στα οποία υπάρχει εμπειρία ήδη από τις αρχές του 20ου αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, με τα έργα αντλιοσταμείωσης η ενέργεια που αποθηκεύεται, αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας του νερού. Συνήθως υπάρχουν δύο ταμιευτήρες νερού, ο άνω ταμιευτήρας, στον οποίο καταλήγει το νερό που αντλείται από το αντλιοστάσιο και αποθηκεύεται, και ο κάτω ταμιευτήρας στον οποίο καταλήγει το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας μέσω του υδροηλεκτρικού σταθμού (εικόνα (2.1.a)).[5][34][37]



Εικόνα (2.1.a) Ενδεικτικό παράδειγμα αντλιοσταμείωσης σε υβριδικό σταθμό και απεικόνιση πραγματικού [22]

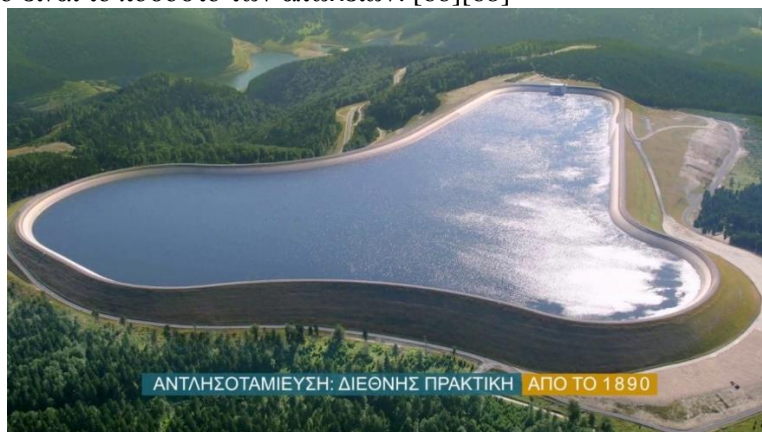
Οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τη νύχτα. Οι εταιρείες παροχής ηλεκτρισμού επιλέγουν τις νυχτερινές ώρες να κοστολογούν την ενέργεια σε πολύ χαμηλότερες τιμές στους καταναλωτές, για να προωθήσουν την χρήση ενέργειας από τη διαθέσιμη ικανότητα παραγωγής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος αιχμής υψηλού κόστους λειτουργίας, τις οποίες θα χρησιμοποιούμε μόνο για μικρό χρονικό διάστημα, δηλαδή σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Ωστόσο, για να λυθεί το πρόβλημα από τις αυξημένες ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες και ν' αποφευχθεί μία διακοπή ρεύματος, οι εταιρείες αναγκάζονται λόγω ανάγκης να αγοράσουν ηλεκτρική ενέργεια σε υψηλές τιμές από ιδιώτες ή ακόμα και να εισάγουν από γειτονικές χώρες αν και όταν αυτό είναι εφικτό. [48][52][53]

Στα κοινά συστήματα αντλιοσταμείωσης (εικόνα (2.1.b)) χρησιμοποιείται η φθηνή ηλεκτρική ενέργεια που υπάρχει διαθέσιμη την νύχτα και τις υπόλοιπες ώρες που δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση στο δίκτυο, έτσι ώστε να τροφοδοτήσει τις αντλίες, για να μεταφερθεί το νερό στον πάνω ταμιευτήρα και να αποθηκευτεί, για μελλοντική χρήση μέσω του υδροηλεκτρικού σταθμού παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως στα υβριδικά συστήματα αντλιοσταμείωσης το νερό επιστρέφει στον πάνω ταμιευτήρα με την χρήση νερού από ΑΠΕ και η νυχτερινή παραγωγή

ρεύματος χρησιμοποιείται για ανατροφοδότηση του άνω ταμιευτήρα όταν χρειάζεται να επιμυκηνθεί ο χρόνος της αυτονομίας ηλεκτροπαραγωγής. [48][52]

Κατά τις περιόδους μεγάλης ζήτησης (αιχμών) στο δίκτυο, το νερό στον πάνω ταμιευτήρα απελευθερώνεται μέσω των υδροστροβίλων για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και να καλύψει την αυξημένη ζήτηση. Η πλέον πιο διαδεδομένη μορφή των συστημάτων αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει κάποια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, κατά κύριο λόγο ανεμογεννήτριες ή δευτερευόντως φωτοβολταϊκά, σαν μέσο τροφοδότησης των αντλιών του συστήματος όπως προαναφέρθηκε. Τα υβριδικά συστήματα αντλησιοταμίευσης, είναι ένας αρκετά αποδοτικός και ρεαλιστικός τρόπος για να αυξηθεί και να ομαλοποιηθεί σημαντικά το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η χρησιμότητα των υβριδικών είναι μείζονως σημασίας σε ηλεκτρικά δίκτυα των μη διασυνδεδεμένων νησιών, όπου μπορεί να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση του μεγάλου διαθέσιμου αιολικού, ή σπανιότερα ηλιακού, δυναμικού.

Ο βαθμός απόδοσης αυτών των συστημάτων κυμαίνεται 70-80%. Πιο αναλυτικά, από το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε για την άντληση τελικά το 70 με 80% θα αποδοθεί πίσω στο ηλεκτρικό σύστημα. Αυτές οι απώλειες αφορούν κυρίως τις απώλειες στους υδροστροβίλους και τις αντλίες, τις ηλεκτρικές απώλειες στις γεννήτριες και τους ηλεκτροκινητήρες καθώς και τις απώλειες στους αγωγούς προσαγωγής/απαγωγής του νερού. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι απώλειες είναι αντιστρόφως ανάλογες του μεγέθους του έργου, δηλαδή όσο μικρότερο το έργο τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των απωλειών. [66][68]



Εικόνα (2.1.b) Αεροφωτογραφία τεχνητής λίμνης συστήματος αντλησιοταμίευσης [23]

Για την επιστροφή του νερού στον άνω ταμιευτήρα, είναι δυνατό να χρησιμοποιείται ο υδροστροβίλος σε αντίστροφη λειτουργία (στροβιλαντλία) αν το επιτρέπει η τεχνολογία του υδροστροβίλου, ή να υπάρχουν ξεχωριστές αντλίες. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας σε σχέση με τις εναλλακτικές μονάδες αιχμής είναι:

- υψηλότερο κόστος ανά μονάδα εγκατάστασης ισχύος
- καθορισμένη θέση εγκατάστασης η οποία συνήθως βρίσκεται σε απομακρυσμένες περιοχές, πράγμα που σημαίνει επιπλέον επιβάρυνση από τις γραμμές μεταφοράς και τις αντίστοιχες απώλειες,
- μεγάλη περίοδος κατασκευής,
- Η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης δεν είναι σε θέση να απορροφήσει όλη την πλεονάζουσα παραγωγή ΑΠΕ σε συνθήκες πολύ υψηλής συμμετοχής ΑΠΕ, κυρίως λόγω περιορισμών χωρητικότητας. Για παράδειγμα, σε μελλοντικό σύστημα με 80% διείσδυση ΑΠΕ, ένα εκτεταμένο σύστημα αντλησιοταμίευσης ισχύος 5GW και με σχετικά μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα 12 ωρών (χωρητικότητας 60GWh), θα μπορεί να απορροφήσει μόνο το 65-70% της πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ. Επιπλέον, οι μονάδες αυτές έχουν ενεργειακό κύκλο αποθήκευσης-παραγωγής μιας έως λίγων ημερών και δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε ανάγκες μακρόχρονης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- υψηλό κόστος. [48][52][53]

Πάραυτα, το όφελος δυναμικά είναι αρκετά μεγάλο καθώς γίνεται αξιοποίηση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού κόστους για την κάλυψη φορτίου σε ώρες υψηλής ζήτησης και υψηλού κόστους. Τα συστήματα αυτά, εκτός του ότι εξασφαλίζουν μία σταθερότητα στο δίκτυο, μπορεί επίσης να αποτελέσουν έναν εύκολο τρόπο για την ενσωμάτωση και άλλων μεταβαλλόμενων ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες δεν έχουν σταθερή παραγωγή και έτσι «επιβαρύνουν» τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Στην πραγματικότητα, σε κατάλληλες γεωγραφικές συνθήκες, φαίνεται λογικό να στέλνουμε ενέργεια απευθείας από τις ανανεώσιμες πηγές σε έναν σταθμό αντλησιοταμίευσης παρά στο ίδιο το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό μειώνουμε τον συστελεστή της τυχαιοποίησης της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ όπου ανεβάζει σημαντικά το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. [52]

Σε κάθε περίπτωση η τελική απόφαση είναι αποτέλεσμα οικονομοτεχνικής μελέτης που λαμβάνει επίσης υπόψη το κόστος του χρήματος, τις διεθνείς τιμών καυσίμων, τις χρηματικές ποινές για εκπομπές CO<sub>2</sub> κ.λπ.



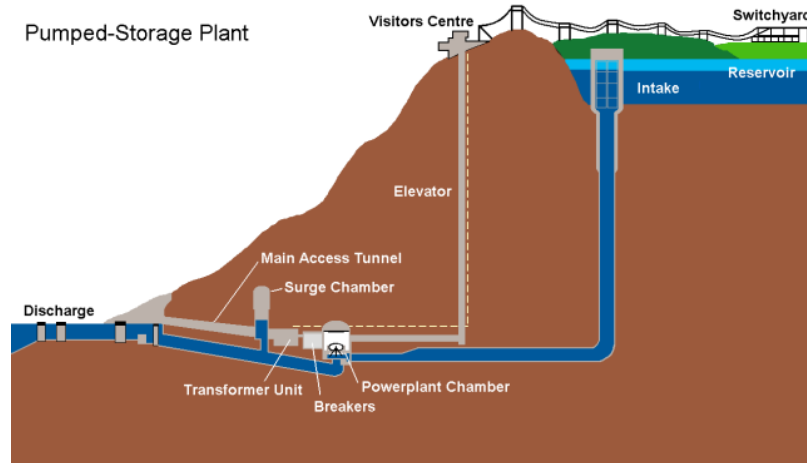
Εικόνα (2.1.c) Τυπικός σταθμός αντλησιοταμίευσης [16]

Ο σημαντικότερος περιοριστικός παράγοντας για την κατασκευή και τη λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση είναι το φυσικό περιβάλλον. Ένα τέτοιου είδους έργο προϋποθέτει την ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων συγκεντρωμένου νερού ή τη δυνατότητα τεχνητής συγκέντρωσης νερού στον εν δυνάμει χώρο κατασκευής του. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να υπάρχει ικανοποιητική και εκμεταλλεύσιμη υψομετρική διαφορά μεταξύ των σχεδιαζόμενων ταμιευτήρων. Είναι προφανές ότι η τοπογραφία και η γεωμορφία του περιβάλλοντος θα πρέπει να ευνοούν τη δημιουργία ενός τέτοιου έργου. Σε μεγάλο ποσοστό το κόστος της επένδυσης για τη δημιουργία ενός τέτοιου έργου εξαρτάται από τη γεωγραφία της περιοχής, η οποία αν δεν είναι ικανοποιητική μπορεί να εκτοξεύσει το κόστος κατασκευής. Η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνοδεύει την αδειοδοτική διαδικασία των έργων αντλησιοταμίευσης πρέπει να είναι εξόχως αναλυτική και να λαμβάνει υπόψη της, εκτός από το φυσικό περιβάλλον, και την τοπική κοινωνία. [37][39][67][68]

Η βασική δομή και λειτουργία ενός αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού παρουσιάζεται στο Σχήμα (2.1.d) και στην εικόνα (2.1.c). Το αν θα κατασκευαστούν μία ή δύο ανεξάρτητες σωληνώσεις νερού, μέσω των οποίων θα συνδέονται οι δύο δεξαμενές του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού, εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, από τον οποίο προκύπτει αν θα υπάρχει η ανάγκη για ταυτόχρονη πτώση και άντληση νερού, δηλαδή, για ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση της μονάδας αποθήκευσης. Τα κάτω άκρα των σωληνώσεων νερού καταλήγουν σε ένα αντλιοστάσιο και σε ένα υδροηλεκτρικό σταθμό, (ΥΗΣ).

Για τη διαδικασία της απαλοιφής αιχμών ισχύος, τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά κατασκευάζονται με μονή σωλήνωση, καθώς η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού, ουσιαστικά δηλαδή η ταυτόχρονη αποθήκευση και παραγωγή ισχύος από το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό, δεν έχει νόημα αν δεν μιλάμε για υβριδικό σύστημα.

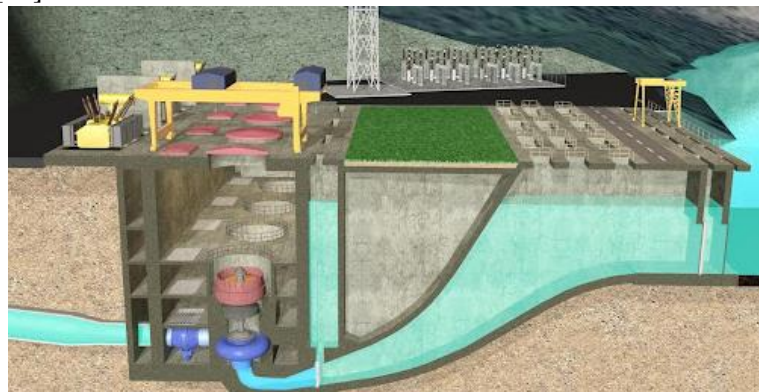
Μία άλλη δυνατότητα είναι η συνδυασμένη λειτουργία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών και μονάδων ΑΠΕ (αιολικά πάρκα), που αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της ετήσιας συμμετοχής του αιολικού πάρκου στην κάλυψη των αναγκών του ΣΗΕ σε ηλεκτρική ενέργεια, εισάγει συγκεκριμένες διαφοροποιήσεις στη σχεδίαση και στη λειτουργία του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού. [52][67][68]



Σχήμα (2.1.d) Σχηματική απεικόνιση μιας εγκατάστασης αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αντλιοσταμείωση[52]

Η βασική καινοτομία και διαφορά με τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά, που χρησιμοποιούνται για απαλοιφή αιχμών ζήτησης ισχύος, είναι η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης, μέσω της οποίας είναι δυνατή η ταυτόχρονη άντληση και πτώση νερού. Η αναγκαιότητα για την εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης απορρέει από το δεδομένο της ύπαρξης μέγιστου ποσοστού απευθείας στιγμιαίας διείσδυσης των μονάδων ΑΠΕ στο δίκτυο, το οποίο, επιβάλλεται για λόγους εξασφάλισης της δυναμικής ασφάλειας του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό η εγκατάσταση διπλής σωλήνωσης επιτρέπει την αποθήκευση της περίσσειας ηλεκτρικής ισχύος από το αιολικό πάρκο όπου δεν είναι εφικτό να διαρεύσει απευθείας στο δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατή η ροή νερού από την ανεξάρτητη σωλήνωση πτώσης, και έτσι καλύπτεται από τους υδροστρόβιλους το έλλειμμα στην παραγωγή ισχύος ως προς τη ζήτηση.

Η διαθεσιμότητα διπλής σωλήνωσης βελτιώνει, επίσης, την ευελιξία του συστήματος και την ικανότητά του να αντιδράσει σε περίπτωση εμφάνισης συμβάντων και διαταραχών στο ΣΗΕ. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ξαφνικής απώλειας παραγωγής ισχύος από το αιολικό πάρκο, η ανεξάρτητη σωλήνωση πτώσης επιτρέπει την άμεση ένταξη στο δίκτυο των υδροστρόβιλων για κάλυψη της απώλειας παραγωγής, ακόμα και αν τη στιγμή του συμβάντος επιτελούνταν άντληση νερού. [48][52][54]



Εικόνα (2.1.e) Σύστημα με αντλιοσταμείωση πολλών στροβίλων[24]

Τα υδροηλεκτρικά αμφίδρομης λειτουργίας (εικόνα (2.1.e)) τεχνικά έχουν δύο δυνατότητες ηλεκτρομηχανολογικών διαμορφώσεων:

Υδροστρόβιλος, φυγόκεντρη αντλία και ηλεκτρική μηχανή (που λειτουργεί σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρας). Όλες οι διατάξεις είναι συνδεδεμένες στον ίδιο άξονα. Η επιλογή του υδροστρόβιλου και της αντλίας γίνεται με κριτήρια όπου αναλύονται στα παρακάτω αντίστοιχα υποκεφάλαια. Όσον αφορά την φορά περιστροφής παραμένει ίδια και για τις δύο λειτουργίες. Είναι σύνηθες, να τοποθετείται ένας υδροδυναμικός συμπλέκτης στα δύο άκρα του άξονα της ηλεκτρικής μηχανής, έτσι ώστε όταν ο υδροστρόβιλος βρίσκεται σε λειτουργία, η αντλία να παραμένει ακίνητη και αντίστροφα, πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο μείωση στις φθορές των διατάξεων.

Πλεονεκτήματα:

- Ο υδροστρόβιλος και η αντλία επιλέγονται σε μία σωστή μελέτη έτσι ώστε να λειτουργούν στο αντίστοιχο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (σημείο σχεδιασμού), χωρίς κανέναν ενδοιασμό στα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους.
- Σε περίπτωση ανάγκης συχνής εναλλαγής λειτουργίας με αυτόν τον τρόπο γίνεται ευκολότερο.

Μειονεκτήματα:

- Το κόστος κατασκευής είναι υψηλό για τον ηλεκτρομηχανολογικό (H/M) εξοπλισμό (δύο υδροδυναμικές μηχανές και συμπλέκτης). Ο χώρος εγκατάστασης πρέπει να είναι μεγαλύτερος, λόγω της ύπαρξης περισσότερων διατάξεων.
- Όταν η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι μεγάλη, η επιλογή υδροστρόβιλου τύπου Pelton είναι μονόδρομος, ο οποίος δεν μπορεί να λειτουργήσει αντίστροφα, δηλαδή σαν αντλία άρα δεν γίνεται αμφίδρομη λειτουργία σε αυτήν την περίπτωση.

Μια υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί σαν υδροστρόβιλος (αντλιοστρόβιλος) ή σαν αντλία (στροβιλαντλία). [48][51]

Η αλλαγή της λειτουργίας επιτυγχάνεται με την αντιστροφή της φοράς περιστροφής της περωτής, οπότε αντιστρέφεται και η ροή. Η διαμόρφωση αυτή πλεονεκτεί όσο αναφορά το κόστος του H/M εξοπλισμού και του απαιτούμενου χώρου εγκατάστασης. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι στρόβιλοι τύπου Francis και Kaplan όπου αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.

Τα πλεονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης είναι:

- Τα συστήματα αυτά μπορούν να ξεκινήσουν και να σταματήσουν τη λειτουργία τους σε λίγα λεπτά όπως επίσης μπορούν να μεταβούν από λειτουργία αντλίας σε λειτουργία στρόβιλου σε λιγότερο από μισή ώρα. Η γρήγορη ανταπόκρισή τους σε διαφορετικά φορτία τα καθιστά ιδανικά για την παρακολούθηση των φορτίων και τη σταθεροποίηση του δικτύου, καθώς επίσης παρόχους μη ρυπογόνων στρεφόμενων εφεδρειών.
- Από την άποψη της μεγάλης κλίμακας, του μεγάλου όγκου αποθήκευσης δικτύου, η αντλούμενη υδροηλεκτρική ενέργεια είναι προς το παρόν η πιο αποδοτική οικονομικά σε σχέση με τους αναδυόμενους ανταγωνιστές της. Ο βασικός ανταγωνιστής της είναι η συμβατική μεγάλη υδροηλεκτρική ενέργεια με αποθήκευση (ταμιευτήρας νερού), η οποία ούτως ή άλλως είναι η πρώτη επιλογή για οποιοδήποτε καλή τοποθεσία εφαρμογής.
- Καθώς οι ΑΠΕ υπεισέρχονται όλο και περισσότερο στο δίκτυο, τα υδροηλεκτρικά συστήματα αντλησιοταμίευσης δεν μπορούν απλώς να παρέχουν εφεδρική ενέργεια όταν η αιολική ή η ηλιακή μειώνεται, αλλά μπορεί επίσης να βοηθήσουν στην αποφυγή περικοπής από αυτές τις πηγές, όταν παράγεται περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο.
- Μια ενδιαφέρουσα προοπτική για την ενέργεια σε τοπική βάση (π.χ. σε αυτόνομα δίκτυα νησιών) προτείνει τη χρήση ενός συστήματος δύο αγωγών πτώσης, στον οποίο η ενέργεια άντλησης παρέχεται απευθείας από τις ΑΠΕ, ενώ τα φορτία καλύπτονται από την πτώση του νερού από τη δεξαμενή αποθήκευσης προς τη χαμηλότερη δεξαμενή. Η αποθήκευση παρέχει την αποσύνδεση μεταξύ των ΑΠΕ και των φορτίων, δεδομένου ότι και τα δύο είναι μεταβλητά και αβέβαια.

- Η ωριμότητα της τεχνολογίας αυτής είναι μεγάλη.
- Υπάρχει εμπειρία διαχείρισης.
- Καλή επιλογή για υπάρχουσα υποδομή .
- Μεγάλη ισχύς και ενέργεια (>GW, >6ώρες).
- Διάρκεια ζωής (>50 έτη).
- Συγκριτικά το χαμηλότερο κόστος, επένδυσης (τυπικό 150-300 €/kWh) και σταθμισμένο (LCOE).
- Ευελιξία στις υπηρεσίες ενέργειας όλων των ειδών (ρύθμιση συχνότητας, εφεδρείες όλων των τύπων, ετοιμότητα, διαχείριση τάσης, black start).
- Παράπλευρα οφέλη (περιβάλλον ύρδευση υδροβιότοποι).

Από την άλλη, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αντιμετωπίζουν τις εξής δυσκολίες:

- Διαθεσιμότητα θέσεων ανάπτυξης περιορισμένη.
- Μέγεθος έργων (ταμειυτήρες σε υψομετρική διαφορά).
- Χρόνοι αδειοδότησης, υλοποίησης και απόσβεσης.
- Βιωσιμότητα αποθηκευτικών σταθμών.

Οι βασικές πηγές εσόδων των συστήματα αντλησιοταμίευσης προέρχονται από:

- Ημερήσια έσοδα εξαρτώνται από τη διαφορά τιμής βάσης-αιχμής (μίγμα συμβατικής παραγωγής) και τη διάρκεια.
- Ενέργεια (arbitrage).
- Διαστημάτων χαμηλών/υψηλών τιμών (μορφή καμπύλης φορτίου).
- Ενδοημερήσια αγορά.
- Διμερή συμβόλαια (OTC).
- Επικουρικές υπηρεσίες (δευτερεύουσα και τριτεύουσα εφεδρεία), αγορά αποκλίσεων,
- Αποζημίωση ισχύος (όπου υφίστανται μηχανισμοί).

Μια ενδεικτική προέλευση εσόδων σταθμών αντλησιοταμίευσης σε ευρωπαϊκή αγορά είναι: 80% από ημερήσια αγορά 10% από ενδοημερήσιες αγορές 10% από επικουρικές, αποκλίσεις, έκτακτες καταστάσεις. [48][51][66][67]

Σε μαθηματικά μεγέθη οι βασικές αρχές λειτουργίας των υδροηλεκτρικών περιγράφονται από την ρευστομηχανική. Η αρχή πίσω από το υδροηλεκτρικό σύστημα είναι απλή και έχει ως εξής:

Η δυναμική ενέργειας  $W_{dyn}$ , ή PE, δίνεται από τη σχέση:

$$W_{dyn} = m \cdot g \cdot h \quad (2.1.1) \quad [48]$$

όπου  $h$  είναι το ύψος ανύψωσης της μάζας  $m$ . Τα ύψη λειτουργίας της στροβιλαντλίας, ( $h_p$ ) και αντλιοστρόβιλου ( $h_T$ ) είναι διαφορετικά και δίνονται από τις σχέσεις:

$$h_p = h + h_L \quad (2.1.2) \quad [48]$$

&

$$h_T = h - h_L \quad (2.1.3) \quad [48]$$

και όπου  $h$  είναι το ανύψωσης ύψος και το μέγεθος με αναπαριστά τις απώλειες κατά τη διάρκεια διάφορων συνθηκών ροής (οι οποίες είναι διαφορετικές εξαιτίας διαφορετικών ρυθμών ροής). Η ισχύς άντλησης και παραγωγής από τον στρόβιλο, δίνονται αντικαθιστώντας την μάζα στη σχέση (2.1.1) με τον ρυθμό ροής μάζας  $m$  και χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ύψος, δηλαδή:

$$\dot{W}_p = g \cdot \rho \cdot \dot{V}_p \cdot h_p \quad (2.1.5) \quad [48]$$

&

$$\dot{W}_T = g \cdot \rho \cdot \dot{V}_T \cdot h_T \quad (2.1.6) \quad [48]$$

όπου  $\dot{W}_p$  και  $\dot{W}_T$ , είναι η ισχύς άντλησης και παραγωγής σε [W], η πυκνότητα  $\rho$  του νερού σε ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\dot{V}_p$  &  $\dot{V}_T$  παροχές όγκου στην άντληση και στην παραγωγή, αντίστοιχα, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Σύμφωνα με τη σχέση (2.1.1) δείχνει πως για παράδειγμα 1,000kg ανυψωμένα σε ύψος 100m θα αποθηκεύσουν  $9.81 \cdot 10^5 \text{J}$  ή 0.2725kWh. Συνεπώς, για να αποθηκευτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας πρέπει να ανυψωθεί σε ικανοποιητικά μεγάλα ύψη μεγάλη μάζα νερού.

Όπως έχω προαναφέρει, τα υδροηλεκτρικά συστήματα προυποθέτουν κατάλληλη τοπογραφία η οποία θα επιτρέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή καθώς και την επιλογή δύο ταμειυτήρων επαρκούς χωρητικότητας όταν μιλάμε για αντλησιοταμίευση, με μέγιστη διαθέσιμη διαφορά ανύψωσης  $h$ , και ελάχιστη οριζόντια απόσταση μεταξύ αυτών  $L$ , ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ροής. Τιμές του  $L/h < 2$  θεωρούνται επιθυμητές, πάραυτα η πλειονότητα των εργοστασίων έχουν κατά μέσο όρο τιμή  $L/h$  μεταξύ του 4 και του 6 με κάποια να εμφανίζουν τιμές σχεδόν κοντά στο 10.

Η μεγαλύτερη πρόκληση σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης είναι κατάλληλη τοπογραφία όπου δυστυχώς δεν υπάρχει παντού. Ενώ τα μεγάλα ύψη είναι επιθυμητά, μερικές τοπογραφίες δεν τα επιτρέπουν. Για τον λόγο αυτό τα υδροηλεκτρικά συστήματα μπορούμε να τα κατηγοριοποιήσουμε ως:

- υπέργεια, που περιλαμβάνουν τα επιθυμητά μεγάλα και μεσαία ύψη
- υπόγεια

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

Αυτή η κατηγορία αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με θαλασσινό νερό μας δίνει μία πολύτιμη εναλλακτική λύση σε γεωγραφικές περιοχές με χαμηλές βροχοπτώσεις, καθώς η διαθεσιμότητα του εργαζόμενου μέσου είναι άφθονη στο θαλασσινό νερό, χωρίς να επηρεάζονται τα πολύ περιορισμένα αποθέματα γλυκού νερού κυρίως στα νησιά. [37][48][52][66]

Βέβαια αυτή η κατηγορία προυποθέτει την κατασκευή των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με χρήση θαλασσινού νερού να εφαρμόζεται επί της ακτογραμμής. Η μορφολογία του εδάφους στην ακτογραμμή αποτελεί την πιο κρίσιμη παράμετρο ως προς την τεχνική εφικτότητα του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού και τη διαμόρφωση του συνολικού αρχικού κόστους εγκατάστασής του. Οι λόφοι και τα μικρά υψώματα με απόλυτα υψόμετρα από 200m έως 600m είναι ιδανικά για την εγκατάσταση αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών. Οι ήπιες κλίσεις των πρανών από τις κορυφές προς την ακτή, καθώς και η ήπια μορφολογία τόσο των πρανών όσο και της ακτής (απουσία γκρεμών, χαραδρών κ.λπ.), ελαχιστοποιούν τα χωματουργικά έργα για την εγκατάσταση των αγωγών και των σταθμών υδροδυναμικών μηχανών όπως το αντλιοστάσιο και υδροηλεκτρικός σταθμός. Το κόστος εγκατάστασης του έργου, εξαρτάται από τα παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι απότομες κλίσεις των πρανών είναι πιθανό να απαιτούν την κατασκευή υπόγειων σηράγγων. Τέτοιες περιπτώσεις στα έργα ανεβάζουν σημαντικά το αρχικό κόστος εγκατάστασης και, υπό προϋποθέσεις δεν είναι απίθανο να καταστήσουν το έργο ασύμφορο, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μικρών έργων. Στα μικρά έργα, η ευνοϊκή εδαφική μορφολογία είναι μείζονος σημασίας για το ελάχιστο κόστος και την οικονομική του σκοπιμότητα. [52][61][67]

## 2.2 Υδροστρόβιλοι

Ο υδροστρόβιλος αποτελεί τη βασικότερη μονάδα κάθε υδροηλεκτρικού συστήματος. Είναι μία μηχανική διάταξη που μας επιτρέπει την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας του νερού σε κινητική και συγκεκριμένα σε περιστροφική. Όταν το νερό έρχεται σε επαφή με τις κατάλληλα διαμορφωμένες υδροδυναμικές επιφάνειες (περυγία ή σκάφες) περιστρέφει γύρω από τον άξονα την περωτή. Η μετατροπή της ενέργειας έχει πάντα το τίμημα των απωλειών, το οποίο το μετράμε με τον βαθμό απόδοσης  $\eta_{tur}$ . Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, τον τύπο του στροβίλου τα στιγμιαία χαρακτηριστικά της παροχής και του ύψους (σημείο λειτουργίας). Η επιλογή του υδροστροβίλου βασιση του τύπου και του μεγέθους γίνεται με σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου βαθμού απόδοσης. Το γεγονός αυτό είναι που οδηγεί στη μέγιστη παραγωγή ενέργειας και στην εκμετάλλευση της μεγαλύτερης δυνατής παροχής. Έτσι προκύπτει μια επιλογή οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με την καμπύλη διάρκεια παροχής. Η πιο βασική παράμετρος για τον σχεδιασμό ενός υδροστροβίλου είναι η ονομαστική (μέγιστη) παροχή του ( $Q_{max}$ ). Ένα άλλο

σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το τεχνικό ελάχιστο. Το σημείο δηλαδή κάτω από το οποίο ο υδροστρόβιλος δεν μπορεί να λειτουργήσει (ή λειτουργεί με σχεδόν μηδενικό βαθμό απόδοσης άρα καθίσταται ασύμφορος).

