



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας Μεγάλης Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χουλάκη Εμμ. Μαρία

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μ. Φούντη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας Μεγάλης Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ε. Χουλάκη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μ. Φούντη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 6^η Οκτωβρίου 2016

.....

Μ. Φούντη

Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....

Δ. Χουντάλας

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ε. Γιακουμής

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2016

.....

Χουλάκη Εμμ. Μαρία

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright© Χουλάκη Εμμ. Μαρία ,2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στο σύγχρονο κόσμο η ανάγκη για ενέργεια είναι ραγδαία αυξανόμενη. Αυτή η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση έχει σαν αποτέλεσμα την εξάντληση των φυσικών πόρων, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την επερχόμενη λόγω αυτού κλιματική αλλαγή.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη στροφή της ενεργειακής αγοράς στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.). Οι Α.Π.Ε. είναι απρόβλεπτες ως προς την συνέχεια της παραγωγής τους, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εφαρμοστούν αυτόνομα στην αντιστάθμιση του φορτίου. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η αποθήκευση της ενέργειας που προέρχεται από Α.Π.Ε. έτσι ώστε να μπορεί να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη και να απελευθερώνεται ανάλογα με τη ζήτηση.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη δύο τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας, της αντλησιοταμίευσης και της ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Μελετήθηκαν οι αρχές λειτουργίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας και μέσω αυτών καταρτίστηκαν οι πίνακες S.W.O.T. (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats) και τα διαγράμματα αποδοτικότητας ανά κύκλο φόρτισης-αποθήκευσης-αποφόρτισης (διαγράμματα Sankey). Βάσει όλων των παραπάνω, έγινε ενεργειακή σύγκριση των δύο τεχνολογιών και έπειτα παρατέθηκαν τα συμπεράσματα της εργασίας.

Abstract

In the modern world, the need for energy is growing rapidly. This growing demand has resulted in the depletion of natural resources, the greenhouse effect and the forthcoming because of this climate change.

This results in a shift of the energy market in renewable sources (RES). The RES are unpredictable as to the continuity of their production, so they cannot be applied independently to compensate for the load. For this reason, it is necessary to store the energy from RES so that it can be more easily manageable and released on demand.

The aim of this thesis is the study of two large scale energy storage technologies, pumped hydro storage and compressed air energy storage. The operating principles and technical characteristics of each technology have been studied and thereby the tables S.W.O.T. (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Treats) and efficiency charts per charge-storage-discharge cycle (Sankey diagrams) have been prepared. Based on all the above, an energy comparison of these two technologies has been made and the conclusion of this thesis was presented.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Κα Φούντη Μαρία και την Κα Σταματιάδου Μαριάννα για την κατανόηση, τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια αυτής της μελέτης.

Ευχαριστώ θερμά την συμφοιτήτρια και καλή μου φίλη Αικατερίνη Παναγιωτοπούλου για τη στήριξη και τη βοήθεια της σε όλα τα στάδια αυτής της εργασίας, στην κοινή μας πορεία στην σχολή και για την συμπαράσταση της σε κάθε μου δυσκολία .

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	8
Κεφάλαιο 1 -Εισαγωγή	13
1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και αποθήκευση ενέργειας	13
1.2 Σκοπός διπλωματικής.....	16
Κεφάλαιο 2-Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές	17
2.1 Πλεονεκτήματα (τεχνικά και οικονομικά) της αποθήκευσης ενέργειας.....	17
2.1.1 Μεταφορά ενέργειας	17
2.1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας.....	18
2.1.3 Ευελιξία δικτύου	18
2.2 Διαθέσιμες τεχνολογίες μέσης ισχύος 100MW	19
2.2.1 Μπαταρίες ροής πολυσουλφιδίου-βρωμίου (PSB-flow batteries).....	20
2.2.2 Αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES).....	21
2.2.3 Αντλησιοταμίευση	23
2.2.4 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES).....	25
2.3 State of the art	27
2.3.1 Flow batteries PSB-state of the art.....	27
2.3.2 SMES-state of the art	28
2.3.3 Pumped Hydro Storage(PHS)-state of the art	29
2.3.4 CAES-state of the art.....	30
Κεφάλαιο 3 - Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος (100MW).....	33
3.1 Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage- PHS).....	33
3.1.1 Εισαγωγή-Υδροηλεκτρικό έργο και περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης.....	33

3.1.1.1 Υδροηλεκτρικό έργο	33
Καθορισμός σημείου λειτουργίας	36
3.1.1.2 Περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης	37
3.1.2 Υδροστρόβιλος.....	40
3.1.2.1 Υδροστρόβιλοι Δράσης:.....	41
3.1.2.1 α) Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton	42
3.1.2.1 β) Υδροστρόβιλοι τύπου Turgo	44
3.1.2.2 Υδροστρόβιλοι Αντίδρασης	46
3.1.2.2 α) Υδροστρόβιλοι τύπου Francis	46
3.1.2.2 β) Υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan.....	51
3.1.2.2 γ) Υδροστρόβιλοι τύπου Deriaz	54
3.1.3 Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα	55
3.1.3.1 Συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση	56
3.1.3.2 Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με ηλιακά-φωτοβολταϊκά συστήματα.....	58
3.1.4 Εφαρμογές αντλησιοταμίευσης.....	59
3.1.4.1 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Bath County.....	59
3.1.4.2 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Horse Mesa.....	61
3.1.4.3 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Thermalito	62
3.1.4.4 Σύστημα αντλησιοταμίευσης Reisach.....	63
3.1.4.5 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Tanes	63
3.1.4.6 Αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα	64
3.1.5 Αντλησιοταμίευση-Ανάλυση S.W.O.T.....	64
3.2 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES) 68	
3.2.1 Αρχές λειτουργίας CAES	68
3.2.2 Κατάλληλα εδάφη για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα	73
3.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπιεσμένου αέρα	74

3.2.4 Εφαρμογές συστημάτων CAES	76
3.2.5 Έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων CAES	78
3.2.5.1 Εξελιγμένα συμβατικά CAES	78
3.2.5.2 Προηγμένα αδιαβατικά CAES (Advanced Adiabatic CAES-AACAES) ...	80
3.2.6 Ανάλυση S.W.O.T. για τα συστήματα CAES.....	81
Κεφάλαιο 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	85
4.1 Διαθέσιμη/ ονομαστική ισχύς	85
4.2 Αποθηκευτική ικανότητα-Χωρητικότητα	85
4.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μεταφοράς ισχύος.....	86
4.4 Αποδοτικότητα	87
4.4.1 Αποδοτικότητα αποφόρτισης	87
4.4.2 Αποδοτικότητα κύκλου	88
4.5 Χρόνος αποφόρτισης.....	89
4.6 Διάρκεια της αποθήκευσης και αυτό-αποφόρτιση.....	90
4.7 Κύκλοι ζωής- Ανθεκτικότητα	90
4.8 Χρόνος απόκρισης.....	91
4.9 Πυκνότητα ισχύος και ενεργειακή πυκνότητα	91
4.10 Ειδική ενέργεια	92
4.11 Κόστος κεφαλαίου	92
4.12 Τεχνική ωριμότητα.....	94
4.13 Επίδραση στο περιβάλλον.....	95
Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ.....	99
5.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης- Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο.....	100
5.1.1 Απώλειες μετασχηματιστών.....	100
5.1.2 Απώλειες κινητήρα.....	100
5.1.3 Απώλειες στην αντλία	101

5.1.3 α) Υδραυλικός βαθμός απόδοσης	101
5.1.3 β) Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	102
5.1.3 γ) Μηχανικός βαθμός απόδοσης	102
5.1.4 Απώλειες σωληνώσεων	102
5.1.5 Απώλειες υδροστροβίλου	103
5.1.5 α) Υδραυλικές απώλειες	103
5.1.5 β) Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	104
5.1.5 γ) Μηχανικός βαθμός απόδοσης	104
5.1.6 Απώλειες γεννήτριας	104
5.1.7 Διαγράμματα Sankey για τυπική μονάδα αντλησιοταμίευσης	105
5.2 Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα- Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο	106
5.2.1 Απόδοση θερμότητας, Heat Rate (HR)	107
5.2.2 Λόγος απαίτησης ηλεκτρισμού, Charging Electricity Ratio (CER)	107
5.2.3 Προσεγγίσεις του βαθμού απόδοσης συστήματος CAES	108
5.2.4 Απώλειες ενέργειας στα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	111
5.2.5 Διάγραμμα Sankey για μονάδα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα	112
Κεφάλαιο 6 –Συμπεράσματα	115
Βιβλιογραφία	117

Κεφάλαιο 1 -Εισαγωγή

1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και αποθήκευση ενέργειας

Η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται γρήγορα την τελευταία δεκαετία. Συγκεκριμένα ανήλθε σε 22,200Twh το 2012[1,2], από τα οποία το 70% προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Η χρήση ορυκτών καυσίμων βέβαια παρόλο που διασφαλίζει σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου, είναι υπεύθυνη για την εκπομπή τεραστίων ποσοτήτων CO₂ . Επιπλέον, οι πηγές του πετρελαίου είναι περιορισμένες, καθώς ενώ χρειάζονται αιώνες για να δημιουργηθούν εξαντλούνται μέσα σε δεκαετίες. .

Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 "αφύπνισε" την ανθρωπότητα που για πρώτη φορά άρχισε να διαβλέπει συνέχιση της κρίσης σε μόνιμη βάση πλέον. Τώρα ξέρουμε ότι η εποχή της άφθονης φτηνής «πετρελαιοενέργειας» έχει περάσει χωρίς επιστροφή .Έτσι έχουμε την γρήγορη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η έρευνα της ενεργειακής αποθήκευσης, που θα εξομάλυνε τις διακυμάνσεις στον εφοδιασμό ενός ενεργειακού συστήματος και θα περιείχε αρκετή ενέργεια για να καλύψει τις ανάγκες και τις διακυμάνσεις της κατανάλωσης, έγινε κύριο ζητούμενο της επιστημονικής κοινότητας διεθνώς.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Αμερικανού Υπουργείου Ενέργειας (Department of Energy), ο μέσος ρυθμός με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο προβλέπεται να φτάσει τα 25-30 TW το 2050 και τα 40-50 TW το 2100. Παίρνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα καυσίμων στο μέλλον, έχει εκτιμηθεί ότι θα υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα 14 TW το 2050 (μεγαλύτερο του σημερινού συνολικού ρυθμού παραγωγής) και 33 TW το 2100[3]. Βεβαίως τα ελλείμματα αυτά είναι εικονικά και στην πραγματικότητα η κατανάλωση ενέργειας δεν μπορεί παρά να προσαρμοστεί στη διαθεσιμότητα/παραγωγή. Ωστόσο, οι αριθμοί αυτοί είναι χαρακτηριστικοί του μεγέθους του προβλήματος και σηματοδοτούν την ανάγκη αλλαγής του σημερινού ενεργειακού τοπίου.

Λόγω της αδυναμίας κάλυψης της ανάγκης σε ενέργεια παγκοσμίως μόνο από τα ορυκτά καύσιμα αλλά και για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος είναι πλέον αναγκαία η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή

Οι βασικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι ακόλουθες :

- 1) Η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

- 2) Η ηλιακή ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω των φωτοβολταϊκών γεννητριών μετατρέποντας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και πιο σπάνια μέσω των ηλιακών συλλεκτών με τη συγκέντρωση υψηλών θερμοκρασιών και εν τέλει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- 3) Τα υδροηλεκτρικά έργα, τα οποία εκμεταλλεύονται τα υδάτινα ρεύματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εισαγωγή στο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή εντείνουν τη δύσκολη πρόκληση της σταθεροποίησης των δικτύων ηλεκτροδότησης, κυρίως λόγω της αδυναμίας εξισορρόπησης μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

Το δίκτυο ενέργειας όμως απαιτεί σταθερότητα και αξιοπιστία. Άρα ψάχνουμε βιώσιμες λύσεις όπως η αποθήκευση ενέργειας, η μετατόπιση του φορτίου μέσω της διαχείρισης της ζήτησης και η διασύνδεση με εξωτερικά ηλεκτρικά δίκτυα. Η πιο υποσχόμενη από αυτές τις βιώσιμες λύσεις είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (Electrical Energy Storage-EES).

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη συστημάτων αποθήκευσης Ενέργειας, μερικά ικανά να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και άλλα πολύ μικρές. Μερικά είναι μέρη των διαδικασιών μεταφοράς ενέργειας και άλλα είναι μέρη των συστημάτων μετατροπής.

Τέλος, 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 (υπερ-πυκνωτές).
- Υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης).
- Υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα).
- Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης).
- Υπό μορφή υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου).

Οι διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρουν μεταξύ τους σε πολλά χαρακτηριστικά. Αρχικά, διαφέρουν ως προς την ωριμότητα της τεχνολογίας που τις διέπει. Επιπλέον, έχουν πολύ διαφορετική αποθηκευτική ικανότητα, διάρκεια ζωής, κόστος λειτουργίας και κόστος εγκατάστασης.

Ένας τρόπος διαίρεσης των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι ο διαχωρισμός τους σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες αποθηκευτικές διατάξεις. Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται για να βελτιώσουν την ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και συγκεκριμένα για να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά. Στην κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας εντάσσονται οι σφόνδυλοι (flywheels), οι υπερ-πυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Από την άλλη μεριά, οι διατάξεις μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, και να

συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (Fuel cells-Hydrogen Energy Storage).

1.2 Σκοπός διπλωματικής

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την ανάδειξη της ανάγκης για αποθήκευση ενέργειας και την σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος (100 MW). Οι διαθέσιμες εμπορικά τεχνολογίες των 100 MW είναι η αποθήκευση ενέργειας μέσω της αντλησιοταμίευσης (Pumped Hydro Energy Storage-PHES) και η αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES).

Η σύγκριση των παραπάνω δύο τεχνολογιών θα γίνει τόσο ως προς την εμπορική ωριμότητα τους, όσο και ως προς την αποδοτικότητα τους, το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης και γενικότερα την ευκολία ή μη της εφαρμογής τους. Για να είναι δυνατή η παραπάνω σύγκριση πρέπει να μελετηθούν οι αρχές λειτουργίας που διέπουν τις δύο τεχνολογίες, τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, αλλά και το κατά πόσο είναι ρεαλιστική και εφικτή η εφαρμογή τους βάσει οικονομικών, περιβαλλοντολογικών και κοινωνικών παραμέτρων.

Κεφάλαιο 2-Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

2.1 Πλεονεκτήματα (τεχνικά και οικονομικά) της αποθήκευσης ενέργειας

Παρακάτω περιγράφονται τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας τα οποία την καθιστούν αξιόλογη πρόκληση.

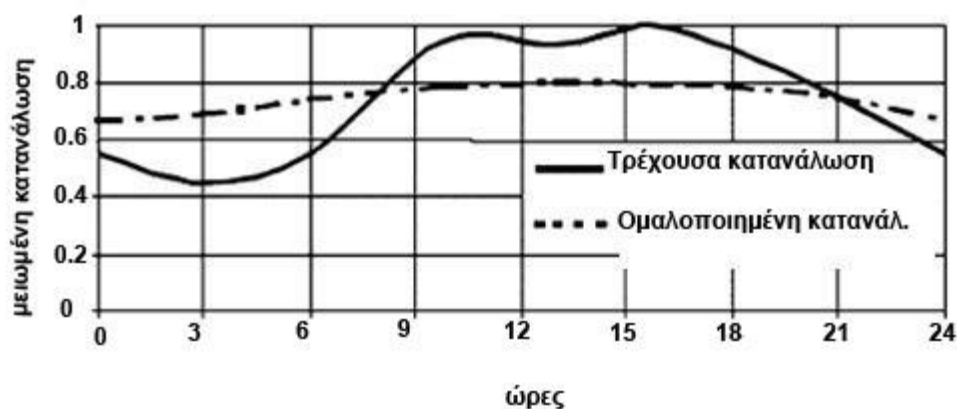
2.1.1 Μεταφορά ενέργειας

Η ενδιάμεση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το μετασχηματισμό πρωτογενούς ενέργειας χαμηλού κόστους, καθώς και η μετέπειτα χρησιμοποίηση της όποτε υπάρχει αυξημένη ζήτηση, είναι δυνατό να αντικαταστήσει την ακριβή ενέργεια που παράγεται από τους σταθμούς που μπαίνουν σε λειτουργία για τη αναπλήρωση των αιχμών του φορτίου. Υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για τις οποίες η αποθήκευση παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο:

- Η συμβατική παραγωγή ενέργειας, η αποθήκευση της οποίας θα είναι σε θέση να αποζημιώσει για τις προσωρινές ενεργειακές απώλειες της μονάδας παραγωγής, καθώς και να εκπληρώσει την εμπορική υποχρέωση του προπληρωμένου ενεργειακού αποθέματος.
- Η αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές βοηθά στην αντιμετώπιση του προβλήματος που προκαλεί η απρόβλεπτη φύση αυτών των πηγών σε ότι αφορά την προσφορά της ενέργειας.

2.1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας από τους χρήστες χαρακτηρίζεται από διαφορές και διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα η ελάχιστη κατανάλωση κυμαίνεται περίπου στο μισό των αιχμών της ζήτησης. Στην εικόνα 1 βλέπουμε την διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη Γαλλία , όπου παρατηρείται η μεγάλη αυξομείωση κατά τη διάρκεια της ημέρας



Εικόνα 2.1: Διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού στη Γαλλία[2]

Η ενεργειακή απαίτηση του τελικού χρήστη σε ότι αφορά το λόγο μεταξύ της μέγιστης και της μέσης ισχύος συχνά παίρνει την τιμή 10. Αυτό οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας, ο οποίος σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις αιχμές του φορτίου και όχι την μέση ημερήσια κατανάλωση. Έτσι εμφανίζεται η ανάγκη της αποθήκευσης ενέργειας.

2.1.3 Ευελιξία δικτύου

Η ευελιξία των συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης της ενέργειας βοηθά στην άμεση απόκριση και κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Η αδυναμία εξισορρόπησης του δικτύου μπορεί να προκληθεί από προσωρινό έλλειμμα ενέργειας, το οποίο είναι εφικτό να προβλεφθεί. Επίσης τυχαίες βλάβες της παραγωγικής μονάδας μπορούν να

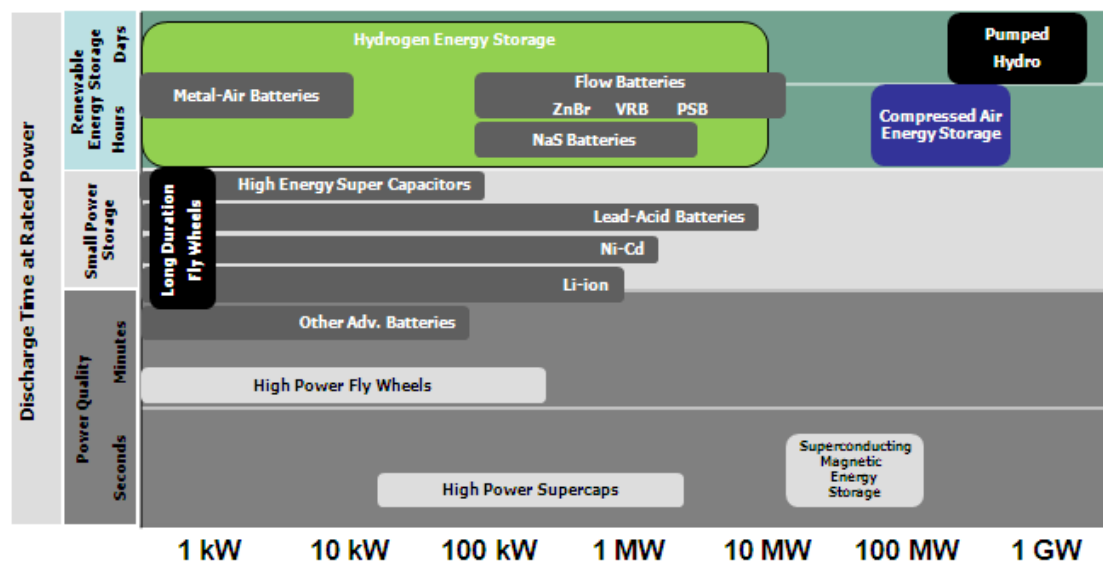
Κεφάλαιο 2- Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

οδηγήσουν σε αδυναμία κάλυψης της ζήτησης. Συνεπώς, φαίνεται για ποιο λόγο τα τελικά οφέλη που προκύπτουν από τα συστήματα αποθήκευσης απαιτείται να διασφαλίσουν την ανταπόδοση του κόστους της ακόλουθης διπλής αλυσίδας:

Ηλεκτρική ενέργεια=> Αποθηκευμένη ενδιάμεση ενέργεια=> Ηλεκτρική ενέργεια.

2.2 Διαθέσιμες τεχνολογίες μέσης ισχύος 100MW

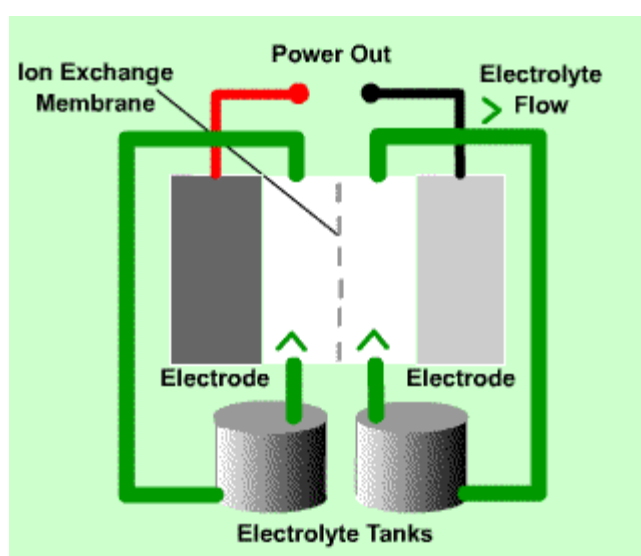
Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι διαθέσιμες τεχνολογίες μέσης ισχύος 100MW είναι οι μπαταρίες ροής και πιο συγκεκριμένα οι μπαταρίες πολυσουλφιδίου-βρωμίου(PSB), η αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών (Superconducting Energy Storage-SMES), η αντλιοσταμείωση (Pumped Hydro) και τέλος η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES).



Εικόνα 2.2: χρόνος αποφόρτισης και ικανότητα αποθήκευσης για τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας [4]

Παρακάτω θα παρουσιαστούν περιληπτικά οι αρχές λειτουργίας της κάθε διαθέσιμης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας μέσης ισχύος 100MW και στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί περαιτέρω η αντλησιοταμίευση και η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα που είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

2.2.1 Μπαταρίες ροής πολυσουλφιδίου-βρωμίου (PSB-flow batteries)



Εικόνα 2.3: Σύστημα μπαταρίας πολυσουλφιδίου- βρωμίου (PSB) [5]

Το σύστημα μπαταρίας πολυσουλφιδίου-βρωμίου (PSB) είναι μια ανανεώσιμη τεχνολογία κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιεί μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική αντίδραση μεταξύ δύο αλατούχων διαλυμάτων-ηλεκτρολυτών. Συγκεκριμένα, του βρωμιούχου νατρίου και πολθειούχου νατρίου(πολυσουλφίδιο του νατρίου). Οι ηλεκτρολύτες έρχονται πολύ κοντά μεταξύ τους μέσα στις κυψέλες αντίδρασης, όπου τις χωρίζει μία πολυμερής μεμβράνη, η οποία επιτρέπει μόνο στα ιόντα νατρίου να περάσουν στην άλλη πλευρά, παράγοντας περίπου 1,5 V. Η καθαρή απόδοση αυτής της μπαταρίας είναι περίπου 75%. [5]

Στο σύστημα πολυσουλφιδίου-βρωμίου ο θετικός ηλεκτρολύτης είναι το βρωμιούχο νάτριο και ο αρνητικός είναι το πολυσουλφίδιο του νατρίου. Στο θετικό ηλεκτρόδιο τρία ιόντα βρωμιδίου συνδυάζονται για να σχηματιστεί ένα ιόν τριβρωμιδίου. Στο

Κεφάλαιο 2- Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

αρνητικό ηλεκτρόδιο, το θείο στο διάλυμα διασπάται σε πολυσουλφίδιο και σουλφίδιο.

Οι αντιδράσεις είναι οι εξής [5]:

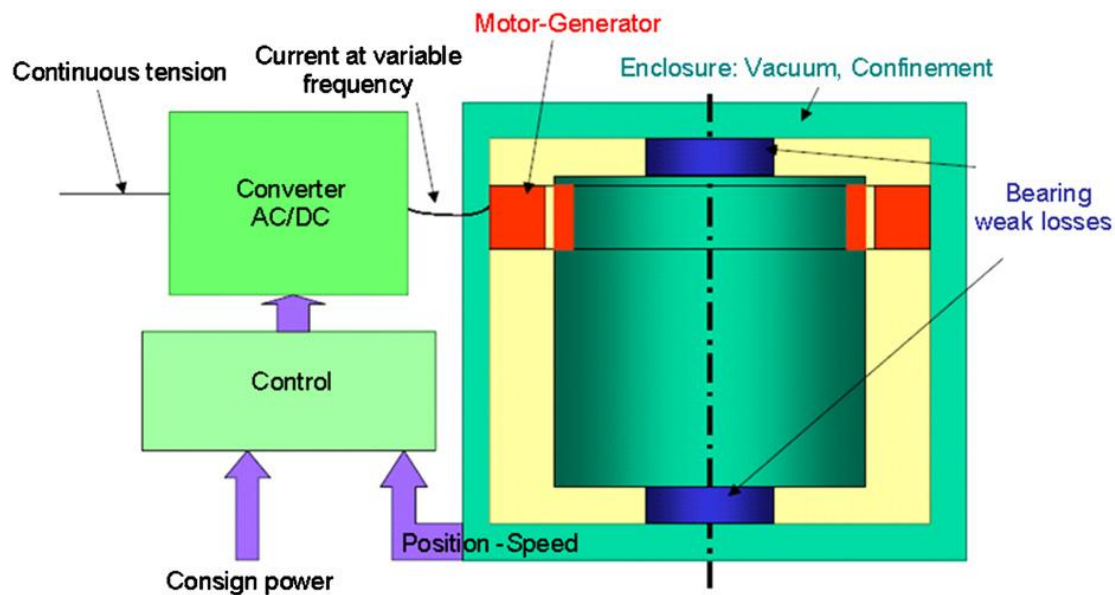
Θετικό ηλεκτρόδιο: $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Br}^-$ (αποφόρτιση)

Αρνητικό ηλεκτρόδιο: $2\text{S}_2 \rightarrow \text{S}_4^{2-} + 2\text{e}^-$ (αποφόρτιση)

Το σύστημα PSB έχει ελεγχθεί εργαστηριακά και αποδεικνύεται η εφαρμογή του σε κλίμακα πολλών KW στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το σημείο κλειδί αυτού του συστήματος είναι ότι τα μέρη που αποτελούν τους δύο ηλεκτρολύτες είναι άφθονα και σχετικά ανέξοδα. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα διαλυτά σε υδατικούς ηλεκτρολύτες που σημαίνει ότι ο όγκος του ηλεκτρολύτη που απαιτείται για την αποθήκευση μιας συγκεκριμένης ποσότητας φορτίου μειώνεται.

2.2.2 Αποθήκευση ενέργειας μέσω μαγνητικών υπεραγωγών (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES)

Η αποθήκευση ενέργειας μέσω υπεραγώγιμων μαγνητικών πυκνωτών, επιτυγχάνεται με εφαρμογή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο φτιαγμένο από υπεραγώγιμα καλώδια, πρακτικά μηδενικής αντίστασης. Τα καλώδια αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένα από νήματα νιοβίου-τιτανίου (NbTi) που λειτουργούν ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-270°C). Η ένταση του ρεύματος αυξάνεται κατά τη φόρτιση και μειώνεται κατά την αποφόρτιση και πρέπει να μετασχηματιστεί για εφαρμογές συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης.



Εικόνα 2.4: Σύστημα μαγνητικού υπεραγωγού(SMES) [2]

Ένα πλεονέκτημα αυτού του συστήματος αποθήκευσης είναι η μεγάλη στιγμιαία απόδοση του, κοντά στο 95% για έναν κύκλο φόρτισης εκφόρτισης [2]. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα είναι ικανά να αποφορτιστούν πλήρως, σε αντίθεση με τις μπαταρίες. Είναι πολύ χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή λειτουργία με μεγάλο αριθμό πλήρων κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης. Ο μικρός χρόνος απόκρισης (<100msec) τα καθιστά ιδανικά για τη ρύθμιση της σταθερότητας του δικτύου (αντιστάθμιση φορτίου).

Σημαντικό μειονέκτημα τους είναι το σύστημα ψύξης, το οποίο αν και δεν αποτελεί πρόβλημα από μόνο του, είναι αρκετά δαπανηρό και καθιστά τη λειτουργία περισσότερο πολύπλοκη. Επιπλέον τα έργα μαζικής αποθήκευσης απαιτούν πηνία μεγάλου μεγέθους (ενδεχομένως διαμέτρου έως 100 μετρων), τα οποία παράγουν τεράστιες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Έτσι είναι απαραίτητη η υπόγεια εγκατάσταση αυτών των συστημάτων, ούτως ώστε να περιοριστεί το κόστος υποδομών.