Για περιπτώσεις εγκατάστασης υδροστροβίλου κατά μήκος ενός ποταμού, η εκμετάλλευση της παροχής είναι η συνολική παροχή του ποταμού μείον την οικολογική παροχή. Αξίζει να σημειωθεί πως, για τη βελτιστοποίηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του έργου χρησιμοποιούνται πολλές φορές αρκετοί υδροστρόβιλοι έτσι ώστε να γίνει συνδυαστική λειτουργία για τον καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Οι κύριοι τύποι υδροστροβίλων είναι οι υδροστρόβιλοι δράσης και οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης. Στους στροβίλους δράσης, η στατική πίεση κατά τη διεργασία παραμένει σταθερή ενώ στους στροβίλους αντίδρασης μειώνεται. [48][51][54]

Υδροστρόβιλοι δράσης: υδροστρόβιλος Pelton

Ο υδροστρόβιλος Pelton (εικόνα (2.2.a) και εικόνα (2.2.b)) είναι υδροστρόβιλος μερικής προσβολής, αυτό σημαίνει πως μόνο ένα μέρος του νερού έρχεται σε επαφή με το στρόβιλο. Το ρεύμα του νερού προσπίπτει στο περύγιο μέσα από ένα ή περισσότερα ακροφύσια σαν πίδακας (Jet). Τα περύγια του στροβίλου είναι σαν σκάφες και είναι περίπου 20 με 26 σε αριθμό. Έχουν ειδική διαμόρφωση έτσι ώστε να χωρίζουν το νερό (θυμίζει δύο κουτάλια ενωμένα) ενώ με μια εγκοπή επιτρέπουν τη συνεχή προσβολή του νερού στις σκάφες.



Εικόνα (2.2.a) Πραγματική απεικόνιση ενός στροβίλου Pelton με 8 ακροφύσια[38]

Η ροή του νερού ρυθμίζεται με τη χρήση ενός βολβού στην έξοδο του ακροφυσίου. Με την ρύθμιση των ακροφυσίων επιτυγχάνεται και ο έλεγχος στροφών του υδροστροβίλου. Ο υδροστρόβιλος αυτός χρησιμοποιείται σε έργα με μεγάλο ωφέλιμο ύψος ενώ το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του είναι πως λειτουργεί με καλό βαθμό απόδοσης (αγγίζει και μερικές φορές ξεπερνά το 90%) σε μεταβλητές παροχές μεταβάλλοντας αντίστοιχα τη διατομή εξόδου με χρήση της βαλβίδας ελέγχου. [2][48][51]

Ανάλυση στροβίλου Pelton

Σε έναν στρόβιλο Pelton η εξίσωση της ροπής περιγράφει την κινητική ενέργεια που μετατρέπεται σε περιστροφική. Όλα τα διανυσματικά μεγέθη όπως η ταχύτητα του νερού, η ροπή και η παραγόμενη δύναμη στις σκάφες μας οδηγούν σε επίλυση του συστήματος με τη χρήση διανυσμάτων. Όταν έχουμε μόνιμες συνθήκες, ταχύτητα του νερού υπολογίζεται λίγο πριν την έξοδο του ακροφυσίου με την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η δυναμική ενέργεια στην είσοδο του αγωγού προσαγωγής μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε κινητική ενέργεια λίγο πριν την έξοδο του ακροφυσίου. [38][47][48]

$$mgH_0 = \frac{1}{2} mV_{noozle}^2 \rightarrow V_{noozle} = \sqrt{2gH_0} \quad (2.2.1) \quad [48]$$

Η ταχύτητα με την οποία φτάνει το νερό στο στρόβιλο είναι λίγο μικρότερη από την  $V_{noozle}$ , δηλαδή:

$$V_1 = C_V V_{noozle} = C_V \sqrt{2gH_0} \quad (2.2.2) \quad [48]$$



όπου  $C_v$  ο συντελεστής ακροφυσίου με τιμή 0.97-0.99. Η παροχή του νερού εξαρτάται από την ταχύτητα  $V_1$ , και από τη διάμετρο  $d$  του ακροφυσίου, δηλαδή:

$$Q = \frac{d^2 \pi V_1}{4} \quad (2.2.3) \quad [48]$$

Όπως φαίνεται και στα τρίγωνα ταχυτήτων, το νερό προσπίπτει στη σκάφη με ταχύτητα  $V_1$ , ενώ η ταχύτητα της σκάφης είναι  $V_B$ . Η σχετική ταχύτητα του νερού ως προς τη σκάφη είναι:

$$V_{R1} = V_1 - V_B \quad (2.2.4) \quad [48]$$

Η απόλυτη ταχύτητα εξόδου του ρευστού είναι η  $V_2$  με περιφερειακή συνιστώσα την  $V_{w2}$  και είναι ίση με

$$V_{W2} = V_B - V_{R2} \cos(\pi - \vartheta) \quad (2.2.5) \quad [48]$$

όπου  $V$ , η σχετική ταχύτητα εξόδου του ρευστού σε σχέση με την ταχύτητα της σκάφης και  $\theta$  η γωνία της διεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας εξόδου σε σχέση με τη διεύθυνση της ταχύτητας της σκάφης. Η σχετική ταχύτητα εξόδου  $V_{R2}$  έχει σχεδόν ίδιο μέτρο με τη σχετική ταχύτητα εισόδου  $V_{R1}$ , μειωμένο μόνο κατά ένα ποσοστό  $k$  λόγω τριβών επάνω στη σκάφη. Έτσι η ταχύτητα  $V_{w2}$  είναι:

$$V_{W2} = V_B - kV_{R1} \cos(\pi - \vartheta) \quad (2.2.6) \quad [48]$$

Η δύναμη  $F$  που αναπτύσσεται στην περιφέρεια του στροβίλου οφείλεται στη μεταβολή των περιφερειακών συνιστωσών της απόλυτης ταχύτητας από την είσοδο στην έξοδο. Η μεταβολή αυτή είναι:

$$\begin{aligned} \Delta V_W &= V_{W1} - V_{W2} = V_1 - V_B + kV_{R1} \cos(\pi - \vartheta) \xrightarrow{\text{Εξ.(2.2.4)}} \\ \Delta V_W &= (V_1 - V_B)(1 - k \cos(\vartheta)) \end{aligned} \quad (2.2.7) \quad [48]$$

Η δύναμη που αναπτύσσει ένα στοιχειώδες ρευστό μάζας  $dm$  με επιτάχυνση  $a$  στο στροφέα είναι:

$$dF = adm \rightarrow dF = \frac{dV_w}{dt} dm \rightarrow dF = dV \frac{dm}{dt} \rightarrow dF = dV_w \dot{m} \quad (2.2.8) \quad [48]$$

Έτσι με ολοκλήρωση από το σημείο 1 στο σημείο 2 προκύπτει η δύναμη  $F$ .

$$F = \dot{m} \Delta V_W = \rho Q \Delta V_W = \rho(V_1 - V_B)(1 - k \cos(\theta)) \quad (2.2.9) \quad [48]$$

Η δύναμη είναι αυτή που προκαλεί ροπή στον στρόβιλο:

$$M = FR_m = \rho Q(V_1 - V_B)(1 - k \cos(\theta))R_m \quad (2.2.10) \quad [48]$$

όπου  $R_m$  η μέση ακτίνα του στροβίλου. Η ταχύτητα περιστροφής είναι:

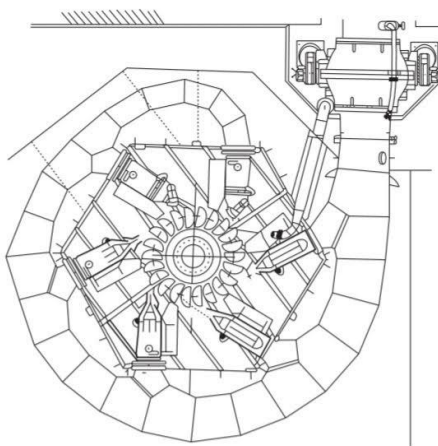
$$N = \frac{30V_B}{\pi R_m} \quad (2.2.11) \quad [48]$$

Η θεωρητική ισχύς του στροβίλου ( $P_{th}$ ) είναι το γινόμενο της ροπής με την γωνιακή ταχύτητα  $\omega = V_B/R_m$ . Έτσι με αντικατάσταση

$$P_{th} = M\omega = \rho Q(V_1 - V_B)(1 - k \cos(\theta))V_B \quad (2.2.12) \quad [48]$$

Ο βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της θεωρητικής ισχύος προς την ισχύ του νερού στην είσοδο.

$$n_{th} = \frac{\rho Q(V_1 - V_B)(1 - k \cos(\theta))V_B}{\frac{1}{2}\rho Q V_1^2} = \frac{2(V_1 - V_B)(1 - k \cos(\theta))V_B}{V_1^2} \quad (2.2.13) \quad [48]$$



Εικόνα (2.2.b) Πρόσψη στροβίλου Pelton με 6 ακροφύσια[38]

Η γωνία  $\theta$  θα είναι περίπου  $165^\circ$  η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή για να διευκολύνεται η έξοδος του νερού από τη σκάφη. Μπορεί να προκύψει και με παραγωγή της εξίσωσης (2.2.13), η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να είναι η μισή της ταχύτητας του νερού εισόδου έτσι ώστε να δουλεύει η μηχανή στη βέλτιστη απόδοση, δηλαδή  $V = V/2$ . Με αντικατάσταση προκύπτει ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης.

$$n_{turb,max} = \frac{1}{2}(1 + \cos(\theta)) \quad (2.2.14) [48]$$

Στην πράξη η απόδοση διαφέρει λόγω των τριβών της μη συμμετρικής πρόσπτωσης του νερού.[48]

Υδροστρόβιλοι αντίδρασης

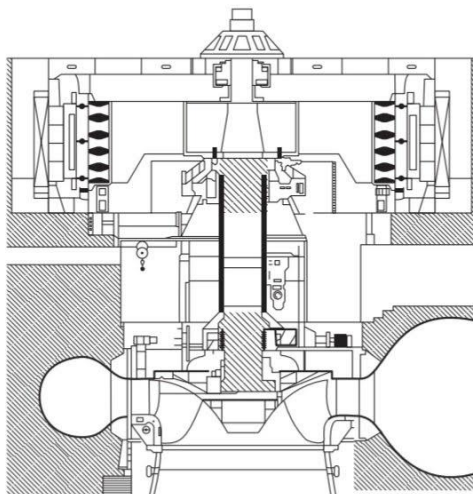
Υδροστρόβιλος Francis

Ο υδροστρόβιλος Francis (Εικόνα (2.2.c)) χαρακτηρίζεται ως στρόβιλος μικτής ροής δηλαδή έχει ακτινική εισαγωγή και αξονική έξοδο. Τοποθετείται σε σύστημα με καθαρό ύψος από 10 έως 150 m. Τα μεγαλύτερα ύψη δεν συνιστώνται για αυτόν τον στρόβιλο λόγω της μεγάλης στατικής πίεσης που υφίστανται τα μηχανικά του μέρη και ιδιαίτερα το κέλυφος.



Εικόνα (2.2.c) Πτερωτή υδροστρόβιλου Francis[38]

Το νερό εισέρχεται στη σπείρα ακτινικά εν συνεχεία εκτονώνει την ενέργεια του στα καμπύλα πτερύγια και εξέρχεται αξονικά. Κατά την είσοδο του νερού από το κέλυφος υπάρχουν οδηγία πτερύγια στο δρομέα, για την κατεύθυνση της ροής, ενώ υπάρχουν και στρεφόμενα/ρυθμιζόμενα πτερύγια τα οποία βελτιστοποιούν τις γωνίες εισόδου στο στρόβιλο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ροής. Η τοποθέτηση αυτού του στροβίλου είναι εξ' ολοκλήρου κάτω από την επιφάνεια του νερού, επίσης σημαντική είναι η μικρή κατάληψη χώρου καθώς και οι ψηλές στροφές λειτουργίας του. [48][51]

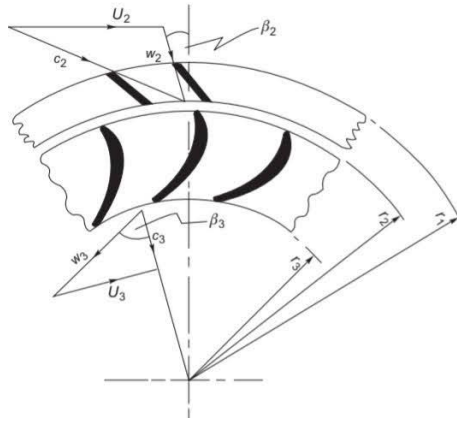


Εικόνα (2.2.d) Πλάγια όψη του μηχανισμού λειτουργίας του υδροστρόβιλου Francis[38]

Η ροή έχει ομοιόμορφη κατανομή στο στρόβιλο αφού καθώς προχωράει το νερό μέσα στο σπειροειδές κέλυφος, ένα μέρος εισέρχεται μέσα στο στρόβιλο με αποτέλεσμα στη συνέχεια να πρέπει να γίνει αντίστοιχα μείωση διαμέτρου του σπειροειδούς κελύφους για την διατήρηση της σταθερής ροής. Ο άξονας περιστροφής ως επί το πλείστον είναι κατακόρυφος (Εικόνα (2.2.d) αν και δεν είναι απίθανο να είναι και οριζόντιος σε μικρότερες μηχανές. [48][51]

Ανάλυση με τρίγωνα ταχυτήτων (Σχήμα (2.2.e)):

$$\alpha_1 = \tan^{-1}(c_{\theta 1}/c_{r1}) \quad (2.2.20) [38]$$



Σχήμα (2.2.e) Στο σχήμα φαίνονται τα τρίγωνα ταχυτήτων για τον στρόβιλο Francis [38]

Όπου  $\alpha_1$  είναι η απόλυτη γωνία ροής,  $c_1$  απόλυτη ταχύτητα. Η ροή μετατρέπεται σε γωνία  $\alpha_2$  και ταχύτητα  $c_2$  και έχουμε την απόλυτη κατάσταση ροής στην είσοδο. Με αφαίρεση των παραγόντων η σχετική ταχύτητα στην είσοδο βρίσκεται από  $w_2=c_2-U_2$ . Η σχετική γωνία ροής  $\beta_2$  ορίζεται:

$$\beta_2 = \tan^{-1}[(c_{\theta 2} - U_2)/c_{r2}] \quad (2.2.21) [38]$$

Το νερό αφήνει τον δρομέα του στροβίλου με σχετική γωνία ροής  $\beta_3$  και σχετική ταχύτητα ροής  $w_3$ . Η ταχύτητα στον δρομέα βρίσκεται από πρόσθεση των παραγόντων  $c_3=w_3+U_3$ . Η σχετική γωνία ροής  $\beta_3$  στην έξοδο του δρομέα ορίζεται:

$$\beta_3 = \tan^{-1}[(c_{\theta 3} + U_3)/c_{r3}] \quad (2.2.22) [38]$$

Γράφοντας την εξίσωση Euler για το έργο του ρευστού σε ρότορα:

$$\Delta W_t = \frac{W_t}{\dot{m}} = U_1 c_{\theta 1} - U_2 c_{\theta 2} > 0 \quad (2.2.23) [38]$$

Στην συγκεκριμένη ανάλυση γράφεται:

$$\Delta W = U_2 c_{\theta 2} - U_3 c_{\theta 3} \quad (2.2.24) [38]$$

Για έξοδο χωρίς δίνη:

$$\Delta W = U_2 c_{\theta 2} \quad (2.2.25) [38]$$

Το αποδοτικό ύψος για όλους του στροβίλους αντίδρασης  $H_E$  είναι το διαθέσιμο ολικό ύψος στην είσοδο του στροβίλου σε σχέση με την επιφάνεια του ταμιευτηρα. Στην είσοδο του δρομέα η διαθέσιμη ενέργεια είναι ίση με το σύνολο της κινητικής της δυναμικής και της πιεστικής ενέργειας.

$$g(H_E - H_N) = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \quad (2.2.26) [38]$$

όπου το  $\Delta H_N$  είναι οι απώλειες ύψους λόγω τριβών στις βάνες και  $p_2$  η απόλυτη στατική πίεση στην είσοδο του δρομέα.

Στην έξοδο του δρομέα η ενέργεια του νερού μειώνεται από το ειδικό έργο  $\Delta w$  και από το έργο τριβής στον δρομέα,  $g\Delta H_R$  και η εναπομείνουσα ενέργεια ισούται με το άθροισμα της κινητικής της δυναμικής και της πιεστικής ενέργειας.

$$g(H_E - H_N - \Delta H_R) = \frac{1}{2} c_3^2 + p_3/\rho - p_a/\rho + g z_3 \quad (2.2.27) [38]$$

όπου το  $p_3$  είναι η απόλυτη στατική πίεση στην έξοδο του δρομέα.

Διαφοροποιώντας τις εξ.17 και 18 το ειδικό έργο λαμβάνεται:

$$\Delta W = (p_{02} + p_{03})/\rho - g\Delta H_R + g(z_2 - z_3) \quad (2.2.28) [38]$$

Όπου  $p_{02}$  και  $p_{03}$  είναι οι απόλυτες ολικές πιέσεις σε είσοδο και έξοδο του δρομέα.

Η εικόνα δείχνει το σωλήνα σε έναν υδροστροβίλο Francis. Όπου το πιο σημαντικό είναι η απόσταση  $z_3$  μεταξύ της εξόδου του δρομέα και της επιφάνειας του νερού. Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δρομέα και επιφάνειας γράφεται :

$$p_3/\rho + \frac{1}{2}c_3^2 + gz_3 - g\Delta H_{DT} = \frac{1}{2}c_4^2 + p_a/p \quad (2.2.29) [38]$$

Όπου  $\Delta H_{DT}$  είναι οι απώλειες ύψους του σωλήνα και το  $c_4$  είναι η ταχύτητα εξόδου της ροής.

Η απόδοση γράφεται

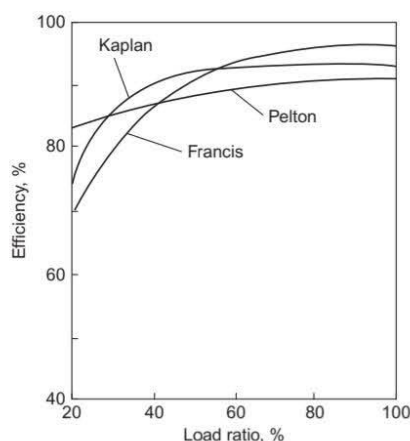
$$\eta_h = \frac{\Delta W}{gH_E} = \frac{U_2c_{\theta 2} - U_3c_{\theta 3}}{gH_E} \quad (2.2.30) [38]$$

Και όπου  $c_{\theta 3}=0$

$$\eta_H = \frac{U_2c_{\theta 2}}{gH_E} \quad (2.2.31) [38]$$

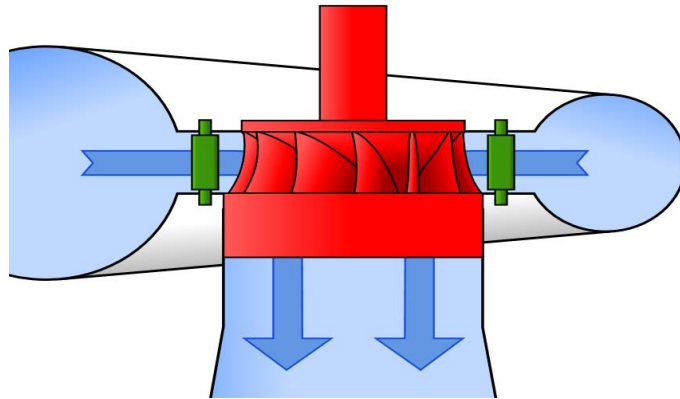
Η απόδοση δίνεται από την σχέση:  $\eta_o = \eta_m \eta_H$ . Για πολύ μεγάλους στροβίλους (500-1000MW) οι μηχανικές απώλειες είναι σχετικά μικρές,  $\eta \rightarrow 100\%$  και αποτελεσματικά  $\eta_o \approx \eta_H$ .

Για τον υδροστροβίλο Francis η ακτίνα της ταχύτητας του δρομέα σε σχέση με την ταχύτητα τις πτερωτής  $v = U_2/c_1$  δεν είναι τόσο κρίσιμη για υψηλή αποδοτικότητα όπως είναι για τον Pelton και μπορεί να βρίσκεται σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα από  $0.6 \leq v \leq 0.95$  (Σχήμα (2.2.f)). Στις περισσότερες εφαρμογές, ο στροβίλος Francis χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας σύγχρονης γεννήτριας και οι ταχύτητες περιστροφής που επιλέγονται είναι αυτές που είναι κατάλληλες είτε για 50 είτε για 60 κύκλους ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα (2.2.f) Διάγραμμα το οποίο μας δείχνει την απόδοση των στροβίλων σε σχέση με την αναλογία φορτίου [38]

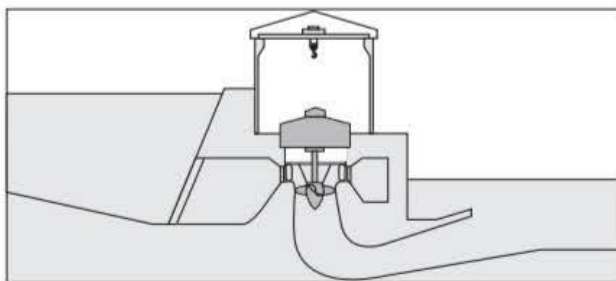
Στη συνέχεια, η ταχύτητα πρέπει να διατηρείται σταθερή. Είναι δυνατό να επιτευχθεί η λειτουργία μερικού φορτίου του στροβίλου μεταβάλλοντας τη γωνία των πτερυγίων οδήγησης. Τα πτερύγια οδήγησης περιστρέφονται και ρυθμίζονται στη βέλτιστη γωνία μέσω ενός μηχανισμού γραναζιών. Ωστόσο, η λειτουργία μερικού φορτίου συνήθως προκαλεί τη δημιουργία μιας ταχύτητας στροβιλισμού στη ροή κατάντη του δρομέα (Σχήμα (2.2.g)) προκαλώντας μείωση της απόδοσης. Η δύναμη της δίνης μπορεί να είναι αρκετή για να προκαλέσει μια φυσαλίδα σπηλαιώσης που θα σχηματιστεί κατά μήκος του άξονα του σωλήνα έλξης. [37][48][51][53][54]



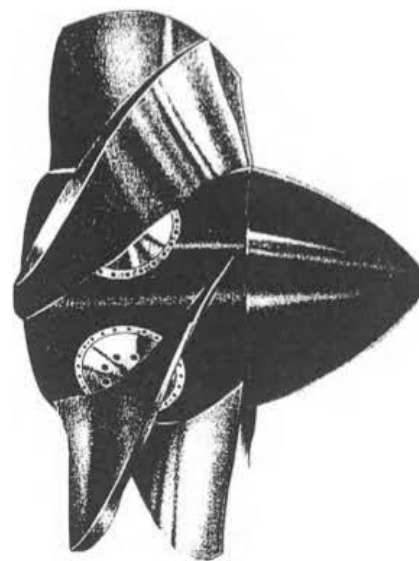
Σχήμα (2.2.g) Τα βέλη στο σχήμα μας εξηγούν τον τρόπο εισροής και εκροής του νερού στον υδροστρόβιλο Francis[38]

### Υδροστρόβιλος Kaplan

Ο υδροστρόβιλος Kaplan θυμίζει προπέλα (Σχήμα (2.2.h) (b)) με την εμφάνισή του καθώς και στα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Κατά κανόνα τοποθετείται κατακόρυφα και το νερό εισέρχεται ακτινικά χαμηλά στα κατευθυντήρια πτερύγια και στη συνέχεια αξονικά, ενώ εξέρχεται αξονικά μόλις περιστρέψει την έλικα (Σχήμα (2.2.h) (a)). Χρησιμοποιείται σε μεγάλες παροχές και μεγάλα ύψη. Στα πτερύγια υπάρχει μεταβλητό βήμα για να βελτιστοποιήσουν τον βαθμό απόδοσης σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής. Όταν τα πτερύγια μεταβλητού βήματος απουσιάζουν, ονομάζονται και στρόβιλοι προπέλας. [48][51]



(a)



(b)

Σχήμα (2.2.h) Στο σχέδιο (a) απεικονίζεται σε πλάγια όψη ένας μηχανισμός υστρόβιλου Kaplan και στο σχέδιο (b) σε τρισδιάστατη απεικόνιση η περωτή ή αλλιώς προπέλα με ρυθμιζόμενα πτερύγια του υδροστρόβιλου Kaplan[38]

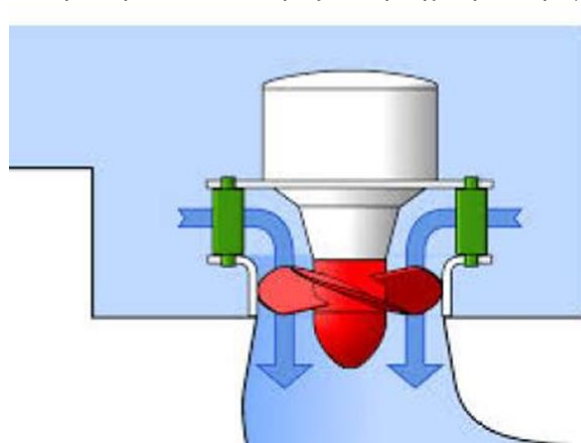
Αυτός ο τύπος στρόβιλου προέκυψε από την ανάγκη παραγωγής ενέργειας από κεφαλές πολύ χαμηλότερης πίεσης από αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως με τον στρόβιλο Francis. Για να ικανοποιηθούν μεγάλες απαιτήσεις ισχύος, πολύ μεγάλοι ρυθμοί ροής όγκου πρέπει να προσαρμόζονται στον στρόβιλο Kaplan, δηλαδή, η παροχή  $Q_{HE}$  να είναι μεγάλη. Η συνολική διαμόρφωση ροής είναι από ακτινική σε αξονική. Το Σχήμα (2.2.i) είναι μια μερική τομή ενός στρόβιλου Kaplan στον οποίο η ροή εισέρχεται από ένα σπειροειδές στα πτερύγια οδήγησης εισόδου, τα οποία προσδίδουν έναν βαθμό στροβιλισμού στη ροή που καθορίζεται από τις ανάγκες του δρομέα. Η ροή που φεύγει από τα πτερύγια οδηγού εξαναγκάζεται από το σχήμα της διόδου σε

αξονική κατεύθυνση και ο στροβιλισμός γίνεται ουσιαστικά μια ελεύθερη δίνη, δηλαδή  $c_{\theta 0} = 0$  σταθερά. [38][48]

Τα πτερύγια του δρομέα είναι παρόμοια με αυτά ενός ρότορα στροβίλου αξονικής ροής, αλλά έχουν σχεδιαστεί με συστροφή κατάλληλη για τη ροή ελεύθερης δίνης στην είσοδο και μια αξονική ροή στην έξοδο. Μια εικόνα ενός δρομέα στροβίλου Kaplan (ή έλικας) φαίνεται στο (Σχήμα (2.2.h) (b)). Λόγω της πολύ υψηλής ροπής που πρέπει να μεταδοθεί και του μεγάλου μήκους των λεπίδων, οι λόγοι αντοχής επιβάλλουν την ανάγκη για μεγάλα πτερύγια λεπίδας. Ως αποτέλεσμα, οι λόγοι βήματος-πτερυγίων 1,0-1,5 χρησιμοποιούνται συνήθως από τους κατασκευαστές και, κατά συνέπεια, ο αριθμός των λεπίδων είναι μικρός, συνήθως τέσσερις, πέντε ή έξι. Ο στροβίλος Kaplan ενσωματώνει ένα βασικό χαρακτηριστικό που δεν βρίσκεται σε άλλους ρότορες στροβίλου και αυτό είναι ότι η ρύθμιση της γωνίας κλιμάκωσης μπορεί να ελεγχθεί. Κατά τη λειτουργία μερικού φορτίου, η γωνία ρύθμισης των πτερυγίων δρομέα ρυθμίζεται αυτόματα από έναν σερβομηχανισμό για τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών απόδοσης. Αυτή η ρύθμιση απαιτεί μια συμπληρωματική ρύθμιση της γωνίας κλιμάκωσης του πτερυγίου εισαγωγής για τη διατήρηση μιας απόλυτης αξονικής ροής στην έξοδο από τον δρομέα. [51][53][54]

Βασικές εξισώσεις

Οι περισσότερες εξισώσεις που παρουσιάζονται για τον στροβίλο Francis ισχύουν και για τον στροβίλο Kaplan (ή έλικα), εκτός από την επεξεργασία του δρομέα. Το σχήμα (2.2.j) δείχνει τα τρίγωνα ταχύτητας και το τμήμα τμήματος ενός στροβίλου Kaplan που σχεδιάστηκε για το ύψος του μέσου πτερυγίου. Στην έξοδο από τον δρομέα, η ροή φαίνεται να αφήνει τον δρομέα χωρίς ταχύτητα στροβιλισμού, δηλαδή  $C_{\theta 3} = 0$  και η αξονική ταχύτητα παραμένει σταθερή.