2.2.3 Αντλησιοταμίευση

Κατά τη διάρκεια της ημέρας η ζήτηση σε ενέργεια δεν είναι σταθερή. Πρέπει λοιπόν, η προσφορά ενέργειας να είναι τέτοια ώστε να καλύπτει οπωσδήποτε τη ζήτηση. Επιπλέον, όσον αφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν απρόβλεπτο χαρακτήρα καθώς εξαρτώνται άμεσα από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Για αυτόν το λόγο, δεν μπορεί να υπάρξει μονάδα παραγωγής ενέργειας χωρίς την παράλληλη λειτουργία μονάδας αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι τα αιολικά πάρκα για παράδειγμα, για παραγωγή ενέργειας μεγάλης κλίμακας υποστηρίζονται από αντλησιοταμειευτικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα τμήμα παραγωγής ενέργειας και ένα τμήμα αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό κατά την περίοδο χαμηλής ζήτησης η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται αποθηκεύεται στο σύστημα αντλησιοταμίευσης και κατά την περίοδο που η ζήτηση υπερβαίνει τη προσφορά η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει τη διαφορά.

Τα υβριδικά αντλησιοταμειευτικά συστήματα αντλούν νερό μεταξύ δύο σημείων-δεξαμενών με ικανή υψομετρική διαφορά. Έτσι κατά την αντίστροφη λειτουργία η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική αλλά και σε θερμότητα που παράγεται λόγω των υδραυλικών απωλειών, τύρβης κτλ. Το κινούμενο ρευστό αποδίδει τμήμα της ενέργειας του στον υδροστρόβιλο και έτσι παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, γίνεται αντιληπτό ότι η ενέργεια από το αιολικό πάρκο συνεισφέρει στην εξοικονόμηση καυσίμων και την βελτίωση του βαθμού απόδοσης της συνολικής μονάδας.

Έτσι κατά τις περιόδους πλεονάζουσας ενέργειας από τα αιολικά πάρκα το νερό αντλείται από την υψηλότερη δεξαμενή. Σε περιόδους κατά τις οποίες υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα είτε λόγω μικρής παραγωγής από τα αιολικά είτε λόγω υπερβολικής ζήτησης από το δίκτυο το νερό ρέει από την υψηλότερη δεξαμενή προς τη χαμηλότερη παράγοντας ενέργεια στο υδροστρόβιλο.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης αναλαμβάνουν την τροφοδότηση του φορτίου μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα εξαιτίας της γρήγορης απόκρισης των υδροστροβίλων και συνδυάζονται εύκολα με τις υπόλοιπες μονάδες ΑΠΕ παρέχοντας έτσι εγγυημένη ισχύ στο δίκτυο. Η τυπική απόδοση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77% και η χρονική περίοδος λειτουργίας τους κυμαίνεται από 20

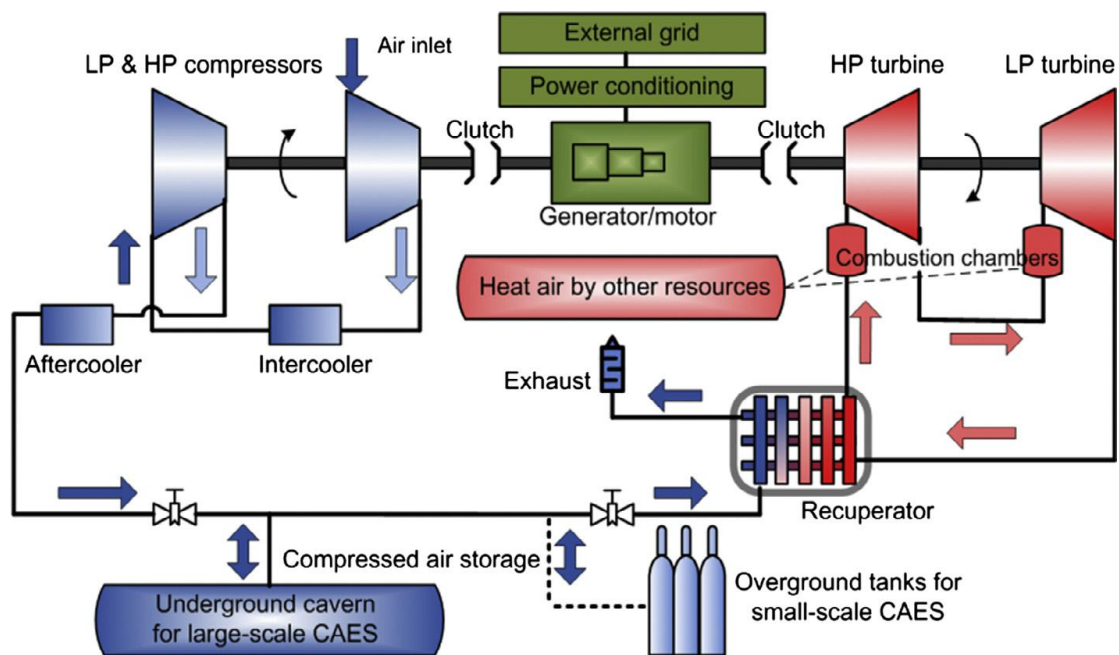
Κεφάλαιο 2- Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

μέχρι 50 χρόνια, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης[3]. Απαιτούν μικρή συντήρηση και φύλαξη, το κόστος παραγόμενης ενέργειας δεν παρουσιάζει διακυμάνσεις ενώ συνδυάζονται συχνά με άλλες διευθετήσεις όπως άρδευση, ύδρευση, ρύθμιση της πλημμύρας και συνοδεύονται με έργα υποδομής που βοηθούν στην αξιοποίηση απομακρυσμένων περιοχών. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της εγκατάστασης είναι η έλλειψη κατάλληλων τοποθεσιών (απαιτούνται μεγάλες υψομετρικές διαφορές σε μικρή γεωγραφική έκταση) και το υψηλό κόστος κεφαλαίου, που οφείλεται κυρίως στην κατασκευή των δύο ταμιευτήρων με μια κατάλληλη υψομετρική διαφορά. Εξαιτίας αυτού, ένα ποτάμι θα μπορούσε να λειτουργήσει ως κάτω ταμιευτήρας για να μειωθεί το κόστος του έργου. Ένα άλλο μειονέκτημα αποτελούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατασκευή του φράγματος του έργου . Αναλυτικότερη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου συγκροτήματος γίνεται στο Κεφάλαιο 3.

2.2.4 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES)

Η ενεργειακή αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES) είναι ένας τρόπος να αποταμιευτεί ενέργεια για μεταγενέστερη χρήση. Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ενέργεια απορροφάται από το δίκτυο και χρησιμοποιείται για να συμπιεστεί αέρας σε ειδικές υπόγειες γεωλογικές δομές, για μεταγενέστερη χρήση. Σε περιόδους αιχμής, ο αέρας αποσυμπιέζεται ώστε, κινώντας αεριοστρόβιλο να παράγει ηλεκτρισμό.

Συχνά ο συμπιεσμένος αέρας αναμειγνύεται με φυσικό αέριο και καίγονται μαζί, κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν ενός συμβατικού στροβίλου. Αυτή η μέθοδος είναι στην πραγματικότητα πιο συμφέρουσα, καθώς ο αέρας χάνει λιγότερη ενέργεια.



Εικόνα 2.5: Σύστημα CAES [1]

Υπάρχουν πολλοί γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μέθοδο αυτή, όπως φυσικά υδροφόρα στρώματα, σπήλαια ορυκτού αλατιού και τεχνητά σπήλαια σε βράχους. Από αυτές, η αποθήκευση σε υδροφόρα στρώματα

Κεφάλαιο 2- Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

είναι μακράν η λιγότερο ακριβή , γι' αυτό και χρησιμοποιείται επί το πλείστον στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Μια άλλη προσέγγιση στην αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα περιλαμβάνει την αποθήκευση σε δεξαμενές υψηλής πίεσης (CAS). Ωστόσο, η τρέχουσα τεχνολογία δεν έχει προχωρήσει αρκετά ώστε να μπορούν να κατασκευαστούν οι δεξαμενές αυτές με εφικτό κόστος. Επιπλέον οι προτεινόμενες κλίμακες είναι σχετικά μικρές σε σχέση με τα συστήματα CAES.

Μια εγκατάσταση CAES περιλαμβάνει πέντε υπέργεια εξαρτήματα [6]:

- Τον κινητήρα/γεννήτρια που περιλαμβάνει συσφιγκτήρες για να είναι δυνατή η εναλλαγή της σύζευξης με το συμπιεστή ή την αλυσίδα των στροβίλων
- Τη μονάδα συμπίεσης που μπορεί να απαιτεί δύο ή περισσότερα στάδια, για οικονομία συμπίεσης και μείωση της υγρασίας του περιεχομένου
- Τις μονάδες ανάκτησης θερμότητας και αποσυμπίεσης (στρόβιλοι υψηλής και χαμηλής πίεσης)
- Κέντρο ελέγχου του εξοπλισμού για τη λειτουργία του καυστήρα, του συμπιεστή και των βοηθητικών καθώς και για την ομαλή μετάβαση από τη φάση της παραγωγής στη φάση της αποθήκευσης
- Βοηθητικός εξοπλισμός για αποθήκευση και χειρισμό καυσίμων, καθώς και μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα για να υποστηρίξουν τις απαιτούμενες συχνές μεταβολές της θερμότητας.

2.3 State of the art

Σε αυτό το σημείο της εργασίας είναι χρήσιμο να αναφερθούμε στην εξέλιξη των συγκεκριμένων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, τη σημερινή τους μορφή και τη θέση που καταλαμβάνουν στην παγκόσμια αποθήκευση ενέργειας. Επιπλέον, θα αναφερθούν αξιόλογα παραδείγματα της εφαρμογής τους.

2.3.1 Flow batteries PSB-state of the art

Κάποια συστήματα PSB έχουν αναπτυχθεί για πολλαπλές κλίμακες KW. Για παράδειγμα ένα σύστημα τεχνολογίας PSB 100KW που είχε κατασκευαστεί από την UK Company Innoogy με απόδοση δικτύου περίπου 75%.

Όσον αφορά την ανάπτυξη εγκαταστάσεων υψηλής κλίμακας συστημάτων PSB η εταιρία Regenesys Technologies επιχείρησε να κατασκευάσει ένα σταθμό αποθήκευσης ενέργειας 15MW/120MWh σε ένα ενεργειακό σταθμό στο Ηνωμένο Βασίλειο. Επίσης σχεδιάστηκε ένας ακόμα σταθμός ικανότητας 12MW/120MWh για αποθήκευση ενέργειας στο Tenessy Valley στις ΗΠΑ για την υποστήριξη ενός αιολικού πάρκου. Όμως, εξαιτίας μηχανολογικών δυσκολιών και οικονομικών περιορισμών η κατασκευή των δύο παραπάνω σταθμών αποθήκευσης ενέργειας δεν ολοκληρώθηκε ποτέ. Επομένως, η τεχνολογία PSB για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας απαιτεί μεγαλύτερη πρακτική εμπειρία.[1,2]

2.3.2 SMES-state of the art

Παρά το γεγονός ότι η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911, μόλις το 1970 τα συστήματα SMES προτάθηκαν για πρώτη φορά σαν τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας. Τα συστήματα SMES προσείλκυσαν τη προσοχή τόσο των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας όσο και του στρατού, αφού οι πιθανές εφαρμογές του περιλαμβάνουν αντιστάθμιση φορτίου, δυναμική ευστάθεια, σταθεροποίηση συχνότητας, ενίσχυση ικανότητας μεταφοράς και βελτίωση ποιότητας ισχύος.

Παρόλα αυτά αν συγκρίνουμε τα σημερινά συστήματα SMES με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, αυτά παραμένουν δαπανηρά. Ωστόσο η εγκατάσταση ενός συστήματος SMES μέσα σε ήδη υπάρχουσες υποδομές, εξαλείφει το κόστος της μονάδας μετατροπείας, που είναι συνήθως το πιο δαπανηρό κομμάτι ολόκληρου του συστήματος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα σύγχρονα παραδείγματα εφαρμογής των συστημάτων SMES ανά τον κόσμο.

Locations/organizations	Technical data	Features/applications
Proof principle, tested in a grid in Germany	5 kJ, 2 s to max 100 A at 25 K	World first significant HTS-SMES, by ASC
Nosoo power station in Japan	10 MW	Improve system stability and power quality
Upper Wisconsin by American Transmission	3 MW/0.83 kWh, each 8 MV A	Power quality application reactive power support
Bruker EST in Germany	2 MJ	High temperature superconductors
Korea Electric Power Corporation, Hyundai	3 MJ, 750 kV A	Improving power supply quality for sensitive loads
Chubu Electric Power Co. in Japan	7.3 MJ/5 MW and 1 MJ	Provide comparison to transient voltage
University of Houston, SuperPower & others	20 kW, up to 2 MJ class	UHF-SMES, voltage distribution

Πίνακας 2.1: παραδείγματα εφαρμογής συστημάτων SMES ανά τον κόσμο [1]

Ένα σύγχρονο παράδειγμα εφαρμογής τεχνολογίας SMES είναι αυτό που διεξήχθη από την SuperPower Inc. σε συνεργασία με τους ABB Inc. , Brookhaven National Laboratory, Texas center for Superconductivity στο πανεπιστήμιο του Houston. Διήρκεσε από τον Ιανουάριο του 2011 έως τον Ιούνιο του 2014 και είχε συνολικό κόστος 5.25 εκατομμύρια δολάρια [1,2].

Τα χαρακτηριστικά του είναι τα ακόλουθα[7]:

- Σύστημα SMES ισχύος 20KW εξαιρετικά υψηλού μαγνητικού πεδίου (Ultra High Field-UHF) με ικανότητα της τάξης των 2 MJ.
- Μαγνητικό πεδίο έως 25 T στους 4.2K.
- Ικανότητα ευέλικτης και άμεσης ανάπτυξης σε δίκτυα μεσαίας κατανομής δυναμικού 15-36 KW
- Καλώδιο 2G HTS (High Temperature Superconductor) υπεραγωγός υψηλής θερμοκρασίας με υψηλά κρίσιμα ρεύματα

2.3.3 Pumped Hydro Storage(PHS)-state of the art

Η τεχνολογία PHS είναι μία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας με μακρά ιστορία, υψηλή τεχνική ωριμότητα και μεγάλη χωρητικότητα ενέργειας. Με εγκατεστημένα ισχύ 127-129 GW το 2012, η τεχνολογία PHS αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 99% της παγκόσμιας ικανότητας αποθήκευσης φορτίου και συμβάλλει στο 3%της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες μονάδες PHS με ονομαστική ισχύ που κυμαίνεται από 1MW έως 3003MW με περίπου 70-85% απόδοση του κύκλου και περισσότερα από 40 χρόνια ζωής [1,2]. Ορισμένες εγκαταστάσεις PHS με τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα.

Plant name	Country	Power rating	Features
Rocky river PHS plant	US	32 MW	The world's first large-scale commercial PHS plant
Bath County PHS plant	US	3003 MW	The world's largest power rated PHS plant
Okinawa Yanbaru PHS	Japan	~30 MW	Only commercial seawater PHS plant
Hawaiian Elec. Co. PHS facility	US	-	Claimed 87% relatively high cycle efficiency
HPS of Ikaria Island	Greece	2.655 MW	One of the first wind-PHS plants (under construction)

Πίνακας 2.2: παραδείγματα εγκαταστάσεων PHS ανά τον κόσμο [1]

Κεφάλαιο 2- Αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

Η φύση της λειτουργίας των συστημάτων PHS υποδεικνύει ότι οι εφαρμογές τους αφορούν κυρίως στην ενεργειακή διαχείριση στους τομείς της χρονικής μετατόπισης, ελέγχου συχνότητας και προσφοράς αποθέματος. Όμως, λόγω των περιορισμών στην επιλογή της τοποθεσίας οι μονάδες PHS έχουν μεγάλο χρόνο κατασκευής και μεγάλο κόστος επένδυσης.

Πλέον με την πρόοδο της τεχνολογίας ορισμένες μονάδες PHS πρόκειται ή έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πλημμυρισμένα ορυχεία, υπόγειες σπηλιές, ωκεανούς, καθώς και ταμειυτήρες, όπως στην Okinawa Yanbaru στην Ιαπωνία, μία μονάδα PHS 300 MW θαλασσινού νερού στη Hawaii και το project Mount Hope στο New Jersey[1,2].

Επιπλέον, η παραγωγή ηλιακής ή αιολικής ενέργειας σε συνδυασμό με τα συστήματα PHS αναπτύσσεται τώρα. Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομονωμένα ή διασυνδεδεμένα δίκτυα, για παράδειγμα ο σταθμός παραγωγής ενέργειας στην Ικαρία που πρόκειται να ενσωματώσει 3 αιολικά πάρκα των 900 KW το καθένα με παράλληλη εγκατάσταση συστήματος PHS[1,2].

Η τελευταία τάση στην ανάπτυξη των εγκαταστάσεων PHS συνίσταται στην κατασκευή υδροηλεκτρικών μονάδων με μεγαλύτερη ταχύτητα και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με το σημερινό τεχνικό επίπεδο, εγκαθιστώντας κεντρική επίβλεψη, αλλά και κάνοντας χρήση έξυπνων συστημάτων ελέγχου [1,2].

2.3.4 CAES-state of the art

Εκτός από τα συστήματα PHS και τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) είναι ένα είδος εμπορευματοποιημένης τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παράγει ισχύ εξόδου άνω των 100MW με μία ενιαία μονάδα. Η πρώτη εγκατάσταση μονάδας CAES το Huntorf έγινε στη Γερμανία το 1978. Χρησιμοποιεί δύο θόλους άλατος σα σπήλαια αποθήκευσης και λειτουργεί σε ημερήσιο κύκλο 8 ωρών φόρτισης συμπιεσμένου αέρα και 2 ωρών λειτουργίας σε μέση ισχύ 290MW. αυτή η μονάδα παρέχει άμεση έναρξη λειτουργίας σε πυρηνικές μονάδες, ενεργειακό απόθεμα σε τοπικούς ενεργειακούς σταθμούς και επιπλέον

ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει το κενό μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης.

[1,2]

Μία άλλη εμπορική μονάδα CAES ξεκίνησε τη λειτουργία της στο McIntosh των ΗΠΑ το 1991. Αυτή η μονάδα των 110MW μπορεί να λειτουργήσει για έως και 26 ώρες σε πλήρη ισχύ. Ο συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε σπήλαιο άλατος. Επιπλέον, ένας συλλέκτης λειτουργεί έτσι ώστε να επαναχρησιμοποιείται η θερμική ενέργεια των καυσίμων. Αυτό μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 22-25% και βελτιώνει την απόδοση του κύκλου από 42-54% σε σχέση με τη μονάδα του Huntorf. Αυτές οι δύο μονάδες CAES δείχνουν σταθερά καλές επιδόσεις με 91,5 και 99,5 % αξιοπιστία εκκίνησης και λειτουργίας αντίστοιχα. [1,2]

Επί του παρόντος, η ανάπτυξη νέων προηγμένων αδιαβατικών CAES(Advanced Adiabatic CAES-AACAES) προσελκύει την προσοχή. Η AACAES τεχνολογία τυπικά πραγματοποιείται με ένα υποσύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, το οποίο δεν περιλαμβάνει εισαγωγή καυσίμου κατά τη λειτουργία επέκτασης. Η πρώτη μονάδα επίδειξης της τεχνολογίας AACAES, που ονομάζεται ADELE, βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης στο Saxony,Anhalt της Γερμανίας. Η μονάδα πρόκειται να έχει ικανότητα αποθήκευσης 360MWh και ισχύ εξόδου 90MW,στοχεύοντας σε απόδοση κύκλου 70%. Επειδή το στάδιο συμπίεσης θα τροφοδοτείται από αιολική ενέργεια, η μονάδα ADELE δεν θα εκπέμπει CO₂ στο πλήρη κύκλο. Η εταιρία LightSail Energy Ltd. , που εδρεύει στις ΗΠΑ αναπτύσσει επίσης εγκαταστάσεις AACAES χρησιμοποιώντας αντιστέψιμα παλινδρομικά έμβολα. Τέλος, το 2013 η εταιρία Luminant and Shell-wind Energy ξεκίνησε την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου στο Texas με στόχο να περιλαμβάνει μονάδα CAES 317 MW [1,2].

Κεφάλαιο 3 - Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος (100MW)

Σε αυτό το σημείο της μελέτης θα αναφερθούμε διεξοδικά στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης ισχύος. Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες που θα παρουσιαστούν είναι η αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage-PHS) και η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES). Θα γίνει περιγραφή των διατάξεων, του τρόπου λειτουργίας, των αρχών λειτουργίας και των εφαρμογών τους.

3.1 Αντλησιοταμίευση (Pumped Hydro Storage- PHS)

Η αντλησιοταμίευση είναι μία μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί σαν αποθηκευτικό μέσο το νερό. Κατά τις περιόδους που υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας στο δίκτυο, αυτή η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή της υδροηλεκτρικής ενέργειας από την άλλη, κατά τις περιόδους που υπάρχει έλλειμμα ενέργειας, η αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια απελευθερώνεται και μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική.

3.1.1 Εισαγωγή-Υδροηλεκτρικό έργο και περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης

3.1.1.1 Υδροηλεκτρικό έργο

Το υδροηλεκτρικό έργο σε μια εφαρμογή αντλησιοταμίευσης αποτελεί ουσιαστικά το αντίστροφο μιας αντλητικής εγκατάστασης.

Συγκεκριμένα, το νερό που είναι αποθηκευμένο στην άνω δεξαμενή (δεξαμενή κατάθλιψης), διαθέτει δυναμική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή επιδιώκεται να εκμεταλλευτεί. Το νερό από την άνω δεξαμενή διέρχεται από τον υδροστρόβιλο μέσω σωλήνωσης, όπου μετατρέπεται η ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Στη συνέχεια, επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας, κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Τέλος, το

Κεφάλαιο 3 –Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος

νερό που εξέρχεται από τον υδροστρόβιλο είναι απαλλαγμένο συστροφής και οδηγείται στη κάτω δεξαμενή (δεξαμενή αναρρόφησης) μέσω σωλήνωσης.

Σε ένα υδροηλεκτρικό έργο η ενέργεια του νερού ανά μονάδα μάζας του είναι η δυναμική ενέργεια, ίση προς την υδραυλική πτώση [8]:

$$h = z_E - z_A \quad (3.1)$$

Η διαθέσιμη υδραυλική πτώση (ή καθαρό ύψος πτώσεως) H , δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του νερού την οποία ο υδροστρόβιλος καλείται να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, θα είναι μειωμένη κατά τις απώλειες στο σύστημα προσαγωγής και θα δίνεται από τη σχέση[8]:

$$H = h - \delta h_{fEe} \quad (3.2)$$

Όπου οι υδραυλικές απώλειες δh_{fEe} δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\delta h_{fEe} = k_e \cdot Q^2 \quad (3.3)$$

Δηλαδή είναι ανάλογες του τετραγώνου της παροχής, για ροή στην πλήρως τυρβώδη περιοχή (με e συμβολίσαμε τη διατομή εισόδου στον υδροστρόβιλο).

Στην περίπτωση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με υδροστρόβιλο δράσεως, όπου η στάθμη του ακροφυσίου τροφοδοσίας είναι υψηλότερη από τη στάθμη απαγωγής, δηλαδή $z_e > z_A$, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του δρομέα, η διαθέσιμη στον υδροστρόβιλο υδραυλική πτώση είναι ίση προς [8]:

$$H = h - \delta h_{fEe} - (z_e - z_A) = z_E - z_e - \delta h_{fEe} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η διαθέσιμη υδραυλική ισχύς N_i θα είναι:

$$N_i = \gamma \cdot H \cdot Q \quad (3.5)$$

Δεδομένου όμως των απωλειών κατά την μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική στον υδροστρόβιλο, η παραγόμενη μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$N = N_i / \eta_T \Rightarrow N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_T \quad (3.6)$$

Όπου η_T είναι ο βαθμός απόδοσης του υδροστρόβιλου.

Τέλος, έχουμε μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια N_T που θα παράγεται θα είναι μειωμένη κατά τις απώλειες της ηλεκτρικής γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Έτσι, προκύπτει [8]:

$$N_T = \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot N \quad (3.7)$$

Όπου η_G είναι ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και η_{TR} είναι ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή.

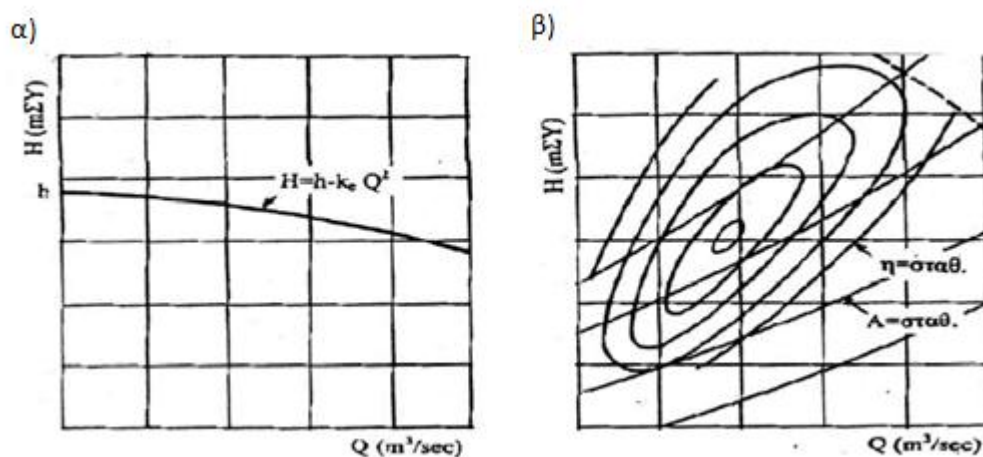
Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις και με μονάδες μετρικού συστήματος, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τον υδροστρόβιλο είναι ίση με:

$$N_T = 9,81 \cdot \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_T \cdot H \cdot Q \Rightarrow N = 9,81 \cdot \eta \cdot H \cdot Q \quad (3.8)$$

Με τυπική τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος υδροστρόβιλου-γεννήτριας-μετασχηματιστή: $\eta=0,85$ [8].

Καθορισμός σημείου λειτουργίας

Όπως δείξαμε προηγουμένως και όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση εκφράζεται συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q , και έχει τη μορφή παραβολής.



Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστική σωλήνωσης και χαρακτηριστική υδροστροβίλου [8]
 Εάν ένας υδροστρόβιλος, με χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όπως στην εικόνα α), εγκατασταθεί σε υδραυλική εγκατάσταση με χαρακτηριστική όπως στην εικόνα β), το μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας είναι αυτά της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H της εγκατάστασης. Χαράσσοντας τη χαρακτηριστική της εγκατάστασης, στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροστροβίλου, αντιλαμβανόμαστε ότι η λειτουργία του υδροστροβίλου στην εγκατάσταση έχει ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας. Αυτό το εύρος είναι ακόμα πιο περιορισμένο προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία της μηχανής και συγχρόνως υψηλός βαθμός απόδοσης.

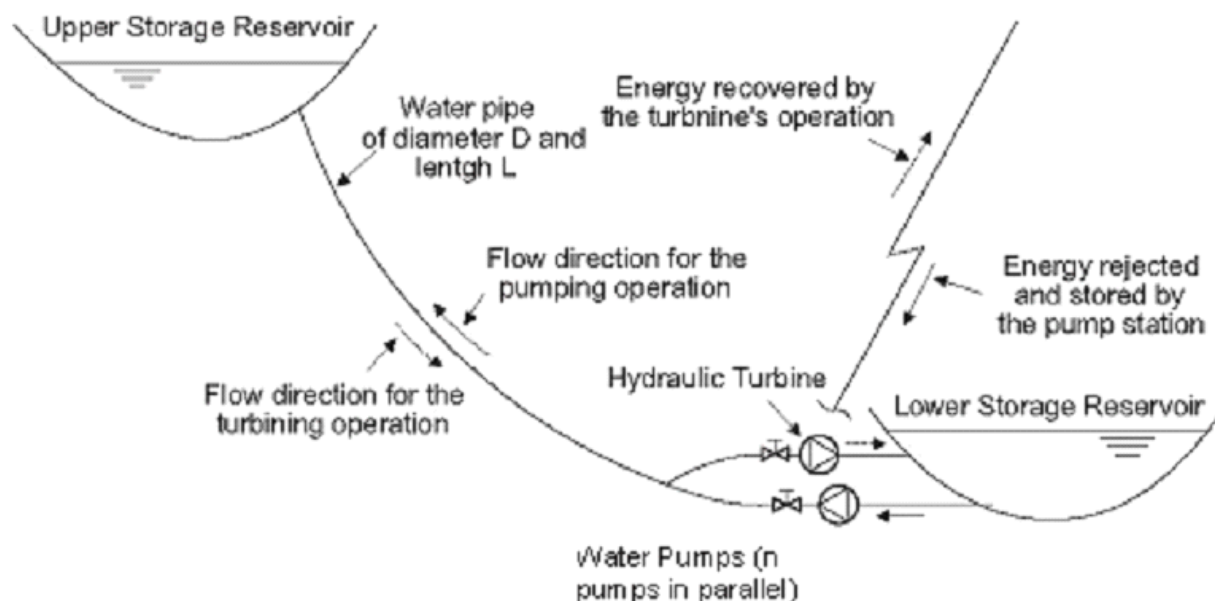
3.1.1.2 Περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης

Ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα παρακάτω μέρη[6]:

- Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών.
- Έναν υδροστρόβιλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων.
- Δύο δεξαμενές νερού, οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω.
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο.