Σχήμα (2.2.i) Τα βέλη στο σχήμα μας εξηγούν τον τρόπο εισροής και εκροής του νερού στον υδροστροβίλο Kaplan[38]

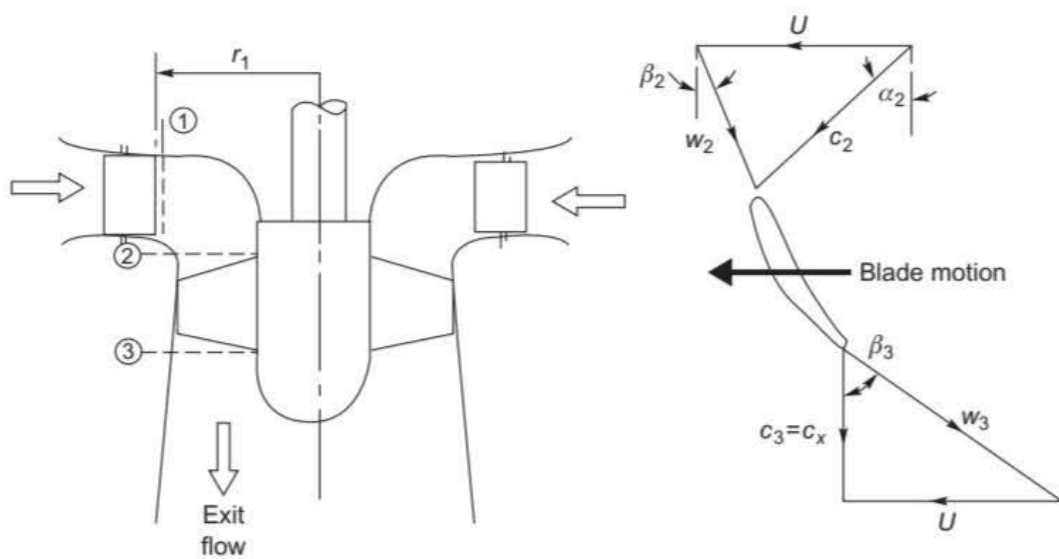
Η θεωρία των ροών ελεύθερης δίνης και τα κύρια αποτελέσματα για ένα ασυμπιεστο ρευστό ισχύουν. Οι λεπίδες του δρομέα θα έχουν αρκετά υψηλό βαθμό συστροφής και το ποσό αυτό εξαρτάται από την ισχύ της συνάρτησης κυκλοφορίας  $K$  και το μέγεθος της αξονικής ταχύτητας. Ακριβώς ανάντη του δρομέα, η ροή θεωρείται ότι είναι μια ελεύθερη δίνη και οι συνιστώσες της ταχύτητας είναι αντίστοιχα:

$$c_{\theta 2} = K/r, c_x = a \text{ σταθερά}(c) \quad (2.2.32) [38]$$

Οι σχέσεις στις γωνίες ροής είναι:

$$\tan \beta_2 = U/c_x - \tan a_2 = \Omega r/c_x - K/(rc_x) \quad (2.2.31) [38]$$

$$\tan \beta_3 = U/c_x = \Omega r/c_x \quad (2.2.31) [38]$$



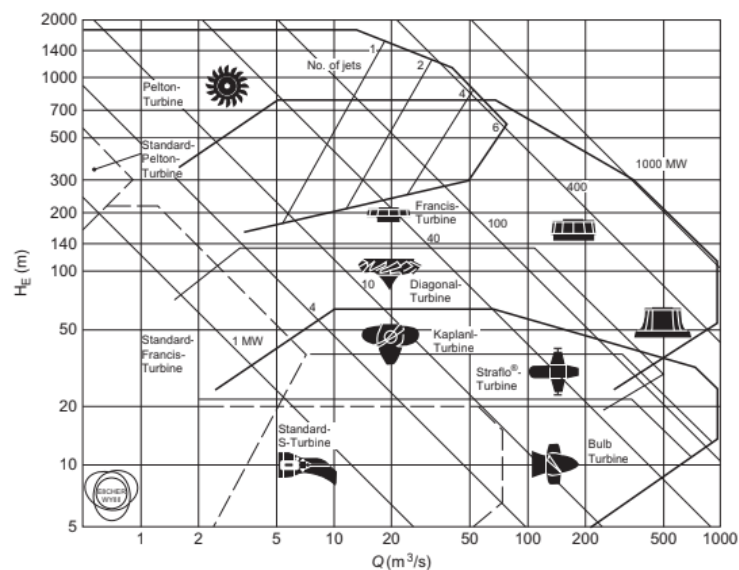
Σχήμα (2.2.j) Αριστερά απεικονίζεται η πλάγια όψη του υδροστρόβιλου Kaplan μαζί με τα βέλη που μας δείχνουν την κατεύθυνση της ροής του νερού και δεξιά τα τρίγωνα ταχυτήτων. [38]

### Ο αντλιοστρόβιλος

Ο αντλιοστρόβιλος (ή στροβιλαντλία), όπως προαναφέρεται σε συστήματα που έχουν μόνο ένα ηλεκτρικό μοτέρ για γεννήτρια ή κινητήρα, είναι ένα παράδειγμα συστήματος ικανού να παρέχει μεγάλα αποθέματα ισχύος με πολύ σύντομο χρόνο εκκίνησης και ο σχεδιασμός του βασίζεται γενικά στους στρόβιλους Francis και Kaplan. [38]

### Κριτήριο επιλογής στρόβιλου:

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα (2.2.k)), υπάρχουν γραμμές που φαίνεται να περικυκλώνουν κάποιους από τους στρόβιλους. Οι γραμμές αυτές ουσιαστικά οριοθετούν την περιοχή λειτουργίας των στρόβιλων. Σύμφωνα πάντα με τα δεδομένα των υπολογισμών μας δηλαδή το μανομετρικό ύψος, την παροχή και την ισχύ προβαίνουμε στην επιλογή του κατάλληλου στρόβιλου. Όμως διακρίνουμε ότι κάποιοι στρόβιλοι έχουν κοινά σημεία λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγουμε αυτό που ταιριάζει καλύτερα βάσει οικονομικών ή στις ιδιαιτερότητες του έργου. [51]



Σχήμα (2.2.k) Διάγραμμα όπου στον άξονα x δείχνει την παροχή, στον άξονα y το μανομετρικό ύψος, καθώς υπάρχει και μία κλίμακα αριθμησης στο κέντρο όπου δείχνει την ισχύ. Σε διάφορα σημεία του διαγράμματος υπάρχουν τα σχήματα και ονόματα των υδροστρόβιλων. [38]

### 2.3 Αντλίες

Σε ένα έργο αντλησιοταμίευσης ,όπως προαναφέρεται, το νερό πρέπει να έχει την δυνατότητα να επιστρέφει στον ψηλότερο ταμιευτήρα για να συνεχιστεί η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν δεν είναι εφικτό κατασκευαστικά ο υδροστρόβιλος να λειτουργήσει αντίστροφα ως αντλία, δηλαδή στροβιλαντλία, η εγκατάσταση μιας ξεχωριστής αντλίας αποτελεί μονόδρομο. [48][52]



Εικόνα (2.3.a) Φωτογραφία από εργοστάσιο κατασκευής φυγοκεντρικών ακτινικών αντλιών[21]

Αν και στο οικονομικό κομμάτι είναι αρκετά ακριβότερη μία τέτοια διάταξη (ξεχωριστά αντλία-στρόβιλος) εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπου στα υβριδικά συστήματα είναι η επικρατέστερη επιλογή:

- Η δυνατότητα να δουλεύει ταυτόχρονα η αντλία με τον στρόβιλο ,πλεονέκτημα που εξασφαλίζει την ομαλότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .
- Σε περίπτωση βλάβης της αντλίας ή του στροβίλου το ένα από τα δύο μπορεί να συνεχίσει να δουλεύει αν είναι ανάγκη.
- Οι σωληνώσεις από την αντλία η τον στρόβιλο δίνουν την δυνατότητα “by pass” σε περίπτωση συντήρησης των υπόλοιπων σωληνώσεων.

Έχοντας αυτά τα τρία πολύ σοβαρά πλεονεκτήματα κατά νου μπορούμε να αντιληφθούμε ότι η εγκατάσταση ξεχωριστής αντλίας από τον στρόβιλο είναι τεχνικά σωστότερη αν και ακριβότερη επιλογή. [51][52]

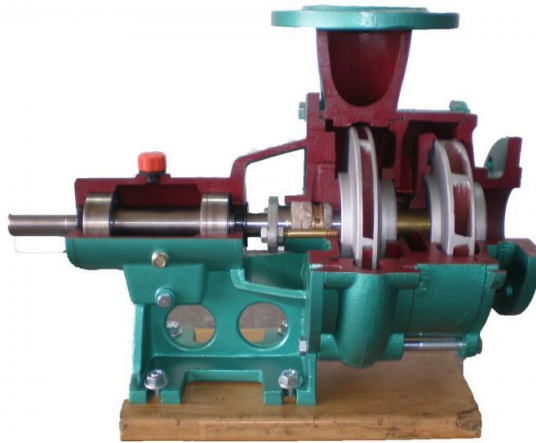
Οι αντλίες (Εικόνα (2.3.a)) είναι ρευστοδυναμικές μηχανές που μας δίνουν την δυνατότητα να δώσουμε κίνηση σε ένα ρευστό . Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιούμε έναν κινητήρα για να μας δώσει περιστροφική κίνηση όπου με την σειρά της η πτερωτή θα μετατρέψει την περιστροφική κίνηση μέσω της κεντρομόλου δύναμης σε κίνηση του ρευστού. Η αντλία ουσιαστικά είναι η αντίστροφη μηχανική διάταξη του στροβίλου.

Υπάρχουν διάφορα είδη αντλιών όπως οι αξονικές, οι βυθιζόμενες, οι πολυβάθμιες φυγοκεντρικές και οι εμβολοφόρες, ωστόσο οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι φυγοκεντρικές ακτινικές αντλίες (Εικόνα (2.3.b)). Για τα συστήματα αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιούνται αντλίες πολυβάθμιες ή μονοβάθμιες, μονής ή διπλής αναρρόφησης. Η επιλογή γίνεται με κριτήρια την υψομετρική διαφορά και την παροχή.

Μία αντλία αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Το περίβλημα
- Το στροφείο
- Τον διαχύτη
- Την άτρακτο που συνδέει την πτερωτή με τον ηλεκτροκινητήρα
- Τον ηλεκτροκινητήρα
- Την ηλεκτρονική πλακέτα (ηλεκτρονική διαχείριση) [51]





Εικόνα (2.3.b) Ακτινική φυγοκεντρική αντλία διπλού στροφείου σε τομή [20]

Ως προς το υπολογιστικό μέγεθος, ισχύουν όσα ισχύουν για τους στροβίλους στα τρίγωνα ταχυτήτων αλλά και στις εξισώσεις με μία σημαντική διαφορά :

Σε περίπτωση αντλίας η περύγωση είναι περύγωση επιβράδυνσης οπότε έχουμε ροή συμπίεσης άρα ισχύει :

$$\vec{w}_1 > \vec{w}_2 \text{ και } p_2 > p_1 \text{ [49]}$$

Εν αντιθέσει με την περύγωση του στροβίλου όπου είναι περύγωση επιτάχυνσης οπότε έχουμε ροή εκτόνωσης άρα ισχύει:

$$\vec{w}_1 < \vec{w}_2 \text{ και } p_2 < p_1 \text{ [49]}$$

Όπου  $w_{1,2}$  είναι οι ταχύτητες και  $p_{1,2}$  οι πιέσεις.

Συμπερασματικά αν εφαρμόσουμε τις εξισώσεις για τον υπολογισμό των στροβίλων η διαφορά είναι στο πρόσημο. Θετικό πρόσημο ισχύει για αντλία και αρνητικό για στρόβιλο.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν είναι η τοποθέτηση και η διάταξη της αντλίας ή των αντλιών. Για την κάλυψη της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς αν η μία αντλία δεν δύναται να καλύψει το μανομετρικό ύψος τότε γίνεται τοποθέτηση 2<sup>ης</sup> αντλίας σε σειρά. Δηλαδή η είσοδος της 2<sup>ης</sup> αντλίας συνδέεται στην έξοδο της 1<sup>ης</sup>. Για την κάλυψη μεγαλύτερων παροχών αν η αντλία του συστήματος κρίνεται ανεπαρκής, τότε γίνεται τοποθέτηση 2<sup>ης</sup> αντλίας παράλληλα με την πρώτη. Δηλαδή η είσοδοι και των δύο αντλιών όπως και οι έξοδοι συνδέονται στις ίδιες σωληνώσεις αντίστοιχα. [49][51][54]

Η επιλογή του αριθμού αντλιών δεν είναι μία απλή διαδικασία ειδικά όταν μιλάμε για ένα σύστημα όπου η άντληση αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας του, δηλαδή την αντροφοδότηση του άνω ταμειυτήρα. Η πολυπλοκότητα και το κόστος είναι δύο από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που δυστυχώς δεν αποφεύγονται εύκολα. Αν για παράδειγμα η μελέτη επιβάλλει σύστημα με εφεδρική αντλία το κόστος εγκατάστασης διπλασιάζεται ωστόσο υπάρχει το πλεονέκτημα της συνεχόμενης λειτουργίας σε περίπτωση συντήρησης ή βλάβης. Έχοντας υπ' όψιν ότι το κόστος της ενέργειας επηρεάζεται από την αβεβαιότητα της παραγωγής της η επιλογή ενός συστήματος με δύο διατάξεις αντλιών έχει μακροπρόθεσμα περισσότερα οφέλη. [52][67]

Ένα άλλο κριτήριο επιλογής είναι η ευελιξία που προσφέρει μία αντλία. Σε ένα υβριδικό σταθμό όταν έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, η ποσότητα του νερού που πρέπει να επιστρέψει στον άνω ταμειυτήρα μεταβάλλεται αναλόγως το αιολικό δυναμικό ή την διαθέσιμη ηλιοφάνεια, όπως και σε ώρες χαμηλότερης κατανάλωσης που μειώνουμε τις στροφές λειτουργίας των υδροστροβίλων. Η ευελιξία που θέλουμε σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η δυνατότητα ελέγχου στροφών είτε μηχανικά είτε ηλεκτρονικά. [52][59][68][69]

Μηχανικά γίνεται με τοποθέτηση μειωτήρα στροφών ανάμεσα σε κινητήρα και αντλία αν και δεν αποτελεί την καλύτερη λύση.

Ηλεκτρονικά οι στροφές ελέγχονται ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, δηλαδή: σε ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος με ένα ποτενσιόμετρο (πιθανώς να παρέχεται από τον κατασκευαστή) είτε πλήρως ρυθμιζόμενο είτε με συγκεκριμένα σημεία για τον έλεγχο της τάσης ενώ σε κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος το inverter αποτελεί την ασφαλέστερη επιλογή.

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου όπως ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης, αισθητήρες, plc, inverter, ακόμα και απομακρυσμένος έλεγχος με την χρήση διαδικτύου έχει λύσει τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα. Έτσι λοιπόν μας δίνεται η δυνατότητα να ελέγξουμε την αντλία ανάλογα τις ανάγκες που θα προκύψουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα υβριδικό σύστημα να λειτουργεί ενεργά και αυτόνομα δηλαδή με την χρήση αυτοματισμών να προσαρμόζεται όχι μόνο η λειτουργία της αντλίας αλλά όλου του συστήματος. [51][52]

Το σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι σε περίπτωση βλάβης λαμβάνουμε ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο όπως και η εκτίμηση του χρόνου συντήρησης γίνεται με αυτόν τον τρόπο.

Η εκκίνηση της στροβιλαντλίας δεν αποτελεί εύκολη υποθεση. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που απορροφάται κατά την εκκίνηση και λόγω της μεγάλης ισχύος μπορεί να γίνει καταστροφικό. Για τον λόγο αυτόν ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία. Η ισχύς η οποία απορροφάται από την αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της και με μηδενική παροχή είναι στο 30% της ονομαστικής της ισχύος, ενώ η ισχύς που απορροφάται από την αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής της με ανοικτά τα ρυθμιστικά περύγια αλλά κλειστή τη βάννα της κατάθλιψης είναι της τάξεως του 60% της ονομαστικής ισχύος. Επίσης η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής σε κενό (λειτουργία σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα) είναι της τάξεως του 1-2% της ονομαστικής ισχύος (υπάρχουν μόνο οι μηχανικές απώλειες εδράνων). Το ολικό ύψος για μηδενική παροχή είναι μεγαλύτερο από το ολικό ύψος στο κανονικό σημείο λειτουργίας (για την κανονική ταχύτητα περιστροφής), σε άλλη περίπτωση η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας θα ήταν ασταθής. [51][52][55]

Τρόποι εκκίνησης:

- a) **Εκκίνηση με την πτερωτή γεμάτη με νερό και τη στεφάνη των ρυθμιστικών περυσίων κλειστή.** Ο τρόπος αυτός εφαρμόζεται αφού το στροφείο πιάσει την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της αντλίας ισχύει δηλαδή η συνθήκη συγχρονισμού. Για να μπορέσουμε να το πετύχουμε όμως αυτό, θα πρέπει να υπάρχει βοηθητικός υδροστρόβιλος που θα προσδώσει την απαιτούμενη ισχύ. Μετά την επίτευξη της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής ανοίγουν σταδιακά τα ρυθμιστικά περύγια μέχρι το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Η μεταβατική κατάσταση λειτουργίας της αντλίας που περιγράφεται είναι ασταθής και θορυβώδης. Όσο διάστημα τα ρυθμιστικά περύγια είναι κλειστά, η ενέργεια που απορροφάται μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό της μηχανής, η οποία και απάγεται μέσω ανεξάρτητου εσωτερικού κυκλώματος παροχής νερού. [51]
- b) **Εκκίνηση με την πτερωτή κενή από νερό, τα ρυθμιστικά περύγια κλειστά και ανοικτή τη βάννα της κατάθλιψης.** Για να εφαρμοσθεί ο τρόπος αυτός πρέπει να απομακρυνθεί το νερό από την πτερωτή μέσω πεπιεσμένου αέρα που εκχύεται από ακροφύσιο στο σπειροειδές κέλυφος. Η ελεύθερη στάθμη του νερού στον αγωγό αναρρόφησης πρέπει να είναι χαμηλότερη από το κατώτερο σημείο της πτερωτής αυτό το πετυχαίνουμε ρυθμίζοντας τη πίεση. Στη συνέχεια το στροφείο τίθεται σε περιστροφή μέχρι την επίτευξη της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής είτε μέσω βοηθητικού υδροστρόβιλου είτε με κατ' ευθείαν σύζευξη στο δίκτυο υπό χαμηλή τάση. Ο συγχρονισμός του στροφείου επιτυγχάνεται σχετικά πιο εύκολα στην περίπτωση αυτή λαμβάνοντας υπόψη την πολύ μικρή ισχύ που απορροφά η πτερωτή. Στη συνέχεια, μειώνουμε προοδευτικά την πίεση του αέρα, οπότε η στάθμη του νερού ανεβαίνει, το φαινόμενο εξελίσσεται κρουστικά τη χρονική στιγμή κατά την οποία η στάθμη του νερού ξεπερνάει ολόκληρη την ακμή εισόδου των περυσίων: λόγω της περιστροφής της πτερωτής το νερό φυγοκεντρείται, γεμίζει απότομα πτερωτή και αυξάνει πολύ γρήγορα η απορροφούμενη ισχύς (από 1-3% φθάνει το 30-40% της ονομαστικής ισχύος). Για την αποφυγή αυτών των

κρουστικών φαινομένων έχουν δοκιμασθεί διάφοροι άλλοι τρόποι όπως η πλήρωση της πτερωτής από τον πάνω ταμιευτήρα μέσω βοηθητικού αγωγού που καταλήγει στο σπειροειδές κέλυφος μεταξύ της πτερωτής 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. Μόνο όταν έχει γεμίσει με νερό ή αντλία ανοίγουν σταδιακά τα ρυθμιστικά πτερύγια. [51]

Αξίζει να σημειωθεί πως όταν ο αγωγός αναρρόφησης έχει μεγάλο μήκος, η κατασκευή πύργου ανάπαλσης είναι απαραίτητη. Ο πύργος ανάπαλσης μειώνει την ένταση του υδραυλικού πλήγματος κατά την εκκίνηση της αντλίας, όμως προκαλεί ταλαντώσεις μεγάλης περιόδου και διάρκειας. Οι ταλαντώσεις αυτές υφίστανται μέχρι την αποκατάσταση της τελικής μόνιμης κατάστασης. [51][68]

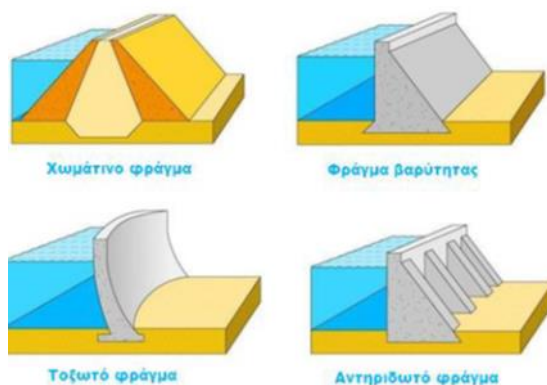
## 2.4 Φράγματα

Ένα από τα πιο σημαντικά κατασκευαστικά στοιχεία ενός έργου αντλησιοταμίευσης αποτελεί το φράγμα (σχήμα (2.4.a)).

Φράγμα είναι το τεχνικό έργο που κατασκευάζεται εγκάρσια στη κοίτη ενός φυσικού υδάτινου ρέματος με στόχο την έμφραξη της ροής και τη δημιουργία συλλεκτών υδάτων, δεξαμενές, τεχνητές λίμνες αποσκοπώντας στην αποθήκευση του νερού για την κάλυψη αναγκών. (Σχήμα (2.4.a)):

- Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Άρδευσης καλλιεργειών
- Ύδρευσης πόλεων & βιομηχανικών περιοχών
- Ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής ποταμών
- Διαμόρφωσης πλωτών διωρύγων, κλπ

Έργα μεγάλης σπουδαιότητας, η απόφαση υλοποίησης τους λαμβάνεται σε εθνικό ή ακόμα και διακρατικό επίπεδο (συνεργασία γειτονικών χωρών). Η ιδιαιτερότητα στην κατασκευή τους απαιτεί τη σύμπραξη μηχανικών διαφόρων ειδικοτήτων μεγάλης εμπειρίας εμπειρογνομόνων πανεπιστημιακών ιδρυμάτων. [31][32][34]



Σχήμα (2.4.a) τρισδιάστατη απεικόνιση των πιο συνηθισμένων ειδών φραγμάτων[31]

Με τον όρο τεχνητή λίμνη αποκαλούμε κάθε λίμνη που σχηματίστηκε με κατασκευή φράγματος, συνήθως στη ροή ποταμού, αλλά και πολύ μικρότερων υδάτινων ρευμάτων, που προέρχονται από την ίδια λεκάνη απορροής, όπως είναι η λίμνη του Μαραθώνα. Ο σκοπός της δημιουργίας τέτοιων λιμνών είναι η παραγωγή ενέργειας, η άρδευση, η ύδρευση και ο έλεγχος των πλημμυρών του ποταμού. Ο τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται για την αναφορά στις τεχνητές λίμνες για άρδευση και ύδρευση είναι ταμιευτήρας (αγγλ. reservoir). Στην Ελλάδα υπάρχουν, μέχρι σήμερα, 25 τέτοιες λίμνες με συνολική επιφάνεια 358,235 Km<sup>2</sup>. Η χρησιμότητα των τεχνητών λιμνών είναι ανεκτίμητη. [31][48][51]

Ο υπερχειλιστής συνήθως αποτελεί τμήμα του φράγματος. Είναι ουσιαστικά ο τρόπος να παροχετεύεται νερό από τον συγκεντρωμένο όγκο υδάτων κατά βούληση, ώστε να αποφεύγεται η υπερχειλίση του φράγματος.

## Τύποι φραγμάτων

Εύκαμπτα φράγματα γεωφράγματα (embankment dams):

Χωμάτινα (earth filled dams) ομογενή ή με πυρήνα

- Λιθόρριπτα (rock filled dams) με πυρήνα.
- Λιθόρριπτα με ανάντη πλάκα σκυροδέματος ΛΑΠΣ (concrete)
- Χωμάτινα ή λιθόρριπτα με ανάντη ασφαλτική μεμβράνη, κλπ.

Άκαμπτα φράγματα (rigid dams):

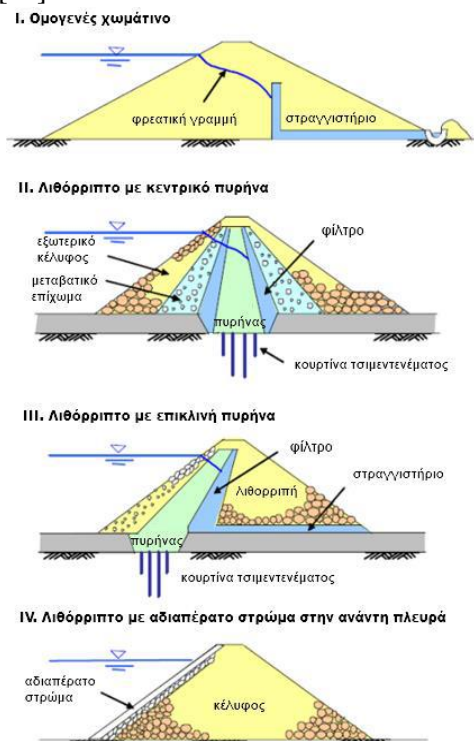
- Βαρύτητας σκυροδέματος (Gravity).
- Βαρύτητας κυλινδρούμενου σκυροδέματος (Rolled Compacted Concrete dams).
- Αξονοσυμμετρικά κυλινδρούμενου σκληρού επιχώματος ΑΚΣΕ (hard filled dams).
- Τοξωτά (Arch dams).
- Αντηριδωτά (Buttress dams), κλπ. [31]

Η επιλογή τύπου φράγματος επηρεάζεται κατά περίπτωση από τις επικρατούσες συνθήκες (γεωλογικές, υδραυλικές, υδρολογικές, περιβαλλοντικές κλπ).

Κοιλάδες με μεγάλα πλάτη και μαλακά εδάφη ευνοούν γεωφράγματα ενώ οι στενές και οι πολύ στενές κοιλάδες (τύπου V) με ανθεκτικά πετρώματα ευνοούν βαρυτικά τοξωτά φράγματα αντίστοιχα. [32][34]

Τμήματα χωμάτινων φραγμάτων (Σχήμα (2.4.b)).

- Στέψη φράγματος
- Πυρήνας φράγματος
- Διάφραγμα
- Φίλτρα στραγγιστηρίου
- Φρεάτιο αποστράγγισης
- Ανάντη πρόφραγμα
- Κατάντη πρόφραγμα [31]



Σχήμα (2.4.b) Τρισδιάστατη απεικόνιση για τα εύκαμπτα (χωμάτινα φράγματα)[31]

## Γεωφράγματα

Τα γεωφράγματα είναι τραπεζοειδούς διατομής και αποτελούνται από υδατοπερατό κυρίως σώμα (χώμα ή λιθορριπή), και από ένα κεντρικό αδιαπέρατο πυρήνα ή από ένα αδιαπέρατο στρώμα (σκυρόδεμα ή ασφαλτική μεμβράνη) στην ανάντη πλευρά.

Πλεονεκτούν καθώς συμπεριφέρονται ιξωδοπλαστικά και ως εκ τούτου μπορούν να ακολουθήσουν σημαντικές παραμορφώσεις του πυθμένα θεμελίωσης χωρίς να ρηγματώνεται το κυρίως σώμα του φράγματος ενώ μειονεκτούν στο γεγονός ότι είναι υπερπηδητά.

Έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις προστασίας έναντι ολισθήσεων πρηνών, καθιζήσεων εδάφους, κυματισμού νερών, διέλευσης οχημάτων. Μερικά παραδείγματα γεωφραγμάτων βλέπουμε παρακάτω. [31][32][34]

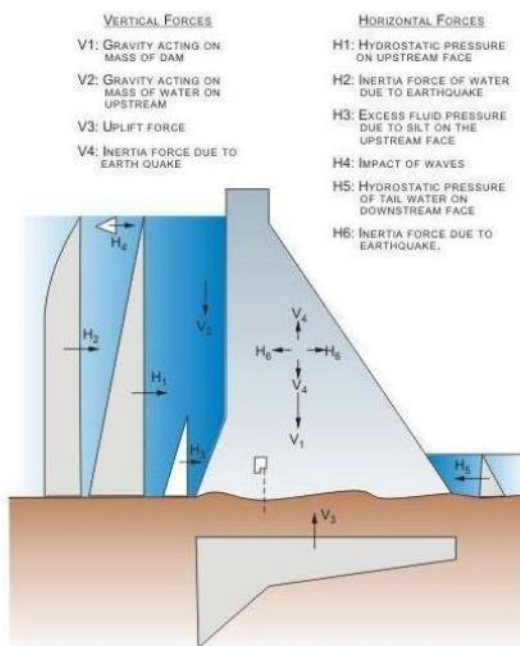
### Φράγματα βαρύτητας

Τα φράγματα βαρύτητας αντιμετωπίζουν τις φορτίσεις που δέχονται λόγω ιδίου βάρους (αντίσταση σε ολίσθηση & ανατροπή) και αναπτύσσουν τριβές στο σώμα και τη θεμελίωση. Ένα φράγμα βαρύτητας είναι ένα φράγμα κατασκευασμένο από σκυρόδεμα ή πέτρινη τοιχοποιία και έχει σχεδιαστεί για να συγκρατεί το νερό χρησιμοποιώντας κυρίως το βάρος του υλικού μόνο για να αντισταθεί στην οριζόντια πίεση του νερού που πέζει εναντίον του. Τα φράγματα βαρύτητας σχεδιάζονται έτσι ώστε κάθε τμήμα του φράγματος να είναι σταθερό, ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλο τμήμα του φράγματος.

Λόγω της κατασκευής τους δημιουργούνται ροπές σταθεροποίησης και πρέπει να θεμελιώνονται πάντα σε βραχώδες πέτρωμα. Το ελάχιστο πλάτος στέψης είναι τα 4,00m για τη διαμόρφωση οδού προσπέλασης μεταξύ των αντρείσμάτων.

Ασκούμενες δυνάμεις (Σχήμα (2.4.c)):

- Ίδιο βάρος.
- Άνοση (λόγω της πίεσης του νερού των πόρων).
- V & Hz υδροστατικές πιέσεις ανάντη & κατάντη.
- V & Hz ωθήσεις από επιχώσεις & των φερτά υλικά ανάντη & κατάντη.
- Σεισμικές φορτίσεις, Κυματισμοί.
- Φορτίσεις από θερμοκρασιακές μεταβολές, παραμορφώσεις εδάφους κλπ. [31][32][34]

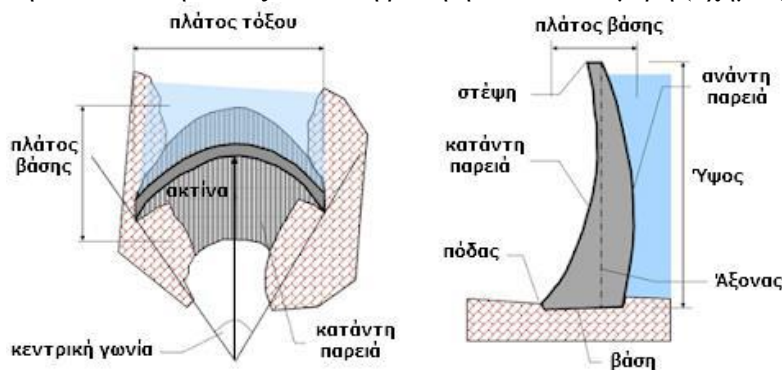


Σχήμα (2.4.c) Στο σχήμα απεικονίζονται και εξηγούνται οι οριζόντιες και κάθετες δυνάμεις που ασκούνται στο φράγμα[31]

## Φράγματα βαρύτητας ανά τον κόσμο

### Τοξωτό φράγμα

Ένα τοξωτό φράγμα ή αψιδωτό φράγμα (σχήμα (2.4.d)) είναι ένα φράγμα σκυροδέματος το οποίο είναι κατασκευασμένο με τη μορφή αψίδας. Το τοξωτό φράγμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η δύναμη του νερού πάνω σε αυτό, γνωστή ως υδροστατική πίεση, να πιέζει την αψίδα, να συμπιέζει και να ενισχύει την κατασκευή καθώς ωθεί στη βάση ή στα πλαϊνά μέρη (σχήμα (2.4.e)).

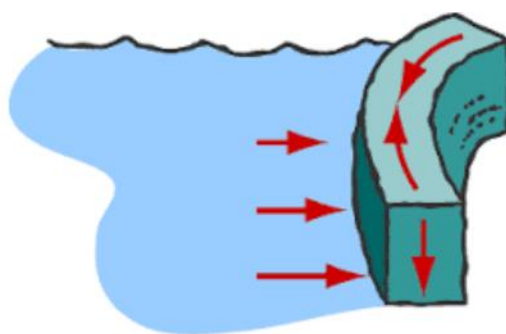


Σχήμα (2.4.d) Απεικονίζονται οι πάνω όψη(δεξιά) και πλάγια όψη(αριστερά) ενός τοξωτού φράγματος με τα μέρη που το αποτελούν[31]

Ένα τοξωτό φράγμα είναι το πλέον κατάλληλο για στενά φαράγγια ή φαράγγια με απότομους βράχους, ώστε να υποστηρίξουν τη δομή του φράγματος. Επειδή είναι λεπτότερα από οποιοδήποτε άλλο τύπο φράγματος, χρειάζονται πολύ λιγότερο οικοδομικό υλικό, καθιστώντας τα οικονομικά και πρακτικά για απομακρυσμένες περιοχές.

Συνεπώς:

- Φράγματα με καμπύλο άξονα που μεταφέρουν τις φορτίσεις που δέχονται στα αντερείσματα και στη θεμελίωση ως τόξο και πρόβολος αντίστοιχα.
- Το ίδιο βάρος δεν συνεισφέρει ουσιαστικά στη ανάλυση φορτίων συνεπώς δε απαιτούνται μεγάλες διατομές (οικονομία υλικού)
- Ενδείκνυται για κοιλάδες τύπου V με απότομα πρανή (μεγάλος λόγος ύψους προς πλάτος) και συμπαγή βραχώδη πετρώματα [31]



Σχήμα (2.4.e) Τα βέλη δείχνουν τις δυνάμεις που ασκούνται στο τοξωτό φράγμα[31]

### Αντηριδωτά Φράγματα

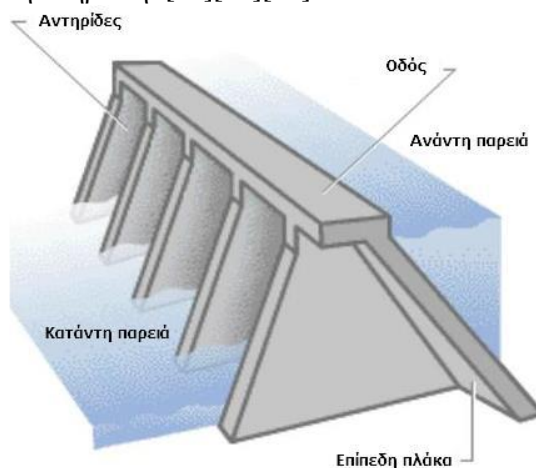
Παρόμοια συμπεριφορά με τα φράγματα βαρύτητας (αντίσταση σε ολίσθηση ανατροπή), τα φορτία μεταφέρονται μέσω των αντηρίδων η διατομή των οποίων μεταβάλλεται καθ' ύψος (σχήμα (2.4.f)). Μεταξύ των αντηρίδων παρεμβάλλονται επίπεδες ή καμπύλες πλάκες. Πλεονεκτούν έναντι των φραγμάτων βαρύτητας σε οικονομία υλικού μειωμένη άνοση. [31]

Άλλα φράγματα λιγότερο συνηθισμένα είναι:

### Τοξωτό φράγμα βαρύτητας

Ένα τοξωτό φράγμα βαρύτητας είναι ένα φράγμα με τα χαρακτηριστικά τόσο ενός τοξωτού φράγματος όσο και ενός φράγματος βαρύτητας. Πρόκειται για ένα φράγμα που καμπυλώνει προς τα πάνω σε μια στενόμακρη καμπύλη που κατευθύνει το μεγαλύτερο μέρος του νερού στα τοιχώματα των βράχων του φαράγγιού, παρέχοντας τη δύναμη να συμπιέσει το φράγμα. Συνδυάζει

τις δυνάμεις δύο κοινών μορφών φράγματος και θεωρείται συμβιβασμός μεταξύ των δύο. Είναι κατασκευασμένα από συμβατικό σκυρόδεμα, συμπαγές σκυρόδεμα (RCC) ή τοιχοποιία. Τα τοξωτά φράγματα βαρύτητας δεν ενισχύονται εκτός από τον υπερχειλιστή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του συμβατικού φράγματος σκυροδέματος είναι το τοξωτό φράγμα βαρύτητας Φράγμα Χούβερ. Το Φράγμα Τσανγκουνόλα είναι ένα παράδειγμα τοξωτού φράγματος βαρύτητας με συμπαγές σκυρόδεμα. Ένα τοξωτό φράγμα βαρύτητας απαιτεί μεγάλο όγκο εσωτερικής πλήρωσης. Ένα τοξωτό φράγμα βαρύτητας μπορεί να είναι πιο λεπτό από το καθαρό φράγμα βαρύτητας και να απαιτεί λιγότερη εσωτερική πλήρωση. [31][32][34]



Σχήμα (2.4.f) Τριδιάστατη απεικόνιση ενός αντηριδοτού φράγματος και των κατασκευαστικών ιδιαιτεροτήτων[31]

#### Φράγμα με καμάρες

Το Φράγμα με καμάρες είναι ένα είδος φράγματος εκτροπής που αποτελείται από μια σειρά από μεγάλες πύλες που μπορούν να ανοίξουν ή να κλείσουν, ώστε να ελέγχεται η ποσότητα του νερού που διέρχεται. Αυτό επιτρέπει στη δομή να ρυθμίζει και να σταθεροποιεί την ανύψωση του ποταμού για χρήση σε αρδευτικά και άλλα συστήματα. Οι πύλες τοποθετούνται μεταξύ των πλευρικών πύργων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την υποστήριξη του φορτίου νερού της δεξαμενής που δημιουργείται. [31][32][34]

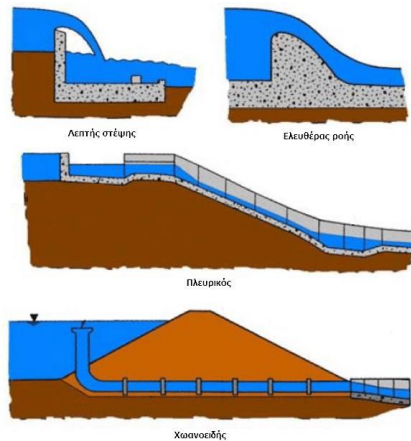
Στην αντλησιοταμίευση τα τοξωτά φράγματα προτιμούνται λόγω του χαμηλότερου κόστους κατασκευής αλλά και επειδή συνήθως οι περιοχές που επιλέγονται για ένα τέτοιο έργο, καθιστούν πιο κατάλληλο αυτόν τον τύπο.

#### Συνοδά έργα φραγμάτων

- Ανάντη Πρόφραγμα
- Κατάντη Πρόφραγμα
- Σήραγγα Εκτροπής
- Υπερχειλιστής
- Δεκάνη Ηρεμίας
- Εκκενωτής πυθμένα
- Σήραγγα Αποστράγγισης
- Αγωγός προσαγωγής (Υδροηλεκτρικά έργα)
- Σήραγγα φυγής (Υδροηλεκτρικά έργα) [31]

#### Υπερχειλιστής

Ζωτικής σημασίας για ένα φράγμα, όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι η ελεγχόμενη απελευθέρωση του νερού. Η κατασκευή που αναλαμβάνει το έργο της ελεγχόμενης απελευθέρωσης ροών από τα φράγματα διασφαλίζοντας ότι το νερό δεν θα υπερχειλίσει και δεν θα προκαλέσει ζημιά ή δεν θα καταστρέψει το φράγμα είναι ο υπερχειλιστής (σχήμα (2.4.g)).



Σχήμα (2.4.g) Τα είδη των υπερχειλιστών σε πλάγια όψη [31]

Τύποι υπερχειλιστών:

- Ελευθέρως πτώσεως
- Πλευρικός
- Χοανοειδής
- Σιφωνοειδής κλπ[31]

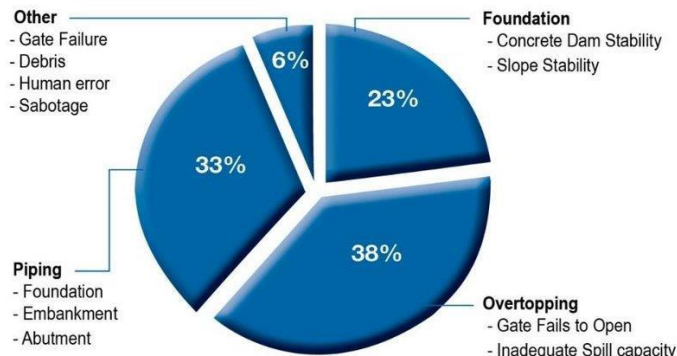
Έργα εκτροπής

Αποσκοπούν στη δημιουργία ασφαλών συνθηκών εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής ενός φράγματος. Τα συνήθη φράγματα περιλαμβάνουν πρόφραγμα και αγωγό εκτροπής (σήραγγα ή οχετός ή τάφρος ή διώρυγα κλπ). Συχνά τα έργα εκτροπής συνδυάζονται με μόνιμα λειτουργικά στοιχεία του φράγματος (εκκενωτή ή υδροληψία) όπως στα έργα αντλησιοταμίευσης. [31]

Λεκάνη ηρεμίας

Από την μηχανική ρευστών γνωρίζουμε πως οι δυνάμεις του νερού όταν εκτονώνεται από διαφορά ύψους μπορούν να γίνουν καταστροφικές. Για αυτό στα φράγματα υπάρχει η τεχνική διάταξη της λεκάνης ηρεμίας όπου αποσκοπεί στην ανάσχεση της ορμής του νερού. [31]

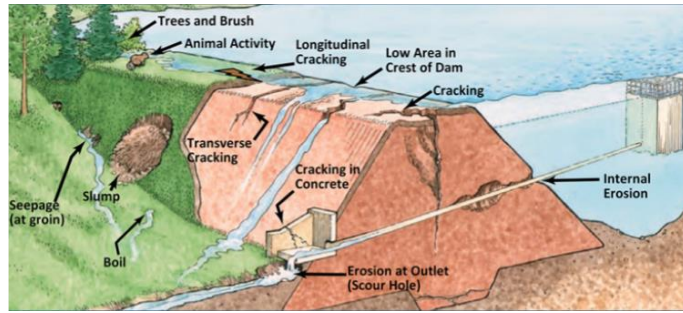
Αστοχία φραγμάτων



Σχήμα (2.4.h) Διάγραμμα «πίτας» που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή των αιτιών αστοχίας [31]

Όπως προανέφερα, η ορμή του νερού μπορεί να γίνει ανελέητη και για αυτόν τον λόγο η μελέτη ενός υδροηλεκτρικού πρέπει να γίνει από έμπειρους μηχανικούς έτσι ώστε να προβλεφθούν όσον τον δυνατόν περισσότεροι λόγοι αστοχίας και να προληφθούν τα χειρότερα. Τα ποσοστά φαίνονται στο σχήμα (2.4.h) και στο σχήμα (2.4.i) απεικονίζονται στα σημεία του φράγματος.





Σχήμα (2.4.ι) οι λόγοι αστοχίας ενός φράγματος με τα σημεία και τους λόγους που προκύπτουν[31]

Λόγοι αστοχίας:

- Σφάλμα της θυρίδας
- Σκουπίδια
- Ανθρώπινος παράγοντας
- Σαμποτάζ
- Κακής ποιότητας τσιμέντο
- Πρόχειρη κατασκευή
- Υπερχείλιση
- Ζημιά στα θεμέλια
- Υποχώρηση του αναχώματος[31]

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Η μέθοδος της αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα

Στη σύγχρονη εποχή, η ενέργεια έχει διαδραματίσει έναν υπερβατικό ρόλο στην κοινωνία, και μεταξύ των διαφορετικών πηγών που αποτελούν το ενεργειακό μείγμα, ο ηλεκτρισμός κυριαρχεί, ειδικά στις μέρες μας την ηλεκτροδότηση συστημάτων θέρμανσης και μεταφοράς. Επιπλέον, το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής έχει επηρεάσει τις κυβερνήσεις να εφαρμόσουν και να επιβάλουν τη νομοθεσία για τη μετάβαση από την παροχή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα, σε ανανεώσιμες πηγές ή «πράσινη» ενέργεια.[1][6][23][62]

Στο πλαίσιο αυτό, το ενσωμάτωση της παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια, για να βοηθήσει στην επίτευξη αυτού του στόχου. Έχουν γίνει και ενέργειες από την πλευρά της ζήτησης, για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αυξάνοντας την απόδοση εξοπλισμού και διεργασιών, και με την αντικατάσταση του εξοπλισμού που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα με ηλεκτρικό συσκευές, όπως στην περίπτωση των κλιβάνων αερίου και των θερμοσιφώνων. Επιπλέον, η αυτοκίνητοβιομηχανία έχει επίσης ξεκινήσει μεγάλης κλίμακας κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων ως εναλλακτική λύση οχήματα με συμβατικούς κινητήρες. Ωστόσο, όλες αυτές οι εξελίξεις και η μετάβαση σε νέες τεχνολογίες βασίζονται σε αποδοτικά και αξιόπιστα ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία αποτελούν την κεντρική αρχή για μία αποτελεσματική ένταξη.[3][61][69]

Σε αυτό το σενάριο, οι ερευνητές έχουν κάνει σημαντικές προσπάθειες στη μελέτη των μηχανισμών και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και τις οικονομικές πτυχές τους. Σαν αποτέλεσμα, εξαρτήματα του συστήματος ισχύος, όπως ευέλικτα συστήματα μετάδοσης AC και το Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (ESS) έχουν προκύψει, με πολλά τεχνολογικά εμπόδια που ξεπερνιούνται και το κόστος παραγωγής μειώνεται.[52][58]

Στην περίπτωση του ESS, αυτά αποδείχθηκαν κατάλληλα για την παροχή υποστήριξης στην ηλεκτρική ενέργεια δίκτυο ενισχύοντας την αξιοπιστία του συστήματος (επάρκεια και ασφάλεια) με την απόσβεση των επιπτώσεων της μεταβλητότητας της παραγωγής και της ζήτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παρέχοντας δυνατότητα ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας, βελτιώνοντας την ποιότητα ισχύος κ.λπ.. Ειδικότερα, μεγάλης κλίμακας ESS παρέχουν Ανεξάρτητοι Διαχειριστές Συστήματος (ISO) με την ευελιξία που απαιτείται για το δίκτυο μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδροηλεκτρικό σύστημα αποθήκευσης αντλίας και η αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES) είναι τα μόνα δύο οικονομικά και τεχνικά εφικτές εναλλακτικές λύσεις για μαζική αποθήκευση, με CAES είναι λιγότερο περιοριστικό ως προς τη θέση του, ειδικά σε περιοχές, όπου διατίθενται γεωλογικοί σχηματισμοί κατάλληλοι για να φιλοξενήσουν υπόγεια σπήλαια για αποθήκευση αέρα.[52][68]

Στην επαρχία του Οντάριο, στον Καναδά, οι δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας για ενίσχυση του δικτύου, οι λειτουργίες αξιολογούνται από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (IESO) μέσω διφασικής προμήθειας 50 MW ESS, που αναπτύσσεται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες εντός της επαρχίας, μία από τις οποίες είναι μια αδιαβατική εγκατάσταση CAES ισχύος 1,75 MW με αποσυνδεδεμένη φόρτιση και φάσεις εκφόρτισης στο Goderich, Οντάριο. Με βάση τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν, το IESO έχει παράσχει ορισμένες συστάσεις για μελλοντικές εξελίξεις ESS. Για παράδειγμα, προτείνει νέες επενδύσεις σε έργα ESS, που επιδιώκουν να συνδεθούν με το δίκτυο του Οντάριο, θα πρέπει να εξετάσει την παροχή πολλαπλών υπηρεσιών, εκτός από το ενεργειακό αρμπιτράζ για αυτούς να γίνει οικονομικά βιώσιμο. Προσδιορίζει επίσης τις μεγάλες διάρκειες κυκλικότητας ως έναν άλλο παράγοντα που επηρεάζει θετικά την επιτυχία των εγχειρημάτων ESS. Επομένως, αφού το CAES είναι ικανό

παρέχει πολλαπλές υπηρεσίες και έχει το πλεονέκτημα μεγέθους έναντι άλλων τεχνολογιών αποθήκευσης, οι προσδοκίες επιτυχίας από το CAES είναι υψηλές.[41][58]

Για το σκοπό αυτό, μελέτες για να προσδιορίσουν εάν μια συγκεκριμένη εγκατάσταση ESS είναι σε θέση να λειτουργήσει χωρίς περιορισμούς στο δίκτυο, χρειάζονται, γιατί μπορεί να υπάρχουν κάποια σημεία όπου οι περιορισμοί του δικτύου λόγω της συμφόρησης μετάδοσης μπορεί να εμποδίσουν τη βέλτιστη και αποτελεσματική τους λειτουργία. Κατά συνέπεια, το CAES μπορεί να οραματιστεί ότι θα συμμετέχει όχι μόνο στην ενεργειακή αγορά, αλλά και σε βοηθητικές υπηρεσίες όπως οι λειτουργικές αποθεματικές αγορές, επεκτείνοντας έτσι την επιχειρηματικές ευκαιρίες για επενδυτές. Αυτό απαιτεί την αξιολόγηση της απόδοσης του CAES σε αυτές τις πρόσθετες αγορές. Ειδικότερα, διάταξη ρύθμισης συχνότητας από το CAES είναι ελκυστικά λόγω της ικανότητας γρήγορης ανύψωσης, του σχετικά μεγάλου μεγέθους και της αδράνειας προστέθηκε στο σύστημα, κάτι που μπορεί να μην ισχύει για άλλες τεχνολογίες ESS .[45][58]

Από γεωλογικής άποψης, υπάρχουν μερικά μέρη στο Οντάριο όπου απλώνονται κοιτάσματα αλατιού και πορωδών βράχων και όπου έχουν επίσης ανακαλυφθεί υδρογονάνθρακες . Αυτά τα σπήλαια με πορώδη βράχο είναι κυρίως διαθέσιμα πάνω από τους υφάλους Guelph. Υπάρχουν ισχυρισμοί ότι ορισμένες εξαντλημένες δεξαμενές υδρογονανθράκων στην κομητεία Lambton, οι οποίες βρίσκονται εντός του ύφαλου Guelph, και έχουν μετατραπεί σε κοιτάσματα αποθήκευσης φυσικού αερίου, μπορεί να είναι εφικτή επιλογή για εγκαταστάσεις CAES. Επιπλέον, κοιτάσματα αλατιού υπάρχουν κατά μήκος του δυτικού περιθωρίου της λεκάνης του Μίσιγκαν, από το Άμχερστμπουργκ προς τα βόρεια έως το Κινκάρντιν και το Ουίνδσορ περιοχή, όπου οι τοποθεσίες που είχαν εξορυχθεί στο παρελθόν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως ταμειυτήρες CAES. Επίσης, από τότε το νοτιοδυτικό Οντάριο έχει ηλιακούς και αιολικούς πόρους, αυτή η περιοχή είναι ακόμα πιο ελκυστική για την CAES να μετριάσει τις σχετικές διακοπές της παροχής τους. Αυτό απαιτεί δυναμικές μελέτες συστήματος για χύδην εγκαταστάσεις CAES που συνδέονται με το δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς που σχετίζονται με την έγχυση ενέργειας σε αυτή τη θέση .[42][58]

Από τις προαναφερθείσες πληροφορίες, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα συστήματα CAES μπορούν αποφέρουν σημαντικά και μοναδικά οφέλη στο σύστημα από τη συμμετοχή σε διαφορετικές αγορές, συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες ESS, και όταν υπάρχει η κατάλληλη γεωλογία, όπως το παράδειγμά μας στο Οντάριο, για να φιλοξενήσει νέες εγκαταστάσεις CAES. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για την αποτελεσματική ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, ένα από τα οποία είναι η έλλειψη των κατάλληλων μοντέλων που επιτρέπουν την αξιολόγηση της πραγματικής αξίας αυτών των συστημάτων, με βάση την κατανόηση των τεχνικών δυνατοτήτων και περιορισμών τους.

Η έλλειψη μοντέλων μπορεί να αποδοθεί στην περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων και στη μικρή έρευνα στο CAES, επειδή μόνο λίγα πραγματικά έργα CAES έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως, ωστόσο είναι μια σχετικά παλιά τεχνολογία αποθήκευσης. Μόνο δύο χύδην εγκαταστάσεις CAES λειτουργούν επί του παρόντος: το εργοστάσιο Huntorf CAES (εικόνα(3.1.a)) 290 MW στη Γερμανία και το εργοστάσιο McIntosh 110 MW στην Αλαμπάμα των ΗΠΑ, και μερικά πρωτότυπα μικρής κλίμακας , ενώ άλλα έργα μεγάλης κλίμακας βρίσκονται ακόμη υπό ανάπτυξη, όπως το έργο Bethel CAES των 324 MW στο Τέξας, ΗΠΑ, σχεδιάστηκε να τεθεί σε εμπορική λειτουργία το 2022 .[6][41][42][43][45]

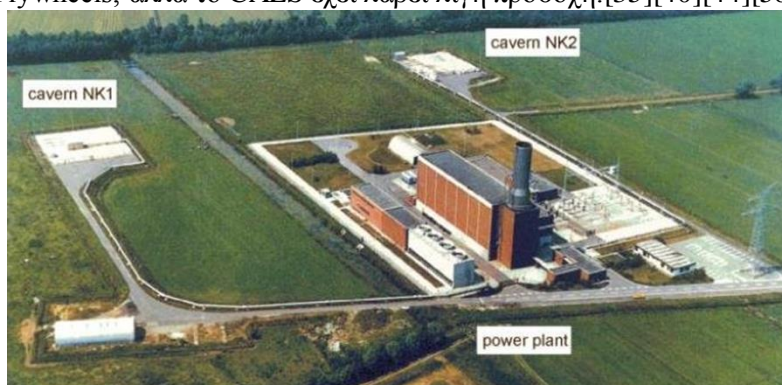
Αρκετά ακριβή μοντέλα CAES θα επιτρέψουν στα ISO, τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και τους προγραμματιστές έργων να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις των νέων συστημάτων CAES που συνδέονται με δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, όταν αυτά λειτουργούν υπό κανονικές ή μη συνθήκες, καθώς και για την κατανόηση των δυνατοτήτων τους να παρέχουν υπηρεσίες επιπλέον αρμπιτράζ, όπως επίσης και την ρύθμιση τάσης και συχνότητας. Για αυτό, τα μοντέλα θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιπροσωπεύουν το σύστημα CAES για ολόκληρο το εύρος λειτουργίας του· ως εκ τούτου, όρια και έλεγχοι πρέπει επίσης να μοντελοποιηθούν.[44][58]

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα μοντέλα CAES στοχεύουν στη μελέτη των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των εξαρτημάτων, όπως η απόδοση του συμπιεστή και του διαστολέα , ενώ μόνο λίγα

προσπάθησε να μοντελοποιήσει το σύστημα CAES συνδεδεμένο σε ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, τέτοια έργα έχουν αρκετούς περιορισμούς, όπως η χρήση μη πρακτικών ηλεκτρικών μηχανών ως διεπαφή με το πλέγμα, η μη ρεαλιστική αναπαράσταση της στροβιλομηχανής (συμπιεστής και στρόβιλος) και περιορισμένη ή έλλειψη συστημάτων ελέγχου. [40][44][58]

Ένα επιπλέον ζήτημα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές δικτύου όταν αναπαριστούν ένα νέο σύστημα, όπως π.χ το ESS, για τις μελέτες δικτύου, είναι η έλλειψη γενικών μοντέλων που επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών σχεδίων εξοπλισμού, προδιαγραφές ή ακόμα και διαφορετικούς παρόχους με απλή παραμετροποίηση του μοντέλου. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνονται γενικά μοντέλα ESS που μπορούν να υλοποιηθούν σε εμπορικούς σκοπούς. [36][44][58]

Το λογισμικό συστημάτων ισχύος έχει αποτελέσει το επίκεντρο πολλών ερευνητών. Όπως για παράδειγμα, το West3 του Συντονιστικού Συμβουλίου Ηλεκτρικής Ενέργειας (WECC) και του Ινστιτούτου Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI) έχουν προτείνει γενικά μοντέλα μεταβατικής ευστάθειας συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών (BESSs), τα οποία έχουν υιοθετηθεί από διάφορα πακέτα λογισμικού, συμπεριλαμβανομένων των TSAT της Powertech. Ωστόσο, ενώ οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην τυποποίηση αυτά τα μοντέλα για τεχνολογίες αποθήκευσης όπως BESS ή Flywheels, αλλά το CAES έχει λάβει λίγη προσοχή. [35][40][44][58]



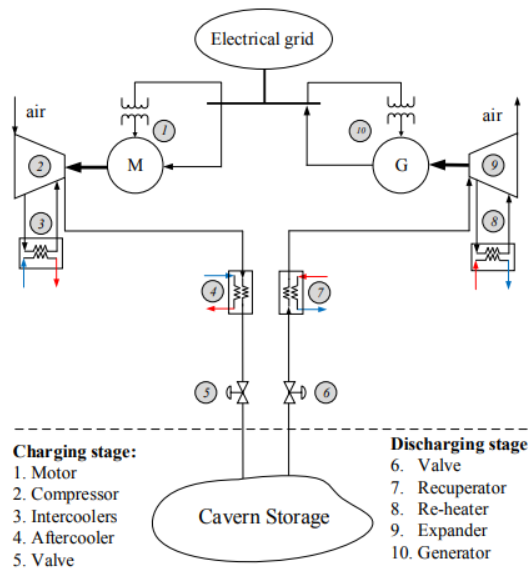
Εικόνα (3.1.a) αεροφωτογραφία του CAES στο Huntorf [43]

Θερμοδυναμικά μοντέλα σταθερής κατάστασης και δυναμικά.

Το μεγαλύτερο μέρος της υφιστάμενης έρευνας για τη μοντελοποίηση CAES επικεντρώνεται στην περιγραφή των θερμοδυναμικών διεργασιών που εμπλέκονται στη συμπίεση του αέρα στο σπήλαιο και την επέκτασή του όταν είναι έξω από το σπήλαιο, με στόχο να ποσοτικοποιηθεί η απόδοσή του μέσω του υπολογισμού των αποδόσεων για συγκεκριμένες συνθήκες σταθερής κατάστασης. Σε αυτά τα έργα, οι αλλαγές στην πίεση τη θερμοκρασία, και τη μηχανική εργασία που γίνεται σε κάθε διαστολή μοντελοποιείται και το στάδιο συμπίεσης είτε ως πολυτροπική είτε ως ισεντροπική διεργασία, υποθέτοντας ότι ο αέρας συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο. [45][46][58]

Μερικά από τα μοντέλα ενσωματώνουν επίσης δυναμική συμπεριφορά όπως ένας αδιαβατικός σταθμός παραγωγής CAES, λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό της περιστροφικής αδράνειας στους συρμούς συμπίεσης και διαστολής, την θερμική αδράνεια των εναλλακτών θερμότητας και στοιχείων θερμικής αποθήκευσης, και την μακροπρόθεσμη δυναμική του σπηλαίου. Ομοίως, γίνεται μελέτη για την μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα CAES σπήλαιο για τρεις διαφορετικούς τύπους τοίχων σπηλαίων: αδιαβατικό, ισόθερμο και ένα στο οποίο η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί μέσω των τοίχων του σπηλαίου ως αποτέλεσμα της πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και του περιβάλλοντός του. [45][46][58]

Η τεχνολογία CAES χρησιμοποιεί τον αέρα ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας συμπιέζοντάς τον σε δεξαμενές ή φυσικές δεξαμενές, όπως σπήλαια, που μπορούν αργότερα να εκτονωθούν σε έναν στρόβιλο που με την σειρά του θα οδηγήσει μια γεννήτρια όπου με την σειρά της διοχετεύει την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Ένα γενικό σύστημα CAES και τα κύρια εξαρτήματα παρουσιάζονται στο παρακάτω (σχήμα (3.1.b)).



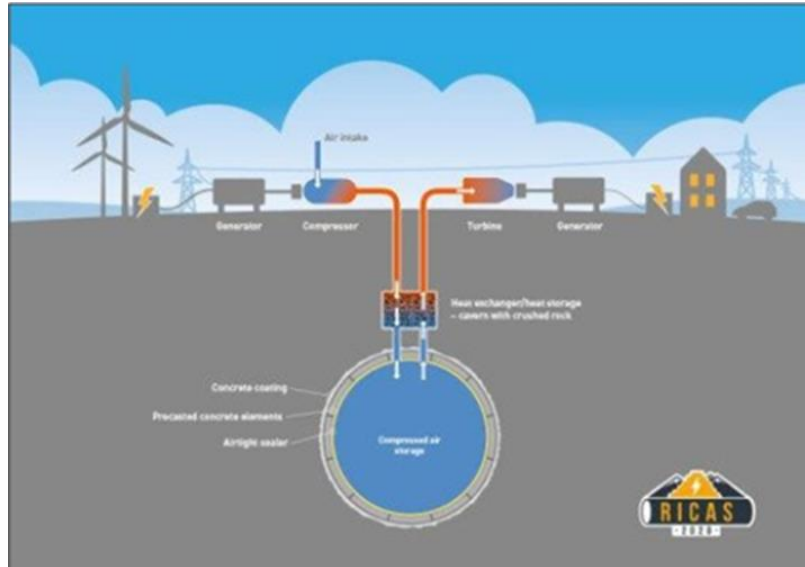
Σχήμα (3.1.b) Μηχανολογικό σχέδιο μιας τυπικής εγκατάστασης CAES [58]

Η λειτουργία του αποτελείται από τις ακόλουθες τρεις λειτουργίες:

- Λειτουργία συμπίεσης ή φόρτισης: ο αέρας, σε συνθήκες περιβάλλοντος, συμπιέζεται από έναν συμπιεστή, ο οποίος κινείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα που τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο πεπιεσμένος αέρας διοχετεύεται μέσω σωλήνων σε μια δεξαμενή όπου παραμένει αποθηκευμένος και καθώς ο αέρας εγχέεται, η εσωτερική πίεση της δεξαμενής και η δυναμική της ενέργεια αυξάνεται. Για την αποτελεσματική αποθήκευση του αέρα στη δεξαμενή, ακολουθούν διάφορα στάδια συμπίεσης μπορεί να είναι απαραίτητο με intercooler μεταξύ των σταδίων και επίσης ένα aftercooler για μείωση τη θερμοκρασία του αέρα περαιτέρω, έτσι ώστε να αποφεύγεται τη θερμική καταπόνηση στη δεξαμενή. Κατά τη διάρκεια αυτής της κατάστασης λειτουργίας, το σύστημα CAES συμπεριφέρεται ως φορτιστής- κινητήρας..
- Λειτουργία παραγωγής ή εκκένωσης: Ο αέρας μεταφέρεται μέσω των σωλήνων από την αποθήκευση δεξαμενή, προθερμαίνεται και στη συνέχεια εκτονώνεται σε στρόβιλο. Η διαδικασία εκτόνωσης είναι συνήθως πολλαπλών σταδίων με αναθέρμανση μεταξύ των σταδίων. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, το σύστημα CAES συμπεριφέρεται ως γεννήτρια.
- Λειτουργία ρελαντί: Σε αυτήν τη λειτουργία, το CAES δεν φορτίζει ούτε εκφορτίζει, αλλά συγχρονίζεται με το δίκτυο να μπορεί να παρέχει υποστήριξη τάσης. [52][58]

Τα συστήματα CAES διαφοροποιούνται από τα συμβατικά GT, τα οποία διαθέτουν επίσης συμπιεστή και τουρμπίνα στον θερμικό τους κύκλο, στο ότι οι μάζες του ρότορα της γεννήτριας, του συμπιεστή και του στρόβιλου συγκεντρώνονται στον ίδιο άξονα σε GT. Επομένως περίπου τα 2/3 της ισχύος που παρέχεται από τον στρόβιλο χρησιμοποιούνται για την κίνηση του συμπιεστή. Από την άλλη πλευρά, στο CAES, αυτά είναι πλήρως αποσυνδεδεμένα και μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα. Ως εκ τούτου, η μέση απόδοση του CAES είναι υψηλότερη, στο εύρος 40-89%, ανάλογα με το τύπο και τη διαμόρφωση CAES.