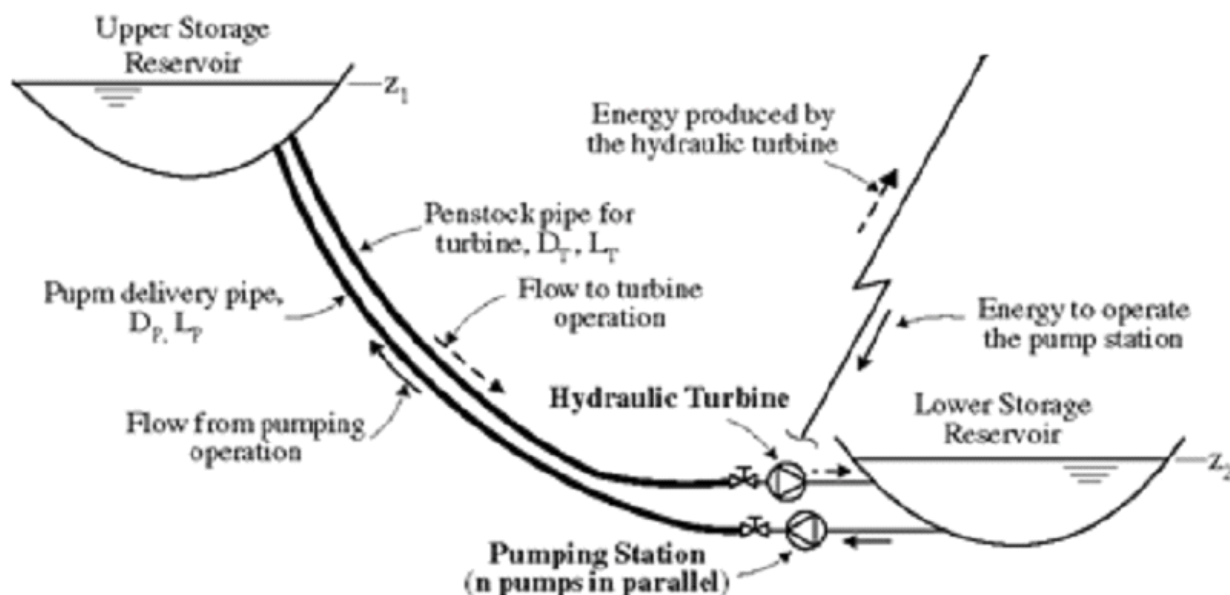
Σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών.

Όταν έχω μονή σωλήνωση (πιο οικονομική σχεδιαστικά λύση) πρέπει να καθοριστεί αν έχει προτεραιότητα η λειτουργία του στροβίλου ή εκείνη της αντλίας, καθώς η εγκατάσταση δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία. Προτεραιότητα θα έχει η αντλία όταν η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Σε αυτή την περίπτωση παραγωγή ενέργειας από τον στρόβιλο μπορεί να γίνει μόνο όταν δεν γίνεται άντληση, δηλαδή τις ώρες που δεν υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς. Στη περίπτωση που συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή των μονάδων βάσεως προτεραιότητα λειτουργίας έχει ο στρόβιλος έναντι των αντλιών. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς που να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση λόγω της λειτουργίας του στροβίλου.



Εικόνα 3.2: Τυπικό σύστημα αντλιοσταμείωσης με μονή σωλήνωση [9]

Θα μπορούσε να σκεφτεί κανείς ότι η διπλή σωλήνωση είναι περιττή, δεδομένου ότι εάν υπάρχει ανάγκης παραγωγής ενέργειας από το στρόβιλο και ταυτόχρονα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς από τις θερμικές μονάδες ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως, τότε θα μπορούσε να απορροφηθεί απευθείας περισσότερη ενέργεια από τις μονάδες αυτές. Ο συλλογισμός αυτός είναι εσφαλμένος, λόγω των περιορισμών του δικτύου. Η άμεση δηλαδή απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης από το δίκτυο ενέργειας. Παράλληλα, η χρονική κατανομή της απορριπτόμενης ισχύος δείχνει ότι η περικοπή καθορίζεται πρώτα από τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και δεύτερον από τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, από τη μια υπάρχει περικοπή ισχύος και απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος, από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (π.χ. λόγω υψηλής ζήτησης). Εάν λειτουργεί η αντλία, θα απαιτηθεί χρόνος μέχρι να σταματήσει και να ξεκινήσει ο στρόβιλος, οπότε το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης απόκρισης του στρόβιλου χάνεται.



Εικόνα 3.3: Τυπικό σύστημα αντλιοστοταμείωσης με διπλή σωλήνωση [9]

Τόσο στην περίπτωση της μονής σωλήνωσης όσο και στην περίπτωση της διπλής που περιγράφηκαν ανωτέρω, οι τρεις μηχανές (αντλία – υδροστρόβιλος – κινητήρας /γεννήτρια) τοποθετούνται σε κοινή άτρακτο και η φορά περιστροφής είναι η ίδια ανεξαρτήτως λειτουργίας. Αξίζει βέβαια να αναφέρουμε ότι για τη μείωση των φθορών απαιτείται η ύπαρξη συμπλέκτη στα άκρα της ατράκτου, ώστε να μην περιστρέφεται άσκοπα η υδροδυναμική μηχανή που κάθε φορά δεν εργάζεται. Σε περίπτωση κατακόρυφης διάταξης, η αντλία τοποθετείται στο κατώτερο σημείο ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της σπηλαίωσης.

Μία άλλη περίπτωση λειτουργίας είναι αυτή της μονής σωλήνωσης σε σύνθετη λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης. Πρόκειται για μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλιοστοταμείωσης, το λεγόμενο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Αυτή η προτεινόμενη λύση εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικότερη χωρίς να υστερεί λειτουργικά.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ανεξάρτητα των σχεδιαστικών εκδοχών που υιοθετούνται κάθε φορά σε ένα σύστημα αντλιοστοταμείωσης, οι μονάδες του συστήματος (αντλία – υδροστρόβιλος – ηλεκτρική μηχανή) τοποθετούνται σε στάθμη

χαμηλότερη από αυτή της κατώτερης δεξαμενής για την αποφυγή εισροής αέρα, κάτι όμως που απαιτεί μεγάλο όγκο εκσκαφών. Επιπρόσθετα, οι μονάδες αυτές μπορούν να απομονωθούν από τις δύο δεξαμενές, μέσω βανών που τοποθετούνται στους αγωγούς κατάθλιψης και αναρρόφησης.

Με βάση όλα τα παραπάνω θα έλεγε κανείς ότι η αντλησιοταμίευση αποτελεί ένα συνδυασμό αντλητικής εγκατάστασης(αποταμίευση ενέργειας) και υδροηλεκτρικού έργου (παραγωγή ενέργειας).

3.1.2 Υδροστρόβιλος

Οι στρόβιλοι γενικά είναι κινητήριες μηχανές εφοδιασμένες με ένα περιστρεφόμενο μέρος, το στροφέα, ο οποίος κινείται με την ενέργεια ενός ρευστού. Ανάλογα με τη φύση του ρευστού αυτού διακρίνουμε τους στροβίλους σε υδροστρόβιλους, αεροστρόβιλους και ατμοστρόβιλους.

Υδροστρόβιλοι: υπάρχουν δύο κύριοι τύποι, οι υδροστρόβιλοι δράσης και οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης. Εκμεταλλεύονται την ενέργεια των υδατοπτώσεων για να δώσουν μηχανική ενέργεια. Αποτελούνται από δύο βασικά όργανα: το διανομέα (σταθερό) και το στροφέα (κινητό). Ο υδροστρόβιλος δράσης ονομάζεται και στρόβιλος ελεύθερης ροής ή με συμμετρικά πτερύγια ή Πέλτον, από το όνομα αυτού που τον επινόησε το 1880. Ο δεύτερος λέγεται εξαναγκασμένης ροής ή με ασύμμετρα πτερύγια και αντιστοιχεί στους τύπους Φράνσις, από το όνομα εκείνου που τους κατασκεύασε το 1850 [8].

Ατμοστρόβιλος : τα κυριότερα μέρη που τον αποτελούν είναι ο πτερυγωτός τροχός, το περίβλημα ή κύλινδρος στο εσωτερικό του οποίου περιστρέφεται ο τροχός και βρίσκονται τα ακροφύσια , ο ρυθμιστής ταχύτητας και το σύστημα λίπανσης. Ο τροχός αποτελείται συνήθως από πολλές σειρές από πτερύγια και σε κάθε μία σειρά αντιστοιχεί μία σειρά από ακροφύσια . Ο ατμός διατρέχει αδιάκοπα το εσωτερικό του στροβίλου όπου βρίσκονται τα σταθερά ακροφύσια και τα κινητά πτερύγια και έτσι η κινητήρια ροπή είναι σταθερή.

Αεροστρόβιλοι: Βασίζονται στην αρχή των αμοστροβίλων, αλλά στους αεροστρόβιλους η σειρά των τροχών με τα πτερύγια περιστρέφεται από θερμά αέρια που παράγονται από την καύση σε κατάλληλους θαλάμους. Ο αέρας παράγεται στο θάλαμο καύσης υπό πίεση και συμπιέζεται με κατάλληλους περιστροφικούς συμπιεστές, που είναι στερεωμένοι στον άξονα του ίδιου του στρόβιλου.

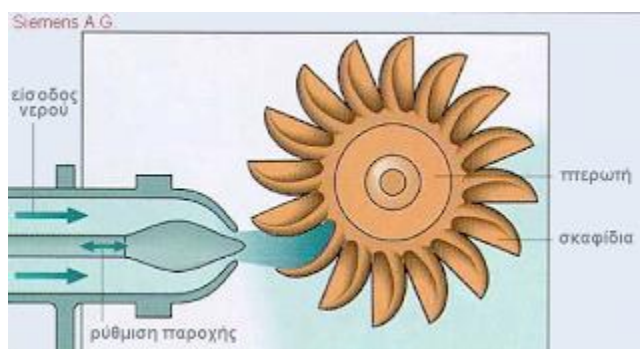
3.1.2.1 Υδροστρόβιλοι Δράσης:

Πρόκειται για υδροστρόβιλους μερικής προσβολής, δηλαδή κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα τμήμα της πτερωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Η στατική πίεση δεν μεταβάλλεται μεταξύ εισόδου και εξόδου της πτερωτής και ο βαθμός αντιδράσεως ισούται με το μηδέν. Στους υδροστρόβιλους αυτής της κατηγορίας η εσωτερική στεφάνη κινείται λόγω πλήξεως, την οποία υφίσταται το νερό. Στην περίπτωση αυτή το νερό δρα επί της στεφάνης με την κινητική του ενέργεια. Στους υδροστρόβιλους του τύπου αυτού η θλιπτική ενέργεια του νερού μετατρέπεται εξολοκλήρου σε κινητική. Ο μόνος τύπος υδροστρόβιλου δράσης που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη η διαμόρφωση στρόβιλων μερικής προσβολής στις μεγάλες τιμές ενέργειας του ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι οι ακόλουθοι:

- Η ταχύτητα της ροής είναι πολύ υψηλή, στοιχείο το οποίο σε συνδυασμό με τις μικρές παροχές, άρα τις μικρές διατομές, έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των απωλειών λόγω τριβής στο εσωτερικό της μηχανής, άρα τη μείωση του βαθμού απόδοσης.
- Η τιμή της στατικής πίεσης είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα να γίνεται προβληματική η αντοχή του τμήματος εισόδου εάν αυτό ήταν μορφής σπειροειδούς κελύφους (περίπτωση υδροστρόβιλου Francis), το οποίο αποτελεί και το ογκοδέστερο τμήμα της μηχανής. Στην περίπτωση υδροστρόβιλου Pelton μόνο το τμήμα του ακροφυσίου τροφοδοσίας (που είναι μικρό σε μέγεθος) υπόκειται σε σημαντική τιμή της στατικής πίεσης.
- Η σημαντική διαφορά της στατικής πίεσης στην πτερωτή θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής εάν τητή ήταν ολικής προσβολής. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι τύπου Pelton και Turgo.

3.1.2.1 α) Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton

Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε μηχανική, σχηματίζοντας το καθένα δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στην πτερωτή, δίνοντας σε αυτή μια ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Φυσικά, η πτερωτή είναι τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η δέσμη του νερού, μετά την πρόσπτωσής της στην πτερωτή, να πέφτει με τη βαρύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια της δώρυγας φυγής.



Εικόνα 3.4: υδροστρόβιλος τύπου Pelton [10]

Ο άξονας της πτερωτής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην κατακόρυφη διάταξη, το βάρος της γεννήτριας και του στροφείου της γεννήτριας παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερες δέσμες, είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα τα ακροφύσια να μην βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και να μην παρενοχλείται η λειτουργία τους από τα απόνερατων σκαφιδίων.

Σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, με τη χρήση ενός υδροστροβίλου Pelton, μπορεί να επιτευχθεί βαθμός απόδοσης έως και 90% [8].

Στον υδροστρόβιλο Pelton το τμήμα εισόδου αρχίζει από τη σφαιρική βάνα στο άκρο του αγωγού προσαγωγής και καταλήγει στο ένα ή και περισσότερα ακροφύσιας. Με τη μετακίνηση της βελόνης μεταβάλλεται η διατομή διέλευσης της παροχής, διάμετρος της δέσμης και άρα μεταβάλλεται αντίστοιχα η παροχή. Η όλη κατασκευή του ακροφυσίου είναι πολύ στιβαρή λόγω της μεγάλης τιμής της στατικής πίεσης και των μεγάλων ταχυτήτων στη διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Για την περίπτωση

γρήγορης απόρριψης του φορτίου υπάρχει όνυχας εκτροπής της δέσμης, αμέσως μετά τη διατομή εξόδου του ακροφυσίου. Ο όνυχας εκτρέπει τη δέσμη, η οποία δεν προσπίπτει πλέον στην περωτή και στη συνέχεια η παροχή της μειώνεται (μέσω κλεισίματος της βελόνης) με ρυθμό που έχει υπολογιστεί έτσι ώστε η υπερπίεση λόγω του φαινομένου του υδραυλικού πλήγματος να μην ξεπερνά τις επιτρεπόμενες τιμές.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο του υδροστροβίλου είναι η περωτή. Η περωτή κατασκευάζεται είτε ολόσωμη, είτε τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμόζονται στην περωτή μέσω κοχλίωσης και κωνικής ασφάλειας. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από τη ροή, κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην περίπτωση ολόσωμης κατασκευής, ολόκληρη η περωτή κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάμετρος της περωτής είναι συνάρτηση του πλήθους και των διαστάσεων των σκαφιδίων, ενώ το πλήθος των σκαφιδίων κυμαίνεται μεταξύ 20 και 22.



Εικόνα 3.5 : Περωτή Pelton [10]

Τέλος το τμήμα εξόδου οδηγεί το νερό που πέφτει από την περωτή στη διάωρυγα απαγωγής και στη συνέχεια στον ταμιευτήρα. Με το τμήμα εξόδου συνδέεται και το τμήμα του υδροστροβίλου που συγκεντρώνει τα νερά που εκτοξεύονται από την περωτή προς διάφορες διευθύνσεις, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας.

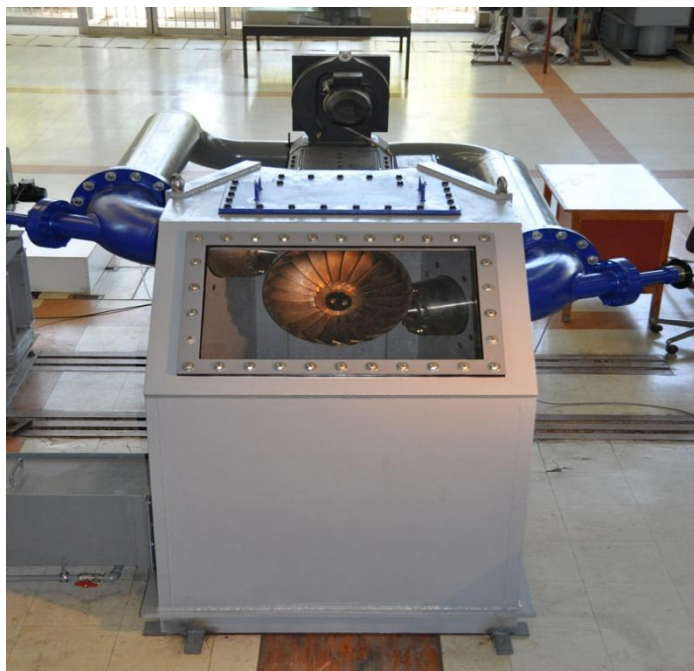
Μανομετρικό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή m^3/s
15-1800	0,1-200	0,8-6	150-1000	0,02-5

Πίνακας 3.1 : Τεχνικά χαρακτηριστικά υδροστρόβιλου τύπου Pelton [8]

3.1.2.1 β) Υδροστρόβιλοι τύπου Turgo

Ο υδροστρόβιλος Turgo αποτελεί παραλλαγή του υδροστρόβιλου Pelton που πλέον δεν βρίσκει συχνή εφαρμογή. Ο υδροστρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως, ο οποίος δύναται να διαχειριστεί μεγαλύτερες τιμές παροχής νερού, σε σχέση με τον υδροστρόβιλο Pelton. Περισσότερα και μακρύτερα ακροφύσια τοποθετούνται γύρω από την περιφέρεια του δρομέα, προκειμένου να οδηγήσουν τη ροή να τα αφήσει. Ένα πλεονέκτημα του υδροστρόβιλου Turgo είναι ότι, για την ίδια υδραυλική ισχύ και για την ίδια διάμετρο δρομέα, η ταχύτητα είναι περίπου η διπλάσια, πάντα σε σχέση με τον υδροστρόβιλο Pelton. Εδώ ο βαθμός απόδοσης μπορεί να αγγίζει τιμές όπως 92% και παραμένει υψηλός ακόμα και για παροχές ίσες με το 25% της παροχής σχεδίασης [8]. Στον αντίποδα όμως για την ίδια ισχύ με έναν Pelton χρειάζεται έναν δρομέα με διπλάσια διάμετρο.

Τέλος έχει υψηλή ταχύτητα περιστροφής, συνεπώς δεν χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων για τη σύζευξη με τη γεννήτρια, σε αντίθεση με τον υδροστρόβιλο Pelton.



Εικόνα 3.6: Μοντέλο υδροστρόβιλου Turgo 70MW που είναι εγκατεστημένος στο ΕΜΠ

Μανομετρκό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή m^3/s
15-1800	0,1-200	1-9	300-1500	0,5-8

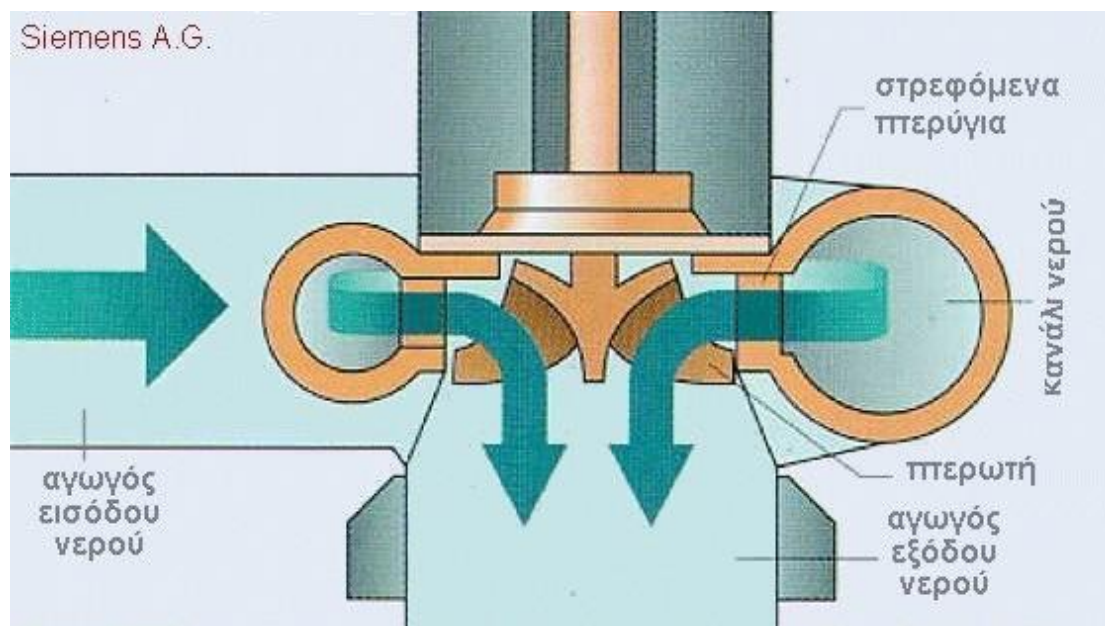
Πίνακας 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά υδροστρόβιλου τύπου Turgo [8]

3.1.2.2 Υδροστρόβιλοι Αντίδρασης

Είναι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρη η περωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά. Η στατική πίεση μεταβάλλεται (μειώνεται) μεταξύ εισόδου και εξόδου της περωτής. Το νερό δρα με πίεση λόγω του φορτίου του, τότε ο υδροκινητήρας καλείται αντιδράσεως. Σ' αυτούς η σταθερή διανέμουσα στεφάνη μετατρέπει μερικώς την πτώση σε ταχύτητα. Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρη η περωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσης (βαθμός αντίδρασης ίσος με το μηδέν), είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή μόνο τμήμα της περωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι τύπου Francis και Kaplan.

3.1.2.2 α) Υδροστρόβιλοι τύπου Francis

Ο υδροστρόβιλος Francis έχει τις περισσότερες εγκαταστάσεις στον κόσμο . Ο υδροστρόβιλος Francis είναι ένας τροχός – δρομέας, που φέρει περιφερειακά ειδικά διαμορφωμένα σταθερά πτερύγια. Ο δρομέας βρίσκεται μέσα σε μια φωλιά μεταβλητής κυκλικής διατομής και σπειροειδούς γεωμετρίας που έχει πτερύγια μεταβλητής θέσης που ονομάζονται κλαπέτα. Η φωλιά του δρομέα τροφοδοτείται με νερό από τον αγωγό τροφοδοσίας και τα κλαπέτα της φωλιάς καθοδηγούν το νερό, ώστε να προσκρούει εφαπτομενικά στα πτερύγια του δρομέα, Η φωλιά είναι σπειροειδούς γεωμετρίας ώστε το εναπομείναν νερό να αποκτά μεγαλύτερη στροφορμή. Επειδή η περιφερειακή ροή του νερού στη φωλιά ελαττώνεται λόγω εισροής του νερού στο δρομέα, ελαττώνεται παράλληλα και η διατομή του σπειροειδούς αγωγού της φωλιάς.



Εικόνα 3.7: υδροστρόβιλος τύπου Francis [11]

Τα κλαπέτα της φωλιάς εκτρέπουν το νερό, δημιουργούν μια εφαπτομενική ταχύτητα στο νερό και κατά συνέπεια μια στροφορμή στο νερό. Το νερό μετά εισέρχεται στον δρομέα της τουρμπίνας και μεταφέρει την στροφορμή του σαν ροπή στον άξονα της τουρμπίνας.

Η γεωμετρία των πτερυγίων είναι τέτοια ώστε να εξασκείται δύναμη στον τροχό και να τον θέτει σε περιστροφή. Το νερό αφού περάσει από τον δρομέα της τουρμπίνας παροχετεύεται σε κατάλληλο παρακείμενο αποδέκτη, ποταμό ή άλλη τεχνητή λίμνη. Σκοπός ενός βέλτιστου σχεδιασμού μιας τουρμπίνας Francis είναι το νερό να εξέρχεται χωρίς στροβιλισμό με την ελάχιστη δυνατή κινητική και δυναμική ενέργεια. Έτσι το νερό θα έχει αποδώσει σχεδόν όλο το μηχανικό ενεργειακό του περιεχόμενο/φορτίο στον υδροστρόβιλο. Οι υδροστρόβιλοι Francis χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολύ μικρή διαφορά υψομετρικής στάθμης υδατόπτωσης, να κατασκευαστούν από μικρά έως πολύ μεγάλα μεγέθη και έχουν πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης. Οι υδροστρόβιλοι Francis μπορούν ακόμα, να λειτουργήσουν και ως αντλίες δηλαδή, να αντλήσουν το νερό από ένα ρεζερβουάρ νερού χαμηλότερης υψομετρικής στάθμης σ' ένα ανώτερης στάθμης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου προς επαναχρησιμοποίησή του σε περιόδους υψηλής ζήτησης.

Κεφάλαιο 3 –Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος

Επειδή, ο συγκεκριμένος τύπος υδροστροβίλου είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτός που συναντάμε πιο συχνά στα υδροηλεκτρικά έργα είναι χρήσιμο να γίνει αναφορά στο μαθηματικό μοντέλο που διέπει τη λειτουργία του.

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία των υδροστροβίλων Francis είναι το ακόλουθο [12]:

Ισοζύγιο ορμής- 2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{u}) = \frac{(d\vec{P})}{dt} \quad (3.9)$$

Πολλαπλασιάζουμε εξωτερικά με ένα διάνυσμα θέσης \vec{r} :

$$\vec{r} \times \sum \vec{F} = \vec{r} \times \frac{d}{dt}(m\vec{u}) = \vec{r} \times \frac{(d\vec{P})}{dt} \quad (3.10)$$

Στο αριστερό μέλος της παραπάνω εξίσωσης βρίσκεται η συνισταμένη ροπή ΣΜ που ασκείται στο στοιχειώδη όγκο από όλες τις δυνάμεις.

Άρα προκύπτει:

$$\vec{r} \times \sum \vec{F} = \sum \vec{r} \times \vec{F} = \sum \vec{M} \quad (3.11)$$

Στο δεξί σκέλος της παραπάνω εξίσωσης έχουμε:

$$\vec{r} \times \frac{(d\vec{P})}{dt} = \frac{d}{dt} (\vec{r} \times \vec{P}) = \frac{(d\vec{G})}{dt} \quad (3.12)$$

Όπου G είναι η στροφορμή του στοιχειώδους όγκου, που από τον ορισμό της στροφορμής ισούται με το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος θέσης και της ορμής:

$$\vec{G} = \vec{r} \times \vec{P} \quad (3.13)$$

Η ολική παράγωγος της ορμής ισούται με:

$$\frac{(d\vec{P})}{dt} = \frac{\theta}{\theta t} \iiint_V \rho \vec{u} dV + \iint_{S_0 + S_1 + \text{Παράπλευρη}} \vec{u} \rho (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS \quad (3.14)$$

Στον παραπάνω τύπο αναπαρίστανται η συσσώρευση της ορμής στον

στοιχειώδη όγκο (πρώτο μέρος αθροίσματος) και η καθαρή εκροή από τον στοιχειώδη όγκο και εξωτερικής κλειστής επιφανείας $S_0 + S_1 + \text{Παράπλευρη}$ και το n είναι το κάθετο διάνυσμα της του στοιχειώδη όγκου και της απειροστής επιφανείας και φορά όμοια με της εκροής.

Τελικά , το ισοζύγιο της ορμής για τον υδροστρόβιλο Francis είναι:

$$\vec{M}_{\acute{\alpha}\xi\sigma\nu\alpha} = \sum \vec{M} = \frac{\theta}{\theta t} \iiint_V \rho (r \times \vec{u}) dV + \iint_{S_0 + S_1 + \text{Παράπλευρη}} (\vec{r} \times \vec{u}) * \rho * (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS \quad (3.15)$$

Στην περίπτωση της μόνιμης κατάστασης κατά την οποία η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα παραμένει σταθερή όπως και η παροχή η μερική παράγωγος που εμφανίζεται στο παραπάνω τύπο ως προς τον χρόνο είναι ίση με το μηδέν.

Δηλαδή:

$$\frac{\theta}{\theta t} \iiint_V \rho (\vec{r} \times \vec{u}) dV = 0 \quad (3.16)$$

Επίσης το επιφανειακό ολοκλήρωμα στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με το μηδέν αφού το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος της ταχύτητας και του κάθετου διανύσματος είναι μηδέν:

$$\iint_{S_o + S_i + \text{Παράπλευρη}} (\vec{r} \times \vec{u}) * \rho * (\vec{u} * \vec{n}) dS = 0 \quad (3.17)$$

Τέλος , η ροπή του υδροστροβίλου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Ροπή Υδροστροβίλου} = -M_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha} = \rho \dot{V} \frac{\dot{V}}{2\pi L} (\cos\alpha + \cos\beta) - r_i^2 \omega \quad (3.18)$$

Για την παραπάνω ανάλυση έχουν γίνει οι εξής παραδοχές: μόνιμη κατάσταση, στρωτή ροή ρευστού, κίνηση κατά παράλληλες στιβάδες, όχι αξονική.

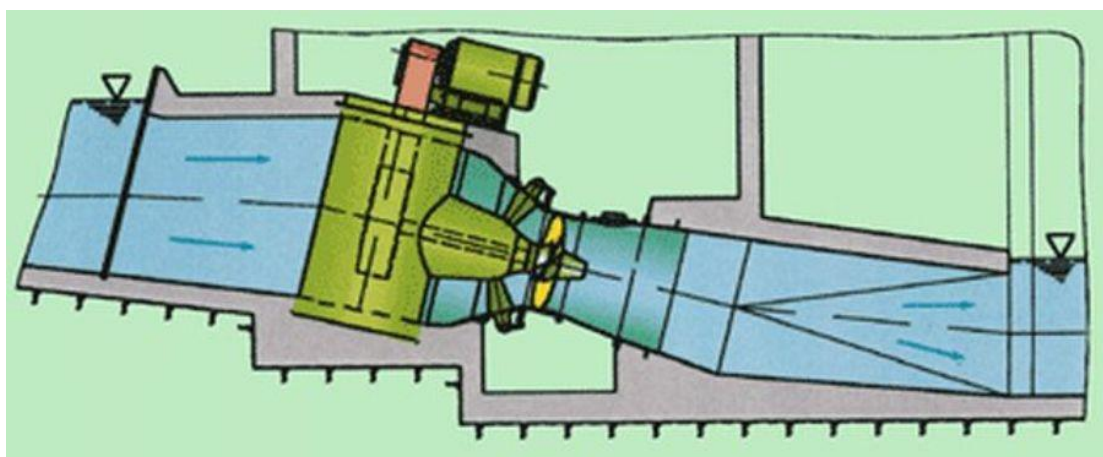
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υδροστροβίλου τύπου Francis :

Μανομετρκό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή m ³ /s
10-650	1-750	0,4-6	68-1000	0,02-8

Πίνακας 3.3: τεχνικά χαρακτηριστικά υδροστροβίλου τύπου Francis [8]

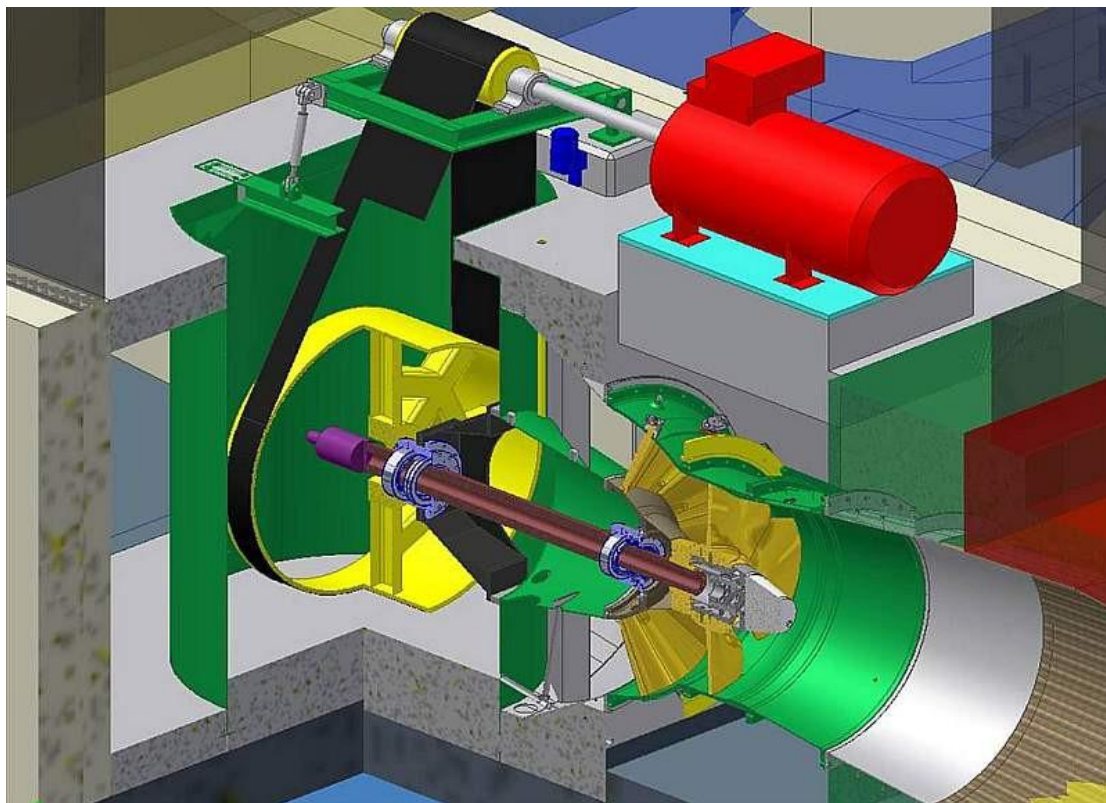
3.1.2.2 β) Υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan

Ο υδροστρόβιλος με δρομέα τύπου Kaplan αποτελεί μια παραλλαγή του τύπου Francis και πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα. Ο λόγος δημιουργίας τους είναι η δυνατότητα διαχείρισης υψηλών παροχών και μικρού μανομετρικού ύψους. Το 1919 έγιναν οι πρώτες τοποθετήσεις μεγάλων υδροστροβίλων αυτού του τύπου στην Τσεχοσλοβακία ενώ το 1922 στην Γερμανία (Voith) εγκαταστάθηκε μια μονάδα ισχύος 800kW. Πλέον οι μονάδες αυτού του τύπου έχουν ισχύ που φτάνουν τα 120MW.

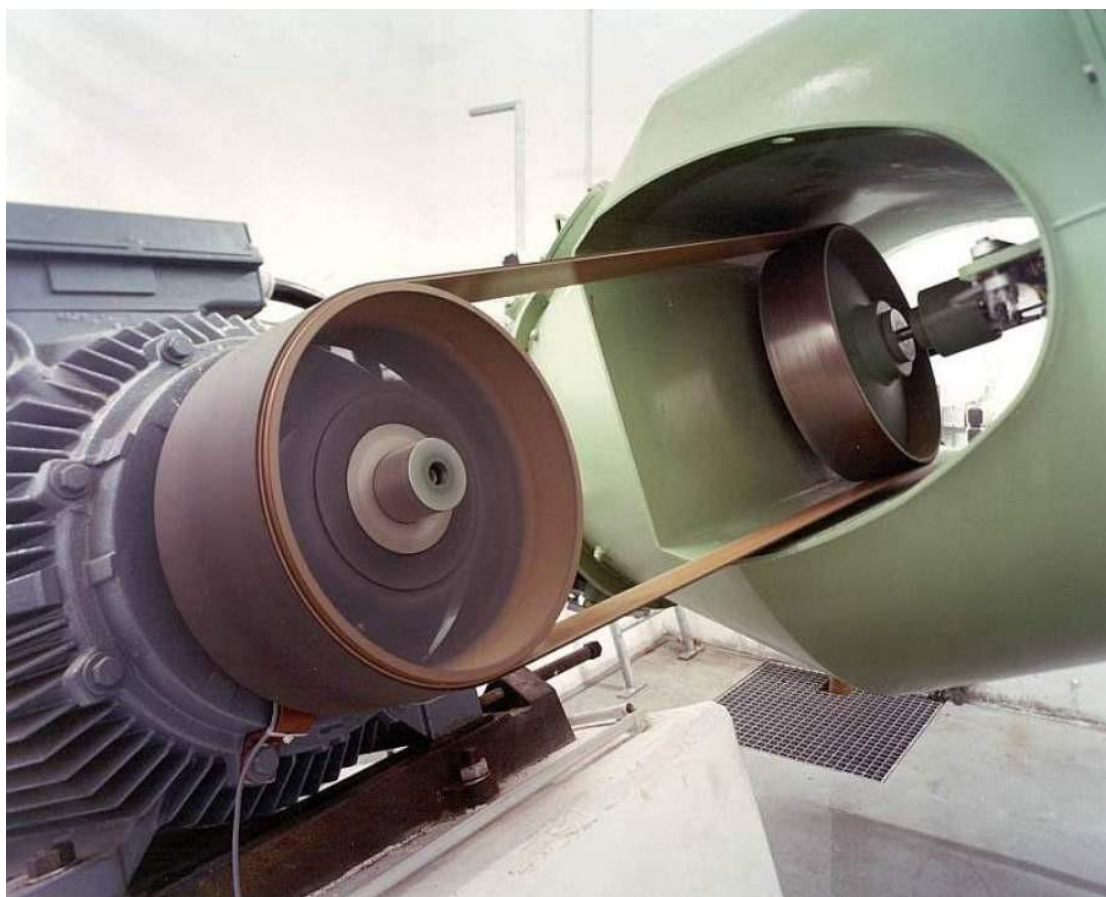


Εικόνα 3.8 : δρομέας τύπου Kaplan [13]

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς μεγάλης κλίμακας καθώς έχουν υψηλό κόστος μολονότι εμφανίζουν βαθμό απόδοσης υψηλότερο του 90% από μόλις το 35% της μέγιστης παροχής. Αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας το νερό εισέρχεται πλευρικά στο στρόβιλο, εκτρέπεται από τα κατευθυντήρια πτερύγια και ρέει αξονικά μέσω του δρομέα. Το ποσό του νερού που ρέει διαμέσου του υδροστροβίλου, μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των κατευθυντήριων πτερυγίων. Κατασκευαστικά τα πτερύγια του δρομέα μπορεί να είναι από μπρούτζο ή συνθηθέστερα ανοξείδωτο χάλυβα. Κατά κανόνα για μεγάλες δομές επιλέγεται το δεύτερο υλικό. Τα περιβλήματα της εισαγωγής νερού και της εξόδου κατασκευάζονται από μέταλλο ή σκυρόδεμα. Είναι δυνατή η άμεση σύνδεση με αγωγό κατασκευασμένο από σκυρόδεμα. Τέλος διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων για να συνδέονται με την γεννήτρια που κινείται είτε με ιμάντες/ζώνες.[12]



Εικόνα 3.9: Συνολική διάταξη με σύνδεση δρομέα-γεννήτριας με ζώνες [14]



Εικόνα 3.10 :Σύνδεση με κιβώτιο ταχυτήτων μέσω ιμάντα [14]

Μανομετρικό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή m^3/s
1-70	0,1-120	2-8	79-430	0,5-50

Πίνακας 3.4: τεχνικά χαρακτηριστικά υδροστροβίλου τύπου Kaplan [8]

3.1.2.2 γ) Υδροστρόβιλοι τύπου Deriaz

Ο υδροστρόβιλος Deriaz είναι παραλλαγή του υδροστροβίλου Kaplan με επίπεδα κεκλιμένα πτερύγια, με σκοπό τη λειτουργία του σε υψηλότερα μανομετρικά . Είναι υδροστρόβιλος μικτής ροής. Η κλίση των πτερυγίων είναι προσαρμοζόμενη, συνεπώς προσφέρεται η δυνατότητα λειτουργίας σε ευρύ πεδίο μανομετρικού και παροχής. Για τον ίδιο λόγο είναι δυνατή η αποφυγή της σπηλαίωσης, σε όλα τα σημεία λειτουργίας.



Εικόνα 3.11 : Υδροστρόβιλος τύπου Deriaz [15]

Μανομετρικό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή m^3/s
20-100	0,1-120	2-8	79-430	0,5-50

Πίνακας 3.5: τεχνικά χαρακτηριστικά υδροστροβίλου τύπου Deriaz [8]

Στον επόμενο πίνακα θα παρουσιαστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των υδροστροβίλων. Κοιτάζοντας τον πίνακα καταλαβαίνουμε πως το ποιος υδροστρόβιλος θα χρησιμοποιηθεί τελικά στην εγκατάσταση είναι προσωπική επιλογή του σχεδιαστή μηχανικού αφού πολλά από τα τεχνικά μεγέθη αλληλοκαλύπτονται.

		Μανομετρικό Ύψος (m)	Ισχύς (MW)	Δρομέας (m)	Ταχύτητα Περιστροφής (rpm)	Παροχή (m ³ /s)
Δράσεως	Pelton	15-1800	0,1-200	0,8-6	150-1000	0,02-5
Δράσεως	Turgo	15-1800	0,1-200	1-9	300-1500	0,5-8
Αντιδράσεως	Francis	10-650	1-750	0,4-6	68-1000	0,02-8
Αντιδράσεως	Kaplan	1-70	0,1-120	2-8	79-430	0,5-50
Αντιδράσεως	Deriaz	20-100	0,1-120	2-8	79-430	0,5-50

Πίνακας 3.6: τεχνικά χαρακτηριστικά στροβίλων [8]

3.1.3 Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα

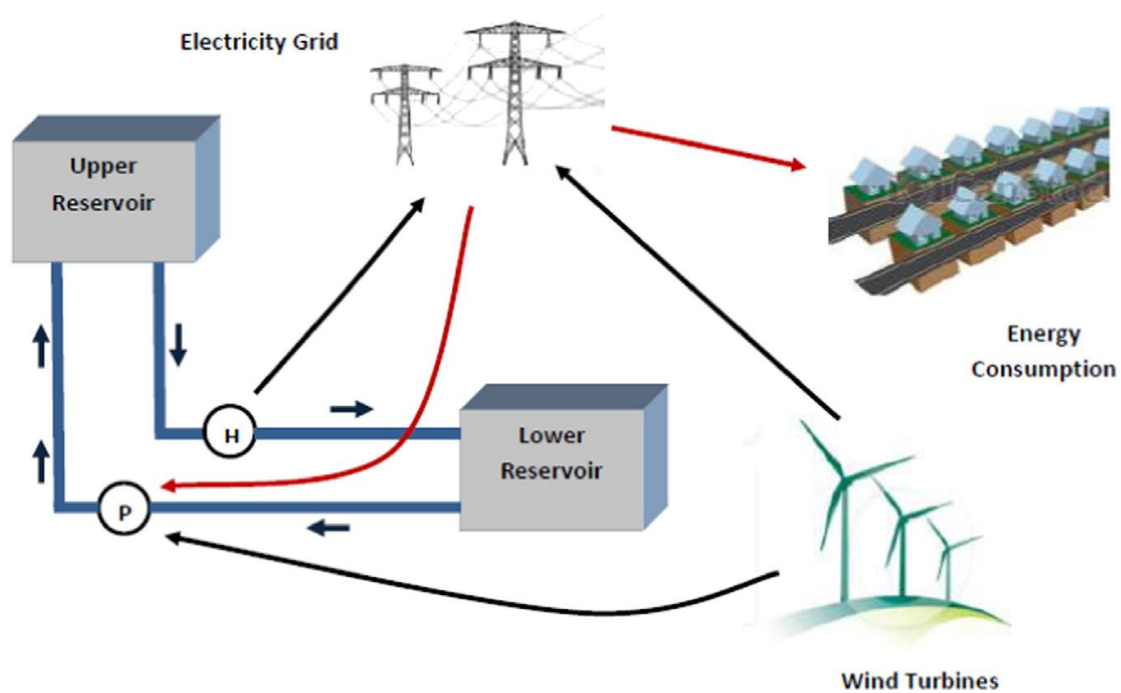
Ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών, είτε συμβατικών είτε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ονομάζεται υβριδικό σύστημα . Τέτοια συστήματα μελετώνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με σκοπό τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα, ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, αλλά και συγχρόνως την παραγωγή ενέργειας σε συμφωνία με τις Ευρωπαϊκές και Εθνικές πολιτικές για την ενέργεια και το περιβάλλον [16]. Σύμφωνα με το Νόμο 3468/2006, σε ένα υβριδικό σύστημα [16]:

- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού Α.Π.Ε. δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Παρακάτω , θα εξεταστούν τα υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα και ειδικότερα τα συστήματα αντλησιοταμίευσης που συνδυάζονται με αιολικά πάρκα ή με θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα την περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας ή της ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί.

3.1.3.1 Συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή αιολικών μηχανών, παράλληλα με σύστημα αντλησιοταμίευσης. Ιδίως για τα απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα ελληνικά νησιά, που χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, έντονη εξάρτηση από το πετρέλαιο, ενώ διαθέτουν πλούσιο αιολικό δυναμικό, τα συστήματα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση παρουσιάζονται ως μια τεχνικά κατάλληλη και αποδεκτή λύση.



Εικόνα 3.12 : Σύστημα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση[17]

Το υβριδικό αυτό σύστημα αποτελείται από δύο δεξαμενές χωροθετημένες σε διαφορετικό υψόμετρο, σύστημα αντλιών, στροβίλου και σωληνώσεων και αιολικό πάρκο. Οι ανεμογεννήτριες παριστάνουν το αιολικό πάρκο, από το οποίο προέρχεται όλη η ενέργεια που παράγει το σύστημα. Το αιολικό πάρκο τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρική ισχύ P_w . Όπως θα δούμε και σε επόμενη παράγραφο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Σ.Δ.Ε) ελέγχει αν η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το αιολικό πάρκο είναι μεγαλύτερη από τη στιγμιαία ζήτηση P_f .

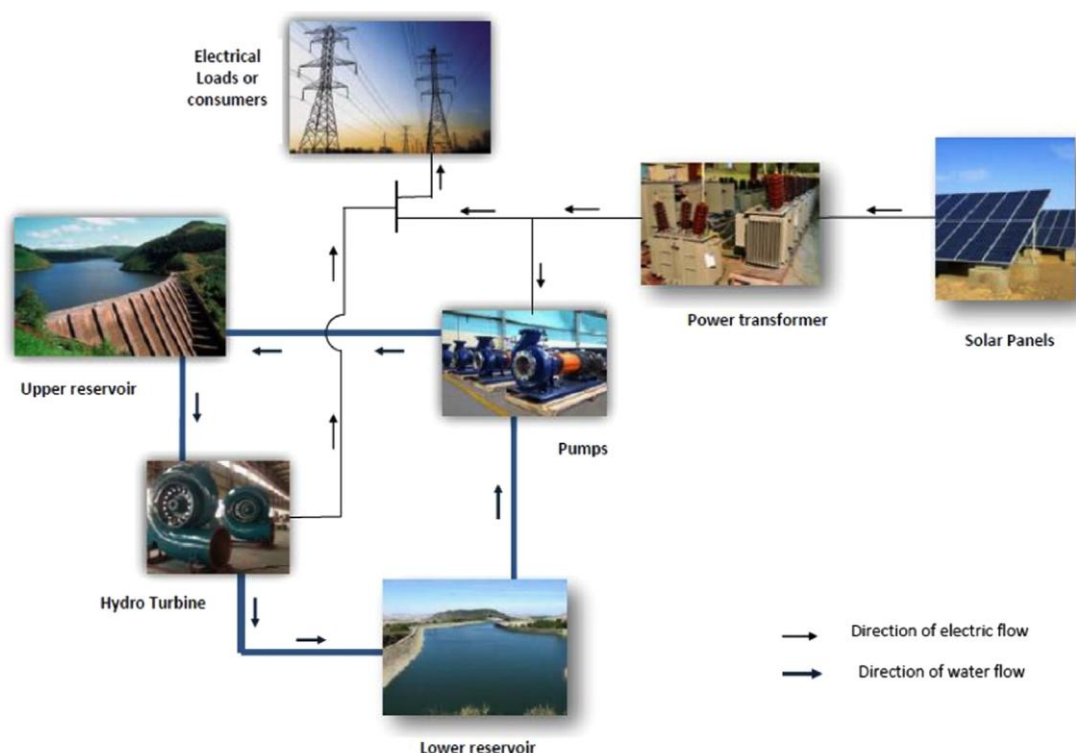
Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση είναι ο εξής: το αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στο βαθμό που δεν

μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο αξιοποιείται για την άντληση του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του νερού και αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Όταν και όποτε παραστεί ανάγκη να μετατραπεί η ενέργεια αυτή σε ηλεκτρική για να καλύψει ανάγκες ηλεκτροδότησης (για παράδειγμα κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, ή όταν δεν φυσάει άνεμος, και υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας), τότε ακολουθείται η αντίστροφη διαδρομή. Το νερό θα μεταφέρεται από τον πάνω στον κάτω ταμιευτήρια, όπου ένας υδροστρόβιλος θα μετατρέπει την κίνηση του νερού σε ηλεκτρική και θα τη διοχετεύει πάλι πίσω στο δίκτυο.[6]

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του υβριδικού συστήματος αιολικής ενέργειας και αντλησιοταμίευσης είναι η ανάπτυξη της ασφάλειας των μη διασυνδεδεμένων συστημάτων ενέργειας μέσω της ύπαρξης των υδροστροβίλων. Ο συνδυασμός αιολικής ενέργειας και αντλησιοταμίευσης είναι μέσο εκμετάλλευσης του άφθονου αιολικού δυναμικού, αύξησης της ικανότητας του εγκατεστημένου αιολικού πάρκου και υποκατάστασης των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας κατά την αιχμή του φορτίου [10]. Ως εκ τούτου, μειώνονται και οι εκπομπές CO₂ αφού θα μειωθεί η παραγωγή από συμβατικές μεθόδους. Επιπλέον, αυξάνεται η εγχώρια παραγωγή ενέργειας κάθε χώρας μειώνοντας την εισαγωγή καυσίμων από το εξωτερικό. Τέλος, το υβριδικό αυτό υδροηλεκτρικό σύστημα μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιούν μέρος της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Έτσι εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του νερού, όχι μόνο για ενεργειακή χρήση, αλλά και για ύδρευση-άρδευση [6] . Μοναδικό μειονέκτημα ενός τέτοιου υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος είναι το κόστος κατασκευής του. Το κόστος ανά MW ενός υδροηλεκτρικού κυμαίνεται στα 2-3 εκατομμύρια ευρώ έναντι 1,3 εκατομμυρίων ευρώ για μια μονάδα λιθάνθρακα και 700.000 ευρώ για μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου (φυσικό αέριο). Αν και ακριβό στην κατασκευή του, είναι ωστόσο πολύ πιο φθηνό στη λειτουργία του συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες, δεδομένης της συνεχούς αύξησης των τιμών των καυσίμων [18].

3.1.3.2 Συνδυασμός συστήματος αντλιοσταμείωσης με ηλιακά-φωτοβολταϊκά συστήματα

Η ηλιακή ενέργεια είναι διακοπτόμενη στη φύση, λόγω καιρικών συνθηκών(λ.χ. συννεφιά) και επιπλέον είναι διαθέσιμη μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Άρα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα αποθήκευσης το οποίο θα αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας όταν υπάρχει, και να κάνει χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας όταν χρειαστεί. Ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι αυτό της αντλιοσταμείωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.13: σύστημα αντλιοσταμείωσης-φωτοβολταϊκών [17]

Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ μεταφέρεται μέσω του δικτύου και η περίσσεια ενέργειας τις ώρες χαμηλής ζήτησης χρησιμοποιείται για να αντληθεί το νερό από την κάτω δεξαμενή στην άνω δεξαμενή. Το νερό της άνω δεξαμενής, αφήνεται κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης και μέσω υδροστροβίλου παράγει την απαιτούμενη ενέργεια.

3.1.4 Εφαρμογές αντλησιοταμίευσης

Παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποια παραδείγματα εφαρμογής του συστήματος της αντλησιοταμίευσης ανά τον κόσμο.

3.1.4.1 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Bath County

Αν και δεν εμπίπτει στη παρούσα μελέτη λόγω πολύ μεγάλου μεγέθους, παραθέτουμε πρώτα τη μονάδα του Bath County επειδή είναι από τις σημαντικότερες στον κόσμο και δείχνει τις πολύ μεγάλες δυνατότητες της τεχνολογίας της αντλησιοταμίευσης γενικότερα.

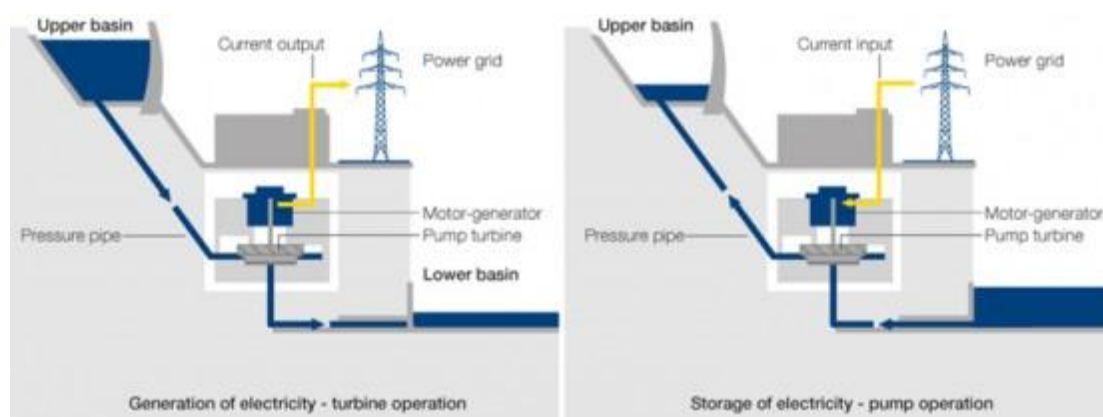
Ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Bath County, που βρίσκεται στην περιοχή Bath County της Βιρτζίνια των Η.Π.Α. περιγράφεται ως τη μεγαλύτερη μπαταρία του κόσμου αφού έχει δυνατότητα παραγωγής ισχύος 3003 MW. Η μονάδα παραγωγής ενέργειας αποτελείται από δύο δεξαμενές που έχουν διαφορά υψομέτρου 380 μέτρα. Πρόκειται για τη μεγαλύτερη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με αντλησιοταμίευση στον κόσμο.

Η κατασκευή της μονάδας ξεκίνησε το 1977, με αρχική ικανότητα 2.100MW και ολοκληρώθηκε το 1985. Το συνολικό κόστος της αρχικής κατασκευής ήταν 1.6 δισεκατομμύρια δολάρια. Η εταιρεία Voith-Siemens έκανε αναβάθμιση των έξι υδροστροβίλων, αυξάνοντας την ισχύ παραγωγής στα 500.5 MW και την ισχύ άντλησης στα 480MW για κάθε στρόβιλο.

Ο άνω και κάτω ταμιευτήρας έχουν δημιουργηθεί σε δύο φράγματα, φτιαγμένα από πλέγμα χώματος και βράχων. Το φράγμα του άνω ταμιευτήρα έχει ύψος 140 μέτρα, μήκος 670 μέτρα και όγκο κατασκευής 14.000.000 κυβικά μέτρα. Έχει επιφάνεια 1.07 τετραγωνικά χιλιόμετρα και χωρητικότητα 43.911.000 κυβικά μέτρα. Το φράγμα του κάτω ταμιευτήρα έχει 41 μέτρα ύψος και 730 μέτρα μήκος. Έχει όγκο κατασκευής 3.100.000 κυβικά μέτρα, ενώ ο ταμιευτήρας που δημιουργείται έχει επιφάνεια 2.25 τετραγωνικά χιλιόμετρα και χωρητικότητα 34.447.000 κυβικά μέτρα. Για τη σύνδεση των δύο ταμιευτήρων χρησιμοποιούνται τρεις αγωγοί νερού, μήκους από 940 έως 1100 μέτρα. Ο κάθε αγωγός οδηγεί σε ένα άξονα 990 μέτρα ο οποίος χωρίζεται σε δύο αγωγούς πτώσης (δηλαδή έξι στο σύνολο) πριν φτάσει στις

ανεμογεννήτριες. Ο κάθε αγωγός πτώσης έχει διάμετρο 5.5 μέτρα και μήκος από 270 έως 380 μέτρα. Η μέγιστη στατική πίεση από την κορυφή του συστήματος παροχής νερού έως τους υδροστροβίλους είναι 400 μέτρα στήλης ύδατος.[19]

Όσον αφορά στη λειτουργία της συγκεκριμένης μονάδας, το νερό απελευθερώνεται από τον άνω ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια των περιόδων υψηλής ζήτησης και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό που κάνει αυτή την μονάδα διαφορετική από άλλες μονάδες αντλησιοταμίευσης, είναι ότι κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης, η ισχύς λαμβάνεται από λιγνιτικές, πυρηνικές και άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας, και χρησιμοποιείται για την άντληση νερού από τον κάτω προς τον άνω ταμιευτήρα. Παρόλο που η μονάδα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από αυτήν που παράγει, επιτρέπει στις άλλες μονάδες να λειτουργούν σε πλήρη ισχύ με συνολική εξοικονόμηση κόστους. Οι πηγές νερού που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν οι δύο ταμιευτήρες (Back Creek και Little Back Creek) έχουν σχετικά χαμηλή ταχύτητα ροής. Όμως, επειδή το νερό ανακυκλώνεται ανάμεσα στους δύο ταμιευτήρες, το μόνο επιπλέον νερό που χρειαζόμαστε είναι αυτό που χάνεται λόγω της εξάτμισης. Κατά τη λειτουργία της μονάδας, η στάθμη του νερού φθάνει σε πάνω από 30 μέτρα στον άνω ταμιευτήρα και πάνω από 20 μέτρα στον κάτω. Κατά την παραγωγή ενέργειας η παροχή του νερού είναι 850 κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ενώ κατά την αποθήκευση η παροχή είναι 800 κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 3.14: Λειτουργία μονάδας Bath County κατά την παραγωγή και την αποθήκευση ενέργειας [19]

3.1.4.2 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Horse Mesa

Το 1969 η εταιρία SRP υλοποίησε το σχέδιο για την αύξηση της ικανότητας παραγωγής της μονάδας Salt River στην Αριζόνα των Η.Π.Α. . Το πρόγραμμα συμπεριελάμβανε την εγκατάσταση μονάδας αντλησιοταμίευσης στο φράγμα Horse Mesa το 1972. Το φράγμα Horse Mesa βρίσκεται στις όχθες του Salt River, έχει ύψος 93 μέτρα, μήκος 20 μέτρα και σχηματίζει δεξαμενή χωρητικότητας 302373275 κυβικών μέτρων που ονομάζεται Apache Lake. Έχει τρεις υδροηλεκτρικές μονάδες που παράγουν συνολικά 32MW και μία μονάδα αντλησιοταμίευσης αποθηκευτικής ικανότητας 97 MW. [20]



Εικόνα 3.15 : Το φράγμα Horse Mesa [20]

3.1.4.3 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Thermalito

Ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Thermalito βρίσκεται στην California των Η.Π.Α. . Πρόκειται για σημαντικό κομμάτι του υδροηλεκτρικού πάρκου που είναι εγκατεστημένο στην λίμνη Oroville και έχει αποθηκευτική ικανότητα 120MW. Η κατασκευή της μονάδας άρχισε το 1964 και ολοκληρώθηκε το 1969.[20]



Εικόνα 3.16: Σταθμός Thermalito [20]

3.1.4.4 Σύστημα αντλησιοταμίευσης Reisach

Ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Reisach τέθηκε σε λειτουργία το 1955,βρίσκεται στην Γερμανία και ανήκει στην εταιρία Jansen Power Plant Group. Τέλος έχει αποθηκευτική ικανότητα 99 MW.[20]



Εικόνα 3.17: Σταθμός αντλησιοταμίευσης Reisach [20]

3.1.4.5 Σταθμός αντλησιοταμίευσης Tanes

Ο σταθμός αντλησιοταμίευσης Tanes βρίσκεται στην Ισπανία. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1970 από την εταιρία Energias de Portugal(EDP) και ο σταθμός ξεκίνησε να λειτουργεί το 1978. Έχει καθαρό ύψος πτώσης 102 μέτρων κατά την παραγωγή και 105 μέτρων κατά την άντληση.Ο άνω ταμιευτήρας έχει χωρητικότητα 25.300.000 κυβικά μέτρα. Τέλος η αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας είναι 114.5 MW και οι υδροστρόβιλοι της είναι τύπου Francis, αξονικοί και αντιστρέψιμοι. [20]

3.1.4.6 Αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα έχουμε δύο μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, το υδροηλεκτρικό έργο Σφηκιάς στον Αλιάκμονα και εκείνο του Θησαυρού στο Νέστο.