Ένα μόνο μηχάνημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα CAES, όπως στο Huntorf ή στο McIntosh, που μπορεί να λειτουργήσει ως γεννήτρια ή κινητήρας μέσω ενός συμπλέκτη που αποσπά τον συμπιεστή ή τουρμπίνα αναλόγως. Ωστόσο, σε αυτή τη διατριβή το σύστημα CAES μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας δύο σύγχρονες μηχανές, που λειτουργούν και ελέγχονται ανεξάρτητα, όπως στην περίπτωση του Μπέθελ και του Γκόντερικ. Η χρήση σύγχρονων μηχανών ενισχύει την τάση τον έλεγχο και την ρύθμιση του συστήματος και διευκολύνει τον έλεγχο του συμπιεστή και του στρόβιλου καθώς οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ρότορα είναι χαμηλές, ακόμη και σε μεταβατικές περιόδους. [52][58]



Σχήμα (3.1.c) Στο σχήμα φαίνονται τα στοιχεία λειτουργίας ενός CAES [52]

Γενικά η απόδοση ανάκτησης του συστήματος συμπιεσμένου αέρα μοιάζει με εκείνη των υδροηλεκτρικών.

Μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας CAES (σχήμα (3.1.c)) είναι τα ακόλουθα :

- Είναι κατάλληλο για δευτερεύουσες αποθεματικές υπηρεσίες, αφού ο χρόνος εκκίνησης από ψυχρή κατάσταση μέχρι το πλήρες φορτίο είναι περίπου 15 λεπτά.
- Μπορεί να παρέχει ανταπόκριση στη ζήτηση με τον κατάλληλο προγραμματισμό της λειτουργίας χρέωσης, και προσαρμόζοντας το σχήμα του φορτίου του, καθώς η ζήτηση φόρτισης της εγκατάστασης CAES (τρόπος συμπίεσης) μπορεί να είναι διαφορετική από εκείνη της γεννήτριας, εάν απαιτείται, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μηχανήματα για τα στάδια παραγωγής/συμπίεσης.
- Μπορεί να παρέχει ρύθμιση συχνότητας και τάσης.
- Είναι πιο αξιόπιστο από τους στρόβιλους καύσης απλού κύκλου, λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών στο εσωτερικό του στρόβιλου (π.χ., 815,56 °C για ένα σύστημα 220 MW, σε σύγκριση με 1.204,44 °C για μία παρόμοια συμβατική γεννήτρια αερίου απλού κύκλου).
- Η κατανάλωση καυσίμου είναι μόνο 30 – 40% μιας συμβατικής μονάδας τουρμπίνας καύσης.
- Έχει υψηλούς ονομαστικούς ρυθμούς ράμπας στην περιοχή από 22 έως 33% της ισχύος της πινακίδας ανά λεπτό. Οι ακόλουθες προδιαγραφές ράμπας για CAES: 0 έως 100% της ονομαστικής ισχύος σε λιγότερο από 10 λεπτά. αύξηση από 10 σε 100% σε 4 λεπτά και 2 λεπτά σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. και ράμπα από 50 έως 100 % σε λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα. [52][58]

Εμφανίζει πρακτικότητα για εφαρμογές μαζικής αποθήκευσης που απαιτούν την εκφόρτιση της ενέργειας για μεγάλες περιόδους συνήθως, περισσότερο από 5 ώρες στην ονομαστική ισχύ εξόδου. Τα CAES και τα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν αρκετά κοινά, όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής τους, τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας αλλά και τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας.

Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας για την αποθήκευση του αέρα μπορεί να προέρχεται είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όταν αυτές μπορούν να παράγουν περισσότερο από όσο απαιτείται, είτε από το ηλεκτρικό δίκτυο όταν η τιμή της ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλή και συμφέρει να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση, όταν η τιμή θα σημειώσει άνοδο. [52][58]

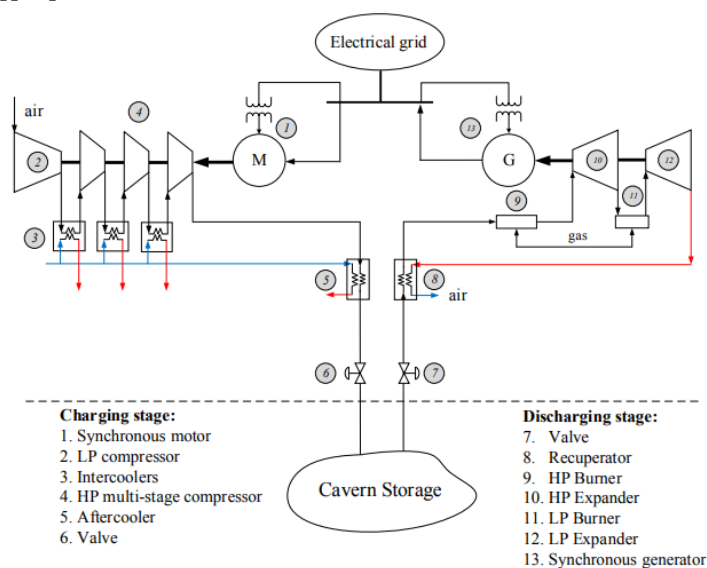
Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα. Οι διαφορές μεταξύ τους έχουν να κάνουν με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η συμπίεση του αέρα, με

τη δυνατότητα αλλά και το ποσοστό εκμετάλλευσης της ενέργειας που εκλύεται κατά τη συμπίεση αλλά και με το μέσο με το οποίο γίνεται η αναθέρμανση του αέρα για την παραγωγή ενέργειας από τον αποθηκευμένο πεπιεσμένο αέρα. Έτσι, οι τεχνολογικά διαθέσιμοι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα είναι:

1. Διαβατικοί Σταθμοί CAES
2. Αδιαβατικοί Σταθμοί CAES
3. Ισοθερμικοί Σταθμοί CAES

**Διαβατικοί Σταθμοί CAES:**

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου συστήματος CAES είναι ότι καίει φυσικό αέριο για να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα πριν διασταλεί στον στρόβιλο. Τα κύρια στοιχεία και οι αλληλεπιδράσεις μιας υπόγειας διαβατικής εγκατάστασης CAES απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (3.1.d). [52][58]



Σχήμα (3.1.d) Μηχανολογικό σχέδιο ενός Διαβατικού CAES πολυβάθμιου συμπιεστή. Τα μπλε βέλη δείχνουν τον κρύο αέρα και τα κόκκινα τον θερμό.[58]

Ο συρμός συμπίεσης περιλαμβάνει έναν αξονικό συμπιεστή χαμηλής πίεσης (LP) και έναν φυγόκεντρο συμπιεστή πολλαπλών σταδίων υψηλής πίεσης (HP) για την επίτευξη του επιθυμητού εύρους λειτουργίας πίεσης στο σπήλαιο. Μια ρυθμιστική βαλβίδα χρησιμοποιείται για να μειώσει τον αέρα του συμπιεστή της πίεσης εκκένωσης στην πραγματική πίεση στο σπήλαιο. Τα intercoolers έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την θερμοκρασία εισόδου στα διάφορα στάδια για την κατά προσέγγιση ισοθερμική συμπίεση, και έτσι μειώνουν την ισχύ που απαιτείται από τον κινητήρα. Το aftercooler υπάρχει για μείωση των απωλειών και θερμική καταπόνηση στο σπήλαιο. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η θερμότητα που λαμβάνεται στην καυτή πλευρά του οι ενδιάμεσοι ψύκτες (intercoolers) δεν χρησιμοποιούνται. Στην εγκατάσταση Huntorf CAES χρησιμοποιούνται τρεις ενδιάμεσοι ψύκτες, ένας μετά τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης και δύο μεταξύ των τριών σταδίων του συμπιεστή υψηλής πίεσης. [40][41][43][58]

Ο στρόβιλος έχει δύο κύρια εξαρτήματα: τον θάλαμο καύσης (ή καυστήρα) και τον διαστολέα. Όπως και στη συμπίεση, χρησιμοποιούνται πολλαπλά στάδια στη διαστολή στο Χάντορφ, χρησιμοποιούνται διαστολείς υψηλής πίεσης (HP) και χαμηλής πίεσης (LP). Ο αέρας από το σπήλαιο προθερμαίνεται στον ανακτητή χρησιμοποιώντας την παραμένουσα θερμότητα του αέρα εξαγωγής του χαμηλής πίεσης διαστολέα για αύξηση της απόδοσης, η οποία στη συνέχεια συνδυάζεται με καύσιμο και καίγεται στον υψηλής πίεσης θάλαμο καύσης για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου στον διαστολέα υψηλής πίεσης. Μετά, ο αέρας ξαναθερμαίνεται σε έναν καυστήρα χαμηλής πίεσης και διαστέλλεται στον διαστολέα χαμηλής πίεσης, ο οποίος

αυξάνει την απόδοση του κύκλου διαστολής, καθώς το έργο εκτόνωσης είναι ανάλογο με την είσοδο θερμοκρασίας σε μια τουρμπίνα δηλαδή το αέριο καταναλώνεται σε αυτή τη διαδικασία. Ο στρόβιλος μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους: σταθερή πίεση εισόδου ή μεταβλητή είσοδο πίεσης. Στο πρώτο, ο αέρας στραγγαλίζεται έτσι ώστε να παραμένει η πίεση εισόδου του καυστήρα σταθερή ανεξάρτητα από την πίεση του σπηλαιίου, ενώ στο τελευταίο, η πίεση εισόδου του καυστήρα είναι η πίεση του σπηλαιίου. [44][58]

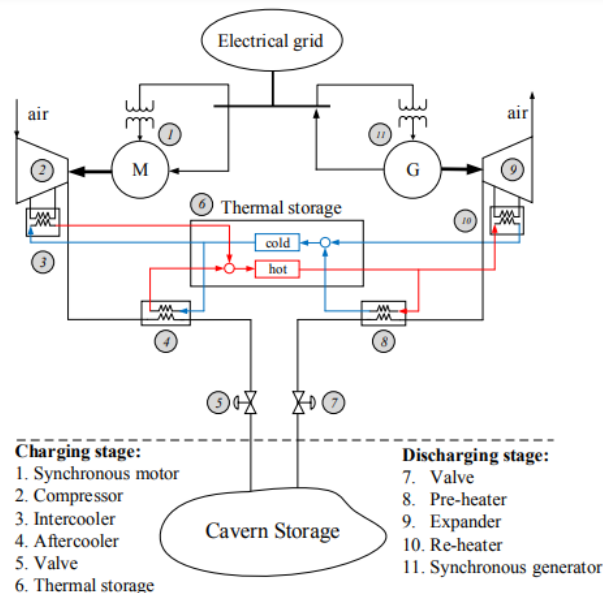
Οι δύο υπάρχουσες μεγάλες εγκαταστάσεις CAES, Huntorf και McIntosh, και η εγκατάσταση που αναπτύσσεται στο Bethel, είναι διαβατικές, με αποτελεσματικότητα μετ' επιστροφής 46% και 54% αντίστοιχα.

## 2) Αδιαβατικοί CAES

Όταν ο αέρας συμπιέζεται προς αποθήκευση, η θερμοκρασία του αυξάνεται (εφόσον πρόκειται για ένα συμπιεστό αέριο) σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(n-1)/n} \quad (3.1.1) \quad [52]$$

όπου  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία και  $P$  η πίεση, ενώ οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στην κατάσταση πριν και μετά τη συμπίεση αντίστοιχα, ενώ  $n$  είναι ο πολυτροπικός εκθέτης για την μη αντιστρεπτή διεργασία συμπίεσης. Η θερμότητα της συμπίεσης μπορεί να διατηρηθεί στον συμπιεσμένο αέρα ή σε ένα άλλο μέσο αποθήκευσης θερμότητας και έπειτα να ανακτηθεί στον αέρα προτού αυτός εκτονωθεί διά μέσου του στροβίλου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αδιαβατική αποθήκευση και έχει ως αποτέλεσμα την αποθήκευση υψηλής απόδοσης. Υπενθυμίζεται ότι, για ένα δοσμένο λόγο πίεσης το έργο του στροβίλου είναι ευθέως ανάλογο με την απόλυτη θερμοκρασία εισαγωγής. Υπενθυμίζεται επίσης ότι, οι γραμμές σταθερής πίεσης σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας για αέρια παρουσιάζουν απόκλιση σε μεγάλες θερμοκρασίες έτσι ώστε, το ισεντροπικό έργο, το οποίο είναι ίσο με την κάθετη απόσταση μεταξύ δύο οποιονδήποτε γραμμών σταθερής πίεσης, αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Ανακτώντας την θερμότητα στον αέρα προστατεύονται τα μέρη του στροβίλου από τον παγετό αν αέρας χαμηλής θερμοκρασίας πρόκειται να εκτονωθεί διαμέσου αυτού (σχήμα (3.1.e)). [38][52][58]



Σχήμα (3.1.e) Μηχανολογικό σχέδιο ενός Αδιαβατικού CAES. Τα μπλε βέλη δείχνουν τον κρύο αέρα και τα κόκκινα τον θερμό.[58]

Σε αυτόν τύπο CAES, η θερμότητα που παράγεται κατά τη διαδικασία συμπίεσης ανακτάται από intercoolers και aftercoolers, και στη συνέχεια αποθηκεύονται σε υγρή ή στερεή μορφή, όπως λιωμένο αλάτι ή ειδικά κεραμικά στη «θερμική αποθήκευση». Το αποθηκευμένο ζεστό ρευστό αντλείται στον στρόβιλο κατά τη διάρκεια της διαστολής για να προθερμανθεί ο αέρας που



προέρχεται από το σπήλαιο και ξαναθερμαίνεται το μεταξύ των σταδίων επέκτασης. Τα υγρά που φεύγουν από την ψυχρή πλευρά του προθερμαντήρα του αναθερμαντήρα αντλούνται σε ένα στοιχείο ψυχρής αποθήκευσης και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για αφαίρεση της θερμότητας των συμπιεστών στο intercooler και aftercooler. Αφού ο θερμικός κύκλος δεν περιλαμβάνει καύση αερίου, η απόδοση του αδιαβατικού CAES είναι υψηλότερη από αυτή του διαβατικού CAES, το οποίο αναφέρεται ότι είναι μεταξύ 60 και 70%. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόδοση των ενδιάμεσων μεταψυκτών και αναθερμαντήρων. Ομοίως, η θερμική αποθήκευση πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (600°C– 700°C) να ζεσταθεί ο αέρας από το σπήλαιο σε μια βέλτιστη θερμοκρασία για την είσοδο στροβίλου. Επομένως, η θερμική αποθήκευση απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες εκφόρτισης από τον συμπιεστή (υψηλότερες από τη θερμοκρασία αποθήκευσης), η οποία συνεπάγεται ειδικούς σχεδιασμούς στροβιλομηχανών. Ένα παράδειγμα του αδιαβατικού CAES είναι η εγκατάσταση 1,75 MW στο Goderich, Οντάριο, Καναδάς, που αναπτύχθηκε από την εταιρία Hydrostore. Η βασική δομή λειτουργίας των AA-CAES αναλύεται ως εξής, διακρινόμενη στα μονοβάθμια και στα διβάθμια αδιαβατικά CAES:

#### Μονοβάθμια AA-CAES

Όταν διατίθεται περίσσεια παραγωγής ισχύος από τη μονάδα ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού, ο αέρας συμπιέζεται σε μία βαθμίδα συμπιεστή χωρίς ψύξη, απελευθερώνοντας τη θερμότητα που ανακτά κατά τη συμπίεση σε μία ανεξάρτητη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, πριν την αποθήκευσή του στη δεξαμενή αποθήκευσης του κρύου συμπιεσμένου αέρα. Τις περιόδους μεγάλης ζήτησης για κάλυψη των αναγκών που θα προκύψουν, γίνεται αναθέρμανση στον συμπιεσμένο αέρα σε θερμοκρασία 600°C για να εισέλθει σε στρόβιλο μιας βαθμίδας, μέσω της ανάκτησης της αποθηκευμένης θερμότητας. [45][52][58]

#### Διβάθμια AA-CAES

Σε αδιαβατικά CAES με διβάθμια συμπίεση του εργαζόμενου μέσου, η θερμότητα, που προσδίδεται στον αέρα κατά τη συμπίεσή του στις δύο βαθμίδες του συμπιεστή, αποθηκεύεται σε διαφορετικές δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας όπως φαίνεται στον ανερχόμενο σταθμό της Καλιφόρνιας (εικόνα (3.1.f)). Κατά τις περιόδους εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης, η θερμότητα, που έχει αποθηκευτεί μετά τη χαμηλή και την υψηλή βαθμίδα του συμπιεστή, ανακτάται από τον συμπιεσμένο αέρα πριν από την είσοδό του στη βαθμίδα χαμηλής και υψηλής πίεσης του στροβίλου αντίστοιχα.



Εικόνα (3.1.f) Τρισδιάστατη αναπαράσταση του ανερχόμενου CAES στην Καλιφόρνια [30]

Με τα διβάθμια AA-CAES επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας (kWh) αποθηκευμένης ενέργειας ανά  $m^3$  όγκου ταμειυτήρα αποθήκευσης), αντισταθμίζοντας με αυτό τον τρόπο την περισσότερο πολύπλοκη κατασκευή του συστήματος (δύο ταμειυτήρες αποθήκευσης, σωληνώσεις μεταφοράς αέρα).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των αδιαβατικών CAES είναι :

- η εξάλειψη της κατανάλωσης καυσίμου για την αναθέρμανση του αέρα πριν από την εκτόνωσή του στους αεροστροβίλους,

- η συμπίεση του αέρα χωρίς ενδιάμεση και τελική ψύξη, που επιτρέπει τη διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών μετά τη συμπίεση και, συνεπώς,
- υψηλά ποσά αποθηκευόμενης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης.

Ωστόσο, η υλοποίηση των αδιαβατικών CAES απαιτεί εκ νέου σχεδιασμό με συγκεκριμένες βελτιώσεις των βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Πιο αναλυτικά οι βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν, είναι οι εξής:

- a) Οι απαιτούμενοι ταμιευτήρες αποθήκευσης θερμότητας με χωρητικότητες από 120 έως 1.800MWh θα χρειαστούν σχεδίαση, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλοί συντελεστές μετάδοσης θερμότητας κατά την αποθήκευση και ειδική την ανάκτηση θερμότητας στην και από δεξαμενή, ελαχιστοποιώντας όμως ταυτόχρονα τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον, όσο η θερμότητα παραμένει αποθηκευμένη εντός της δεξαμενής.
- b) Θα πρέπει, επίσης, να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας κατά τη διαδικασία αποθήκευσης και ανάκτησης θερμότητας στην και από τη δεξαμενή. [52]

Όσον αφορά τον συμπίεστη, στα αδιαβατικά CAES η συμπίεση προσεγγίζεται θεωρητικά ως αδιαβατική, σε αντίθεση με τα διαβατικά CAES, όπου η συμπίεση προσεγγίζεται θεωρητικά ορθότερα ως ισοθερμοκρασιακή. Ωστόσο, με τους συμβατικούς συμπίεστες δεν μπορούν να επιτευχθούν οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που απαιτούνται για την αδιαβατική συμπίεση, σε συνδυασμό με τους επιθυμητούς πολύ χαμηλούς χρόνους απόκρισης και την απαίτηση για υψηλό βαθμό απόδοσης συμπίεσης. Ως εκ τούτου, απαιτείται η σχεδίαση νέων τύπων συμπίεστων για την προσέγγιση των ανωτέρω χαρακτηριστικών λειτουργίας. [52][58]

Οι πιο πρόσφατες μελέτες συμπεραίνουν ότι οι ανωτέρω απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν με την κατασκευή ενός συμπίεστη που θα αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα θα συνίσταται από έναν αξονικό ή ακτινικό συμπίεστη ως τη μονάδα χαμηλής πίεσης, για μεγάλες ή μικρές παροχές αέρα αντίστοιχα. Το δεύτερο και το τρίτο τμήμα θα αποτελούνται από δύο ακτινικούς συμπίεστες κοινού άξονα, ως βαθμίδες μέσης και υψηλής πίεσης.

Η μονάδα στροβίλου πρέπει, επίσης, να σχεδιαστεί εκ νέου προκειμένου να λειτουργήσει με υψηλές θερμοκρασίες εισόδου, μεταβαλλόμενες παροχές αέρα, χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η απόδοση του συστήματος. Για να προσεγγιστούν οι ανωτέρω προδιαγραφές, θα πρέπει να σχεδιαστεί μία νέα, μη συμβατική βαθμίδα ρύθμισης λειτουργίας, για τη βελτιωμένη διαχείριση εργαζόμενου μέσου με μεταβαλλόμενη πίεση και παροχή. Η προθέρμανση του στροβίλου αποδεικνύεται, επίσης, να βοηθάει στη βελτίωση της απόκρισής του.

Ο όγκος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας του συσκευασμένου υποστρώματος είναι περίπου ίσος με το 1/10 της αποθήκευσης του ταμιευτήρα στις περισσότερες περιπτώσεις. Έτσι, για να μειωθεί ο όγκος αποθήκευσης και συνεπώς το κόστος, είναι απαραίτητη η λειτουργία σε υψηλή πίεση. [52][58]

### 3) Ισοθερμικά CAES

Τα ισοθερμικά CAES στοχεύουν στη διατήρηση της θερμοκρασίας μέσω της συμπίεσης και της διαστολής με τις θερμοδυναμικές διεργασίες σχεδόν σταθερές, γεγονός που, θεωρητικά, εξαλείφει την ανάγκη για υψηλή θερμοκρασία μονάδα αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιείται σε αδιαβατικά CAES.

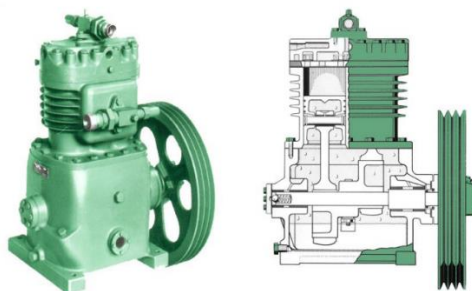
Η ισοθερμική συμπίεση απαιτεί μικρότερη ποσότητα εργασίας από τον κινητήρα για την ίδια αναλογία πίεσης, ενώ ο στροβίλος μπορεί να αποδώσει περισσότερο ρεύμα στη γεννήτρια, αυξάνοντας έτσι την απόδοση μετ' επιστροφής του συστήματος σε 70% – 80%. Για να επιτευχθεί ισοθερμική κατάσταση, η συμπίεση και η διαστολή πρέπει εκτελείται αρκετά αργά, ώστε η θερμότητα να μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί αποτελεσματικά.

Αυτή η τεχνολογία αποφεύγει τα πολλαπλά στάδια συμπίεσης και εκτόνωσης, αλλά απαιτεί ειδικούς μηχανισμούς για τη συνεχή προσθαφαίρεση θερμότητας κατά τη διάρκεια των κύκλων συμπίεσης και διαστολής. Αυτοί οι κύκλοι συμπίεσης υλοποιούνται μέσω ενός μηχανήματος με βάση το έμβολο, όπως οι παλινδρομικές μηχανές ή μηχανές κύλισης. Το ισοθερμικό CAES βρίσκεται ακόμη υπό έρευνα και επί του παρόντος περιορίζεται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως η εγκατάσταση 1,5 MW από την SustainX στο Seabrook, NH, ΗΠΑ. [58]

### 3.2 Συμπιεστές

Οι συμπιεστές ανήκουν στην κατηγορία των ρευστοδυναμικών μηχανών και πιο συγκεκριμένα στις αντλίες ως «αντλίες αερίων». Όπως αντιλαμβανόμαστε από την ονομασία τους χρησιμοποιούνται για την συμπίεση αέρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συμπιεστών όπου ο καθένας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ονομαστικά τους κατατάσσουμε:

- Σε εμβολοφόρους (σχήμα (3.2.a))
- Σε ακτινικούς (εικόνα (3.2.b))
- Σε αξονικούς (εικόνα (3.2.c)) [49][51]



Σχήμα (3.2.a) Εμβολοφόρος Συμπιεστής σε τρισδιάστατη απεικόνιση (δεξιά) και πρόοψη σε τομή (αριστερά)[15]

Πριν όμως εξετάσουμε αναλυτικά τα είδη των συμπιεστών, θα σημειώσουμε κάποιες βασικές αρχές όπως:

Η ροϊκή ισχύς είναι το γινόμενο διαφοράς πίεσης  $\Delta p$  και της παροχής όγκου  $Q$  του ρευστού που παροχεύεται. Με παροχή μάζας  $\dot{m} = \rho Q$  και ειδικό έργο  $a_t = \Delta p / \rho$  προκύπτει η σχέση :

$$P = \Delta p Q = \dot{m} \frac{\Delta p}{\rho} = \dot{m} a_t \quad (3.2.1) \quad [49]$$

Όπου  $P$  είναι η ροϊκή ισχύς.

Σε μία ρευστοδυναμική μηχανή και συγκεκριμένα για τους συμπιεστές η παροχή μάζας εξαρτάται από τις διαστάσεις της. Κύρια διάσταση είναι η διάμετρος του στροφείου ή η διάμετρος του κυλίνδρου σε περίπτωση εμβολοφόρου συμπιεστή. [49][51]

Το μέγεθος της διαφοράς πίεσης που πρέπει να αναπτύξει μια εργομηχανή η να εκμεταλλευτεί μια κινητήρια μηχανή εξαρτάται από την ικανότητα της βαθμίδας να μετατρέψει ροϊκό έργο. Επειδή η ικανότητα αυτή είναι περιορισμένη χρησιμοποιούνται πολυβάθμιδες μηχανές. [49][51]



Εικόνα (3.2.b) Ακτινικός Συμπιεστής[14]

Οι επιδόσεις των μηχανών πετυχαινονται με διάφορους βαθμούς απόδοσης  $\eta$ , οι οποίοι διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Για μια ρευστοδυναμική μηχανή ορίζονται διάφοροι βαθμοί απόδοσης. Εδώ εννοούμε τον γενικό βαθμό απόδοσης σαν το πηλίκο της ροϊκής ισχύος, προς την εισαγόμενη ισχύ στον άξονα μιας εργομηχανής η αντίστροφα της εξερχόμενης ισχύος του άξονα μιας κινητήριας μηχανής προς την ροϊκή ισχύ που εισάγεται στη μηχανή.

Είδος συμπιεστή	Λόγος πίεσης	Παροχή σε m <sup>3</sup> /h	Απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης σε m <sup>3</sup>	Υλικό κατασκευής (t)
Αξονικός 5-βάθμιος 6000 min <sup>-1</sup>	2,4	100000	26500	1600
Ακτινικός 3-βάθμιος 3000 min <sup>-1</sup>	2,4	100000	34600	2350
Εμβολοφόρος	2,4	100000	70000	8450

Πίνακας (3.2.1) [49]

Γενικά πάντως διαπιστώνεται πως οι αξονικές μηχανές έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τις ακτινικές. Οι ακτινικές όμως έχουν μεγαλύτερη ικανότητα ως προς το να μετατρέπουν το ειδικό έργο ανά βαθμίδα σε σχέση με τις αξονικές για ίδιες διαστάσεις και τις κάνει κατάλληλες για περισσότερες εφαρμογές. [49][51]



Εικόνα (3.2.c) Αξονικός Συμπιεστής[13]

Θεωρητικός υπολογισμός συμπιεστή.

Το θερμοδυναμικό μοντέλο του συμπιεστή είναι παρόμοιο με αυτό της τουρμπίνας, αλλά σε αυτήν την περίπτωση, η ενέργεια από έναν ηλεκτρικό κινητήρα ρέει στον συμπιεστή. Έτσι, υποθέτοντας ισοεντροπική συμπίεση σε κάθε στάδιο  $j$ , η θερμοκρασία εκφόρτισης  $T_{cout_j}$  υπολογίζεται όπως ακολουθεί :

$$\frac{T_{cout_j}}{T_{cin_j}} = \pi_{c_j}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3.2.2) [38]$$

$$\pi_{c_j} = \frac{P_{cout_j}}{P_{cin_j}} \quad (3.2.3) [38]$$

όπου  $T_{cin_j}$ ,  $\pi_{c_j}$ ,  $P_{cin_j}$ , και  $P_{cout_j}$  είναι αντίστοιχα η θερμοκρασία εισόδου, η αναλογία πίεσης, η πίεση εισόδου και πίεση εξόδου του σταδίου συμπίεσης  $j$ .