Στον υδροηλεκτρικό σταθμό Σφηκιάς που κατασκευάστηκε το 1985 στη Βέρροια από τη ΔΕΗ. Πρόκειται για μία αναστρέψιμη μονάδα όπου η λειτουργία των στρόβιλων αντιστρέφεται, όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο, ώστε τη νύχτα να αντλούν νερό από την κατάντη λίμνη των Ασωμάτων όταν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τους λιγνιτικούς σταθμούς και να την αποδίδουν την ημέρα υπό πιο συμφέροντες όρους.

Όπως και στον υδροηλεκτρικό σταθμό Σφηκιάς, έτσι και στο υδροηλεκτρικό σταθμό του Θησαυρού Νέστου που κατασκευάστηκε το 1998 από τη ΔΕΗ, οι στρόβιλοι μπορούν να αντιστρέφονται τη νύχτα και να αντλούν νερό από τον κατάντη ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης, όταν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τους λιγνιτικούς σταθμούς, και να την αποδίδουν την ημέρα.

3.1.5 Αντλησιοταμίευση-Ανάλυση S.W.O.T

Σε αυτό το σημείο της μελέτης θα κάνουμε ανάλυση S.W.O.T, δηλαδή θα παρουσιάσουμε τα πλεονεκτήματα (Strengths), τα μειονεκτήματα (Weaknesses), τις προοπτικές (Opportunities) και τον υπερκερασμό από άλλη τεχνολογία (Threats) της αντλησιοταμίευσης.

Στα πλεονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης συγκαταλέγονται το χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η αξιοπιστία της μεθόδου, μιας και είναι από τις πρώτες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας που εφαρμόστηκαν. Ακριβώς γι' αυτό υπάρχει η απαραίτητη τεχνογνωσία και εμπειρία για τη λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας. Επιπλέον, είναι συνήθως φθηνότερη από τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας. Τέλος, λόγω της αντλησιοταμίευσης γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται από αιολικά πάρκα και από μονάδες φωτοβολταϊκών, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για νέες επενδύσεις σε χώρες με πλούσιο αιολικό και ηλιακό δυναμικό.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται η δυσκολία εύρεσης κατάλληλης τοποθεσίας εγκατάστασης της αντλησιοταμιευτικής μονάδας. Η τοποθεσία αυτή θα πρέπει να παρέχει μεγάλη υψομετρική διαφορά ανάμεσα στους δύο ταμιευτήρες και ταυτόχρονα μικρή οριζόντια απόσταση μεταξύ τους και πηγή νερού σημαντικής παροχής. Ο χρόνος κατασκευής είναι μεγάλος, συχνά πάνω από δέκα χρόνια. Επιπλέον, το κόστος της εγκατάστασης είναι υψηλό, γίνεται όμως η απόσβεση του σε βάθος χρόνου. Μέσα στα μειονεκτήματα θα πρέπει να προσμετρηθούν και οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις, όπως η φραγή ποταμών, η βύθιση περιοχών με αποτέλεσμα την καταστροφή του προηγούμενου οικοσυστήματος, αύξηση της θερμοκρασίας του νερού λόγω της άντλησης, παγίδευση και θάνατος ψαριών μέσα στην εγκατάσταση. Υπάρχουν βέβαια τρόποι αποφυγής κάποιων επιπτώσεων, όπως ειδικά δίχτυα αποφυγής της εισόδου των ψαριών και μηχανισμοί προσθήκης οξυγόνου, που χάνεται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού. Ένας λόγος καθυστέρησης της αποπεράτωσης του έργου και της μεγάλης συνολικής διάρκειας κατασκευής είναι ότι πρέπει να καταστρωθεί περιβαλλοντολογική μελέτη, ειδική για τη συγκεκριμένη τοποθεσία. Τέλος, αν και μικρός, υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος όπως στην περίπτωση του Taum Sauk που ξεχείλισε ο άνω ταμιευτήρας καταστρέφοντας το κοντινό δάσος. [21]

Στην εισαγωγή αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε η ανάγκη που υπάρχει για γενική στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο επιτυχής συνδυασμός της αντλησιοταμίευσης με τις μονάδες Α.Π.Ε. προσφέρει νέες ευκαιρίες στην εγκατάσταση συστημάτων αντλησιοταμίευσης και στο προσεχές μέλλον. Πάνω από 100 νέες μονάδες αντλησιοταμίευσης με συνολική ικανότητα περίπου 74 GW αναμένονται να είναι σε λειτουργία μέχρι το 2020, σε όλο τον κόσμο. Η Κίνα, που έχει το πιο φιλόδοξο σχέδιο, σκοπεύει να τετραπλασιάσει τις μονάδες αντλησιοταμίευσης ώστε να φτάσει συνολική ικανότητα 100GW έως το 2025. Προσπαθώντας να διευκολύνει τη γρήγορη ανάπτυξη της ασταθούς ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α. Π.Ε., η Ευρώπη βιώνει επιτυχώς την αναγέννηση της αντλησιοταμίευσης σαν τεχνολογία, ειδικά σε Ισπανία, Σουηδία και Αυστρία, με νέες μονάδες ικανότητας 27 GW έως το 2020. Η Ιαπωνία, αν και έχει ήδη τις περισσότερες μονάδες αντλησιοταμίευσης αναλογικά, συνεχίζει την ανάπτυξη νέων μονάδων. Στις Η.Π.Α. γίνεται επίσης αναγέννηση των μονάδων αντλησιοταμίευσης. Συγκεκριμένα το 2014 δόθηκαν δύο άδειες για νέες μονάδες (1,3GW στο Eagle

Mountain και 400MW στο Iowa River) και υπάρχουν πάνω από 40 προτεινόμενες μονάδες[21]. Με την ώριμη τεχνολογία και τον μεγάλο όγκο εμπορικών δραστηριοτήτων, η αντλησιοταμίευση θα παραμείνει σίγουρα η κυρίαρχη τεχνολογία στο προσεχές μέλλον. Οι περισσότερες υπάρχουσες μονάδες αντλησιοταμίευσης είναι εξοπλισμένες με αντλίες συγκεκριμένης ταχύτητας λειτουργίας. Παρόλο που αυτές οι μονάδες παρέχουν οικονομική αποθήκευση φορτίου, μπορούν να παρέχουν ρύθμιση συχνότητας μόνο κατά τη φάση παραγωγής ενέργειας και όχι κατά την άντληση. Όσο όμως αυξάνεται η υιοθέτηση ποικίλων πηγών ενέργειας, όπως ο άνεμος και ο ήλιος, υπάρχει αυξημένη ανάγκη για ρύθμιση της συχνότητας. Νέες μονάδες που μπορούν να λειτουργήσουν σε διάφορες ταχύτητες επιτρέπουν τη ρύθμιση της συχνότητας τόσο κατά τη φάση της άντλησης, όσο και κατά τη φάση της παραγωγής ενέργειας. Η Ιαπωνία πρωτοπορεί σε αυτό και έχει επιτυχώς λειτουργήσει τέτοια συστήματα στο Okawachi για πάνω από 20 χρόνια [21]. Οι ευρωπαϊκές χώρες εισάγουν ενεργά αυτές τις μονάδες στην ενεργειακή τους ατζέντα. Τέλος, από το 1907 έως το 2007 έχουν γίνει 279 μεγάλα ενεργειακά ατυχήματα που προκάλεσαν 182.156 θανάτους και καταστροφές ύψους 41 δισεκατομμυρίων δολαρίων, χωρίς να περιλαμβάνονται τα μικρά ατυχήματα [22]. Η υδροηλεκτρική ενέργεια ενοχοποιείται για λιγότερο από 1% αυτών των καταστροφών, με αποτέλεσμα να διάκειται θετικά η κοινή γνώμη προς τέτοιες μορφές παραγωγής ενέργειας.

Όσον αφορά τον υπερκερασμό από άλλες τεχνολογίες (Threats) είναι γεγονός ότι υπάρχουν πολλά και ισχυρά υποκατάστατα αυτής της τεχνολογίας. Τέτοια είναι η αποθήκευση με υδρογόνο (κυψέλες καυσίμου, μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου), οι σφόνδυλοι, οι υπεραγωγίμοι πυκνωτές, η αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα και τέλος η αποθήκευση σε χημική μορφή που αφορά τις μπαταρίες. Οι τεχνολογίες είναι αρκετές και ποικίλουν ως προς την χωρητικότητα και το κόστος απόκτησης. Ιδιαίτερα οι μπαταρίες πλεονεκτούν στην κλίμακα εφαρμογών και αποτελούν τον κυριότερο τρόπο αποθήκευσης σε οικιακά αυτόνομα συστήματα. Παρά ταύτα όλες αυτές οι διατάξεις έχουν μικρότερο χρόνο ζωής από τα υβριδικά συστήματα και συνήθως μικρότερη χωρητικότητα.

STRENGTHS	WEAKNESSES
Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης	Δυσκολία εύρεσης τοποθεσίας εγκατάστασης
Αξιοπιστία	Μεγάλος χρόνος κατασκευής
Τεχνογνωσία/εμπειρία	Υψηλό κόστος εγκατάστασης
Φθηνότερη μέθοδος	Περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις
Νέες επενδύσεις	Κίνδυνος ατυχήματος

OPPORTUNITIES	THREATS
Στροφή στις Α.Π.Ε./ υβριδικά συστήματα	Ισχυρά υποκατάστατα
Μονάδες λειτουργίας σε ποικίλες ταχύτητες	Ισχυρή έρευνα υποκατάστατων
Φόβος κοινής γνώμης για συμβατικές μονάδες (ατυχήματα)	

Πίνακας 3.7: S.W.O.T. για την αντλησιοταμίευση

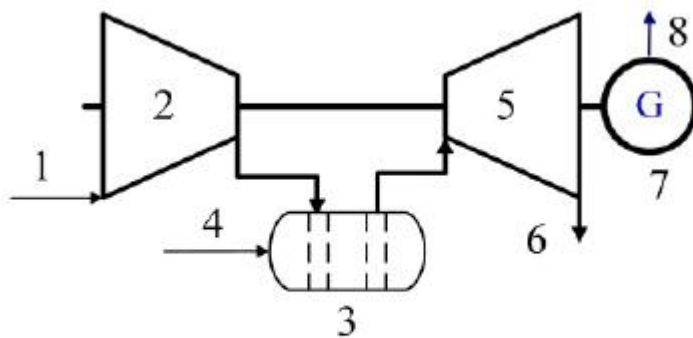
3.2 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αντλησιοταμίευση είναι μία ώριμη τεχνολογία με μεγάλο όγκο, μεγάλη περίοδο αποθήκευσης, υψηλή αποδοτικότητα και σχετικά χαμηλό κόστος ανά μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Εν τούτοις, υπάρχει το μειονέκτημα της δυσκολίας ανεύρεσης κατάλληλων τοποθεσιών για την κατασκευή δύο ταμιευτήρων και ενός ή και δύο φραγμάτων. Επίσης απαιτούνται μεγάλος χρόνος και τεράστια ποσά για την κατασκευή, ενώ υπάρχουν και περιβαλλοντολογικά θέματα. Αυτά τα μειονεκτήματα, και οι περιορισμοί για την εφαρμογή της αντλησιοταμίευσης, καθιστούν την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES) μία ελκυστική εναλλακτική λύση για την αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Τα συστήματα CAES είναι η μοναδική, εκτός της αντλησιοταμίευσης, τεχνολογία που διατίθεται εμπορικά και είναι ικανή να αποδίδει μεγάλα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας (πάνω από 100 MW ανά μονάδα).

Οι παρακάτω ενότητες έχουν σκοπό να παρουσιάσουν τις αρχές λειτουργίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την ανάπτυξη αλλά και τις εφαρμογές των CAES.

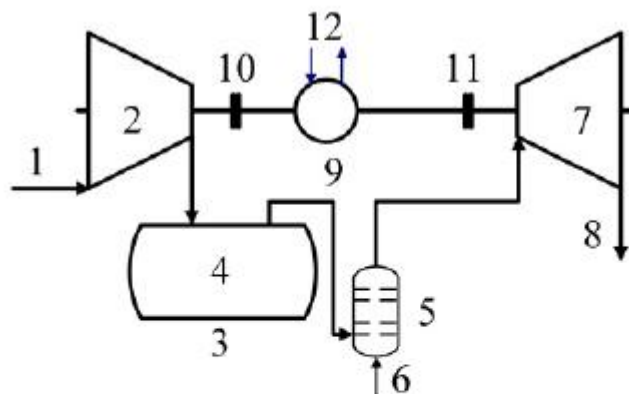
3.2.1 Αρχές λειτουργίας CAES

Η μέθοδος των CAES πρωτοεμφανίστηκε το 1949, όταν η Stal Naval παρουσίασε την πρώτη πατέντα των CAES, η οποία χρησιμοποιούσε έναν υπόγειο χώρο για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα. Η αρχή του βασίζεται στη λειτουργία ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.18 α), τα CAES διαχωρίζουν τον κύκλο συμπίεσης και εκτόνωσης ενός αεριοστρόβιλου σε δύο ξεχωριστές διαδικασίες και αποθηκεύουν την ενέργεια με τη μορφή της ελαστικής δυναμικής ενέργειας του συμπιεσμένου αέρα.



1.Air, 2.Compressor, 3.Combustor, 4.Fuel, 5.Turbine, 6.Exhaust, 7.Generator, 8.Electricity

Εικόνα 3.18 α): σχηματική διάταξη αεριοστρόβιλου [23]

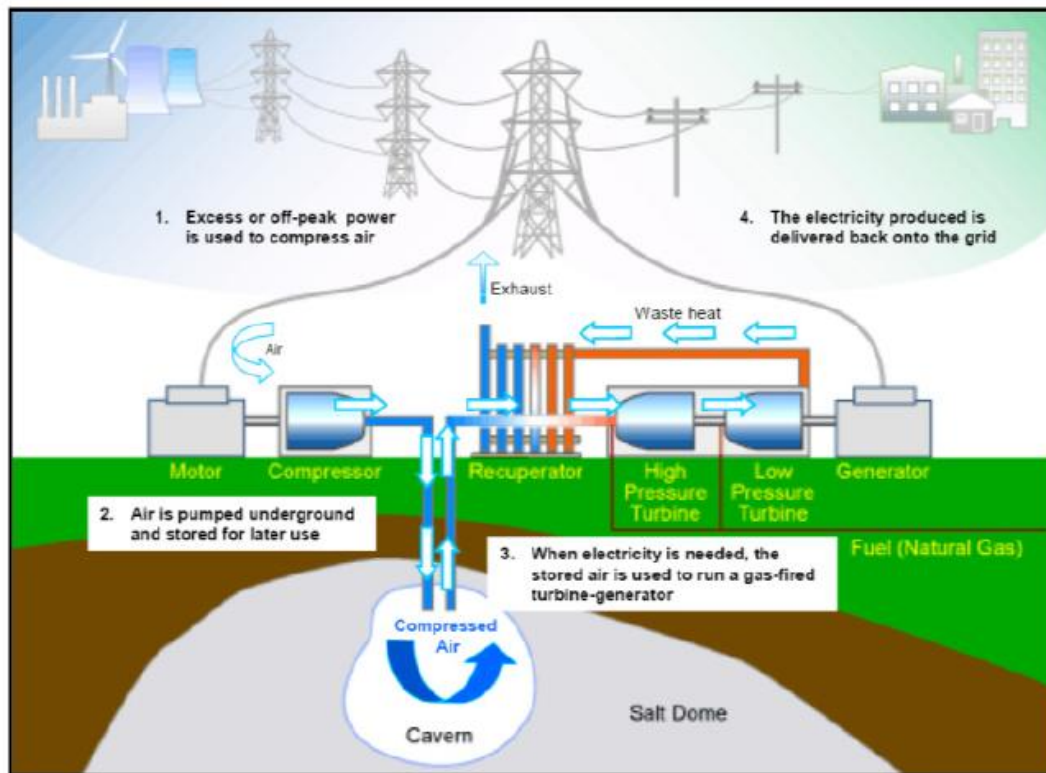


1.Air, 2.Compressor, 3.Reservoir, 4.Compressed air, 5.Combustor, 6.Fuel, 7.Turbine, 8.Exhaust, 9.Motor/Generator, 10 and 11.Clutch, 12.Electricity

Εικόνα 3.18 β): σχηματική διάταξη συστήματος συμπιεσμένου αέρα [23]

Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης η ενέργεια αποθηκεύεται συμπιέζοντας αέρα σε έναν αεροστεγή χώρο, τυπικά στα 4-8 MPa, τέτοιον όπως έναν υπόγειο χώρο αποθήκευσης[16]. Για να αποδοθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, ο συμπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται από το υπόγειο δοχείο, αναμιγνύεται με καύσιμο, προκαλείται

καύση και εκτονώνεται περνώντας μέσα από έναν στρόβιλο. Ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Η θερμότητα που παράγεται συλλαμβάνεται σε ένα θάλαμο ανάκτησης απαιρίων πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 3.19: Τμήματα των CAES [23]

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.19, το σύστημα CAES περιλαμβάνει υπέργεια και υπόγεια τμήματα που συνδυάζουν ανθρώπινη τεχνολογία και φυσικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, έτσι ώστε να δέχονται, να αποθηκεύουν και να αποδίδουν ενέργεια.

Υπάρχουν έξι κύρια τμήματα σε μία βασική εφαρμογή CAES, που συνίστανται από πέντε υπέργεια και ένα υπόγειο[23]:

- Η γεννήτρια, στην οποία είναι ενσωματωμένοι συμπλέκτες, έτσι ώστε να υπάρχει εναλλακτική σύζευξη, είτε με το συμπιεστή είτε με τις συστοιχίες στροβίλων.
- Ο συμπιεστής αέρα, που μπορεί να περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα τμήματα, εναλλάκτες θερμότητας και μεταψύκτες, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία στη συμπίεση και να ελαττώνεται η υγρασία που περιέχεται στο συμπιεζόμενο αέρα.
- Οι συστοιχίες στροβίλων, που περιλαμβάνουν στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης.
- Εξοπλισμός ελέγχου για τη λειτουργία του στροβίλου εκτόνωσης, του συμπιεστή και του βοηθητικού εξοπλισμού και για να εξισορροπεί και να ελέγχει την εναλλαγή από τη διαδικασία παραγωγής στη διαδικασία αποθήκευσης.
- Βοηθητικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει την αποθήκευση και διαχείριση του καυσίμου και μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα για διαφόρους εναλλάκτες θερμότητας που απαιτούνται για την υποστήριξη της λειτουργίας της εφαρμογής.
- Το υπόγειο μέρος του συστήματος είναι κυρίως ο υπόγειος χώρος αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα.

Τα συστήματα CAES είναι σχεδιασμένα να κάνουν ολοκληρωμένο κύκλο λειτουργίας σε ημερήσια βάση και να λειτουργούν αποδοτικά σε καταστάσεις μερικού φορτίου. Αυτή η σχεδίαση, επιτρέπει στις διατάξεις CAES να μεταπηδούν εύκολα από τη λειτουργία παραγωγής ενέργειας στη λειτουργία συμπίεσης αέρα και αντίστροφα. Η μονάδα CAES μπορεί να ξεκινήσει τη λειτουργία της χωρίς την εισαγωγή επιπλέον ενέργειας και μέσα σε λίγα λεπτά να λειτουργεί σε πλήρη ισχύ. Ως αποτέλεσμα, τα CAES έχουν τις παρακάτω λειτουργίες:

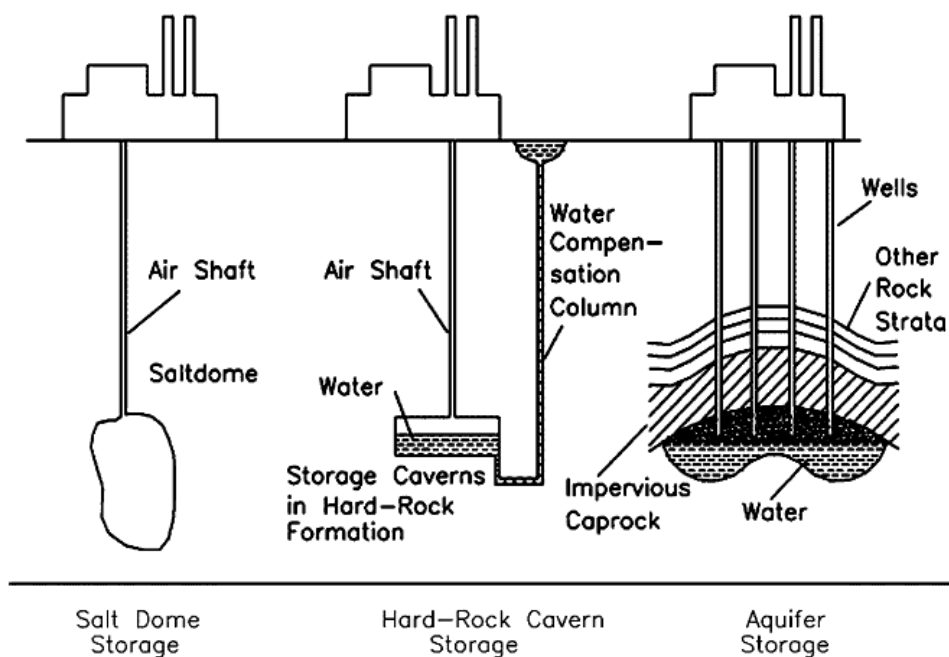
- **Κάλυψη απαιτήσεων αιχμής:** τα συστήματα που επωφελούνται από τα CAES περιλαμβάνουν αυτά που το φορτίο τους διαφέρει σημαντικά κατά τον ημερήσιο κύκλο και αυτά που το κόστος τους διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το επίπεδο παραγωγής ενέργειας ή με τη στιγμή της ημέρας. Λόγω της ανάγκης για οικονομία, είναι σημαντική αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας χαμηλού κόστους σε πιο ακριβές αγορές χαμηλώνοντας έτσι το κόστος κατά την αιχμή του φορτίου.
- **Αντιστάθμιση φορτίου:** οι μονάδες CAES μπορούν να ανταποκριθούν σε αλλαγές φορτίου καθώς είναι σχεδιασμένες να υφίστανται συχνά κύκλους επανεκκίνησης/τερματισμού λειτουργίας.
- **Διαχείριση ενέργειας :** οι μονάδες CAES επιτρέπουν την κάλυψη των απαιτήσεων αιχμής μεταφέροντας την απαίτηση ενέργειας από μία στιγμή της ημέρας σε μία άλλη. Αυτό χρησιμεύει κυρίως στο να μειωθούν οι χρεώσεις που οφείλονται στην απαίτηση ενέργειας κατά την ώρα αιχμής.
- **Ανανεώσιμη ενέργεια:** η σύνδεση των CAES με τις ασταθείς πηγές ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να αυξήσει τη χωρητική ικανότητα και να βελτιώσει τα περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά τους..
- **Ισχύς στην κατάσταση αναμονής:** τα συστήματα CAES θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν ένα συμβατικό σύστημα μπαταρίας παρέχοντας ισχύ κατά την κατάσταση αναμονής, μειώνοντας έτσι το κόστος και το χρόνο κατασκευής και λειτουργίας.

3.2.2 Κατάλληλα εδάφη για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα

Όπως αναφέρθηκε, η αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα επιτυγχάνεται σε υψηλές πιέσεις (40 – 70 bar), και κοντά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος[16]. Οι γεωλογικές τοποθεσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες[24]:

- Κοιλότητες άλατος που σχηματίστηκαν σε αλατορυχεία
- Εδάφη σκληρών βράχων: πρόκειται για κοιλότητες που σχηματίστηκαν με την ανασκαφή σχετικά σκληρών και αδιαπέραστων βραχωδών σχηματισμών.
- Εδάφη πορωδών βράχων όπως σχιστόλιθοι και ψαμόλιθοι: πρόκειται για δεξαμενές υπογείων υδάτων ή εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου ή πετρελαίου.

Οι υπόγειες δεξαμενές υδάτων ειδικά, μπορούν να είναι πολύ ελκυστικές σαν αποθηκευτικοί χώροι επειδή ο συμπιεσμένος αέρας θα αντικαταστήσει το νερό εγκαθιστώντας ένα αποθηκευτικό σύστημα σταθερής πίεσης, ενώ στα εναλλακτικά συστήματα η πίεση μπορεί να ποικίλει όταν προστίθενται ή απελευθερώνεται αέρας.

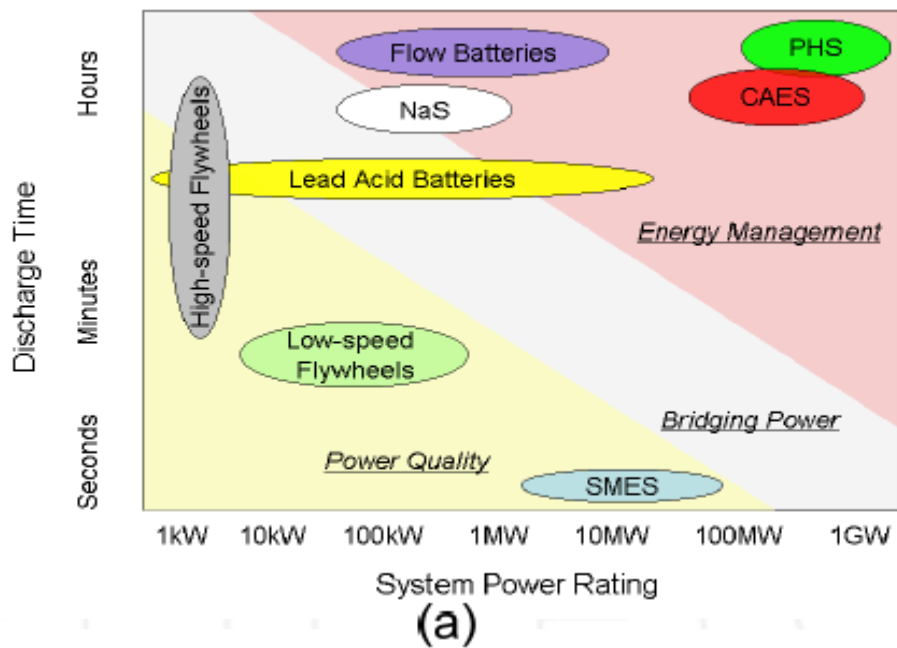


Εικόνα 3.20: κατάλληλες υπόγειες κοιλότητες για αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα[25]

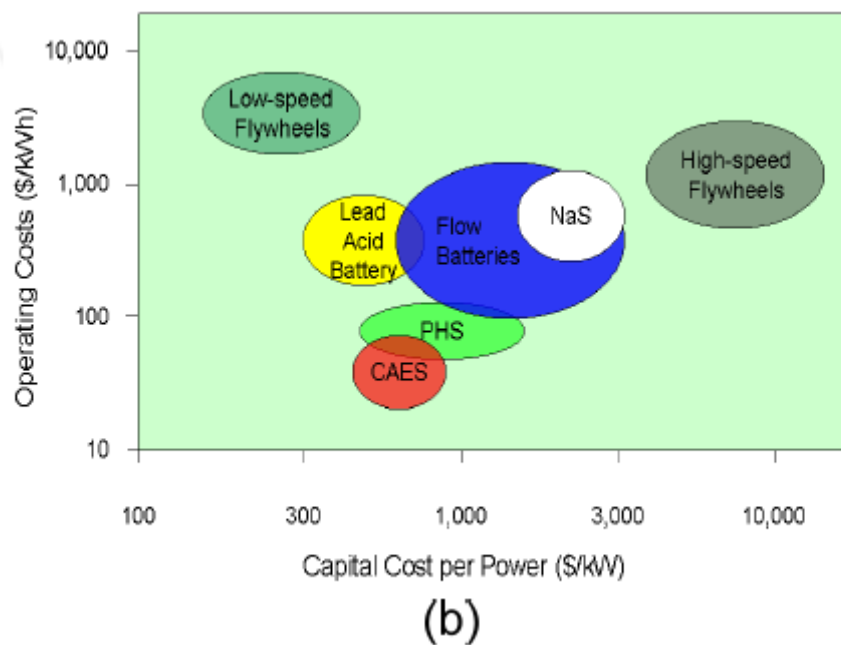
3.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπιεσμένου αέρα

Στις εικόνες 3.21 α) , β) και γ) φαίνεται η σύγκριση των τεχνικών χαρακτηριστικών μεταξύ CAES και άλλων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Όπως φαίνεται τα CAES έχουν μεγάλο χρόνο αποθήκευσης, μικρό κόστος λειτουργίας, αλλά αναλογικά μικρή αποδοτικότητα. Ένα τυπικό CAES :

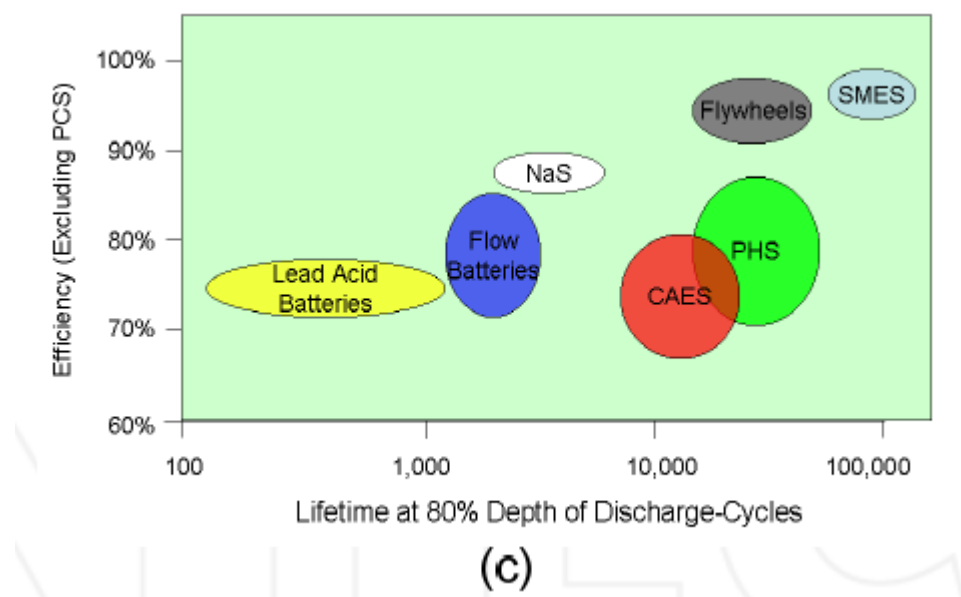
- Μπορεί να αποθηκεύσει 50 έως 300 MW, ενώ τελευταία μπορούν να κατασκευαστούν μηχανές αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα για εγκαταστάσεις αποθήκευσης από 5-350MW. Οι εκτιμήσεις για την αποθηκευτική ικανότητα των CAES , είναι πολύ καλύτερες από ότι για άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, εκτός από την αντλησιοταμίευση.
- Η περίοδος αποθήκευσης είναι επίσης μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες τεχνολογίες, εκτός της αντλησιοταμίευσης, μιας και υπάρχουν πολύ μικρές απώλειες και η αποθήκευση μπορεί να γίνει για πάνω από ένα χρόνο.
- Η τυπική απόδοση ενός συστήματος CAES ποικίλει από 60 έως 80% .
- Το κόστος εγκατάστασης για μία μονάδα CAES διαφέρει ανάλογα με τον υπόγειο χώρο που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση αέρα, αλλά κυμαίνεται συνήθως από 400 έως 800\$ ανά KWh.
- Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα κυμαίνεται από 3-6 Wh/lit ή 0.5-2 W/lit τυπικά.
- Τέλος, η τυπική διάρκεια ζωής κυμαίνεται από 20 έως 40 χρόνια.