Χρησιμοποιώντας την ισοεντροπική απόδοση, που ορίζεται ως:

$$\eta_{c_j} = \frac{h_{cout_j} - h_{cin_j}}{h_{cout_j} - h_{cin_j}} \quad (3.2.4) [38]$$

και δεδομένου ότι  $\Delta T = c_p \Delta h$ , η θερμοκρασία εκφόρτισης του σταδίου  $j$  μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$T_{cout_j} = T_{cin_j} \left\{ 1 + \left( \pi_{c_j}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{c_j}} \right\} \quad (3.2.5) [38]$$

Η συνολική μηχανική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση των συμπιεστών σε όλα τα στάδια  $j$  μπορεί να είναι υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες παραδοχές:

$$\bar{P}_{cm_j} = \frac{c_p \dot{m}_{c_0} \dot{m}_c}{10^3 \eta_{cm_j} P_{cm_0}} (T_{cout_j} - T_{cin_j}) \quad (3.2.6) \quad [38]$$

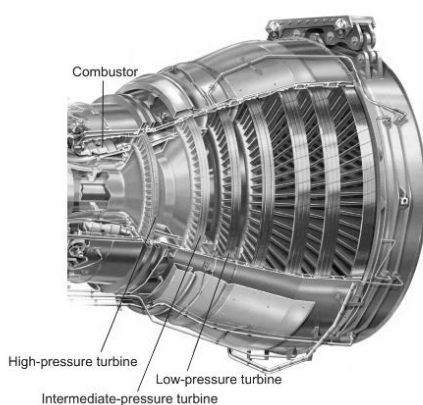
$$\bar{P}_{cm} = \sum_j \bar{P}_{cm_j} \quad (3.2.7) \quad [38]$$

όπου  $\bar{P}_{cm_j}$  είναι η μηχανική ισχύς του σταδίου  $j$  σε ανά μονάδα της συνολικής ονομαστικής συμπίεσης τροφοδοσία  $P_{cm_0}$  σε [MW],  $\dot{m}_{c_0}$  είναι ο ονομαστικός ρυθμός ροής μάζας αέρα του συμπιεστή σε [kg/s],  $\eta_{cm_j}$  είναι η μηχανική απόδοση του συμπιεστή στο στάδιο  $j$  και  $c_p$  είναι η ειδική θερμότητα χωρητικότητα σε σταθερή πίεση σε [kJ/kg·K]. [38]

Οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται για την συμπίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, στα συστήματα CAES, είναι είτε αξονικοί (Εικόνα 3.2.c), με τους οποίους επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσης της τάξης του 20 για παροχές που ανέρχονται στα 1.4Mm<sup>3</sup>/h, είτε ακτινικοί συμπιεστές (Εικόνα 3.2.b)), με μέγιστες παροχές συμπίεσης έως 100.000m<sup>3</sup>/h και μέγιστη πίεση συμπίεσης έως 1,000bar. Με τη σημερινή διαθέσιμη τεχνολογία, η συμπίεση του αέρα επιτυγχάνεται σε δύο βαθμίδες με ενδιάμεση ψύξη, σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 40 έως 200°C. Ο συμπιεσμένος αέρας εκτονώνεται τελικά σε αεροστροβίλους με λόγους εκτόνωσης έως 22 και μέγιστη θερμοκρασία εισαγωγής μέσου έως 1,230°C (όταν το σύστημα διαθέτει θάλαμο καύσης). [51]

### 3.3 Αεροστρόβιλοι

Ο σύγχρονος στρόβιλος αξονικής ροής αναπτύχθηκε από μια μακρά σειρά εφευρέσεων που εκτείνονται πίσω στο χρόνο. Ο αιολίπιλλος του Ήρωνα (γνωστός και ως Ήρωας) της Αλεξάνδρειας γύρω στο 120 π.Χ. Αν και θα το θεωρούσαμε ως το παιχνίδι που απέδειξε τη σημαντική αρχή ότι η περιστροφική κίνηση μπορούσε να επιτευχθεί με τη διαστολή ατμού μέσω ακροφυσίων. Κατά τη διάρκεια των αιώνων, πολλές εξελίξεις των περιστροφικών συσκευών έλαβαν χώρα με αιολικούς και υδατοκίνητους μύλους, υδροστρόβιλους και τους πρώιμους ατμοστρόβιλους της σουηδικής μηχανής neer Carl de Laval το 1883. Τα κύρια προβλήματα των στροβίλων de Laval προέκυψαν από την τεράστια ταχύτητα περιστροφής, οι μικρότεροι ρότορες πέτυχαν ταχύτητες 26.000 rpm και οι μεγαλύτεροι είχαν περιφερειακή ταχύτητα άνω των 400 m/s. Μαθαίνοντας από αυτά τα λάθη, ο Sir Charles Parsons το 1891 ανέπτυξε έναν ατμοστρόβιλο πολλαπλών σταδίων (15 σταδίων) αξονικής ροής, ο οποίος είχε ισχύ εξόδου 100 kW στις 4800 rpm. [38]



Σχήμα (3.1.a) Αεροστρόβιλος αξονικής ροής και τα μηχανικά του μέρη: αναφλεκτήρας ,πτερύγια υψηλής μεσαιας και χαμηλής πίεσεως [38]

Αργότερα, και για καλό όλων, χρησιμοποιήθηκε ένας ατμοστρόβιλος Parsons με ισχύ 1570 kW για την τροφοδοσία ενός μήκους 30 μέτρων πλοίο το Turbinia, και θεωρήθηκε υπερβολική η ταχύτητά του σε μια μεγάλη ανασκόπηση των ναυτικών πλοίων στο Spithead της Αγγλίας, το 1897. Ξεπέρασε τα πλοία που διατάχθηκαν να το καταδιώξουν και να το αξιολογήσουν. Αυτή η

θεαματική διαφορά απέδειξε αμέσως σε όλη την ικανότητα και τη δύναμη της τουρμπίνας ατμού και ήταν ένα σημείο καμπής στην καριέρα του Parsons και για την τουρμπίνα ατμού. Όχι πολύ μετά από αυτό το πιο κεφάλαιο τα πλοία των μεγάλων δυνάμεων χρησιμοποιούσαν αμοστρόβιλους και όχι τους παλιομοδίτικους εμβολοφόρους κινητήρες. [38]

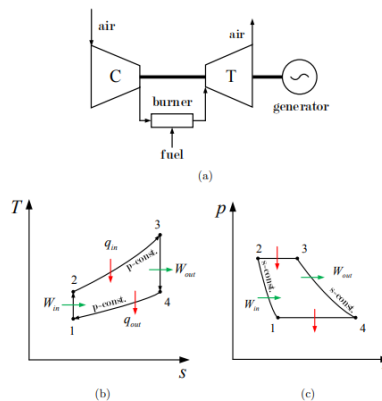
Από αυτό το σημείο, ο σχεδιασμός των αμοστρόβιλων εξελίχθηκε γρήγορα. Μέχρι το 1920, η General Electric ήταν η κύρια προμηθεύτρια εταιρία στροβίλων ισχύος 40 MW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έκτοτε έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατασκευή του μεγέθους και την απόδοση των αμοστρόβιλων με 1000 MW που επιτυγχάνονται τώρα για εργοστάσιο ενός άξονα.[38]

Η ανάπτυξη του στροβίλου αξονικής ροής (Σχήμα (3.1.a)) συνδέεται με την ιστορία του αεροστρόβιλου αεροσκαφών, αλλά εξαρτιόταν σαφώς από τις σχεδιαστικές προόδους που έγιναν προηγουμένως στον τομέα των αμοστρόβιλων.

Η απλούστερη προσέγγιση στην ανάλυσή τους είναι να υποθέσουμε ότι οι συνθήκες ροής σε μια μέση ακτίνα, που ονομάζεται pitchline, αντιπροσωπεύουν τη ροή σε όλες τις ακτίνες. Αυτή η δισδιάστατη (2D) ανάλυση μπορεί να παρέχει μία λογική προσέγγιση στην πραγματική ροή, με την προϋπόθεση ότι ο λόγος του ύψους της λεπίδας προς τη μέση ακτίνα είναι μικρό. Ωστόσο, όταν αυτή η αναλογία είναι μεγάλη, όπως στα τελικά στάδια ενός αεροσκάφους ή μιας τουρμπίνας ατμού, απαιτείται πιο περίπλοκη τρισδιάστατη (3D) ανάλυση.

Η περαιτέρω υπόθεση που απαιτείται για τους σκοπούς της ανάλυσης μέσης γραμμής είναι ότι η ροή είναι αμετάβλητη κατά μήκος την περιφερειακή κατεύθυνση (δηλαδή, δεν υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις ροής "από λεπίδα σε λεπίδα"). Για τους στροβίλους, η ανάλυση παρουσιάζεται έχοντας κατά νου τα αποτελέσματα της συμπιέσιμης ροής. Αυτή η προσέγγιση ισχύει τόσο για αμοστρόβιλους όσο και για αεροστρόβιλους υπό τον όρο ότι, στην πρώτη περίπτωση, οι συνθήκες ατμού παραμένει εξ ολοκλήρου εντός της φάσης ατμού (δηλαδή, στην περιοχή υπερθέρμανσης). [38][50]

Ο σύγχρονος στροβίλος αξονικής ροής που χρησιμοποιείται σε κινητήρες αεροσκαφών και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται τώρα στο ακραίο πλεονέκτημα της τεχνολογικής ανάπτυξης: τα αέρια που φεύγουν από τον καυστήρα μπορεί να είναι σε θερμοκρασίες περίπου 1600°C ή περισσότερο, ενώ το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πτερυγίων του στροβίλου λιώνει στους 1250°C περίπου. Ακόμη πιο αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αυτές οι λεπίδες υπόκεινται σε τεράστιες φυγόκεντρες δυνάμεις και κάμψη φορτίων από την εκτροπή των καυτών αερίων. Ο μόνος τρόπος για αυτά τα επίπεδα θερμοκρασίας και καταπόνησης μπορεί να διατηρηθεί είναι από ένα κατάλληλο σύστημα ψύξης αέρα υψηλής πίεσης (HP) που παρέχεται από το συμπιεστή τελικού σταδίου. [38][38][51]



Σχήμα (3.3.b) Στο (a) βλέπουμε το σχέδιο αεροστρόβιλου γεννήτριας, στο (b) φαίνεται το διάγραμμα T-s και στο (c) φαίνεται το διάγραμμα p-v [58]

Ένα τυπικό GT περιλαμβάνει έναν συμπίεστη φυσικά συνδεδεμένο στον ρότορα ενός στροβίλου και ένας θάλαμος καύσης όπου ο πεπιεσμένος αέρας συνδυάζεται με αέριο και καίγεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία του αέρα πριν από τη διαστολή, όπως φαίνεται στο (σχήμα (3.3.b)).

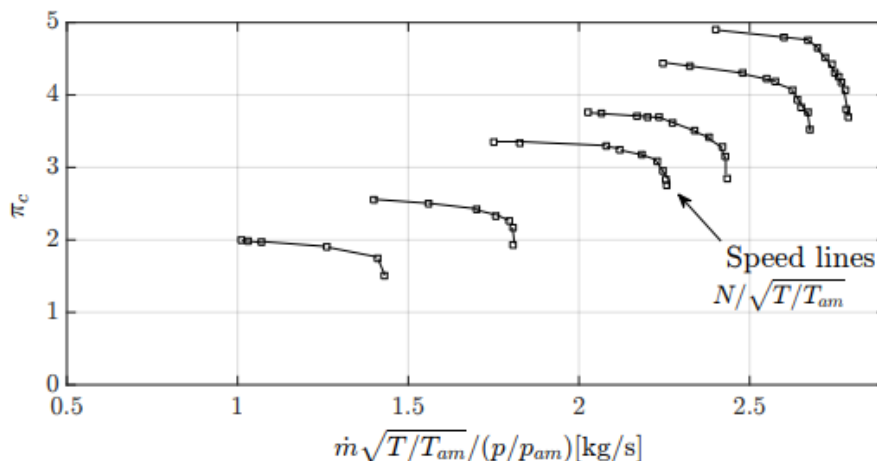
Το GT λειτουργεί κάτω από έναν κύκλο Brayton που συνοψίζεται στο (σχήμα (3.3.b)) (α) και στα διαγράμματα (b)&(c) του ίδιου σχήματος. [38][58]

Ο ιδανικός κύκλος Brayton περιλαμβάνει: ισεντροπική συμπίεση του αέρα από 1 έως 2, ισοβαρική προσθήκη θερμότητας από 2 σε 3, ισεντροπική διαστολή από 3 σε 4 και ισοβαρική απόρριψη θερμότητας από 4 έως 1. Κατά την 1-2 ισεντροπική συμπίεση, δηλ. σταθερή εντροπία  $s$ , αδιαβατική και αναστρέψιμη, η εργασία  $W_{in}$  γίνεται στο σύστημα από τον συμπίεστη, γεγονός που αυξάνει την θερμοκρασία από  $T_1$  έως  $T_2$ . Δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας με το περιβάλλον και, ως εκ τούτου, το έργο  $W_{in}$  αυξάνει την εσωτερική ενέργεια (χωρίς απώλειες), αλλάζοντας την ενθαλπία της από  $h_1$  σε  $h_2$ . Η πίεση εξόδου του συμπίεστη αυξάνεται από συνθήκες περιβάλλοντος  $p_1$  σε  $p_2$ , ενώ ο όγκος του μειώνεται. Η μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T_{1-2}$ , και επομένως, η μεταβολή της ενθαλπίας το  $\Delta h_{1-2}$  εξαρτάται από την αναλογία πίεσης του συμπίεστη  $\pi_c = p_2/p_1$ . Στον θάλαμο καύσης, προστίθεται θερμικό φορτίο  $q_{in}$  κατά τη διάρκεια 2 έως 3, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του αέρα σε  $T_3$  και η ενθαλπία σε  $h_3$  χωρίς αλλαγή της πίεσης. Στο διαστολέα 3-4, η θερμοκρασία και η ενθαλπία αλλάζουν σε  $T_4$  και  $h_4$ , αντίστοιχα, ενώ η πίεση του αέρα μειώνεται στο περιβάλλον συνθήκες  $p_4 = p_1$ . Η πτώση ενθαλπίας  $\Delta h_{3-4}$  μετατρέπεται σε χρήσιμο έργο  $W_{out}$ , το οποίο μετατρέπεται σε μηχανική ροπή για να κινήσει τη γεννήτρια. Ο κύκλος κλείνει μέσω του περιβάλλοντος του στροβίλου, αλλάζοντας τη θερμοκρασία του αέρα από  $T_4$  σε συνθήκες περιβάλλοντος  $T_1$  κατά απελευθέρωση θερμότητας στην ατμόσφαιρα σε πίεση περιβάλλοντος  $p_1 = p_4$ . Αν χρησιμοποιούνται αναθερμαντήρες ή ενδιάμεσοι ψύκτες, αυτός ο κύκλος τροποποιείται με την προσθήκη σταδίων ισοβαρικής προσθήκης ή απόρριψης θερμότητας ως απαραίτητη. Σε πραγματικούς στροβίλους, η ισεντροπική εξιδανίκευση είναι αδιαβατική, η οποία μοντελοποιείται από μέσα ισεντροπικών αποδόσεων  $\eta_i$ .

Ο λόγος πίεσης  $\pi_c$  στον συμπίεστη και τον στροβίλο εξαρτάται από τη γεωμετρία, την είσοδο τις συνθήκες (πίεση  $p$  και θερμοκρασία  $T$ ), την ταχύτητα δρομέα  $N$  και την ταχύτητα ροής μάζας  $\dot{m}$ .

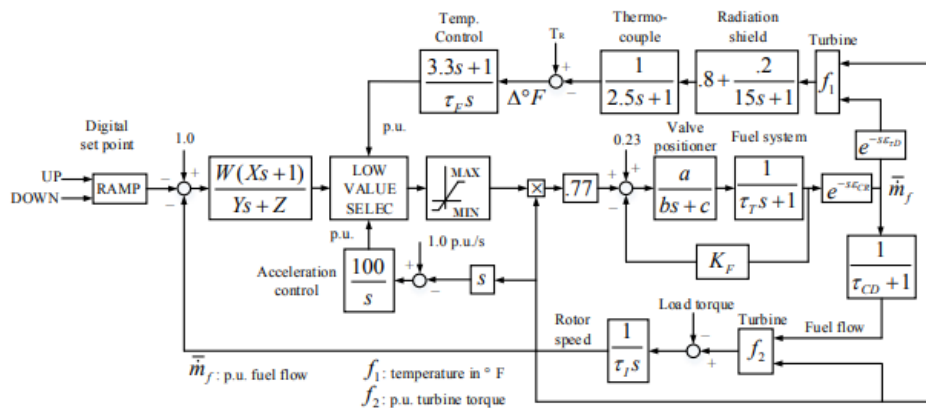
Η μη γραμμική σχέση  $\pi_c = (N, \dot{m}, T, p)$  δημιουργείται, χρησιμοποιώντας χάρτες συμπίεστη και στροβίλου, που συνήθως παρέχονται από τους κατασκευαστές του εξοπλισμού. Σε αυτούς τους χάρτες, ο οριζόντιος άξονας δείχνει τη διορθωμένη ταχύτητα ροής μάζας  $\dot{m} \sqrt{T/T_{am}} / (p/p_{am})$  που ορίζεται ως η μάζα ρυθμός ροής μέσω της συσκευής εάν οι συνθήκες εισόδου ( $T, p$ ) ήταν συνθήκες περιβάλλοντος στο επίπεδο της θάλασσας ( $T_{am}, p_{am}$ ). Ο διορθωμένος ρυθμός ροής μάζας αντιστοιχίζεται στον λόγο πίεσης μέσω διορθωμένες γραμμές ταχύτητας  $N / \sqrt{T/T_{am}}$ .

Στο (σχήμα (3.3.c)), ένα παράδειγμα χάρτη συμπίεστη είναι παρουσιάζονται για λόγους απεικόνισης. Παρόμοιες καμπύλες χρησιμοποιούνται για την απόδοση των μηχανών. [38][50][51][58]



Σχήμα (3.3.c) Παράδειγμα χάρτη συμπίεσης [58]

Δύο τύποι μοντέλων GT χρησιμοποιούνται κυρίως για δυναμικές μελέτες σε συστήματα ισχύος: Το μοντέλο του Rowen και το μοντέλο IEEE . Άλλα μοντέλα GT όπως το WECC , Το CIGRE , το GAST ή μοντέλα IEEE. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι το μοντέλο IEEE λαμβάνει υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού, που αντιπροσωπεύονται από τη θερμοδυναμική τους, ενώ το μοντέλο του Rowen επικεντρώνεται κυρίως στους βρόχους ελέγχου που σχετίζονται με τη λειτουργία του στροβίλου, ενώ απλοποιεί τη θερμοδυναμική με γραμμικές συναρτήσεις. [58] Το μοντέλο του Rowen, που παρουσιάζεται στο (σχήμα (3.3.d)), έχει τρεις κύριους βρόχους ελέγχου: έλεγχος ισχύος, έλεγχος επιτάχυνσης και έλεγχος θερμοκρασίας, όλα αυτά ενεργούν στην παροχή αερίου του συστήματος. Ο έλεγχος ισχύος αντιστοιχεί στον κυβερνήτη και χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της επιθυμητής ισχύος εξόδου. Επιτρέπει επίσης τον πρωτεύοντα έλεγχο συχνότητας με την κατάλληλη επιλογή ενός κέρδους W. Για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση λόγω μεγάλων απαιτήσεων ισχύος από τη διαδρομή του ρυθμιστή, ο έλεγχος θερμοκρασίας περιορίζει την παροχή αερίου εάν η θερμοκρασία καυσαερίων του GT είναι υπερβολική. [58]



Σχήμα (3.3.d) Μοντέλο αυτοματισμού του Rowen για GT [58]

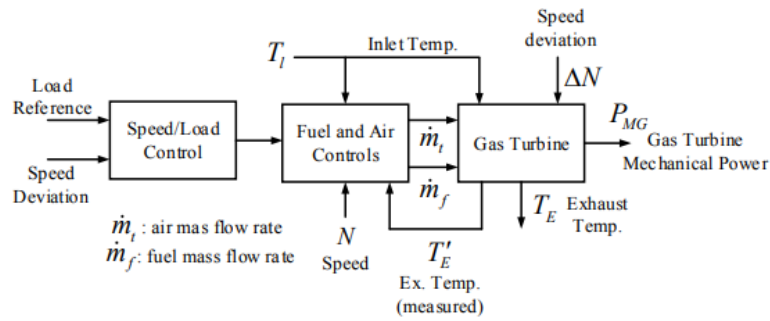
Αυτός ο έλεγχος συγκρίνει τη μετρούμενη (με χρήση θερμοστοιχείου) θερμοκρασία εξάτμισης GT, υπολογίζεται ως συνάρτηση  $f_1$  της ροής αερίου και της ταχύτητας του δρομέα, με αναφορά. Αν η προκύπτουσα θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την αναφορά, ο έλεγχος θερμοκρασίας υπερισχύει του ρυθμιστή, μέσω ενός μπλοκ επιλογής χαμηλής τιμής (LVS) και μειώνει το αέριο που εγχέεται στην τουρμπίνα.

Τέλος, ο έλεγχος επιτάχυνσης χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση για την αποτροπή του ρότορα για υπερβολική επιτάχυνση μέχρι το συγχρονισμό. Σε αυτόν τον έλεγχο, η ταχύτητα του ρότορα διέρχεται ένα μπλοκ παραγωγού για τη δημιουργία του σήματος επιτάχυνσης, το οποίο συγκρίνεται με μια τιμή αναφοράς και, εάν ανιχνευτεί υπερβολική ταχύτητα, ο έλεγχος παρακάμπει επίσης τον ρυθμιστή για να περιορίσει την έγχυση αερίου, όπως στον ελεγκτή θερμοκρασίας. Συνοψίζοντας, το LVS περνά το σήμα με την ελάχιστη ποσότητα καυσίμου που απαιτείται από τον στρόβιλο, η οποία αποστέλλεται στο σύστημα ροής καυσίμου. [50][58]

Η δυναμική του συστήματος ροής καυσίμου που περιλαμβάνει τον ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας και του αερίου και η καθυστέρηση πολλαπλής διανομής μοντελοποιούνται από δύο συναρτήσεις μεταφοράς πρώτης τάξης (ανάδραση το  $K_F$  χρησιμοποιείται εάν το καύσιμο είναι υγρό). Δύο επιπλέον μπλοκ καθυστέρησης χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του χρόνου αντίδρασης καύσης και καθυστέρηση μεταφοράς αερίου μέσω του στροβίλου και μια πρώτη λειτουργία προτεραιότητας μεταφοράς για τον όγκο εκφόρτισης του συμπιεστή. Η τιμή 0,23 αντιπροσωπεύει την κατανάλωση αερίου σε κατάσταση χωρίς φορτίο.

Η ισχύς εξόδου του στροβίλου υπολογίζεται ως γραμμική συνάρτηση της ροής και της ταχύτητας του δρομέα, με το τελευταίο να αντιπροσωπεύει μηχανικές απώλειες λόγω τριβής. Με την αφαίρεση ορισμένων βρόχων ελέγχου και παραβλέποντας τις καθυστερήσεις μεταφοράς, το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί αντιπροσωπεύοντας μια πιο άκαμπτη τουρμπίνα.





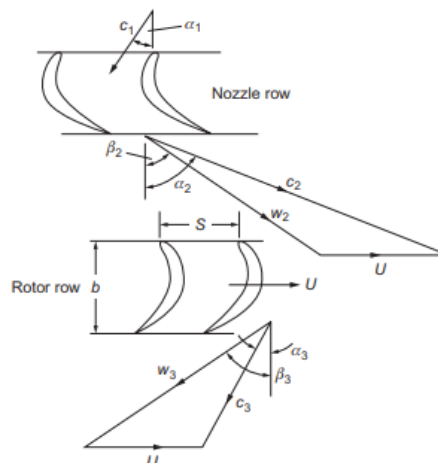
Σχήμα (3.3.e) IEEE GT μοντέλο [58]

Το μοντέλο IEEE που παρουσιάζεται στο (σχήμα (3.3.e)) και , σε αντίθεση με του Rowen, περιλαμβάνει θερμοδυναμικές σχέσεις, για τον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος και της θερμοκρασίας των καυσαερίων. [50][51][58]

Το (σχήμα (3.3.e)) απεικονίζει τις κύριες σχέσεις μεταξύ του συστήματος ελέγχου και του φυσικού μοντέλου του GT. Παρατηρήστε ότι δύο μεταβλητές ελέγχου προτείνονται στο μοντέλο IEEE αντίθετα στο single που χρησιμοποιείται στο Rowen's. το πρώτο αντιπροσωπεύει το ρυθμό ροής μάζας αέρα ( $\dot{m}_t$ ) και το δεύτερο για τον ρυθμό ροής καυσίμου( $\dot{m}_f$ ). Στους υπολογισμούς μηχανικής ισχύος οι λόγοι πίεσης συμπιεστή και στροβίλου θεωρούνται γραμμικές συναρτήσεις του ρυθμού ροής μάζας αέρα. Ωστόσο, στις πραγματικές τουρμπίνες, αυτές οι σχέσεις καθορίζονται από οι χάρτες του συμπιεστή και της τουρμπίνας αντίστοιχα. [50][51][58]

Διαγράμματα ταχύτητας της βαθμίδας αξονικού στροβίλου.

Η αξονική βαθμίδα στροβίλου περιλαμβάνει μια σειρά σταθερών οδηγών πτερυγίων ή ακροφυσίων (συνήα ονομάζονται σειρά στάτορα) και μια σειρά από κινούμενα πτερύγια ή κουβάδες (μια σειρά ρότορα). Το ρευστό εισέρχεται στον στάτορα με απόλυτη ταχύτητα  $c_1$  στη γωνία  $\alpha_1$  και επιταχύνεται σε απόλυτη ταχύτητα  $c_2$  στη γωνία  $\alpha_2$ . Όλες οι γωνίες είναι μετρούμενη από την αξονική (x) κατεύθυνση. Από το διάγραμμα ταχύτητας, η σχετική ταχύτητα εισόδου του ρότορα  $w_2$ , υπό γωνία  $\beta_2$ , βρίσκεται αφαιρώντας, διανυσματικά, το πτερύγιο ταχύτητα  $U$  από την απόλυτη ταχύτητα  $c_2$ . Η σχετική ροή εντός του ρότορα επιταχύνεται στην ταχύτητα  $w_3$  υπό γωνία  $\beta_3$  στην έξοδο του ρότορα. η αντίστοιχη απόλυτη ροή ( $c_3, \alpha_3$ ) προκύπτει προσθέτοντας, διανυσματικά, την ταχύτητα της λεπίδας  $U$  στη σχετική ταχύτητα  $w_3$ . [38][50]



Σχήμα (3.3.f) Τρίγωνα ταχυτήτων για στρόβιλο[38]

Όταν σχεδιάζουμε τα τρίγωνα ταχυτήτων (σχήμα (3.3.f)), αξίζει πάντα να σκιαγραφούμε τις σειρές ακροφυσίων και ρότορα δίπλα τους, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό βοηθά στην αποφυγή σφαλμάτων, καθώς οι απόλυτες ταχύτητες είναι χονδρικά ευθυγραμμισμένες με τις γωνίες εισόδου και εξόδου από τη σειρά ακροφυσίων και οι σχετικές ταχύτητες είναι ευθυγραμμισμένο με τη σειρά

του ρότορα. Σημειώστε ότι, σε έναν αξονικό στρόβιλο, τα επίπεδα στροφής είναι πολύ υψηλά και η ροή στρέφεται μέσω της αξονικής κατεύθυνσης τόσο στους ρότορες όσο και στα ακροφύσια. [38][50]

Διαδικασία εκκίνησης στροβίλου

Κατά την διαδικασία εκκίνησης ενός τυπικού αεριοστρόβιλου υφίστανται κάποιες φάσεις όπου διαδραματίζονται μέχρι να δουλέψει στο ιδανικό σημείο λειτουργίας.

Στην πρώτη φάση η γεννήτρια θα χρησιμοποιηθεί σαν κινητήρας γυρίζοντας τον στρόβιλο στις 1000 rpm. Βέβαια αν μας το επιτρέπει η εγκατάσταση μπορεί να υπαρξει και βοηθητικός ηλεκτροκινητήρας. Σε αυτήν την φάση η παροχή καυσίμου είναι κλειστή. Ο λόγος είναι πως ο στρόβιλος αν δεν φτάσει τις 1000 rpm δεν μπορεί να επιταχύνει από μόνος του.

Στην δεύτερη φάση ξεκινά η παροχή καυσίμου και από τις 1200 έως τις 1800 rpm περίπου λειτουργεί μαζί με τον ηλεκτροκινητήρα. Έπειτα από τις 1800 rpm απομονώνεται ο ηλεκτροκινητήρας και στρόβιλος επιταχύνει μόνος του. Δεδομένου της χαμηλής απόδοσης του είδους αυτού του κινητήρα μέχρι να φτάσει τις 3000 rpm και να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία και η ροπή δεν έχουμε παραγωγή ισχύος και η φάση αυτή τελειώνει όταν ο αεριοστρόβιλος φτάσει στο ρελαντί.

Στην τρίτη φάση ο αεριοστρόβιλος παραμένει στο ρελαντί και η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο και γίνονται οι ανάλογες παραμετροποιήσεις. Αυτή είναι η πιο γρήγορη σε χρόνο φάση από όλες.

Στην τέταρτη φάση αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα γραμμικά μέχρι την ονομαστική του και ανοίγουν οι οδικοί εισόδου αέρος (όπου παράμεναν κλειστοί μέχρι να επιτευχθεί το ρελαντί). Στην φάση αυτή πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση δεν έχει φτάσει στο μέγιστο λόγω της θερμοκρασίας όπου αποθηκεύεται προοδευτικά στα μέταλλα.

Στην πέμπτη φάση οι θερμοκρασίες φτάνουν στα επιθυμητά σημεία και συμπεριφορά του στροβίλου είναι σταθερή.

Εν κατακλείδι μπορούμε να αντιληφθούμε το πόσο σημαντικός είναι ένας αεριοστρόβιλος για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ειδικότερα όταν αποτελεί μέρος ενός CAES υβριδικού σταθμού. [50][51]

### 3.4 Δεξαμενές αποθήκευσης αέρα

Η αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (Compressed air energy storage ή CAES), μπορεί να περιλαμβάνει την αποθήκευση του αέρα σε δεξαμενές χάλυβα ή σε πολύ λιγότερο δαπανηρές φυσικές υπόγειες αποθήκες κάτω από το έδαφος. Σε μερικές περιπτώσεις, η υψηλή πίεση αέρα μπορεί να αποθηκευτεί σε βαθιά υπόγεια σπήλαια, είτε μέσα σε βράχους με σκληρό πέτρωμα, είτε σε μεγάλες αποθέσεις αλατιού. Αυτά τα σπήλαια αλατιού χρησιμοποιούνται συχνά για την αποθήκευση φυσικού αερίου. [18]

Συνήθως, πέντε τύποι γεωλογικών σχηματισμών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ταμιευτήρες για υπόγεια CAES :

- σπήλαια αλατιού
- στερεοί βραχώδεις σχηματισμοί
- ασβεστολιθικά σπήλαια
- φυσικά πορώδεις υδροφορείς πετρωμάτων
- εξαντλημένα κοιτάσματα αερίου
- υπόγειες σωληνώσεις υψηλής πίεσης

Ωστόσο, τα σπήλαια αλατιού είναι από τα πιο βολικά, λόγω του σχετικά χαμηλού συνολικού κόστους και των στεγανών χαρακτηριστικών τους. Τα σπήλαια άλατος, έχουν καλό ιστορικό για την αποθήκευση προϊόντων πετρελαίου. Η μέχρι τώρα έρευνα επιδεικνύει πως δείχνουν ότι διατηρούν τη σταθερότητα στην καταπόνηση από την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός εργοστασίου. Οι δυσκολίες είναι η γεωμετρία, το μέγεθος και τα κενά του σπηλαίου, ο μακροπρόθεσμος ερπυσμός σε συνδυασμό με την ρήξη του ορυκτού αλατιού και η διαρροή αέρα. Ο όγκος αποθήκευσης μπορεί να κυμαίνεται από 300.000 έως 600.000m<sup>3</sup>.

Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από το μέγεθος του σπηλαίου, το οποίο είναι σε κάποιο βαθμό ανεξάρτητα από το μέγεθος του στροβιλοκινητήρα. Κατά συνέπεια, ο λόγος ενέργειας προς ισχύ του ένα σύστημα CAES είναι πιο ευέλικτο από άλλες τεχνολογίες ESS. Για τις υπέργειες διατάξεις αποθήκευσης, χρησιμοποιούνται χαλύβδινες δεξαμενές. Τέλος, μια εναλλακτική επιλογή αποθήκευσης είναι η χρήση υπόγειων σωληνώσεων υψηλής πίεσης (20-100bar). Οι δύο τελευταίοι τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρές εφαρμογές CAES.

Οι υδροφορείς είναι σχηματισμοί από πορώδη πετρώματα που προκύπτουν φυσικά. Έχουν χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση φυσικού αερίου για πάνω από πενήντα χρόνια σε ετήσιο και όχι σε ημερήσιο κύκλο. Οι επιπτώσεις από τις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες του αέρα και του οξυγόνου που περιέχει, καθώς και των υψηλών θερμοκρασιών της αποθήκευσης, δεν έχουν ακόμη εκτιμηθεί. Σε αυτές τις ανησυχίες προστίθενται η κυκλική καταπόνηση του πορώδους βράχου, οι μετακινήσεις της διεπιφάνειας αέρα-νερού (το νερό είναι συνήθως παρόν στους υδροφορείς), καθώς και η παραγωγή και μεταφορά λεπτών σωματιδίων ύλης. [42][52]

Τα βραχώδη σπήλαια χρειάζονται αντιστάθμιση από νερό στην επιφάνεια των ταμιευτήρων ώστε να διατηρηθεί την πίεση του αέρα και γι' αυτό και το κόστος είναι υψηλό. Πάραυτα, είναι πιο σταθερά όταν οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι περίπου στους 50°C. Σημαντικό παράγοντα αποτελεί ο αναβρασμός του αέρα στον άξονα του νερού (ονομάζεται φαινόμενο σαμπάνια), οι ιδιότητες των σκληρών βράχων υπό τις κυκλικές συνθήκες και η εναπομείνασα αντοχή του σκληρού βράχου μετά από μία αρχική αστοχία.

Ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης αέρα (σπήλαιο) εξαρτάται σημαντικά από την πίεση αποθήκευσης. Για μια μονάδα ισχύος αιχμής των 1500MWh αυτός ο όγκος εκτιμάται γύρω στα 2.000.000m<sup>3</sup> για 10 bar ή 64.000m<sup>3</sup> για 100bar πίεσης αποθήκευσης.

Οι τύποι σταθμών αποθήκευσης είναι τρεις: Διαβατικοί, Αδιαβατικοί και Ισόθερμοι. Χαρακτηρίζονται με βάση τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η συμπίεση του αέρα, με τη δυνατότητα, το ποσοστό εκμετάλλευσης της ενέργειας που εκλύεται κατά τη συμπίεση και με το μέσο με το οποίο γίνεται η αναθέρμανση του αέρα για την παραγωγή ενέργειας από τον αποθηκευμένο πεπιεσμένο αέρα. [52][58]

Για μπορέσουμε να διεξάγουμε μία μελέτη ενός CAES, πρέπει να γνωρίζουμε την ενέργεια που απαιτείται για την συμπίεση του αέρα στην δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτό είναι εφικτό αν γνωρίζουμε τα εξής δεδομένα:

- Τον τύπο CAES.
- Την χωρητικότητα δεξαμενής.

Για να έχουμε και μία εικόνα γύρω από τις θερμικές καταπονήσεις θέτουμε το εξής ερώτημα:

Πόσο θα αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα (σε συνθήκες 1 atm και 20°C) όταν συμπιεστεί στις 100 atm;

Γενικά, η σχέση πίεσης και θερμοκρασίας όπως γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική είναι:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (3.4.1) \quad [51]$$

Για ιδανικό αέριο  $\gamma=1$ . Για αέρα  $\gamma=1,4$ . Επομένως  $T_2= 293 \times 100^{(1,4-1)/1,4} \Rightarrow T_2= 1.093 \text{ K} = 720^\circ\text{C}$ . Για αυτές τις θερμοκρασίες, εξετάζουμε το ενδεχόμενο ερπυσμού, αν και μέχρι στιγμής τα σπήλαια έχουν αποδειχτεί αρκετά ανθεκτικά. [52]

Ας θέσουμε άλλο ένα ερώτημα το οποίο θα μας δώσει μία εικόνα για το ποσό της ενέργειας που χρειάζεται για να αποθηκεύσουμε τον αέρα.

Θεωρούμε αξονικό πενταβάθμιο συμπιεστή με ηλεκτροκινητήρα 200KW με παροχή 100.000m<sup>3</sup>/h σε δεξαμενή 64.000 m<sup>3</sup> για αποθήκευση ενέργειας 1.500MWh.

Με τα δεδομένα που έχουμε μπορούμε να κάνουμε μετατροπή στον τύπο που υπολογίζουμε την κατανάλωση ενέργειας και να βρούμε τον χρόνο λειτουργίας.

$$E(KWh) = \frac{P(W)}{60min} \times t(min) \quad (3.4.2) \quad [10]$$

Όπου E η ενέργεια σε KWh, P η ισχύς σε W και ο χρόνος σε min. Λύνουμε ως προς t και προκύπτει :

$$t = \frac{E}{(P/60)} \quad (3.4.3)$$

$$P/60 = 200.000/60=333,33$$

$$t=1.500.000/333,33= 450 \text{ min η } 7,5 \text{ ώρες.}$$

Κρίνοντας από τον χρόνο που χρειάζεται για να γεμίσει απο ατμοσφαιρική πίεση σε 100 bar, βλέπουμε ότι πλησιάζει κατά πολύ τους χρόνους των συστημάτων αντλησιοταμίευσης. Βέβαια αν θέλουμε πλήρωση σε λιγότερο χρόνο θα πρέπει να διαστασιολογήσουμε αλλιώς τον ηλεκτροκινητήρα και τον συμπιεστή ώστε να επιλέξουμε μεγαλύτερης ισχύος και παροχής αντίστοιχα. Όλα αυτά προκύπτουν από το είδος του σταθμού και φυσικά από την πηγή της εισερχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα αν έχουμε αιολικά η φωτοβολταϊκά πάρκα, πρέπει να είναι ανάλογης ισχύος και φυσικά να υπάρχει και άλλη πηγή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας.

## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Οικονομοτεχνικά

Έχοντας υπ' όψιν τις ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και τις ανάγκες για καθαρότερη ενέργεια οι σταθμοί αντλησιοταμίευσης όπως και οι CAES πρέπει να αποτελούν μία ελκυστική πρόταση για επένδυση για να υλοποιηθούν. Όπως αναφέρεται στα προηγούμενα κεφάλαια για το καθένα ξεχωριστά, μία εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας, έχει πολλούς περιορισμούς και μεγάλο κόστος.

Η καλύτερη και πιο “ασφαλής” λύση είναι οι υβριδικοί σταθμοί, δηλαδή οι σταθμοί αποθήκευσης ενέργειας όπου τροφοδοτούνται ενεργειακά από ΑΠΕ και στην συνέχεια διοχετεύουν την ενέργεια στο δίκτυο. Ειδικά στις απομακρυσμένες περιοχές (π.χ. νησιά) αυτό το πλάνο αποτελεί την χρυσή τομή.

Μία επένδυση κρίνεται σωστή ή λάθος ανάλογα με την καθαρή παρούσα αξία (NPV). Ο μηχανικός που θα κάνει ανάλυση του του έργου και θα κρίνει αν είναι σωστή ή όχι η επένδυση βάσει αυτού του κανόνα.[67]

Η παρούσα αξία (PV) προκύπτει από την σχέση :

$$(PV) = \frac{c_1}{(1+r)} + \frac{c_2}{(1+r)^2} + \frac{c_3}{(1+r)^3} + \dots \quad (4.1.1) [57]$$

Όπου r είναι ο ελάχιστος συντελεστής απόδοσης και C η χρηματοροή.

Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) προκύπτει από την σχέση :

$$(NPV) = C_0 + PV \quad (4.1.2) [57]$$

Το  $C_0$  είναι αρνητικό .Ο κανόνας ορίζει πως η τιμή (NPV) με την μεγαλύτερη αξία αποτελεί την καλύτερη επένδυση.

Τα πιο σημαντικά και δύσκολα προβλήματα είναι :

- Ο χρόνος υλοποίησης της επένδυσης . Αυτό για να γίνει κατανοητό ως πρόβλημα σε μία εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να συμπεριλάβουμε υπ όψιν τις μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών που αφορούν την ενέργεια.
- Επιλογή εξοπλισμού μακράς ή σύντομης διάρκειας ζωής. Στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας το προσδόκιμο (αποδοτικής) λειτουργίας είναι τα 50-70 έτη. Σε ένα υδροηλεκτρικό είναι 50-80 έτη, ενώ σε CAES το προσδόκιμο ενδεικτικά είναι 50 έτη. Αυτό επηρεάζει το κόστος της επένδυσης για την ανάγκη της μελλοντικής αποκατάστασης.
- Η αντικατάσταση. Σε περιόδους όπως αυτή όπου η καινοτομία και η εξέλιξη είναι ραγδαίες, μπορεί να κριθεί αναγκαίο η αναβολή της επένδυσης για πιο σύγχρονο εξοπλισμό, ή να αξιολογηθεί η ανάγκη γρηγορότερης αντικατάστασης-εκσυγχρονισμού.
- Το κόστος του υπερβάλλοντος δυναμικού. Το κόστος δηλαδή χρήσης του εξοπλισμού ,αν είναι όλες οι διατάξεις απαραίτητες. [6][8][56][57][48][62]

Εκτός από την μέθοδο την καθαρής παρούσας αξίας, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι υπολογισμού της επένδυσης αν και λιγότερο ακριβείς:

Απόδοση Επένδυσης (Return On Investment (ROI))

Απόδοση επένδυσης (ROI) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης μιας επένδυσης ή για να συγκρίνει την αποδοτικότητα διαφορετικών επενδύσεων. Για τον υπολογισμό του ROI, το όφελος (απόδοση) μιας επένδυσης διαιρείται με το κόστος της και το αποτέλεσμα εκφράζεται ως ποσοστό.[66][67]

$$ROI = \frac{(PI-CI)}{CI} \quad (4.1.3) [57]$$

Όπου PI (Profit of Investment) είναι το κέρδος επένδυσης και CI (Cost of Investment) είναι το κόστος επένδυσης.

Ο ROI μετρά πόσο αποτελεσματικά η επιχείρηση χρησιμοποιεί τα κεφάλαια της για να παράγει κέρδος κι είναι ένας πολύ δημοφιλής δείκτης μέτρησης λόγω της ευελιξίας και της απλότητας του. Εάν η επένδυση δεν έχει θετικό πρόσημο ή αν υπάρχουν άλλες επενδύσεις με υψηλότερη απόδοση, τότε η επένδυση δεν θα πρέπει να αναληφθεί.

Αυτή η ευελιξία έχει κι ένα μειονέκτημα όμως, καθώς ο υπολογισμός του ROI μπορεί εύκολα να χειραγωγηθεί και να εκφράσει διαφορετικό αποτέλεσμα κάθε φορά ώστε να εξυπηρετεί τους σκοπούς του χρήστη. [56][57]

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return (IRR))

Εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι ένας δείκτης ο οποίος μετρά την απόδοση μιας μακροχρόνιας επένδυσης, εξισώνοντας την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών πλέον της τελικής αγοραίας αξίας, με την τρέχουσα αγοραία αξία της επένδυσης. .

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+IRR)^t} - C_0 \quad (4.1.4) [57]$$

Όπου  $C_t$  = Καθαρή ταμειακή εισροή κατά την περίοδο  $t$ ,  $C_0$  = Συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης  
 $IRR$  = Το εσωτερικό ποσοστό απόδοσης  $t$  = Ο αριθμός των χρονικών περιόδων

Εναλλακτικά, είναι η τιμή στην οποία η λογιστική αξία ενός χρεογράφου είναι ίση με την παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών.

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) ενός χρεογράφου που εκδίδεται σε τιμή κατώτερη της ονομαστικής (discount note) είναι ισοδύναμος με ένα σταθερό προεξοφλητικό επιτόκιο που καθιστά ίση την παρούσα αξία της ροής των πληρωμών προς την αρχική επένδυση.

Περίοδος Αποπληρωμής – Pay Back Period (PBP)

Η περίοδος αποπληρωμής είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ανακτήσουμε το κόστος μιας επένδυσης και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο (στην περίπτωση που έχουμε σταθερές χρηματοροές ανά έτος. [56][57])

$$PBP = \frac{M_{inv}}{M_{ret}} \quad (4.1.5) [57]$$

Όπου  $M_{inv}$  = χρήματα που επενδύθηκαν και  $M_{ret}$  = τα χρήματα που επιστρέφονται ετησίως (καθατό κέρδος)

Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι η περίοδος αποπληρωμής αγνοεί τη χρονική αξία των χρημάτων (είναι μη-αποπληθωρισμένες ροές χρημάτων).

Παράδειγμα

Εάν το κόστος της αρχικής επένδυσης ή τα € που επενδύθηκαν = € 20.000 και τα καθαρά κέρδη = € 3000/έτος τότε:

Περίοδος Αποπληρωμής – Pay Back Period (PBP) = 20000/3000 = 6,66 έτη

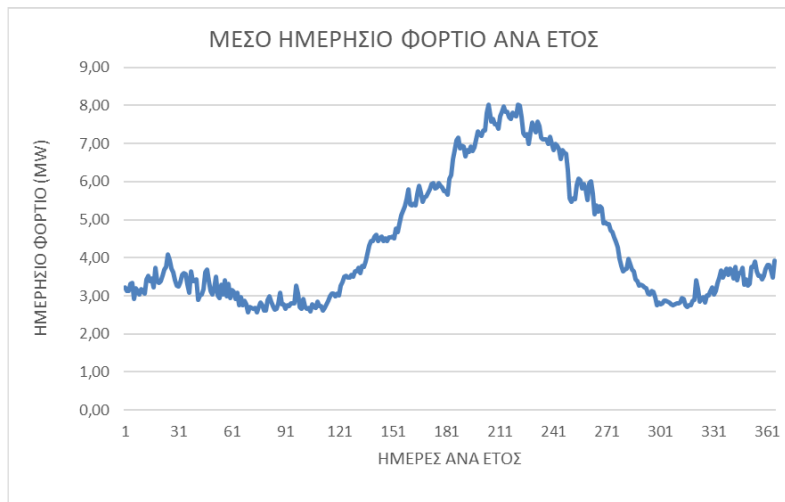
Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν μας εξηγούν τον τρόπο υπολογισμού της επένδυσης, δηλαδή αν συμφέρει τον επενδυτή να διαθέσει τα χρήματά του σε ένα τέτοιο έργο. Πριν όμως γίνει χρήση αυτών των εργαλείων υπολογισμού πρέπει να γίνει διαστασιολόγηση του έργου.

Για να κάνουμε σωστή διαστασιολόγηση πρέπει να ισχύουν τα εξής κριτήρια:

- Να γνωρίζουμε το ηλεκτρικό φορτίο που έχει ανάγκη η κάθε πόλη σε μέσο όρο.
- Να γνωρίζουμε τις περιόδους αιχμής και υπερκατανάλωσης.
- Να έχουμε πλήρη εικόνα για τις γεωγραφικές ιδιομορφίες.
- Να έχουμε γνώση για αιολικό και το ηλιακό φορτίο (αν μιλάμε για υβριδικούς σταθμούς)

Πιο αναλυτικά:

Για να μάθουμε το ηλεκτρικό φορτίο που έχει ανάγκη η πόλη που θα γίνει το έργο σε μέσο όρο, πρέπει να βρούμε δεδομένα σε πίνακες ή γραφήματα που θα δείχνουν το φορτίο (MW) συναρτήσει της χρονικής περιόδου, όπως φαίνεται στις ενδεικτικά στα διαγράμματα (4.1.a) και (4.1.b).[8][10][51][62]



Διάγραμμα (4.1.a) Διάγραμμα που δείχνει το μέσο ημερήσιο φορτίο σε (MW) ανά ημέρες έτους για μία περιοχή[62]



Διάγραμμα (4.1.b) Διάγραμμα που δείχνει το μέσο ημερήσιο φορτίο σε (MW) ανά ώρες ημέρας για μία περιοχή[62]

Τα παραπάνω γραφήματα μας δίνουν ενδεικτικά τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού φορτίου.

Τα ζητούμενα εδώ είναι τα εξής: το μέγιστο φορτίο και ο χρόνος που καταναλώνεται. Από αυτά τα δεδομένα όπως φαίνεται στις εικόνες, κρίνουμε πως οι ανάγκες της πόλης που μελετάμε είναι αυξημένες από τις ημέρες 121 έως 300 του έτους και τις ώρες 16:00 έως 23:00. Έτσι λοιπόν βλέπουμε πως χρειαζόμαστε στρόβιλο ισχύος 10 έως 12 MW όπου θα έχει σχεδιαστεί να δουλεύει συνεχόμενα από 4 έως 6 MW. Βέβαια το ιδανικότερο σενάριο θα ήταν 2 αντλιοστρόβιλοι έως 8 MW ο καθένας, γιατί όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2, η ευελιξία και η απόδοση του συστήματος αυξάνονται.

Η επιλογή του στρόβιλου πρέπει να είναι παραπάνω από το μέγιστο φορτίο κατανάλωσης, για να αποφύγουμε τα χειρότερα και να υπάρχει περιθώριο σε μελλοντικές ανάγκες αύξησης της ισχύος του δικτύου, όχι όμως πολύ παραπάνω γιατί έτσι γίνεται υπερδιαστασιολόγηση του έργου πράγμα που το καθιστά ασύμφορο. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαφορά στις απαιτήσεις του δικτύου και την παραγωγή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευσή της αν το επιτρέπουν οι προδιαγραφές της μονάδας. [50][51][52][58]

Γνωρίζοντας λοιπόν το μέγεθος του στρόβιλου που χρειαζόμαστε, πρέπει να δούμε το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης, είτε σε αντλιοσταμείωση, είτε σε μονάδα πεπιεσμένου αέρα. Στα ήδη υπάρχοντα έργα αντλιοσταμείωσης, η αυτονομία μιας δεξαμενής είναι από 6 έως 12 ώρες,

ανάλογα τις απαιτήσεις του δικτύου, με παρόμοια αυτονομία και στα συστήματα πεπιεσμένου αέρα. [66][67]

Οι ταμιευτήρες έχουν σκοπό την αποθήκευση νερού από βροχές και την τήξη χιονιού στα βουνά όπου μέσω των ποταμών θα τροφοδοτηθούν. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τον έλεγχο στην παροχή και την χρήση του νερού. Η αύξηση της επιφάνειας και του ύψους του ταμιευτήρα μας δίνει και αυξημένο ολικό ύψος άρα και την αύξηση ισχύος της παραγόμενης ενέργειας. Απ' την άλλη, η αύξηση του ύψους οδηγεί και στην αύξηση της επιφάνειας και κατ' επέκταση στην αύξηση της ποσότητας νερού που εξατμίζεται. [47][48]

Για την κατασκευή του ταμιευτήρα θα πρέπει να εξετάζεται μια σειρά από παραμέτρους όπως:

- το μέγεθος και η χωρητικότητα του ταμιευτήρα,
- η θέση,
- η σταθερότητα της όχθης και η διεισδυτικότητα του νερού στο έδαφος,
- η σεισμικότητα,
- οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- η απόθεση της ιλύος

Η χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό του. Επιλέγεται με βάση την ποσότητα του νερού και τις εποχιακές ή ετήσιες μεταβολές της ροής σε συνδυασμό με την απαιτούμενη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τις τοπικές ανάγκες νερού για μη ενεργειακές χρήσεις. Η βέλτιστη εκμετάλλευση του νερού πραγματοποιείται όταν υπάρχει ταυτόχρονη κάλυψη ενεργειακών και μη ενεργειακών αναγκών με το ίδιο νερό. Όμως αρκετές φορές δεν συμπίπτουν οι ανάγκες π.χ. άρδευσης με τις ανάγκες της ηλεκτροπαραγωγής με αποτέλεσμα τη σπατάλη αποθηκευμένου νερού. Επιπλέον σε περιπτώσεις έντονης ροής θα πρέπει να υπάρχει χώρος στον ταμιευτήρα να δεχθεί το νερό, άρα πρέπει να γίνεται σωστός προγραμματισμός της εκροής του νερού λαμβάνοντας υπόψη και το νερό που θα εισρεύσει. Σε κάθε περίπτωση, η αποδοτική διαχείριση του νερού ενός ταμιευτήρα αποτελεί ένα πρόβλημα με πολλές παραμέτρους που έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους. Η μαθηματική σχέση που δίνει τη διαθέσιμη ποσότητα νερού μια χρονική στιγμή σε σχέση με την προηγούμενη στιγμή είναι: [48][53][54][55]

$$Y_{t+1} = Y_t + I_t + B_t + R_t - ET_t - W_t - X_t - N_t \quad (4.1.6) [58]$$

όπου:

- $Y$  υπάρχουσα ποσότητα νερού του ταμιευτήρα,
- $I$  κύρια εισροή από τα ποτάμια,  $B$  βροχόπτωση πάνω στον ταμιευτήρα,
- $R$  τοπική εισροή από το πρηνές της λεκάνης του ταμιευτήρα,
- $ET$  ποσότητα του νερού που εξατμίζεται,
- $W$  ποσότητα νερού που καλύπτει δευτερεύουσες χρήσεις,
- $X$  ποσότητα του νερού προς τον στρόβιλο, και
- $N$  απώλειες που δεν μπορούν να ελεγχθούν.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ή προσομοίωσης.

Οι κύριοι περιορισμοί είναι:

- a) Ως προς το μέγεθος του ταμιευτήρα:

$$Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max} \quad (4.1.7) [48]$$

όπου  $Y_{\max}$  η μέγιστη χωρητικότητα του ταμιευτήρα και  $Y_{\min}$  η ελάχιστη τεχνικά εκμεταλλεύσιμη.

- b) Ως προς την παροχή στον στρόβιλο

$$Q_{\min} \leq X/\delta t \leq Q_{\max} \quad (4.1.8) [48]$$

Όπου  $Q_{\min}$  και  $Q_{\max}$  η μέγιστη και ελάχιστη παροχή από τον στρόβιλο αντίστοιχα, και  $\delta t$  η χρονική απόσταση των στιγμών ή αλλιώς το βήμα.

Αφού προκύψει ο όγκος του μεγάλου ταμιευτήρα, πρέπει να υπολογιστεί το μέγεθος του μικρού ταμιευτήρα. Σαφώς το μέγεθός του ιδανικά θα πρέπει να είναι στο μισό του μεγάλου, ώστε σε δύσκολες περιόδους να υπάρχει η «ανοχή» που χρειάζεται. Βέβαια το μέγεθος μπορεί να



περιοριστεί αν μιλάμε για υβριδικό σταθμό, με το αιολικό και το ηλιακό φορτίο να επιστρέφει το νερό στον μεγάλο ταμιευτήρα. [37][48][52][60]

Έχοντας γνώση όλων των παραπάνω, κάνουμε την διαστασιολόγηση και φτιάχνουμε τον προϋπολογισμό του έργου προσθέτοντας:

- Το κόστος του στροβίλου
- το κόστος πληρωμής των εργαζομένων
- το κόστος των μηχανημάτων εξκαφής και σκυροδέματος
- το κόστος της ηλεκτρογεννήτριας-ηλεκτροκινητήρα
- το κόστος των αυτοματισμών
- το κόστος των αναλωσίμων (σωληνώσεις καλώδια κτλπ) .

#### 4.2 Σύγκριση των συστημάτων αντλησιοταμίευσης με τα CAES και λοιπών διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας

Έχοντας υπ όψιν όλα τα παραπάνω μπορούμε να προβούμε σε κάποια στοιχειώδη συμπεράσματα για τα δύο συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Όπως προαναφέρθηκε η ιδανικότερη περίπτωση θα ήταν να συνδυαστούν με ΑΠΕ για να εξασφαλίζουν την ομαλή τους λειτουργία . Ωστόσο απο μόνα τους παρουσιάζουν μερικά χαρακτηριστικά που τα καθιστά μοναδικά.[36][41][52]

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας		
	<u>Συστήματα αντλησιοταμίευσης</u>	<u>Συστήματα CAES</u>
Αποθηκευτική ικανότητα	500-8000MWh	500-2500MWh
Χωρητικότητα ισχύος	100-1000MW	>100MW
Ενέργεια/Ισχύς	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους
Ενεργειακή απόδοση	76-85%	>75%
Διάρκεια ζωής	>50 έτη	40-50 έτη
Κόστος	140-680 εκατομμύρια ευρώ για ένα έργο	<400 ευρώ ανά κιλοβατώρα
Ανάπτυξη	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη
Διάδοση	Διαδεδωμένη >από 90 GW παγκοσμίως	Αμερική Γερμανία αλλά υπό κατασκευή σε πολλά μέρη του κόσμου
Πλεονεκτήματα	Υψηλή χωρητικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος ανά χωρητικότητα μονάδος	Υψηλή χωρητικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος ανά χωρητικότητα μονάδος
Μειονεκτήματα	Σημαντικές περιβαλλοντικές μεταβολές	Δυσκολία για καταλληλότητα τοποθεσίας
Εφαρμογές	Εξισορρόπηση φορτίου, στρεφόμενη εφεδρεία, εφαρμογή με απε(υβριδικά)	Στρεφόμενη εφεδρεία Εξομάλυνση αιχμών εφαρμογές μεταφοράς και διανομής συνδυασμός με ΑΠΕ
Περιβαλλοντική ή επίδραση	Σημαντική	Αμελητέα

Πίνακας (4.2.1) σύγκριση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [66]

Για συστήματα αντλησιοταμίευσης:

Πλεονεκτήματα:

- Είναι γνώριμη και παλιά η τεχνολογία τους και υπάρχει όλη η τεχνογνωσία που χρειαζόμαστε.
- Αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό σταθμών αποθήκευσης ενέργειας .

- Έχουν μεγάλο προσδόκιμο ζωής.
- Μπορούν να κάνουν απόσβεση της επένδυσής τους σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.
- Μπορούν ταυτόχρονα να γίνουν υδροβιότοποι .
- Βελτιώνουν το περιβάλλον όχι μόνο με την καθαρή ενέργεια που αποθηκεύουν και παράγουν, αλλά και την γύρω περιοχή αλλάζοντας θετικά το μικροκλίμα.
- Συμβάλλουν στην τοπική ανάπτυξη (αθλήματα του νερού, ιχθυοκαλλιέργειες κ.α).
- Μπορούν τα ήδη υπάρχοντα φράγματα να μετατραπούν σε σταθμούς παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.
- Δίνουν την δυνατότητα υδροδότησης.

Όπως καταλαβαίνουμε θα ήταν μία ουτοπία αν μπορούσε κάθε πόλη να έχει το δικό της φράγμα και να λειτουργούσε ως υβριδικός σταθμός αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας ταυτόχρονα με τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα. Βέβαια είναι πολλά τα μέρη του κόσμου που προσπαθούν να πετύχουν μία αειφόρο ανάπτυξη χρησιμοποιώντας την μέθοδο της αντλησιοταμίευσης. Στην Ελλάδα επικρατεί δυστυχώς μία ρευστή κατάσταση ακόμα και σε έργα τα οποία έχουν εγκριθεί από το ελληνικό κράτος. Η πρόταση και οι δυνατότητες της χώρας θα αναλυθούν στο επόμενο υποκεφάλαιο.[4][63][24][69]

Ωστόσο τα συστήματα αυτά έχουν ατέλειες και υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα στα συστήματα της αντλησιοταμίευσης.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτούν συγκεκριμένα γεωγραφικά σημεία και μεγάλα ύψη ή πολύ μεγάλους ταμιευτήρες.
- Είναι ακριβές κατασκευές ειδικά αν πρόκειται για απόκρυμα μέρη.
- Υπάρχουν δυσκολίες στην μετατροπή της χρήσης γης από κρατικούς παράγοντες.
- Υπάρχουν δυσκολίες και δυσανασχέτιση στους κάτοικους που τους ανήκουν κομμάτια γης που θα μπορούσαν να μετατραπούν.
- Σε περίπτωση αστοχίας του φράγματος τα αποτελέσματα είναι ολέθρια .

Αρκεί να συλλογιστούμε τα προβλήματα που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια στον πλανήτη και στους ανθρώπους,για να αντιληφθούμε την προοπτική που έχουν τα συστήματα αυτά . Με την στήριξη των τοπικών και κρατικών παραγόντων μπορούν να εξασφαλίσουν μία ανώτερη ποιότητα ζωής. Αυτό θα το πετύχουν προσφέροντάς μας οικονομική σταθερότητα με τέσσερις τρόπους:

- 1) Με την παραγωγή φθηνής και καθαρής ενέργειας.
- 2) Με την δυνατότητα υδροδότησης
- 3) Με την δυνατότητα ιχθυοκαλλιέργειας
- 4) Με την τουριστική ανάπτυξη από την αναβάθμιση του τοπίου και των αθλημάτων του νερού

Όλα τα παραπάνω υφίστανται ενώ ταυτόχρονα βελτιώνουν το περιβάλλον και το ευ ζην.

[31][33][37][39][51]

Για συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα.