Εικόνα 3.21α) : χρόνος αποφόρτισης και αποθηκευτική ικανότητα για κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας [23]



Εικόνα 3.21 β) κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας για κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας [23]



Εικόνα 3.21 γ) : αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής για κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας [23]

3.2.4 Εφαρμογές συστημάτων CAES

Παρόλο που η τεχνολογία αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES) είναι μία ώριμη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας υπάρχουν μόνο δύο μονάδες CAES σε όλον τον κόσμο. Η μία μονάδα βρίσκεται στο Huntorf της Γερμανίας και η άλλη στο McIntosh της Alabama των Η.Π.Α. .

Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τις τεχνολογίες των 100MW, παρ' όλο αυτό δεν μπορούμε να μην αναφέρουμε την παλαιότερη επιτυχημένη μονάδα CAES. Η μονάδα του Huntorf είναι η παλιότερη μονάδα CAES και είναι σε λειτουργία περίπου 35 χρόνια, από το 1978. Πρόκειται για μία μονάδα των 290 MW, με συχνότητα 50Hz, της εταιρίας Nordwestdeutsche Kraftwerke, AG . Το μέγεθος του σπηλαίου που έχει δημιουργηθεί σε ένα θόλο εξόρυξης άλατος μέσω έκπλυσης σε βάθος 600 μέτρων, είναι 310.000 κυβικά μέτρα. Λειτουργεί σε ημερήσιο κύκλο, και χρειάζονται 8 ώρες για να γεμίσει το σπήλαιο. Δεν υπάρχει μεγάλη ευελιξία στη λειτουργία της μονάδας λόγω του μικρού σπηλαίου. Η συμπίεση επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας

συμπιεστών 60 MW , με μέγιστη πίεση 10MPa. Στο πλήρες φορτίο η μονάδα μπορεί να παράγει 290 MW σε δύο ώρες. Από την εγκατάσταση της η μονάδα έχει επιδείξει σημαντική ικανότητα λειτουργίας. Συγκεκριμένα έχει 90% διαθεσιμότητα και 99% αξιοπιστία εκκίνησης. [23]

Η δεύτερη εμπορική μονάδα CAES, που ανήκει στην εταιρία Alabama Energy Cooperative AEC , και είναι εγκατεστημένα στο McIntosh της Alabama, λειτουργεί για πάνω από 20 χρόνια, από το 1991. Η μονάδα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με πίεση έως 7.5 MPa , είναι ένα υπόγειο σπήλαιο, που δημιουργήθηκε σε ένα θόλο εξόρυξης άλατος μέσω έκπλυσης σε βάθος 450 μέτρων. Η ικανότητα αποθήκευσης της μονάδας είναι πάνω από 500.000 κυβικά μέτρα ενώ η ικανότητα παραγωγής είναι 110 MW. Το φυσικό αέριο θερμαίνει τον αέρα που απελευθερώνεται από το σπήλαιο. Ο αέρας αυτός εκτονώνεται μέσω αεριοστρόβιλου παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η φάση παραγωγής μπορεί να διαρκεί 26 ώρες. Τέλος, η μονάδα του McIntosh χρησιμοποιεί προθερμαντήρα για να επαναχρησιμοποιήσει τη θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου, μειώνοντας έτσι κατά 25% την κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με η μονάδα του Huntorf. [23]

Υπάρχουν κάποιες ήδη σχεδιασμένες ή υπό ανάπτυξη εφαρμογές CAES. Από αυτές μία ανταποκρίνεται στις τεχνολογίες 100MW που μελετούνται. Πρόκειται για την υπό σχεδίαση μονάδα στο Markham του Texas. Αυτή η μονάδα συνολικής αποθηκευτικής ικανότητας 540MW, αποτελείται από τέσσερις μονάδες CAES των 135MW με ξεχωριστές συστοιχίες συμπιεστών που τίθενται σε λειτουργία από κινητήρες υψηλής και χαμηλής πίεσης. Και σε αυτή τη μονάδα θα χρησιμοποιηθεί θόλος άλατος σε δοχείο αποθήκευσης. Τέλος, η εταιρία Eskom της Νότιας Αφρικής έχει εκφράσει ενδιαφέρον για την εξερεύνηση των οικονομικών ωφελημάτων από την τοποθέτηση μίας μονάδας CAES σε ένα από τα ολοκληρωμένα της ενεργειακά προγράμματα.[23]

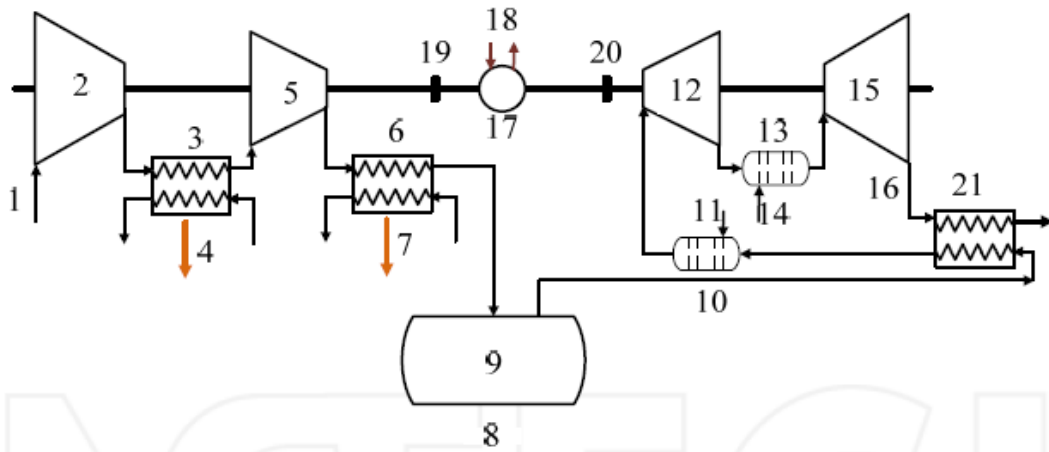
3.2.5 Έρευνα και ανάπτυξη των συστημάτων CAES

Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν δύο εμπόδια στην εγκατάσταση των CAES, η εξάρτηση από την εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας και η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Για να υπερπηδηθούν αυτά τα εμπόδια προτείνονται ή είναι υπό μελέτη και ανάπτυξη κάποια εξελιγμένα συστήματα CAES. Τέτοια είναι τα εξελιγμένα συμβατικά CAES, τα προηγμένα αδιαβατικά CAES (Advanced-Adiabatic CAES-AACAES) . Επιπλέον, υπάρχουν και τα συστήματα CAES μικρής κλίμακας στα οποία δεν θα αναφερθούμε καθώς αναφέρονται σε αποθηκευτική ικανότητα μικρότερη των 10MW.

3.2.5.1 Εξελιγμένα συμβατικά CAES

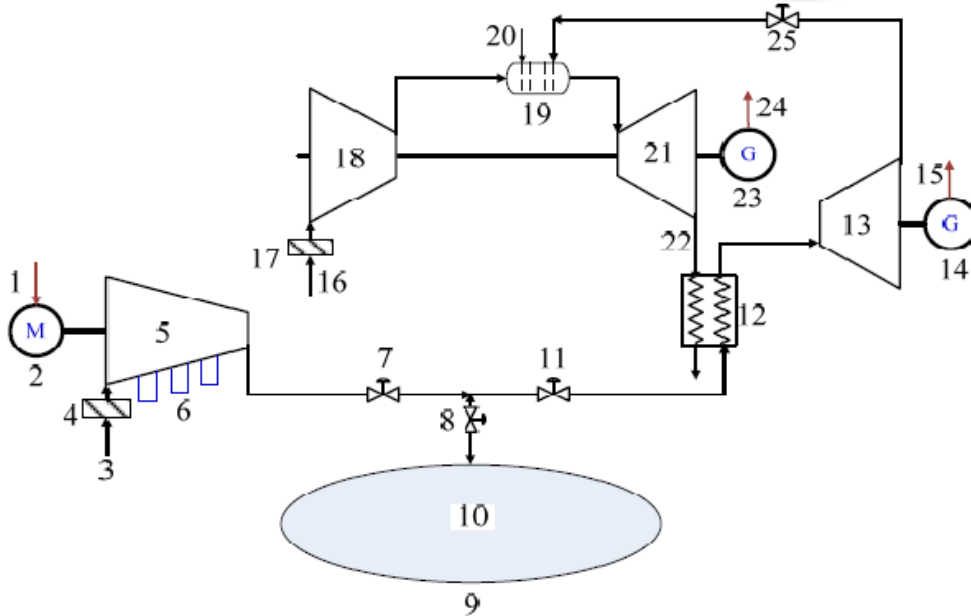
Στην εικόνα 3.22 φαίνεται ένα εξελιγμένο συμβατικό σύστημα CAES. Η διαφορά του με το σύστημα στην εικόνα 3.19 είναι ότι υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας και μεταψύκτες στη φάση της συμπίεσης, αναθερμαντήρας ανάμεσα στις βαθμίδες του στροβίλου, και ανακομιστήρας θερμότητας που προθερμαίνει το συμπιεσμένο αέρα με τη βοήθεια των καυσαερίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνει η μονάδα του McIntosh μείωση κατά 25% της κατανάλωσης καυσίμου.

Ένα άλλο εξελιγμένο συμβατικό σύστημα CAES συνδυασμένο με αεριοστρόβιλο φαίνεται στην εικόνα 3.23. Όταν η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλή, ο συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε υπόγειες κοιλότητες ή υπέργειους ταμιευτήρες. Κατά την περίοδο υψηλής ζήτησης το CAES φορτίζει το δίκτυο ταυτόχρονα με τον αεριοστρόβιλο. Ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου. Στη συνέχεια ο πλέον θερμασμένος συμπιεσμένος αέρας εκτονώνεται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης και έπειτα εγχέεται στο στρόβιλο του αεριοστρόβιλου και έτσι αναμιγνύεται με το εργαζόμενο μέσο του αεριοστρόβιλου. Το σύστημα της εικόνας μπορεί κατά αυτόν τον τρόπο να ανακτήσει σχεδόν 70% της ενέργειας συμπίεσης.



1.Air, 2 and 5.Compressor, 3 and 6.Heat Exchanger, 4 and 7. Heat, 8.Reservoir, 9.Compressed Air, 10 and 13.Combustor, 11 and 14.Fuel, 12 and 15.Turbine, 16.Exhaust, 17.Motor/Generator, 18.Electricity, 19 and 20.Clutch, 21.Recuperator

Εικόνα 3.22: Διάταξη CAES που κάνει χρήση της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων για την προθέρμανση του αέρα [23]

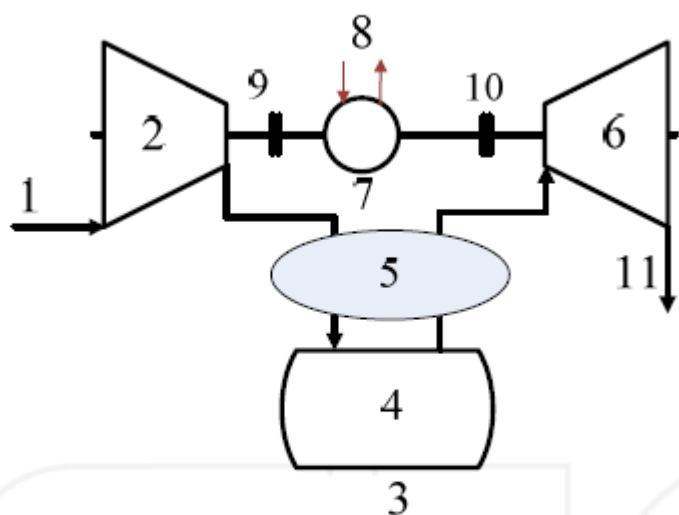


1 15 and 24.Electricity, 2.Motor, 3 and 16.Air, 4 and 17.FILtEr, 5 and 18.Compressor, 6.Intercooler, 7 8 11 And 25.Valve, 9.Underground Cavern, 10.Compressed Air, 12.Recuperator, 13 and 21 Turbine, 14 and 23 Generator, 19.Combustor, 20.Fuel, 22.Exhaust

Εικόνα 3.23: διάταξη CAES που συνεργάζεται με αεριοστρόβιλο [23]

3.2.5.2 Προηγμένα αδιαβατικά CAES (Advanced Adiabatic CAES-AACAES)

Το σύστημα AACAES αποθηκεύει τη δυναμική και τη θερμική ενέργεια ξεχωριστά και τις ανακτά κατά τη φάση της εκτόνωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.24. Αν και το κόστος είναι από 20 έως 30% μεγαλύτερο από αυτό ενός συμβατικού CAES, με αυτό το σύστημα αφαιρείται ο θάλαμος καύσης και δεν γίνεται χρήση ορυκτού καυσίμου[23]. Τα AACAES μπορεί να είναι βιώσιμα εμπορικά εφόσον η αποθήκευση θερμικής ενέργειας και η τεχνολογία συμπιεστή – στροβίλου αναπτύσσεται.



- 1.Air, 2.Compressor, 3.Storage Reservoir,
4.Compressed Air, 5.Thermal Energy Storage,
6.Turbine, 7.Motor/Generator, 8.Electricity, 9 and
10.Clutch, 11.Exhaust

Εικόνα 3.24: διάταξη AACAES [23]

3.2.6 Ανάλυση S.W.O.T. για τα συστήματα CAES

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα (Strengths), τα μειονεκτήματα (Weaknesses), τις ευκαιρίες (Opportunities) για την τεχνολογία και τέλος τις απειλές για την αντικατάσταση της από άλλες τεχνολογίες (Threats).

Στα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα περιλαμβάνεται ο μεγάλος χρόνος αποθήκευσης, που μπορεί όπως είπαμε και παραπάνω να ξεπεράσει το ένα χρόνο, πράγμα που ισχύει μόνο για αυτήν την τεχνολογία και για την αντλησιοταμίευση. Επιπλέον η μονάδα CAES έχει μικρότερο αναλογικά κόστος λειτουργίας από κάθε άλλη τεχνολογία συμπεριλαμβανόμενης και της αντλησιοταμίευσης. Τέλος, πρόκειται για μία ώριμη τεχνολογία που διατίθεται εμπορικά εδώ και δεκαετίες, άρα υπάρχει η ανάλογη τεχνογνωσία και έρευνα και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, τυπικά 20 έως 40 χρόνια.[23]

Το μεγαλύτερο εμπόδιο για την εγκατάσταση των CAES είναι η εξάρτηση από την κατάλληλη τοποθεσία (σπήλαια). Άρα τα συστήματα CAES είναι οικονομικά εφικτά για μονάδες ενέργειας που βρίσκονται κοντά σε ορυχεία, σπήλαια άλατος, υδροφόρους ορίζοντες ή εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου. Σε σύγκριση με την αντλησιοταμίευση και άλλες μορφές αποθήκευσης ενέργειας, τα CAES δεν είναι αυτόνομα συστήματα και πρέπει να συνδεθούν με μονάδα αεριοστρόβιλου, άρα εξαρτώνται από την καύση ορυκτού καυσίμου. Κατά αυτόν τον τρόπο, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνεργασία με άλλες μονάδες ενέργειας όπως πυρηνικές μονάδες, αιολικά πάρκα ή μονάδες φωτοβολταϊκών, είναι απαραίτητη και η καύση φυσικού αερίου. Επιπλέον, η καύση ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε εκπομπές ρυπαντών, όπως τα οξείδια του αζώτου και το μονοξείδιο του άνθρακα που καθιστούν την τεχνολογία CAES λιγότερο ελκυστική.

Πολλά μη συμβατικά συστήματα CAES προτείνονται ή είναι υπό μελέτη, όπως τα προηγμένα αδιαβατικά CAES με θερμική αποθήκευσης ενέργειας, τα εξελιγμένα CAES, όπως εκείνο του McIntosh, και τα CAES μικρής κλίμακας με την κατασκευή μικρών δοχείων. Όπως και στην αντλησιοταμίευση, ο φόβος της κοινής γνώμης λόγω διαφόρων ατυχημάτων που έχουν συμβεί στις λιγνιτικές μονάδες παραγωγής, οδηγεί στη στροφή σε εναλλακτικές λύσεις όπως η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα. Τέλος, η κύρια αντίπαλος τεχνολογία είναι εκείνη της αντλησιοταμίευσης, η οποία όμως έχει

περιορισμούς που οφείλονται στην κατάλληλη τοποθεσία, διαφορετικούς από αυτούς της αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

Όσον αφορά τις απειλές αντικατάστασης από άλλες τεχνολογίες, υπάρχουν πολλές και ισχυρές υποκατάστατες τεχνολογίες. Η αντλησιοταμίευση είναι η κυριότερη, μιας που είναι ώριμη τεχνολογία και έχει αποθηκευτική ικανότητα μεγαλύτερη αυτής των CAES. Επιπλέον, υπάρχουν οι μπαταρίες, οι υπεραγωγίμοι πυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου, που έχουν διαφορετική αποθηκευτική ικανότητα η κάθε μία και σίγουρα μικρότερη των CAES, αλλά επειδή γίνεται ισχυρή έρευνα πάνω σε αυτές τις νεώτερες τεχνολογίες ενδεχομένως στο μέλλον θα βελτιώσουν την αποθηκευτική τους ικανότητα.

STRENGTHS	WEAKNESSES
Μεγάλος χρόνος αποθήκευσης	Εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα
Μικρό κόστος λειτουργίας	Εξάρτηση από κατάλληλη τοποθεσία
Ωριμη τεχνολογία	Μη δυνατότητα χρήσης ενέργειας που προέρχεται αποκλειστικά από ΑΠΕ
Μεγάλη διάρκεια ζωής	
OPPORTUNITIES	THREATS
Προηγμένες τεχνολογίες CAES	Ισχυρά και ώριμα υποκατάστατα
Φόβος κοινής γνώμης για συμβατικές μονάδες (ατυχήματα)	Έρευνα υποκατάστατων τεχνολογιών
Περιορισμοί τοποθεσίας της αντλησιοταμίευσης	

Πίνακας 3.8: ανάλυση S.W.O.T για τα συστήματα CAES

Κεφάλαιο 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Με σκοπό τη μελέτη και την αξιολόγηση κάθε διαφορετικής τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μελετώνται τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιλεγεί η τεχνολογία που θα φέρει τη βέλτιστη εκμετάλλευση της ενέργειας σε κάθε εφαρμογή.

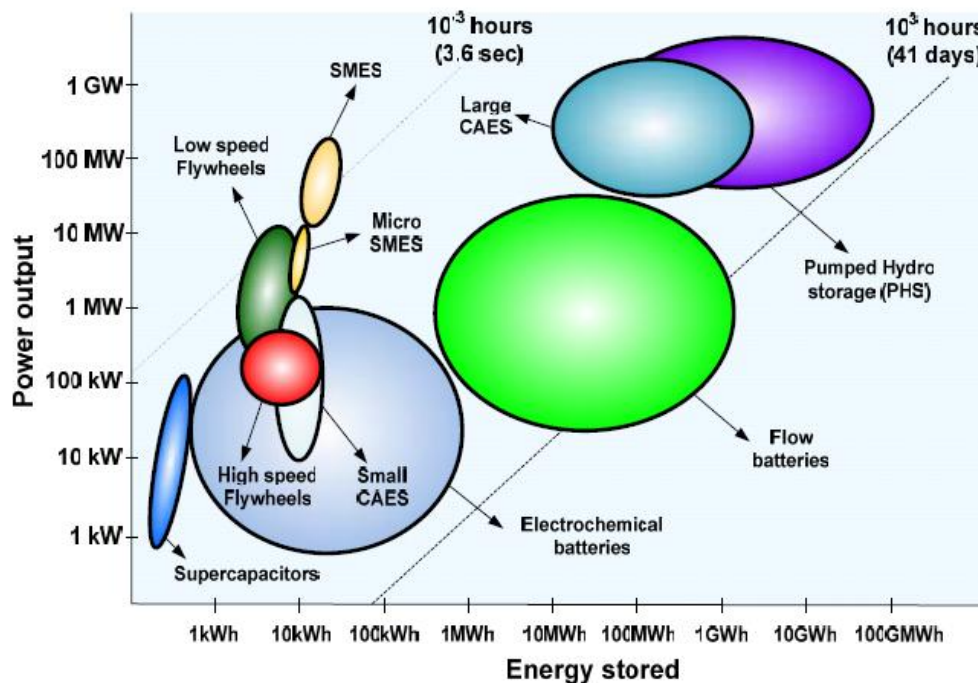
4.1 Διαθέσιμη/ ονομαστική ισχύς

Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι ενδεικτική του μεγέθους και της δομής του ηλεκτροκινητήρα στην αλυσίδα αποθήκευσης της ενέργειας. Γενικά εκφράζεται ως μία μέση τιμή, καθώς επίσης και ως μία μέγιστη τιμή, η οποία χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τη μέγιστη ισχύ φόρτισης ή αποφόρτισης $P_{\max}(w)$. Πρόκειται για την ισχύ που αποδίδει ο υδροστρόβιλος στην γεννήτρια στην περίπτωση της αντλησιοταμίευσης και ο αεριοστρόβιλος στην γεννήτρια στην περίπτωση του συμπιεσμένου αέρα.

4.2 Αποθηκευτική ικανότητα-Χωρητικότητα

Η συγκεκριμένη ποσότητα εκφράζει την ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας μετά την φόρτιση. Η αποφόρτιση είναι συχνά ατελής για αυτό η αποθηκευτική ικανότητα ορίζεται βάσει της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας W_{st} , η οποία είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που ανακτάται στην πραγματικότητα W_{ut} . Σε συνθήκες γρήγορης φόρτισης ή αποφόρτισης, η απόδοση μειώνεται σημαντικά και η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από την χωρητικότητα του συστήματος. Στην τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης η χωρητικότητα αφορά την ποσότητα νερού του άνω ταμιευτήρα, η οποία αφού απελευθερωθεί θα αποδώσει τις αντίστοιχες μεγκαβατώρες (MWh). Κατά τον ίδιο τρόπο, η χωρητικότητα στην

τεχνολογία αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα αφορά την ποσότητα του συμπιεσμένου αέρα που έχει συμπιεστεί.



Εικόνα 4.1: Συσχέτιση διαθέσιμης ισχύς με τη χωρητικότητα κάθε τεχνολογίας [26]

4.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μεταφοράς ισχύος

Η αποθήκευση ενέργειας είναι μία αργή διαδικασία η οποία πρέπει να απελευθερώσει γρήγορα την απαιτούμενη ενέργεια. Η ισχύς εξόδου μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας για το ρυθμό μετάδοσης ισχύος. Αυτός ο ρυθμός μεταφοράς ισχύος καθορίζει το χρόνο που χρειάζεται για να εξαχθεί η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί. Είτε πρόκειται για την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης είτε για την τεχνολογία αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, η ισχύς πρέπει να είναι διαθέσιμη τις ώρες αιχμής, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται εάν είναι σημαντική, είναι αντιπροσωπευτική ενός μη βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος ή ένα θεμελιώδες όριο της μονάδας αποθήκευσης.

4.4 Αποδοτικότητα

4.4.1 Αποδοτικότητα αποφόρτισης

Πρόκειται για το λόγο της ενέργειας που απελευθερώνεται προς την αποθηκευμένη ενέργεια:

$$n = \frac{W_{ut}}{W_{st}} \quad (4.1)$$

Ο παραπάνω ορισμός είναι υπεραπλουστευμένος καθώς προκύπτει βάσει ενός μόνο σημείου λειτουργίας της εγκατάστασης. Επιπλέον, τα συστήματα έχουν απώλειες φόρτισης, έλλειψης φορτίου και αυτό-αποφόρτισης. Πρέπει, λοιπόν, ο ορισμός της αποδοτικότητας να βασιστεί σε ένα ή περισσότερους κύκλους λειτουργίας για μία εφαρμογή. Επιπλέον, η αποδοτικότητα ποικίλλει ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης. Η στιγμιαία ισχύς είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποδοτικότητα του συστήματος. Για να είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ανταγωνιστικό πρέπει να έχει γενικά καλή αποδοτικότητα. Δηλαδή, για βέλτιστη λειτουργία, η αλυσίδα μεταφοράς ισχύος πρέπει να έχει περιορισμένες απώλειες όσο αφορά στη μεταφορά ενέργειας και την αυτό-αποφόρτιση. Αυτό το μέτρο της διατήρησης ενέργειας είναι σημαντικό στοιχείο για εφαρμογές δικτύων αντιστάθμισης φορτίου σε καθημερινή βάση.

4.4.2 Αποδοτικότητα κύκλου

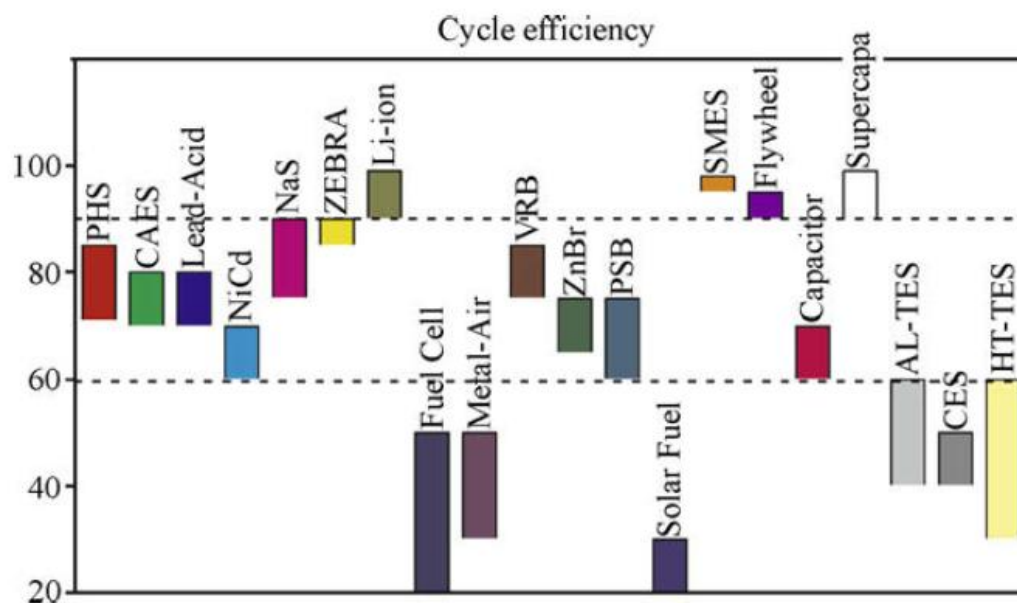
Η συγκεκριμένη παράμετρος αφορά την αποδοτικότητα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ένα πλήρη κύκλο φόρτισης- αποφόρτισης, χωρίς να περιλαμβάνονται οι απώλειες αυτό-αποφόρτισης οι οποίες θα αναφερθούν παρακάτω.

Παρατηρείται από το παρακάτω σχήμα, ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες βάσει της αποδοτικότητας τους σε ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας:

α) Πολύ υψηλής αποδοτικότητας : Μαγνητικοί υπεραγωγοί-SMES, υπέρ-πυκνωτές και μπαταρίες ιόντος λιθίου(Li-ion) με αποδοτικότητα κύκλου μεγαλύτερη του 90%.

β) Υψηλής αποδοτικότητας: συστήματα αντλησιοταμίευσης-PHS, συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα-CAES, μπαταρίες εκτός από εκείνες ιόντος –λιθίου και πυκνωτές με αποδοτικότητα κύκλου 60-90%. Παρατηρείται ότι η αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπίεσης και εκτόνωσης του αέρα μέσω των συστημάτων CAES είναι λιγότερο αποδοτική από ότι η άντληση και απελευθέρωση του νερού με χρήση συστημάτων PHS, καθώς η ταχεία συμπίεση και εκτόνωση του αέρα αυξάνει τη θερμοκρασία του, καθιστώντας έτσι τη περαιτέρω συμπίεση περισσότερο δαπανηρή ως προς την ενέργεια.

γ) Χαμηλής αποδοτικότητας: συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω υδρογόνου, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες αέρα-μετάλλου, συστήματα ηλιακού καυσίμου, αποθήκευση θερμικής ενέργειας και κρυογονική αποθήκευση ενέργειας με αποδοτικότητα μικρότερη του 60%.



Εικόνα 4.2 : Όρια αποδοτικότητας κύκλου κάθε τεχνολογίας [27]

Τέλος, σημειώνεται ότι το κόστος κεφαλαίου μπορεί να αντισταθμίσει την αποδοτικότητα κύκλου και το αντίστροφο, έως κάποιο σημείο. Για παράδειγμα, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με χαμηλό κόστος εγκατάστασης αλλά και χαμηλή αποδοτικότητα μπορεί να είναι ανταγωνιστικότερο από ένα σύστημα με υψηλή αποδοτικότητα κύκλου αλλά και υψηλό κόστος εγκατάστασης.

4.5 Χρόνος αποφόρτισης

Η συγκεκριμένη παράμετρος αντιστοιχεί στη διάρκεια αποφόρτισης της μέγιστης ισχύος και υπολογίζεται ως:

$$\tau(s) = \frac{W_{st}}{P_{max}} \quad (4.2)$$

Εξαρτάται από το βάθος αποφόρτισης και από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, ανάλογα με το αν η ισχύς είναι σταθερή ή όχι. Για κάποιες εφαρμογές, ο χρόνος αποφόρτισης αποτελεί χαρακτηριστικό για την επάρκεια του συστήματος. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης, η αποθηκευτική ικανότητα εξαρτάται από τον όγκο του νερού και το ύψος της υδατόπτωσης, ενώ η μέγιστη

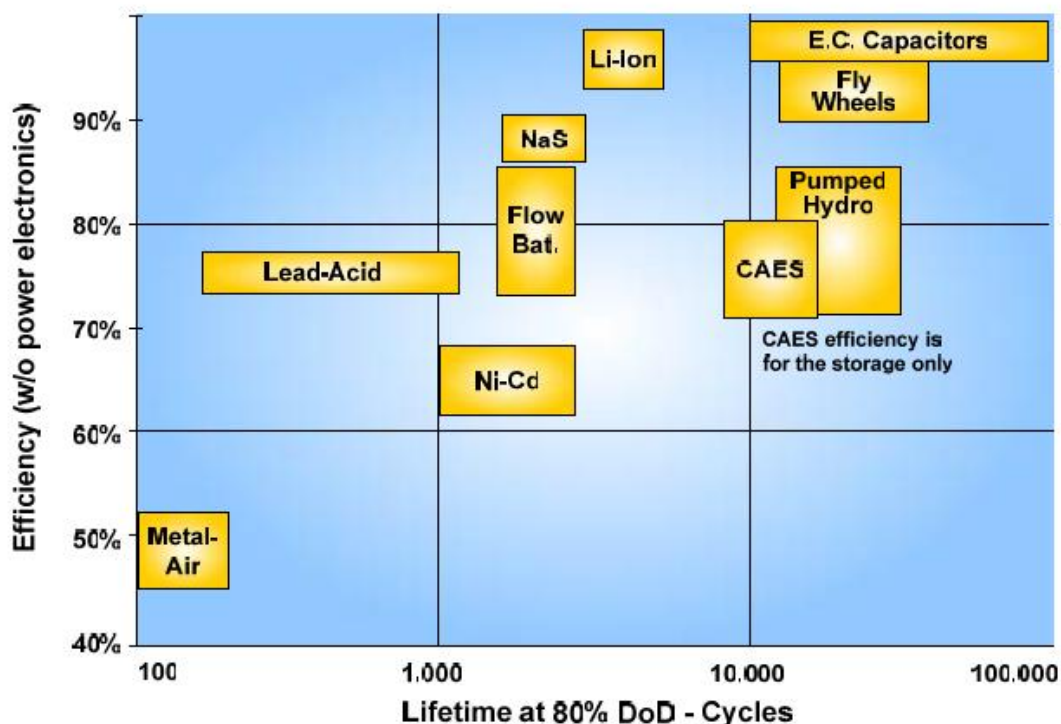
ισχύς καθορίζεται από το μέγεθος των αγωγών και την ισχύ της αντιστρέψιμης στροβιλομηχανής. Αντίστοιχα συμβαίνει και με το σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Η δυσκολία στο διαχωρισμό των διαστάσεων της ισχύος και της ενέργειας του συστήματος καθιστά δύσκολη την επιλογή της βέλτιστης χρονικής σταθεράς για τις περισσότερες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.

4.6 Διάρκεια της αποθήκευσης και αυτό-αποφόρτιση

Η διάρκεια της αποθήκευσης, τόσο στα συστήματα αντλησιοταμίευσης όσο και στα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, είναι μεγάλη, καθώς ο βαθμός αυτό-αποφόρτισης αυτών των συστημάτων είναι πολύ μικρός. Ως αυτό-αποφόρτιση ορίζεται το ποσοστό της ενέργειας που ήταν αρχικά αποθηκευμένη και που έχει διαφύγει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα που δεν χρησιμοποιήθηκε. Στα συστήματα αντλησιοταμίευσης η ποσότητα ενέργειας που χάνεται λόγω αυτό-αποφόρτισης, συνήθως έχει να κάνει με την φυσική εξάτμιση του νερού των ταμιευτήρων, ενώ στα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα έχει να κάνει με τη διαφυγή αέρα από τις ειδικές κοιλότητες.

4.7 Κύκλοι ζωής- Ανθεκτικότητα

Ως ανθεκτικότητα αναφέρεται το πόσες φορές η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να απελευθερώσει την ποσότητα ενέργειας για την οποία ήταν σχεδιασμένη, μετά από κάθε φόρτιση, εκφρασμένη ως τον μέγιστο αριθμό κύκλων n . Ο ένας κύκλος αναφέρεται σε μία πλήρη φόρτιση και αποφόρτιση.



Εικόνα 4.3: Απεικόνιση της ανθεκτικότητας κάθε τεχνολογίας [26]

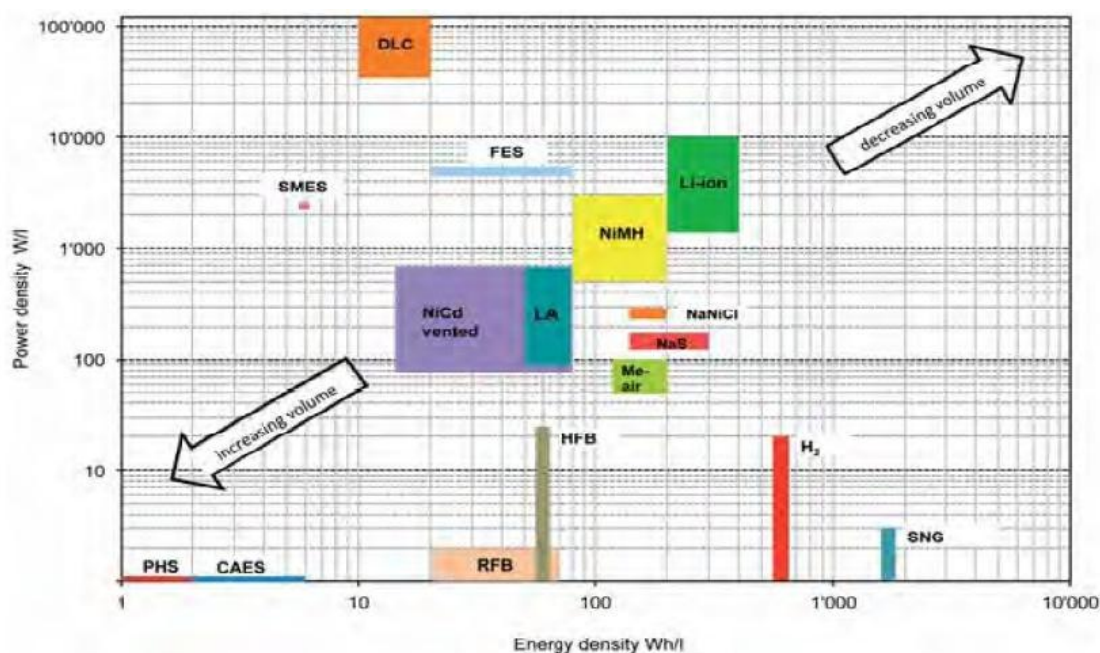
4.8 Χρόνος απόκρισης

Πρόκειται για το χρονικό διάστημα μεταξύ της ζήτησης ενέργειας από το σύστημα και της απόδοσης της σε αυτό.

4.9 Πυκνότητα ισχύος και ενεργειακή πυκνότητα

Η πυκνότητα ισχύος (W/Kg ή W/Lt) είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου διαιρεμένη με τον αποθηκευτικό όγκο της μονάδας. Η ενεργειακή πυκνότητα υπολογίζεται ως το πηλίκο της αποθηκευμένης ενέργειας προς τον αποθηκευτικό όγκο της μονάδας. Ο όγκος της αποθηκευτικής μονάδας είναι ο όγκος όλου του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας, τα διάφορα εξαρτήματα και τις βοηθητικές δομές καθώς και το σύστημα μετατροπής.

Κεφάλαιο 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 4.3: Συσχέτιση ενεργειακής πυκνότητας και πυκνότητας ισχύος [28]

4.10 Ειδική ενέργεια

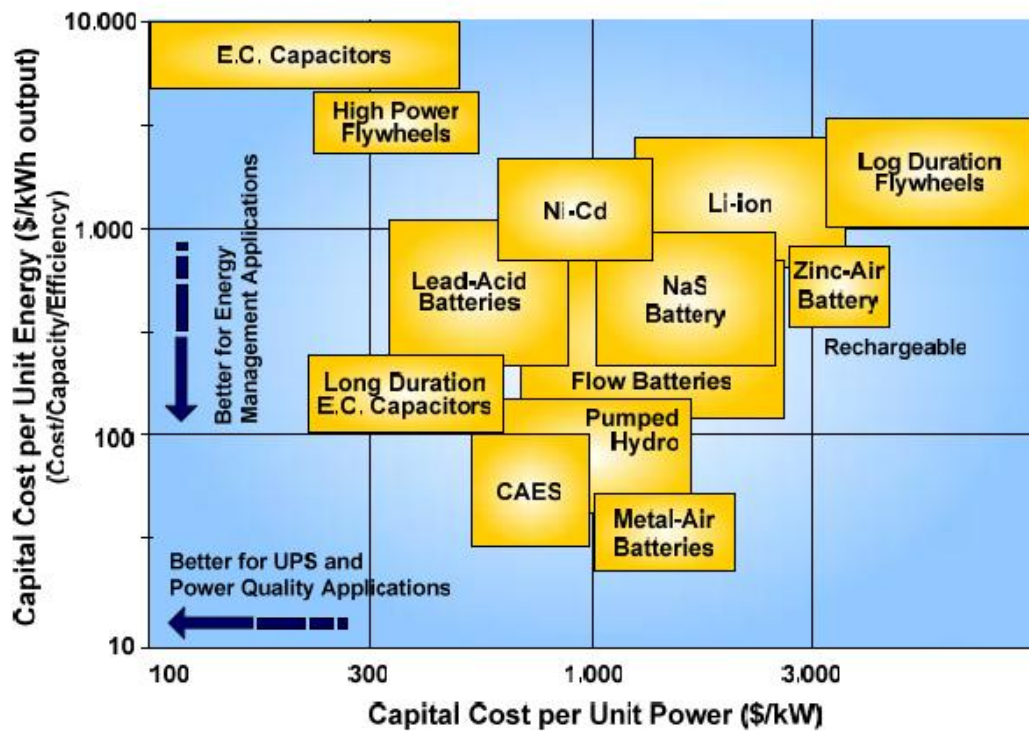
Η ειδική ενέργεια ορίζεται ως η αποθηκευμένη ενέργεια διαιρεμένη με τη μάζα του αποθηκευτικού μέσου, τον αέρα για την αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα και το νερό για την αντλησιοταμίευση. Εκφράζεται σε Wh/ Kg.

4.11 Κόστος κεφαλαίου

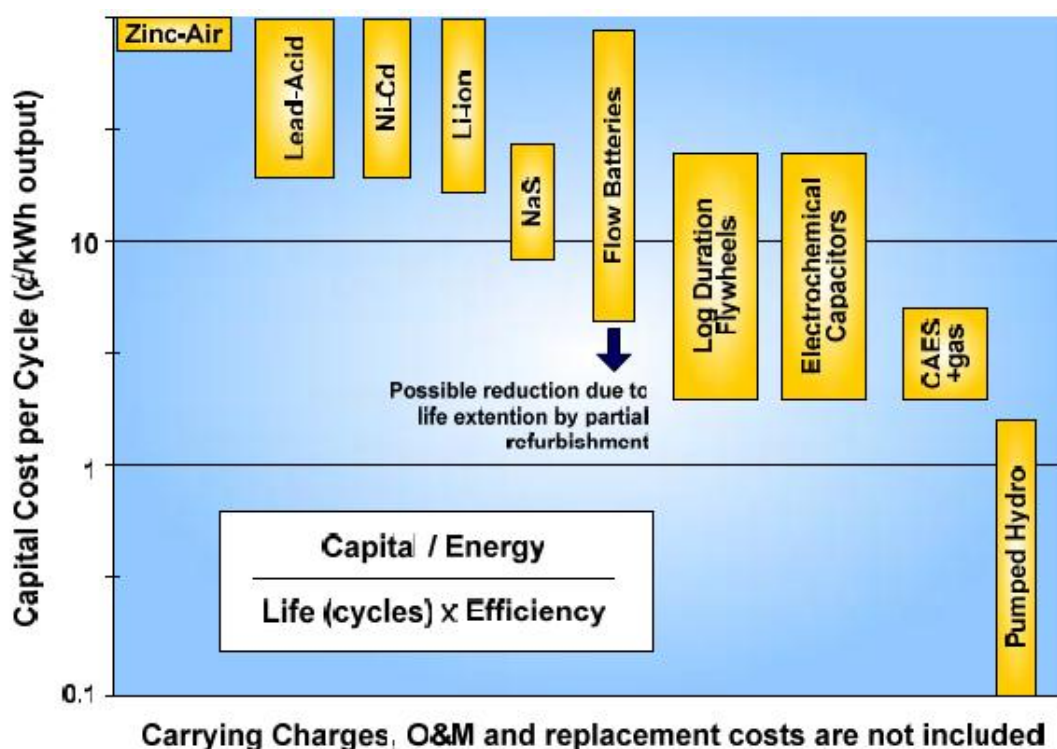
Το κόστος κεφαλαίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη βιομηχανική ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Εκφράζεται ως κόστος/KW ή κόστος/KWh ή κόστος/(KWh)(κύκλο). Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαιρείται με την αποδοτικότητα κύκλου της εκάστοτε τεχνολογίας, έτσι ώστε να προκύψει το κόστος ανά μονάδα 'χρήσιμης' ενέργειας. Το κόστος κύκλου ορίζεται ως το κόστος ανά μονάδα ενέργειας προς τους κύκλους ζωής και αποτελεί έναν από τους καλύτερους τρόπους αξιολόγησης του κόστους της αποθήκευσης ενέργειας, σε μία εφαρμογή με συχνή φόρτιση εκφόρτιση, όπως αυτή της αντιστάθμισης φορτίου. Επιπλέον, υπάρχει το κόστος λειτουργίας και

Κεφάλαιο 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

συντήρησης, που αφορά για παράδειγμα αφαίρεση και αντικατάσταση κάποιου τμήματος της εγκατάστασης και άλλα έξοδα της ιδιοκτήτριας εταιρείας.



Εικόνα 4.4: Κόστος επένδυσης ανά μονάδα ενέργειας και ισχύος κάθε τεχνολογίας [26]



Εικόνα 4.5: Κόστος κεφαλαίου ανά κύκλο [26]

4.12 Τεχνική ωριμότητα

Η τεχνική ωριμότητα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Ωριμες τεχνολογίες: Η αντλησιοταμίευση και η τεχνολογία μπαταριών μολύβδου-οξέως είναι ώριμες και χρησιμοποιούνται για πάνω από 100 χρόνια.
- 2) Αναπτυγμένες τεχνολογίες: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, νατρίου-θείου, Zebra λιθίου-ιόντος, οι μπαταρίες ροής, οι μαγνητικοί υπεραγώγοι, οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές, συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας και υδροφόρα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Όλες αυτές οι τεχνολογίες είναι τεχνικά ανεπτυγμένες και εμπορικά διαθέσιμες. Παρόλα αυτά στην πράξη, αυτές οι εφαρμογές ειδικά για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας δεν είναι ακόμα διαδεδομένες. Η ανταγωνιστικότητα και η αξιοπιστία τους, χρειάζονται περισσότερες δοκιμές από τη βιομηχανία ηλεκτρισμού και την αγορά.

3) Αναπτυσσόμενες τεχνολογίες: Εδώ, ανήκουν οι κυψέλες καυσίμου, οι συσσωρευτές αέρα-μετάλλου, το ηλιακό καύσιμο και η κρυογονική αποθήκευση ενέργειας. Πρόκειται για τεχνολογίες που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, είναι τεχνικά ανώριμες, οι οποίες όμως μπορούν να εφαρμοσθούν και έχουν ερευνηθεί από πολλά ιδρύματα. Από την άλλη πλευρά αυτές οι τεχνολογίες είναι πολλά υποσχόμενες βιομηχανικά στο άμεσο μέλλον. Τα ενεργειακά κόστη και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες είναι κύριοι λόγοι στροφής προς αυτές τις τεχνολογίες.

4.13 Επίδραση στο περιβάλλον

Οι επιδράσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον συγκρίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Παρατηρείται ότι το ηλιακό καύσιμο και η κρυογονική αποθήκευση ενέργειας έχουν θετική επίδραση στο περιβάλλον. Η αποθήκευσή ενέργειας με ηλιακό καύσιμο χρησιμοποιεί μόνο ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, την ηλιακή για να παραχθεί ενέργεια και την αποθήκευση σε «πράσινη» μορφή καυσίμου, όπως γίνεται με το υδρογόνο. Η χρήση ηλιακού καυσίμου μπορεί να μειώσει την καύση ορυκτών καυσίμων και ως εκ τούτου είναι φιλική προς το περιβάλλον. Το κρυογονικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μειώσει τους ρύπους στον αέρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της υγροποίησης (φόρτιση), το οποίο βοηθάει να μετριαστούν τα αρνητικά περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία συσχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων. Ανεπιθύμητα αερομεταφερόμενα σωματίδια μπορούν να αφαιρεθούν κατά τη διάρκεια παραγωγής υγρού αέρα. Η αντλησιοταμίευση, τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής, οι κυψέλες καυσίμου και η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον για διαφορετικούς λόγους το καθένα. Η κατασκευή των συστημάτων αντλησιοταμίευσης αναπόφευκτα περιλαμβάνει κοπή δέντρων και καταστροφή πράσινων εκτάσεων για τη δημιουργία ταμιευτήρων. Η κατασκευή δεξαμενών είναι πιθανό να αλλάξει το τοπικό οικοσύστημα, κάτι το οποίο έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα βασίζονται σε συμβατική τεχνολογία στροβίλων καυσίμων και περιλαμβάνει καύση ορυκτού καυσίμου, ως εκ τούτου οι εκπομπές αποτελούν λόγο περιβαλλοντικής

Κεφάλαιο 4 – Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

ανησυχίας. Οι μπαταρίες παράγουν τοξικά απόβλητα τα οποία παραμένουν και επηρεάζουν το περιβάλλον σε βάθος χρόνου. Το ίδιο συμβαίνει με τις μπαταρίες ροής και τις μεγάλες με τις μπαταρίες ροής και τις κυψέλες καυσίμου. Όσον αφορά στην τεχνολογία υπεραγωγίων πυκνωτών αποθήκευσης ενέργειας, το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό θέμα είναι τα ισχυρά μαγνητικά πεδία, τα οποία μπορεί να είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν σχετικά μικρή επίδραση στο περιβάλλον καθώς δεν περιλαμβάνουν καύση ορυκτών καυσίμων, καταστροφή πράσινων εκτάσεων και τοξικά απόβλητα.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συγκεντρώνονται στους παρακάτω πίνακες:

Χαρακτηριστικά/ Μέθοδος αποθήκευσης	PHS	CAES
Διαθέσιμη ισχύς(MW)	100-5000 [27] <400 [1]	5-300 [27] <300 [1]
Χωρητικότητα (MWh)	500-8000 [1]	<1000 [1]
Αποδοτικότητα κύκλου	70-87% [1]	42-54% [1] 26-82% [29]
Αποδοτικότητα αποφόρτισης	~87% [1]	~70-79% [1]
Χρόνος απόκρισης	Λεπτά [1]	Λεπτά [1]
Χρόνος αποφόρτισης	1-24hr + [27]	1-24hr + [27]
Αυτό-αποφόρτιση	Πολύ μικρή [27]	Μικρή [27]
Διάρκεια αποθήκευσης	Μήνες-χρόνια [27]	Μήνες-χρόνια [27]
Χρόνος ζωής (χρόνια)	40-60 [27]	20-40 [27]
Κύκλοι (αριθμός κύκλων)	ζωής 10.000-30.000 [1]	8.000-12.000 [1]

Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά για τις τεχνολογίες της αντλησιοταμίευσης και της αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Χαρακτηριστικά/Μέθοδος αποθήκευσης		PHS	CAES
Κόστος κεφαλαίου	\$/kW	600-2000 [27]	400-800 [27]
		2500-4300 [1]	2000-4000 [1]
	\$/kWh	5-100 [27]	2-50 [27]
10-12 [1]		2-120 [1]	
	€/kWh-ανά κύκλο	0.1-1.4 [27]	2-4 [27]
Ειδική ενέργεια	Wh/kg	0.5-1.5 [27]	30-60 [27]
Ενεργειακή πυκνότητα	Wh/lit	0.5-1.5[27]	3-6 [27]
			1-2 [1]
Πυκνότητα ισχύος	W/lit	0.5-1.5 [27]	0.5-2 [27]
Επίδραση στο περιβάλλον		Αρνητική	Αρνητική
Τεχνική ωριμότητα		Ωριμη	Εμπορευματοποιημένη

Πίνακας 4.2 Άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά για τις τεχνολογίες της αντλιοσταμίου και της αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης θα γίνει ανάλυση και σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της μεθόδου της αντλησιοταμίευσης και της αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα ως προς τις απώλειες ενέργειας και ισχύος σε ένα πλήρη κύκλο φόρτισης και αποφόρτισης των αντίστοιχων μονάδων.

Προκειμένου να αξιολογηθεί μία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, η μελέτη της αποδοτικότητας σε ένα πλήρη κύκλο, από την είσοδο της ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και την έξοδο αυτής, είναι απολύτως αναγκαία. Οποιοσδήποτε τύπος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μία απλή μπαταρία, με τη μόνη διαφορά να έγκειται στον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση. Στην προσπάθεια να επιτευχθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη απόδοση είναι αναγκαίο οι απώλειες να περιορίζονται. Στο μοντέλο της μπαταρίας, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες, η απόδοση της μπαταρίας ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{sc} = \eta_{ch} \times \eta_{st} \times \eta_{dis}$$

Όπου: η_{sc} είναι η αποδοτικότητα κύκλου,

η_{ch} είναι ο βαθμός απόδοσης της φόρτισης,

η_{st} είναι ο βαθμός απόδοσης της αποθήκευσης,

η_{dis} είναι ο βαθμός απόδοσης της αποφόρτισης.

Κατά αυτόν τον τρόπο η απόδοση της μπαταρίας προκύπτει από τις απώλειες σε κάθε ένα από τα τρία παραπάνω στάδια.

5.1 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης- Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο της μελέτης τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω της αντλησιοταμίευσης έχουν αποδοτικότητα κύκλου που κυμαίνεται από 70 έως 87%. Οι απώλειες που παρουσιάζονται σε ένα πλήρη κύκλο φόρτισης- αποφόρτισης χωρίζονται σε απώλειες:

α)μετασχηματιστών

β) κινητήρα

γ)αντλίας

δ)σωληνώσεων

ε)υδροστροβίλου

ζ)γεννήτριας

5.1.1 Απώλειες μετασχηματιστών

Μετασχηματιστές ονομάζονται οι ηλεκτρικές μηχανές (διατάξεις) που αυξομειώνουν τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη, την ένταση και την τάση του ρεύματος. Στην αντλησιοταμίευση, οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται κατά την είσοδο και την έξοδο της ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το δίκτυο. Οι μετασχηματιστές τυπικά παρουσιάζουν απώλειες της τάξης του 0.5%. [30]

5.1.2 Απώλειες κινητήρα

Στην μονάδα της αντλησιοταμίευσης, ο κινητήρας επιλέγεται ώστε να στρέφει την αντλία στην επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής, αναπτύσσοντας την απαιτούμενη από την αντλία ροπή, έτσι ώστε να μπορεί να αποδώσει την ισχύ που απορροφά η αντλία στο σημείο λειτουργίας της. Προφανώς, θα πρέπει ο κινητήρας να έχει περίσσεια ισχύος ώστε να μπορέσει να επιταχύνει γρήγορα την αντλία και να μπορέσει να καλύψει ένα σφάλμα στον υπολογισμό του σημείου λειτουργίας και της απορροφούμενης ισχύος. Για τον λόγο αυτό επιλέγεται ο τυποποιημένος κινητήρας του οποίου η ονομαστική ισχύς (αυτή την οποία μπορεί να αποδίδει ο κινητήρας δουλεύοντας συνεχώς), είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απορροφά η αντλία κατά ένα περιθώριο ασφάλειας. Οι απώλειες του κινητήρα είναι της τάξεως του 3%. [30]

5.1.3 Απώλειες στην αντλία

Η ροή του υγρού δια μέσου της αντλίας (όπως και από κάθε στροβιλομηχανή) συνοδεύεται από την ανάπτυξη απωλειών στις οποίες αντιστοιχεί η διαφορά ισχύος ανάμεσα στην ισχύ την οποία προσδίδει ο κινητήρας και την ισχύ που παραλαμβάνει το υγρό. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε τρεις τύπους, τις υδραυλικές, τις ογκομετρικές και τις μηχανικές.

5.1.3 α) Υδραυλικός βαθμός απόδοσης

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$\eta_h = \frac{H}{H_u} = \frac{H_u - \delta h_{fea}}{H_u} = 1 - \frac{\delta h_{fea}}{H_u} \quad (5.1)$$

όπου:

H το ολικό ύψος της αντλίας, που εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια την οποία παραλαμβάνει το ρευστό από την διατομή εισόδου (e) μέχρι την διατομή εξόδου (a),

H_u η ενέργεια που προσδίδεται από την πτερωτή στο υγρό,

δh_{fea} η υδραυλικές απώλειες της ροής διαμέσου της αντλίας.

Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής, δh_τ , και σε υδραυλικές απώλειες κρούσεως, δh_α .

$$\delta h_{fea} = \delta h_\tau + \delta h_\alpha \quad (5.2)$$

Οι υδραυλικές απώλειες τριβής διακρίνονται σε γραμμικές απώλειες $\delta h_{\tau i}$ και εντοπισμένες αντιστάσεις $\delta h_{\tau \zeta i}$:

$$\delta h_\tau = \delta h_{\tau i} + \delta h_{\tau \zeta i} = \lambda_i \times \frac{\delta l_i \times c_i^2}{d_i \times 2g} + \zeta_i \times \frac{c_i^2}{2g} \quad (5.3)$$

όπου: λ_i ο συντελεστής γραμμικών απωλειών στη θέση i,

δl_i το στοιχειώδες μήκος της αντλίας ,

d_i η στοιχειώδης διάμετρος της αντλίας στη θέση i,

c_i^2 το τετράγωνο της ταχύτητας του ρευστού στη θέση i,

Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ

και ζ_i ο συντελεστής εντοπισμένων απωλειών στη θέση i .

Ως υδραυλικές απώλειες κρούσεως ορίζονται οι απώλειες αποκόλλησης της ροής, η οποία συνήθως λαμβάνει χώρα στην ακμή πρόσπτωσης των πτερυγίων της πτερωτής και δευτερευόντως στην γλωττίδα του σπειροειδούς κελύφους. Οι υδραυλικές απώλειες κρούσεως ορίζονται ως εξής:

$$\delta h_\alpha = \zeta_\alpha \times \left(1 - \frac{Q}{Q_A}\right)^2 \times \frac{u_1^2}{2g} \quad (5.4)$$

όπου, Q_A συμβολίζεται η optimum παροχή της αντλίας και u_1 η περιφερειακή ταχύτητα της διατομής εισόδου της πτερωτής.

5.1.3 β) Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ο λόγος:

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_u} \quad (5.5)$$

όπου Q η συνολική παροχή και Q_u η παροχή που διέρχεται από την πτερωτή.

5.1.3 γ) Μηχανικός βαθμός απόδοσης

$$\eta_m = \frac{N}{N_u} \quad (5.6)$$

όπου, N η συνολική ισχύς και N_u η περιφερειακή ισχύς της πτερωτής.