Πλεονεκτήματα:

- Έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας.
- Αξιοποιούν υπόγεια σπήλαια και παλαιά κοιτάσματα τα οποία δεν έχουν άλλη χρήση.
- Συνδυάζονται εύκολα με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αν οι τελευταίοι χρησιμοποιούν φυσικό αέριο.
- Σε περίπτωση έλλειψης σπηλαιού η δεξαμενή μπορεί να γίνει τεχνητή.
- Υπό έρευνα νέοι τύποι αποδοτικών και χωρίς καύσιμο σταθμών

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα δίνουν την δυνατότητα σε περιοχές που δεν δύναται να κατασκευάσουν συστήματα αντλησιοταμίευσης να έχουν σταθερότητα στην παραγωγή και την αποθήκευση ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν συνδυάζονται με άλλες μεθόδους παραγωγής ενέργειας, όπως οι ΑΠΕ, τότε εξασφαλίζεται η δυνατότητα σταθερής παροχής

ενέργειας στο δίκτυο, βελτιώνοντας έτσι την τιμή της κιλοβατώρας και αποφεύγοντας πιθανά μπλακ ουτ από υπερφόρτωση.[41][52][56]

Μειονεκτήματα:

- Υπάρχουν λίγοι τέτοιοι σταθμοί με αποτέλεσμα να υπάρχει λίγη τεχνογνωσία σε αυτό το αντικείμενο.
- Απαιτούν καύσιμο για τον στρόβιλο που μειώνει την οικονομική ανεξαρτησία
- Είναι βιομηχανικές εγκαταστάσεις με αποτέλεσμα να μειώνουν την αξία της γύρω περιοχής λόγω καταστροφής του τοπίου.
- Είναι ακριβοί όταν χρειάζεται να χτιστεί η δεξαμενή και δεν υπάρχουν παλαιά κοιτάσματα ή κατάλληλα σπήλαια.

Ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι η εξάρτησή τους (ακόμα) από το φυσικό αέριο. Δεδομένου ότι είναι ένα καύσιμο όπου πλέον βασίζεται η παγκόσμια οικονομία, θα προκαλεί διακυμάνσεις στην τιμή της κιλοβατώρας, κάτι το οποίο φάνηκε και από τους συμβατικούς σταθμούς μαζί με την προσαύξηση των ΑΠΕ στους λογαριασμούς ηλεκτροδότησης στην Ελλάδα τους πρώτους μήνες του 2022, με αποτέλεσμα την οικονομική του αστάθεια. Οπότε συμπεραίνουμε πως αν μία χώρα δεν έχει δικό της ορυκτό πλούτο σε κοιτάσματα αερίου η σταθερότητα ενός CAES με φυσικό αέριο, δεν είναι και τόσο εφικτή.[7][8][9][10]

Στους παρακάτω πίνακες, βλέπουμε συγκριτικά τις υπόλοιπες διατάξεις αποθήκευσης μαζί με τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και τα CAES.

Σύστημα πολύ βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση Μετατροπής
SMES	300	72000	sec	0.95
Σφόνδυλοι(χαμηλών ταχυτήτων)	280	300	sec	0.9
Μπαταρίες (οξέος μολυβδου)	175	100-200	sec	0.85
Συμπιεσμένος αέρας	400	10-20	sec	0.5-0.7
Ultra capacitor	300	82000	sec	0.95

Πίνακας(4.2.2) Συστήματα πολύ βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης για ποιότητα ισχύος [66]

Σύστημα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση Μετατροπής
Σφόνδυλοι(ρυθμιζόμενων ταχυτήτων)	100	125	Λίγα λεπτά	0.95
Σφόνδυλοι(υψηλών ταχυτήτων)	25000	350	Λίγα λεπτά-μία ώρα	0.93
Μπαταρίες (οξέος μολυβδου)	175	200	Λίγα λεπτά-μία ώρα	0.85
Μπαταρίες (ενισχυμένες)	245	300	Λίγα λεπτά-μία ώρα	0.7
Συμπιεσμένος αέρας	400	10-20	Λίγα λεπτά-μία ώρα	0.5-0.7

Πίνακας(4.2.3) Συστήματα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης για εξομάλυνση των διακυμάνσεων αιολικής ισχύος [66]

Σύστημα μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση Μετατροπής
Μπαταρίες (οξέος μολυβδού)	175	200	Πάνω από 10 ώρες	0.85
Μπαταρίες (ενισχυμένες)	245	300	Πάνω από 10 ώρες	0.7
Υδρογόνο	500-20000	50-300	Πάνω από 10 ώρες	0.6
Συμπιεσμένος αέρας	575	10-20	Πάνω από 10 ώρες	0.79

Πίνακας(4.2.4) Σύστημα μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης για εξομάλυνση του φορτίου [66]

Σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Αποτελεσματικότητα
Μπαταρίες (οξέος μολυβδού)	175	200	Πάνω από 10 ώρες	0.85
Υδρογόνο	500-20000	50-300	Πάνω από 10 ώρες	0.59
Συμπιεσμένος αέρας	575	10-20	Πάνω από 10 ώρες	0.79
Αντλησιοταμίευση (500-1500MW)	1100	10	Πάνω από 10 ώρες	0.87

Πίνακας(4.2.5)Σύστημα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας [66]

Αποθηκευτική διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές Ενέργειας
Αντλησιοταμίευση	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία	Μη οικονομικό ή μη εφικτό	Πλήρως κατάλληλο και λογικό
CAES	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία και καύσιμο	Μη οικονομικό ή μη εφικτό	Πλήρως κατάλληλο και λογικό
Μπαταρίες ροής	Υψηλή χωρητικότητα ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος -ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	Λογικό για την εφαρμογή	Πλήρως κατάλληλο και λογικό
NaS	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας υψηλή αποτελεσματικότητα	Κόστος παραγωγής μέτρα ασφαλείας	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Πλήρως κατάλληλο και λογικό
Li-ion	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας υψηλή αποτελεσματικότητα	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Εφικτό αλλά όχι παραγωγικό
Ni-cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας υψηλή αποτελεσματικότητα	Σχεδόν κανένα	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Λογικό για την εφαρμογή
Μολύβδου-οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Εφικτό αλλά όχι παραγωγικό

Σφόνδυλοι	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Εφικτό αλλά όχι παραγωγικό
SMES,DSMES	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας υψηλό κόστος παραγωγής	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Μη οικονομικό ή μη εφικτό
E.C Capacitors	Μεγάλος κύκλος ζωής και υψηλή αποτελεσματικότητα	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	Πλήρως κατάλληλο και λογικό	Λογικό για την εφαρμογή

Πίνακας(4.2.6) Εφαρμογές των αποθηκευτικών μέσων συγκριτικά [66]

Μία καλή ιδέα θα ήταν να συνδυαζόταν με τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης των λυμάτων, ώστε να αξιοποιούσαμε το παραγόμενο μεθάνιο συνδυαστικά με ΑΠΕ σε έναν υβριδικό CAES. Για μία τέτοια περίπτωση φυσικά η επένδυση θα ήταν τεράστια και η μελέτη που απαιτείται για ένα γιγάντιο έργο σαν αυτό, μας κάνει να αμφισβητούμε την βιωσιμότητά του λόγω του μεγάλου χρόνου απόσβεσης που προκύπτει.

### 4.3 Η πρόταση για τον Ελλαδικό χώρο

Το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα σήμερα διαθέτει τους αντλησιοταμιευτικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς ανοικτού κύκλου Θησαυρού και Σφηκιάς, συνολικής ισχύος παραγωγής 699 MW, οι οποίοι λειτουργούν από τα τέλη της δεκαετίας 1990. Τον τελευταίο χρόνο η χώρα γνωρίζει μια έκρηξη ενδιαφέροντος για αδειοδότηση νέων εγκαταστάσεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς αιτήσεων στα μέσα του 2021 υπερβαίνει τα 9000 MW, με το μεγαλύτερο μέρος αυτών να έχει ήδη μετατραπεί σε άδειες παραγωγής, υπερκαλύπτοντας κατά πολύ τις ανάγκες του εθνικού μας συστήματος σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Στα αδειοδοτημένα και ώριμα έργα αποθήκευσης περιλαμβάνεται ο αντλησιοταμιευτικός σταθμός Αμφιλοχίας, ισχύος 680 MW και διάρκειας 6 ωρών, ο οποίος έχει ενταχθεί στα έργα Ευρωπαϊκού Κοινού Ενδιαφέροντος (PCI).

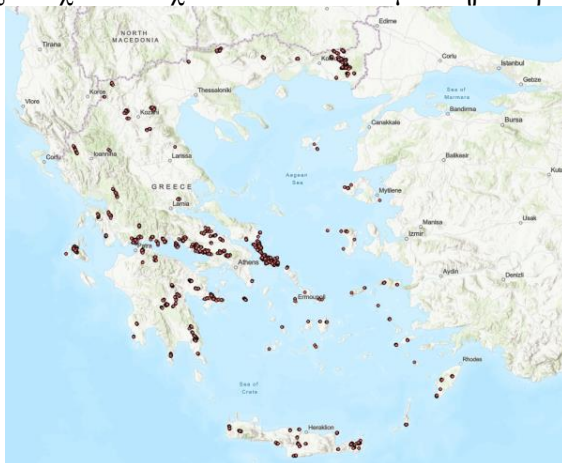
Οι ανάγκες αποθήκευσης του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος με αναφορά το 2030 αποτιμήθηκαν προ έτους από μελέτη του ΕΜΠ για λογαριασμό της ΡΑΕ σε 2000-3000 MW (συνολική δυναμικότητα μείγματος αποθηκών μικρής και μεγάλης διάρκειας, περιλαμβανομένων των υφιστάμενων σταθμών αντλησιοταμίευσης), αναλόγως με τα θεωρούμενα σενάρια ανάπτυξης των ΑΠΕ.

Το ενδιαφέρον για ανάπτυξη νέων εγκαταστάσεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αφορά τόσο σταθμούς καθαρής αποθήκευσης που συνδέονται απ' ευθείας στο σύστημα και δραστηριοποιούνται στις αγορές, όσο και εγκαταστάσεις συνδυασμένες με μονάδες παραγωγής ΑΠΕ υπό μια ποικιλία υποδειγμάτων συνεργασίας, περισσότερο ή λιγότερο αναμενόμενων και συμβατών με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική.

Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ), η εισαγωγή αποθήκευσης είναι σήμερα δυνατή μέσω του πλαισίου των υβριδικών σταθμών (ΥΒΣ), δηλαδή συνδυασμών μονάδων ΑΠΕ και αποθήκευσης που λειτουργούν ως ενιαίες κατανεμόμενες οντότητες. Παρά το σημαντικό επενδυτικό ενδιαφέρον και τις περίπου 160 άδειες παραγωγής εγγυημένης ισχύος άνω των 500 MW και ισχύος ΑΠΕ μεγαλύτερης των 1100 MW, μόνο 2 μικρά έργα έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα:

- Ο υβριδικός σταθμός της Eunice στην Τήλο (σύστημα Κω-Καλύμνου), ο οποίος περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια 800 kW, Φ/Β 160 kW και μπαταρίες τεχνολογίας NaNiCl2 800 kW/2.8 MWh. Ο σταθμός βρίσκεται σε εμπορική λειτουργία από το 2019.
- Το υβριδικό ενεργειακό έργο της ΔΕΗ Ανανεώσιμες στην Ικαρία, το οποίο συνδυάζει υδροηλεκτρική παραγωγή μέσω δύο μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών 1 MW και 3 MW και λειτουργία υβριδικού σταθμού αντλησιοταμιευτικού τύπου που τροφοδοτείται από αιολικό πάρκο 3x900 kW. Το έργο βρίσκεται σε δοκιμαστική λειτουργία.[28]

Η Ελλάδα είναι μία από τις πιο ποικιλόμορφες χώρες του πλανήτη. Συνδυάζονται αντίθετα μεταξύ τους γεωγραφικά στοιχεία όπως π.χ. μεγάλα βουνά δίπλα από θάλασσα, τεράστιες ακτογραμμές και πάρα πολλά νησιά. Επίσης συστηματικές έρευνες των γεωλόγων και σπηλαιολόγων στη χώρα μας, έχουν φέρει στο φως περισσότερα από 8.500 σπήλαια όλων των κατηγοριών (σπήλαια, βράθρα, υπόγειοι ποταμοί κ.α.), πολλά από τα οποία παραμένουν ακόμα ανεξερεύνητα. Τα φράγματα-τεχνητές λίμνες-δεν λείπουν, όπως ούτε και οι φυσικές λίμνες, με αποτέλεσμα σχεδόν κάθε γεωγραφικός νομός να έχει τουλάχιστον από έναν ταμιευτήρα νερού. [21][51][63]



Εικόνα (4.3.a) Χάρτης της Ελλάδος με τις περιοχές όπου υπάρχουν αιολικά πάρκα[29]

Στην εικόνα (4.3.a) βλέπουμε τον χάρτη της Ελλάδος, του οποίου τα σημεία (κουκκίδες) μας δείχνουν τα μέρη όπου υπάρχουν αιολικά πάρκα στην χώρα μας. Σε πολλές περιοχές, τα αιολικά πάρκα βρίσκονται κοντά σε τεχνητές λίμνες, γεγονός το οποίο αξίζει να ερευνηθεί για την δημιουργία υβριδικών σταθμών.

Ακόμα όμως και σε μέρη τα οποία δεν υπάρχουν λίμνες κοντά, καλό θα ήταν να γινόταν μία μελέτη από γεωλόγους στα εδάφη των βουνών όπου βρίσκονται τα αιολικά πάρκα για την τοποθέτηση CAES υβριδικών σταθμών.



Εικόνα (4.3.b)[Αεροφωτογραφία τραβηγμένη με drone από το προσωπικό αρχείο του Οικονομολόγου Γεώργιου]

Το έργο στην Ικαρία είναι από τα πρωτοπόρα έργα αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα, αμέσως μετά το Ελ Γιέρο της Ισπανίας. Στα νησιά του Αιγαίου οι άνεμοι είναι πολύ συχνό φαινόμενο το οποίο με τις κατάλληλες μελέτες μπορεί να τιθασευθεί και να αποθηκευτεί η ενέργειά τους ώστε να αναβαθμιστεί η ποιότητα ζωής των κατοίκων. Εμπνευση μπορεί να αποτελέσει το υβριδικό σύστημα της Τήλου. Το οποίο αποτελείται από ανεμογεννήτρια ισχύος 800 kW, φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 160 KWp και συσσωρευτές χωρητικότητας 2,8 MWh. Βέβαια όπως κάθε νέο εγχείρημα έχει τα προβλήματά του. Αυτή τη στιγμή η Τήλος τροφοδοτείται την υπόλοιπη ενέργεια που χρειάζεται από την Κω με υπόγειο καλώδιο. Ωστόσο, το καλώδιο συχνά παρουσιάζει βλάβες,

με αποτέλεσμα πολλές επιχειρήσεις κυρίως το καλοκαίρι να επιστρατεύουν γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν με πετρέλαιο. Η παροχή ενέργειας από Α.Π.Ε. και η μείωση της χρήσης των μονάδων πετρελαίου θα οδηγήσει σε σημαντικά οφέλη για το νησί, όπως την προστασία του περιβάλλοντος από τη διακοπή λειτουργίας μονάδων παραγωγής ενέργειας με πετρέλαιο και την οικονομική ελάφρυνση των κατοίκων.[25][27][62][69]

Ένα σημαντικό και οικονομικό εγχείρημα για τον Ελλαδικό χώρο είναι η μετατροπή κάποιων φραγμάτων όπου ήδη υπάρχουν σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αντλιοσταμείωση.[68]



Εικόνα (4.3.c)[Αεροφωτογραφία τραβηγμένη με drone από το προσωπικό αρχείο του Οικονομόπουλου Γεώργιου]

Δύο από αυτά τα φράγματα είναι το φράγμα Πείρου Παραπεύρου και της τεχνητής λίμνης Ντασκά στην Αχαΐα. Πιο αναλυτικά, το φράγμα Πείρου παραπεύρου είναι ένα συγχρονο έργο ταμιευτήρα με υποδομές κατάλληλες για την τοποθέτηση ενός αξονικού υδροστρόβιλου, και διαθέτει έναν μικρότερο ταμιευτήρα μετά την εκτόνωση του νερού όπως φαίνεται στις εικόνες.

Στις εικόνες (4.3.b) και (4.3.c) βλέπουμε σε λήψη από drone την λίμνη φράγματος Πείρου Παραπεύρου. Σε περίπτωση χρήσης του κάτω ταμιευτήρα για επιστροφή του νερού θα χρειαστεί να μεγαλώσει η χωρητικότητά της γεγονός που θα αυξήσει το κόστος μιας πιθανής μετατροπής, αλλά είναι μία επένδυση που θα έκανε γρήγορα απόσβεση. Πάραυτα βλέπουμε στις φωτογραφίες την ομορφιά του τοπίου και τις δυνατότητες μιας τέτοιας λίμνης.

Από την άλλη πλευρά η Λίμνη Ντασκά είναι ένας σαφώς μικρότερος ταμιευτήρας, που όμως παρουσιάζει άλλα πλεονεκτήματα. Βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο και το σημείο εκείνο έχει την δυνατότητα κατασκευής ενός ταμιευτήρα χαμηλότερα, ενώ είναι αξιοσημείωτο πως κοντά βρίσκονται αιολικά πάρκα. Θα ήταν μία καλή περίπτωση για έναν υβριδικό σταθμό αντλιοσταμείωσης.

Όπως φαίνεται στην εικόνα (4.3.d), η λίμνη Ντασκά είναι ένας σαφώς μικρότερος ταμιευτήρας σε σχέση με αυτήν του φράγματος Πείρου παραπεύρου, ωστόσο οι δυνατότητές της είναι όλα όσα θετικά στοιχεία παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο για τα συστήματα αντλιοσταμείωσης.

Στον Ελλαδικό χώρο τα κατάλληλα μέρη για επένδυση σε σταθμούς αποθήκευσης ενέργειας είναι πάρα πολλά με ξεχωριστές δυνατότητες το καθένα. Ήδη μας είναι γνωστά κάποια από τα έργα τα οποία βρίσκονται σε εξέλιξη όπως το σύστημα αντλιοσταμείωσης στην Αμφιλοχία ή η κατασκευή του νέου εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής στο ενεργειακό κέντρο του Αγίου Νικολάου στη Βοιωτία, ενός από τους μεγαλύτερους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, ξεκίνησε το 2019 και αναμενόταν να ολοκληρωθεί έως το τέλος του 2021. Η μονάδα της Mytilineos, ύψους επένδυσης που ανέρχεται στα 300 εκατ. ευρώ, θα έχει ισχύ 826 MW, καλύπτοντας το 10% των εθνικών αναγκών σε ενέργεια, γεγονός που την καθιστά τη μεγαλύτερη μονάδα του εγχώριου-εθνικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής και έναν από τους μεγαλύτερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής σε όλη την Ευρώπη.

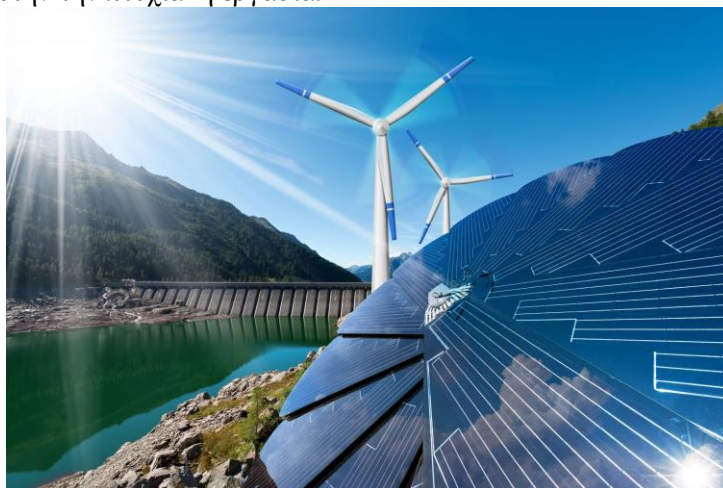
Η μονάδα θα είναι μία από τις πιο σύγχρονες στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς. Ο αεριοστρόβιλος τεχνολογίας class H της General Electric θα έχει θερμική απόδοση μεγαλύτερη από 63%, γεγονός που τον καθιστά τον πιο αποδοτικό στην Ευρώπη αυτή τη στιγμή.[22][23][25][60]

Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες έχει σήμερα 18 Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς σε λειτουργία, 4 σε φάση κατασκευής ενώ αρκετά νέα έργα έχουν λάβει άδεια παραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 ανήλθε σε 136 GWh\*\* ενώ από την λειτουργία των ΜΥΗΣ αποφεύχθηκε η εκπομπή 94.108 τόνων CO<sub>2</sub>, καλύπτοντας τις ανάγκες σε ενέργεια 37.104 ελληνικών νοικοκυριών. Εντός του έτους 2021, ολοκληρώθηκε και η κατασκευή του Μικρού Υδροηλεκτρικού Έργου (ΜΥΗΕ) Σμόκοβο ΙΙ (3,2 MW).[11]



Εικόνα (4.3.d)[Αεροφωτογραφία τραβηγμένη με drone από το προσωπικό αρχείο του Οικονομόπουλου Γεώργιου]

Όταν σκεπτόμαστε το μέλλον αντιλαμβανόμαστε πως η τεχνολογία τείνει στην τιθάσευση της καθαρής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην χρήση της όπως και όποτε την χρειαζόμαστε με τις ελάχιστες-ίσως στο πολύ μακρινό μέλλον και καθόλου-απώλειες. Το παρόν είναι το «σκαλοπάτι» που ανεβαίνουμε προς την πρόοδο με όλες αυτές τις τεχνολογίες αποθήκευσης συστήματα αντλησιοταμίευσης, υβριδικούς σταθμούς(εικόνα (4.3.f)) και CAES που αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν σε αυτήν την πτυχιακή εργασία.



Εικόνα (4.3.f) Υβριδικός σταθμός αποθήκευσης και παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος συνδυάζοντας αντλησιοταμίευση με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες[26]

Τέλος εργασίας



## Βιβλιογραφία

### Άρθρα

1. A Review of Energy Storage Technologies /Connoly. – 2010
2. Analytical Study On Flow Through a Pelton / Atthanayake I.U.. – 2009
3. Notes in Green engineering / Born. - Flensburg : Fachhochschule Flensburg, 2012
4. Κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα / Κουσκούριδης. – ΤΕΕ

### Ιστοσελίδες

5. [www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-6/Features/opportunities-in-pumped-storage-hydropower.htm](http://www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-6/Features/opportunities-in-pumped-storage-hydropower.htm)
6. [www.powertogas.info](http://www.powertogas.info)
7. <https://www.deddie.gr/el/deddie>
8. <http://www.rae.gr/site>
9. <https://www.dapeep.gr/>
10. <https://www.dei.gr/>
11. <https://www.ppcr.gr/el/>
12. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics>
13. <http://gr.junxinasp.com/info/how-does-an-axial-compressor-work-46077628.html>
14. <https://gr.depositphotos.com/stock-photos/.html>
15. [https://psiksi.weebly.com/uploads/2/6/9/7/26978224/1.\\_\\_\\_\\_.pdf](https://psiksi.weebly.com/uploads/2/6/9/7/26978224/1.____.pdf)
16. <https://www.liberal.gr>
17. <https://www.helional.gr>
18. <https://energypress.gr>
19. <https://technoluxpro.com/el/akkumulatory/batarei/li-ion.html>
20. <https://www.ydrotechniki.com/>
21. <http://m.gr.modopumpcn.com/water-pump/end-suction-pump/mis-diesel-engine-centrifugal-water-pump.html>
22. <https://www.kathimerini.gr/economy/local/944295/o-anaxiopoitos-energeiakos-thisayros/>
23. <https://www.tema-energy.com/restories/to-megalo-ergo-antlisiertamieysis-sti/>
24. <https://www.thessaliaty.gr/news/115991/250-ekat-euro-apo-tin-ee-gia-to-kolosiaio-protzekt-antlisiertamieysis-stin-amfiloxia--pote-ksekinaei-to-ergo/>
25. <https://constructionmag.gr/ypodomes/monades-apothikefsis-energeias-ependyseis-kai-stin-ellada/>
26. <https://www.in.gr/2021/04/29/b-science/perivallon-b-science/oi-ape-kyria-pigi-energeias-stin-ellada-2021/>
27. <https://m.eirinika.gr/article/31789/el-iero-proto-prasino-nisi-stin-eyropi-poy-eggyatai-ena-viosimo-energeiako-mellon>
28. [https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/07/Eisigisi\\_ODE\\_Apothikefsis-xwris-FEK-kai-praktika.pdf](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/07/Eisigisi_ODE_Apothikefsis-xwris-FEK-kai-praktika.pdf)
29. <https://www.ot.gr/2021/11/19/energeia/o-xartis-me-ola-ta-aiolika-parka-kai-tis-anemogennitries-tis-ellada>
30. <https://www.worldenergynews.gr/energeia/articles/524237/55>

### Παρουσιάσεις

31. Τα Φράγματα της Ελλάδας, Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων Νοέμβριος, 2013
32. Οργάνωση Έργων & Εργοταξίων Φράγματα & κατασκευαστικές μέθοδοι Αθανάσιος Χασιακός, 2015
33. Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης, Τμήμα Μηχ. Μηχανικών ΤΕΙ Λάρισας, 2012
34. Νέες Προοπτικές για την ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα Τεχνολογίες και Περιορισμοί Παπαντώνης Δημήτριος ,2009

### Ξένα Συγγράμματα

35. Renewable Energy Power for a Sustainable Future, Boyle G., Third Edition Oxford University Press, 2012

36. Energy Systems and Sustainability Power for a Sustainable Future, Everett B., Boyle G., Peake S., Ramage J., Second Edition, Oxford, Oxford University Press/Milton Keynes, the Open University, 2012
37. Guidelines for Design of Small Hydropower Plants, Ramos H., WREAN & DED, 2000
38. Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery Seventh Edition S. L. Dixon, C. A. Hall, 2014
39. A Guide to UK Mini Hydro Developments, The British Hydropower Association, 2005
40. P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," Proceedings of the IEEE, 2001.
41. R. Carnegie, D. Gotham, D. Nderitu, and P. V. Preckel, "Utility scale energy storage systems, benefits, application, and technologies," State Utility Forecasting Group, June 2013. [Online]. Available: <https://www.purdue.edu/discoverypark/sufg/docs/publications/SUFG%20Energy%20Storage%20Report.pdf>
42. J. Konrad, R. Carriveau, M. Davison, F. Simpson, and D. S.-K. Ting, "Geological compressed air energy storage as an enabling technology for renewable energy in ontario, canada," International Journal of Environmental Studies, 2012
43. "Huntorf air storage gas turbine power plant," Technical report No. D GK 90 202 E, Brown Boveri (BBC), Germany, 1979
44. M. Raju and S. K. Khaitan, "Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the huntorf plant," Applied Energy, 2012
45. E. Macchi and G. Lozza, "A study of thermodynamic performance of CAES plants, including unsteady effects," in ASME International Gas Turbine Conference and Exhibition, Anaheim, CA, June 1987
46. T. Schobeiri and H. Haselbacher, "Transient analysis of gas turbine power plants, using the Huntorf compressed air storage plant as an example," in ASME International Gas Turbine Conference and Exhibit, Baden, Switzerland, 1985
47. J. Liang and R. G. Harley, "Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies," in Proceedings of the IEEE-PES General Meeting, Minneapolis, MN, July 2010

#### Ελληνικά Συγγράμματα

48. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ΔΥΝΑΜΙΚΟ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΟΝΥΣΗΣ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΑΓΓΕΛΗΣ-ΔΗΜΑΚΗΣ ΑΒΡΑΑΜ ΚΑΡΤΑΛΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΛΙΓΚΙΡΙΔΗΣ Εκδ.σφια 2015
49. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ 4<sup>η</sup> έκδοση 2010 Δημήτρης Γ. Παπανίκας
50. Λειτουργία Αεριοστρόβιλων και Παραγωγή Ενέργειας-Προώθηση Απόστολος Πολυζάκης HEATCOOLPOWER
51. ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ-ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Θεωρία -Λυμένες Ασκήσεις Απόστολος Πολυζάκης HEATCOOLPOWER
52. Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη Θεωρία -Λυμένες Ασκήσεις Απόστολος Πολυζάκης HEATCOOLPOWER
53. Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία: Υδροηλεκτρική ενέργεια, Μαμάσης Ν., Στεφανάκος Ι., Παρουσίαση 2010
54. Υδροδυναμικές Μηχανές-Αντλίες-Υδροστρόβιλοι, Παπαντώνης Δ., 2<sup>η</sup> έκδοση Εκδόσεις Συμεών, 2002
55. Συστήματα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Masters Gilbert M, 2016

56. Σχεδιασμός και Οικονομική μελέτη Εγκαταστάσεων για Μηχανικούς, 5<sup>η</sup> Έκδοση Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus Ronald E. West ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
57. Αρχές Χρηματοοικονομικής των Επιχειρήσεων Richard A. Brealey Stewart C. Myers Franklin Allen 11<sup>η</sup> Αμερικανική-2<sup>η</sup> Ελληνική έκδοση Εκδόσεις Utoria
- Διπλωματικές εργασίες
58. Modeling of Compressed Air Energy Storage for Power System Performance Studies by Ivan Calero ,Waterloo, Ontario, Canada, 2020
59. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ,Ευάγγελος Γιαννόπουλος ,Πολυτεχνείο Κρήτης ,Χανιά,2014
60. Μελέτη υβριδικού συστήματος παραγωγής & αποθήκευσης ενέργειας στην Κάρπαθο, Διακόπουλος Χρυσοβαλάντης Γεώργιος, 2020
61. Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας: Τεχνολογίες και ρυθμιστικό πλαίσιο, Διπλωματική Εργασία Οδυσσέας Χαλατσάκος, 2017
62. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΚΑΤΟΙΚΟΥΣ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ Χρήστου Βλάχος, 2016
63. Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας /Σαγάνη – 2009
64. Διπλωματική εργασία Μοντελοποίηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο, Τσιώλης Παναγιώτης, 2007
65. Πτυχιακή εργασία Ηλεκτροχημικοί Υπερπυκνωτές (Electrochemical Ultracapacitors) Τεχνολογία και εφαρμογές, Κωνσταντίνος Ιωαννίδης, 2011
66. Διπλωματική εργασία Σύστημα αντλησιοταμίευσης για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στα αυτόνομα συστήματα ,Αικατερίνη Λ. Παπαϊωάννου,2011
67. Διπλωματική Εργασία ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ – ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑΣ, Λεωνίδας Αναστασόπουλος,2020
68. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ (ΛΙΜΝΗ ΠΛΑΣΤΗΡΑ), Άννα Κατσανεβάκη, 2018
69. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Μελέτη του ΣΗΕ της Ικαρίας και του προς ανέγερση Υβριδικού Σταθμού της Ικαρίας, ανάπτυξη του νομοθετικού πλαισίου ένταξης του σταθμού στο νησί, ΕΛΕΝΗ-ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΜΙΧΟΠΟΥΛΟΥ, 2013