Τέλος, ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως το γινόμενο:

$$\eta = \eta_h \times \eta_Q \times \eta_m \quad (5.7)$$

Οι συνολικές απώλειες στην αντλία μονάδας αντλησιοταμίευσης είναι της τάξης του 10%. [30]

5.1.4 Απώλειες σωληνώσεων

Οι απώλειες στις σωληνώσεις χωρίζονται σε γραμμικές και εντοπισμένες κατά τον ίδιο τρόπο με τις υδραυλικές απώλειες της αντλίας:

$$\delta h_\tau = \delta h_{\tau i} + \delta h_{\tau \zeta i} = \lambda_i \times \frac{\delta l_i \times c_i^2}{d_i \times 2g} + \zeta_i \times \frac{c_i^2}{2g} \quad (5.8)$$

Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ

όπου: λ_i ο συντελεστής γραμμικών απωλειών στη θέση i ,

δl_i το στοιχειώδες μήκος της αντλίας ,

d_i η στοιχειώδης διάμετρος της σωλήνωσης στη θέση i ,

c_i^2 το τετράγωνο της ταχύτητας του ρευστού στη θέση i ,

και ζ_i ο συντελεστής εντοπισμένων απωλειών στη θέση i .

Οι απώλειες των σωληνώσεων στην αντλησιοταμίευση είναι της τάξης του 0,5%.

5.1.5 Απώλειες υδροστροβίλου

Όπως και στην περίπτωση των αντλιών, η ροή διά μέσου της μηχανής και η λειτουργία της μηχανής δεν είναι απαλλαγμένη απωλειών οι οποίες έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την μειωμένη αξιοποίηση της διαθέσιμης στην μηχανή υδραυλικής ενέργειας. Αυτές οι απώλειες διακρίνονται σε υδραυλικές, ογκομετρικές και μηχανικές.

5.1.5 α) Υδραυλικές απώλειες

Ο υδραυλικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ορίζεται ως:

$$\eta_h = \frac{H_u}{H} = \frac{H - \delta h_{fea} - \frac{c_a^2}{2g}}{H} \quad (5.9)$$

Οι υδραυλικές απώλειες διακρίνονται σε υδραυλικές απώλειες τριβής, δh_τ , και σε υδραυλικές απώλειες κρούσεως, δh_α .

$$\delta h_{fea} = \delta h_\tau + \delta h_\alpha \quad (5.10)$$

Οι υδραυλικές απώλειες τριβής υπολογίζονται όπως ακριβώς και στην περίπτωση της αντλίας, άρα:

$$\delta h_\tau = \delta h_{\tau i} + \delta h_{\tau \zeta i} = \lambda_i \times \frac{\delta l_i \times c_i^2}{d_i \times 2g} + \zeta_i \times \frac{c_i^2}{2g} \quad (5.11)$$

Οι υδραυλικές απώλειες κρούσεως οφείλονται στη διαφορά της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια του δρομέα σε σχέση με την αντίστοιχη γωνία των πτερυγίων.

$$\delta h_{\alpha} = \zeta_{\alpha} \times \left(1 - \frac{Q_u}{Q_{uA}}\right)^2 \times \frac{u_1^2}{2g} \quad (5.12)$$

5.1.5 β) Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης

Ως ογκομετρικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ο λόγος:

$$\eta_Q = \frac{Q_u}{Q} \quad (5.13)$$

όπου Q_u η παροχή που διέρχεται μέσα από τον δρομέα και Q η συνολική παροχή.

5.1.5 γ) Μηχανικός βαθμός απόδοσης

$$\eta_m = \frac{N}{N_u} \quad (5.14)$$

όπου, N η συνολική ισχύς και N_u η θεωρητική ισχύς που αναπτύσσεται στο δρομέα.

Τέλος, ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ορίζεται ως το γινόμενο:

$$\eta = \eta_h \times \eta_Q \times \eta_m \quad (5.15)$$

Οι συνολικές απώλειες σε υδροστροβίλο μονάδας αντλησιοταμίευσης είναι της τάξης του 7.5%. [30]

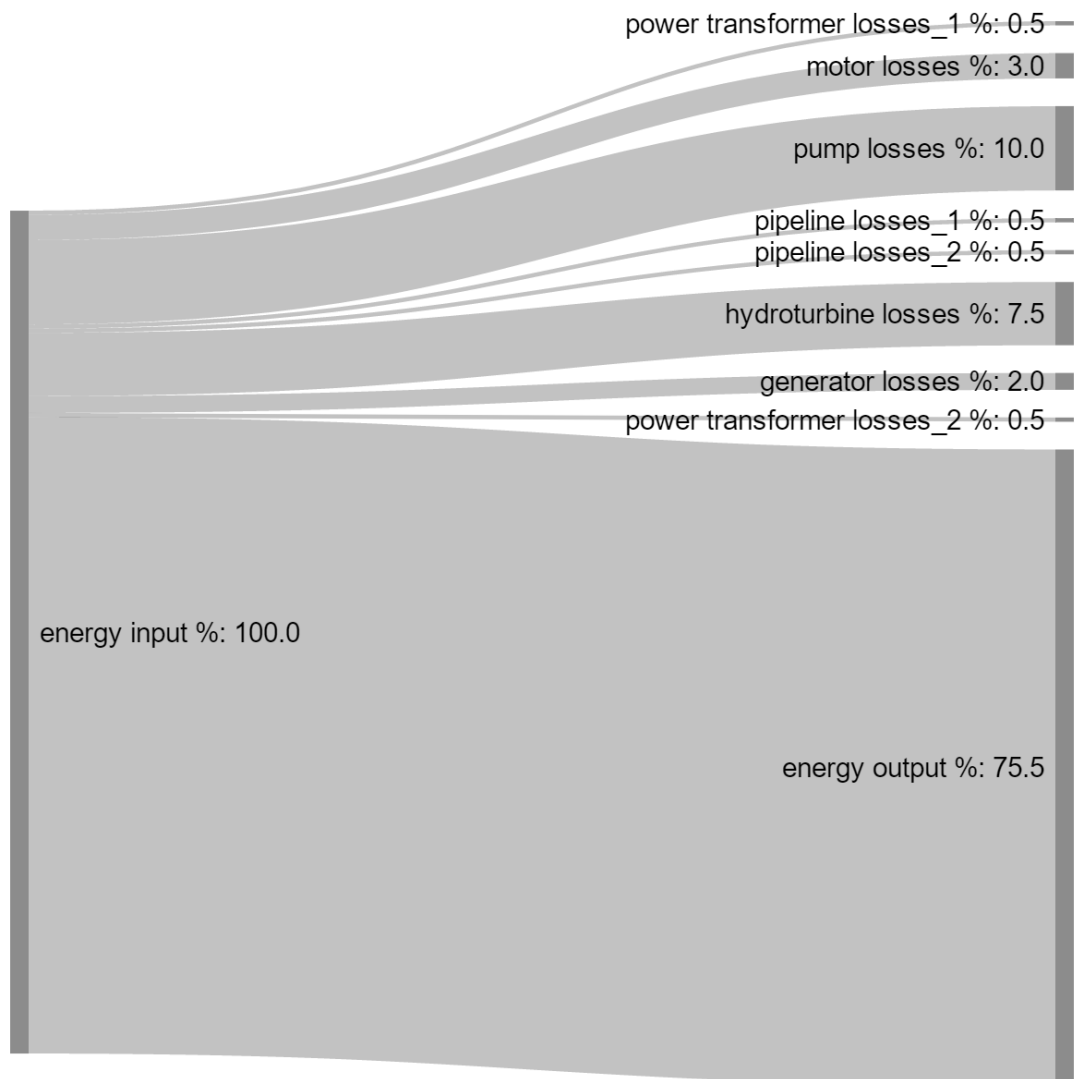
5.1.6 Απώλειες γεννήτριας

Μία γεννήτρια διαμορφώνεται από ένα μόνιμο μαγνήτη και ένα κυλινδρικό τύμπανο από σιδηρομαγνητικό υλικό που περιστρέφεται περί τον άξονα του, μεταξύ των πόλων του μαγνήτη. Το κυλινδρικό τύμπανο μαζί με τους αγωγούς που φέρει ονομάζεται επαγωγικό τύμπανο. Κατά την λειτουργία της γεννήτριας αναπτύσσονται απώλειες οι οποίες χωρίζονται σε ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου και τους μαγνητικούς πόλους, σε μηχανικές απώλειες και σε απώλειες του πυρήνα. Οι ωμικές απώλειες αυξάνονται παραβολικά με την αύξηση του φορτίου. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες του πυρήνα σε πρώτη προσέγγιση θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου. Συμβολίζοντας με N της ισχύ που προσδίδεται στην άτρακτο της μηχανής και με δN το άθροισμα των προηγούμενων απωλειών, ορίζεται ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας ως:

$$\eta_G = \frac{N - \delta N}{N} \quad (5.16)$$

Τυπικά, οι απώλειες της γεννήτριας κυμαίνονται στο 2%. [30]

5.1.7 Διαγράμματα Sankey για τυπική μονάδα αντλησιοταμίευσης



Διάγραμμα 5.1 Sankey μονάδας Αντλησιοταμίευσης

5.2 Συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα- Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο

Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο της μελέτης τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα έχουν ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο που ποικίλλει από 26 έως 85%. Η παραπάνω διαφορά είναι πολύ μεγάλη και είναι χρήσιμο να παρουσιαστούν οι λόγοι για τους οποίους μονάδες που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζουν τόσο μεγάλη απόκλιση ως προς την αποδοτικότητα.

Ο βαθμός απόδοσης μίας συμβατικής θερμικής μονάδας μπορεί εύκολα να εξαχθεί από το λόγο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την θερμική ενέργεια των καυσίμων του. Σε ένα σύστημα CAES όμως, τα πράγματα περιπλέκονται λόγω της ύπαρξης δύο πολύ διαφορετικών ενεργειακών εισόδων. Από των μία πλευρά υπάρχει η ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση των συμπιεστών, και από την άλλη υπάρχει το αέριο καύσιμο για την καύση του αέρα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αποτελέσματα της μελέτης διαφόρων συστημάτων CAES ως προς την αποδοτικότητα.

Efficiency	Source	Comments
82%	Samir Succar, Princeton Environmental Institute	Round trip basis, theoretical turbine assist efficiency used in Hybrid power plant.
80%-85%	Dresser Rand, Form 85230	Polytropic compression basis, does not include expansion efficiency
68%	Frank S Barnes, Handbook for High Power and High energy Storage	Second law (entropy) basis. Theoretical efficiency with heat recuperator between compression and expansion
37%	Mazza and Hammerschlag, 2005 Wind-to-Wheel Energy Assessment	46% compression efficiency, unstated basis, 4 stage expansion process
26.70%	Felix Creutzig, Economic and Environmental Evaluation of Compressed Air Cars	Theoretical isothermal compression, 2 stage expansion.

Πίνακας 5.1: Αποδοτικότητα κύκλου των συστημάτων CAES [29]

Υπάρχουν διάφορες βασικές γραμμές και μεμονωμένες διαδικασίες που αφορούν κάθε μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας, το ίδιο ισχύει και για τα CAES. Κατά αυτόν τον τρόπο, δεν είναι δυνατόν να συγκριθούν οι αποδοτικότητες του παραπάνω πίνακα, χωρίς να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο η αντίστοιχη αποδοτικότητα υπολογίστηκε. Οι αποδοτικότητες του παραπάνω πίνακα φαίνονται να έρχονται σε μεγάλη αντίθεση και να καλύπτουν ένα πολύ ευρύ πεδίο αποδοτικότητας. Παρόλα

αυτά, σε γενικές γραμμές οι αποδοτικότητες που παρουσιάζονται είναι αληθείς. Οι διαφοροποιήσεις εξηγούνται αν θεωρηθούν οι συγκεκριμένες διαδικασίες που έχουν λάβει χώρα, και πως αυτές οι διαδικασίες επηρεάζουν τον υπολογισμό της αποδοτικότητας.

Προκειμένου να εξαχθεί μία σχέση που να μας δίνει το βαθμό απόδοσης ενός συστήματος CAES θα πρέπει πρώτα να γίνει μία αναφορά στις δύο εισόδους της ενέργειας στο σύστημα, την ηλεκτρική ενέργεια και το καύσιμο.

5.2.1 Απόδοση θερμότητας, Heat Rate (HR)

Η απόδοση θερμότητας η_F (Heat Rate), αντιπροσωπεύει την κατανάλωση καυσίμου ανά KWh παραγόμενης ενέργειας από την μονάδα CAES και ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την ενέργεια του καυσίμου:

$$\eta_F = \frac{E_F}{E_T} \quad (5.17)$$

Εξαρτάται από πολλές κατασκευαστικές παραμέτρους του συστήματος, με μεγαλύτερη επίδραση να έχει η ύπαρξη ενός συστήματος ανάληψης θερμότητας. Το σύστημα αυτό θα εκμεταλλεύεται την θερμότητα των καυσαερίων της καύσης που εξέρχονται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, προκειμένου να προθερμανθεί ο αέρας που βγαίνει από την δεξαμενή. Η απόδοση θερμότητας για μια μονάδα CAES χωρίς σύστημα ανάληψης κυμαίνεται από 5500-6000 KJ/KWh (για παράδειγμα 5870 KJ/KWh για τη μονάδα του Huntorf), ενώ για μία μονάδα με σύστημα ανάληψης θερμότητας κυμαίνεται από 4200-4500 KJ/KWh (για παράδειγμα είναι 4330 KJ/KWh για τη μονάδα του McIntosh). Χωρίς το σύστημα ανάληψης η μονάδα του McIntosh θα είχε περίπου 22% μεγαλύτερη απόδοση θερμότητας. Για σύγκριση, ένας συμβατικός αεριοστρόβιλος έχει διπλάσια περίπου κατανάλωση λόγω του ότι μεγάλο μέρος της παραγόμενης ενέργειας δαπανάται για την κίνηση των συμπιεστών.[29]

5.2.2 Λόγος απαίτησης ηλεκτρισμού, Charging Electricity Ratio (CER)

Η δεύτερη παράμετρος που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης ενός συστήματος CAES είναι ο λόγος απαίτησης ηλεκτρισμού (Charging Electricity Ratio, CER). Ο λόγος αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της αποδιδόμενης ενέργειας της γεννήτριας (E_T) προς την ενέργεια που απαιτεί ο συμπιεστής (E_M) και κυμαίνεται από 1.1 έως 1.8 περίπου. Ο λόγος CER λαμβάνει υπόψη του τις απώλειες των σωληνώσεων και της βαλβίδας

ρύθμισης της ροής, καθώς επίσης και τους βαθμούς συμπίεσης και εκτόνωσης. Οι απώλειες της ροής στη βαλβίδα ρύθμισης είναι συνάρτηση των πιέσεων της δεξαμενής αποθήκευσης. Ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι σημαντικός κυρίως στη βαθμίδα χαμηλής πίεσεως λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας των αερίων της καύσης. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσονται τεχνικές ψύξης των πτερυγίων του στροβίλου, προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία των αερίων της καύσης βελτιώνοντας το βαθμό απόδοσης αυτής της βαθμίδας. [29]

5.2.3 Προσεγγίσεις του βαθμού απόδοσης συστήματος CAES

Διάφοροι τύποι έχουν προταθεί για την περιγραφή του βαθμού απόδοσης μίας μονάδας CAES. Η πιο απλή σχέση ορίζει το βαθμό απόδοσης σαν το λόγο της παραγόμενης ενέργειας από τη γεννήτρια (E_T) προς την ενέργεια για την ενέργεια για την κίνηση των συμπιεστών (E_M) συν την ενέργεια του καυσίμου (E_F).

$$n = \frac{E_T}{E_M + E_F} \quad (5.18)$$

Τυπικές τιμές των HR και CER ίσες με 4220 KJ/KWh και 1.5 αντίστοιχα δίνουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 54%. Λόγω όμως της ουσιαστικής διαφοράς των ποσοτήτων ενέργειας, το άθροισμα τους είναι ένας αριθμός χωρίς πραγματική υπόσταση. Προκειμένου να υπολογίσουμε την ολική ενέργεια εισόδου για ένα σύστημα CAES, θα πρέπει να μετατρέψουμε τις δύο αυτές ενέργειες σε μία ισοδύναμη βάση ενέργειας.

Εκφράζοντας την ενέργεια του καυσίμου E_F ως ηλεκτρική ενέργεια μόνο, εισάγουμε το βαθμό απόδοσης η_{RT1} ως:

$$\eta_{RT1} = \frac{E_T}{E_M + \eta_{NG} \times E_F} = \frac{1}{\frac{1}{CER} + \eta_{NG} \times HR} \quad (5.19)$$

Ο όρος $\eta_{NG} \times E_F$ εκφράζει την ηλεκτρική ενέργεια που θα παρήγαγε μία απομονωμένη μονάδα, η οποία θα τροφοδοτούνταν με την ίδια ποσότητα ενέργειας E_F , από το καύσιμο που τροφοδοτεί την μονάδα CAES και η οποία μονάδα θα είχε βαθμό απόδοσης η_{NG} .

Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ

Διάφορες τιμές του βαθμού απόδοσης η_{NG} έχουν ληφθεί υπόψη από πραγματικές θερμικές μονάδες φυσικού αερίου και συνδυασμένου κύκλου. Στις περιπτώσεις αυτές ο βαθμός απόδοσης της μονάδας CAES κυμαίνεται μεταξύ 77% έως 89%.

Αφαιρώντας από την ολική παραγόμενη ενέργεια E_T την ισοδύναμη ηλεκτρική ενέργεια του καυσίμου $\eta_{NG} \times E_F$, λαμβάνουμε μία ακόμα προσέγγιση του βαθμού απόδοσης.

$$\eta_{RT2} = \frac{E_T - \eta_{NG} \times E_F}{E_M} = CER - \eta_{NG} \times HR \times CER \quad (5.20)$$

Στην περίπτωση που την ηλεκτρική ενέργεια των συμπιεστών της μονάδας CAES την τροφοδοτεί μία θερμική μονάδα βάσης, τότε την ενέργεια E_M μπορούμε να τη διαιρέσουμε με το βαθμό απόδοσης η_T και να ληφθεί κατά αυτόν τον τρόπο ο πρωταρχικός βαθμός απόδοσης της μονάδας CAES η_{PE} . Δηλαδή:

$$\eta_{PE} = \frac{E_T}{\frac{E_M}{\eta_T} + E_F} \quad (5.21)$$

Θεωρώντας ένα βαθμό απόδοσης θερμικής μονάδας ίσο με 40% και τις ίδιες τυπικές τιμές όπως και πριν, ο βαθμός απόδοσης η_{PE} μεταπίπτει στην τιμή του 35% περίπου.

Μία επιπλέον προσέγγιση του βαθμού απόδοσης, διορθώνει την ενέργεια του καυσίμου E_F βάση ενός συντελεστή κόστους CR (Cost Ratio, CR), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας εκτός αιχμής, προς την τιμή του καυσίμου. Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$\eta_{APR} = \frac{E_T}{E_M - \frac{E_F}{CR}} \quad (5.22)$$

Αυτός ο βαθμός απόδοσης δεν αφορά τη γενική περίπτωση των συστημάτων CAES αλλά μεταβάλλεται από χώρα σε χώρα λόγω των διαφορών στην τιμή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας εκτός αιχμής και της τιμής του καυσίμου.

Μία τελική σχέση που περιγράφει το βαθμό απόδοσης μίας μονάδας CAES, συγκρίνει την αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας, με την ηλεκτρική ενέργεια μίας θερμοδυναμικά ιδανικής μονάδας CAES, η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασία μεταξύ αυτής του περιβάλλοντος (T_0) και μίας μέγιστης θερμοκρασίας T_{max} . Στην περίπτωση αυτή ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

Κεφάλαιο 5- Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μεγάλη ισχύ

$$\eta_{II} = \frac{E_T}{E_M + E_F - \frac{E_F \times T_0}{T_{max}}} \quad (5.23)$$

Στο παρακάτω πίνακα βλέπουμε συγκεντρωτικά τις προηγούμενες παραμέτρους και τις αναφερόμενες τιμές τους για μονάδα CAES με και χωρίς σύστημα ανάνηψης.

παραμέτρος	ορισμός	αναφερόμενη τιμή	
		No Recuperator	With Heat Recuperator
Heat Rate (HR)	$\eta_F = \frac{E_T}{E_F}$	6000-5500 kJ/kWh (~60-65%)	4500-4200 kJ/kWh (~80-85%)
Charging Energy Ratio (CER)	$\eta_{PE} = \frac{E_T}{E_M}$	1.2-1.4	1.4-1.6
Primary Energy Efficiency η_{PE}	$\eta_{PE} = \frac{E_T}{E_M / \eta_T + E_F}$	CAES Charged From Nuclear Power ($\eta_T=33\%$)	
		24.5%	29.7%
		Charged From Fossil Fuel Power Plant ($\eta_T=42\%$)	
		28.2%	34.4%
		Charged from Combined Heat and Power Plant ($\eta_T=35\%$)	
		35.1-41.8%	
		Charged from grid-averaged Baseload Power ($\eta_T=35\%$, CER=1.4)	
		42-47%	
Roundtrip Efficiency (1)	$\eta_{RT,1} = \frac{E_T}{E_M + \eta_{NG} E_F}$	4220 kJ /kWh, CER=1.5, $\eta_{NG}=47.6\%$.	81.7
Roundtrip Efficiency (2)	$\eta_{RT,2} = \frac{E_T - E_F \eta_{NG}}{E_M}$	4220 kJ/kWh, Eo/Ei=1.5, $\eta_{NG}=47.6\%$	66.3%
Second Law Efficiency	$\eta_{II} = \frac{E_T}{E_{T,REF}}$	$T_0=15\text{ C}, T_{MAX}=900\text{ C}, p_2=20\text{ bar}$	
		58.7%	68.3%

Πίνακας 5.2: Διαφορετικοί ορισμοί του βαθμού απόδοσης ενός συστήματος CAES [31]

Για την κατασκευή του διαγράμματος Sankey επιλέγονται σαν χαρακτηριστικά παραδείγματα αποθήκευσης ενέργειας με συμπίεση αέρα, οι μονάδες του Huntorf και του McIntosh. Στη μονάδα του Huntorf ο λόγος HR λαμβάνεται ίσος με $\frac{5870\text{Kj}}{\text{KWh}} = \frac{5870}{3600} = 1.63056$,ενώ για τη μονάδα του McIntosh $HR = \frac{4330\text{Kj}}{\text{KWh}} = \frac{4330}{3600} = 1.2028$. Ο λόγος CER κυμαίνεται από 1,1 έως 1,8 και λαμβάνεται ίσος με 1,5 και ο βαθμός απόδοσης του φυσικού αερίου η_{NG} λαμβάνεται ίσος με 47,6%. Τελικά προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

	McIntosh	Huntorf
η_{RT1}	80.7%	69.31%
η_{RT2}	64.15%	33.57%

Πίνακας 5.3: Βαθμοί απόδοσης για τις μονάδες του Huntorf και του McIntosh

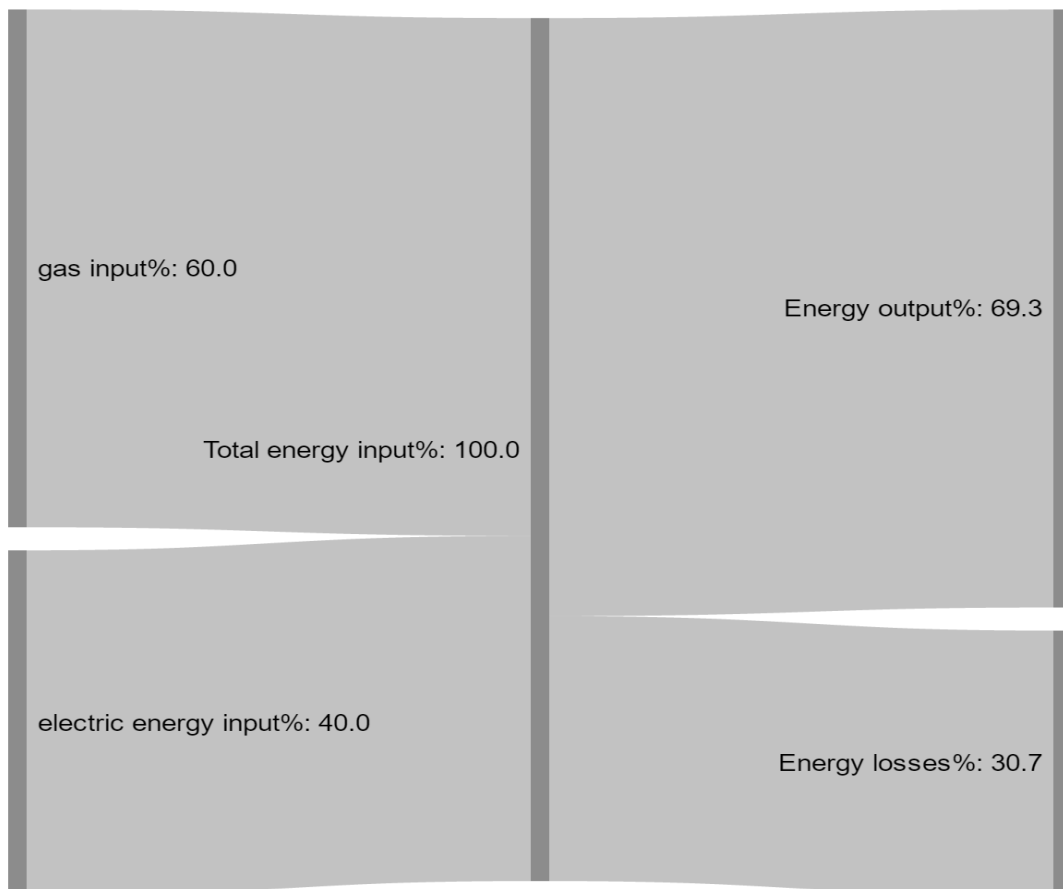
5.2.4 Απώλειες ενέργειας στα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Είναι χρήσιμο να παρουσιασθούν οι ενεργειακές απώλειες που υπάρχουν σε ένα σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, οι οποίες οδηγούν στην αποδοτικότητα ανά κύκλο που περιγράφηκε παραπάνω. Οι ενεργειακές απώλειες είναι οι εξής:

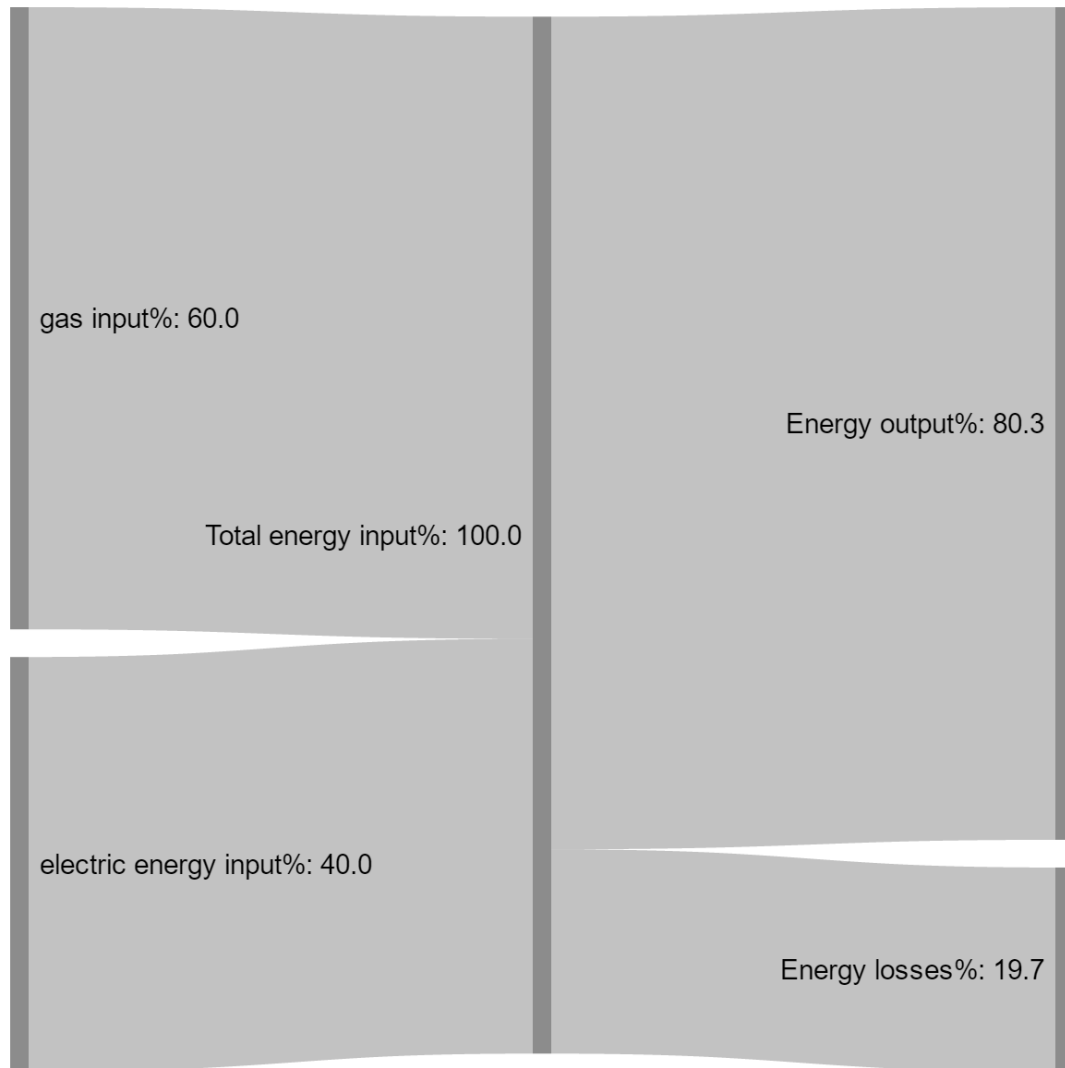
- α) απώλειες κινητήρα
- β) απώλειες συμπίεσης: εξαρτώνται από το βαθμό απόδοσης της συμπίεσης, για ισοθερμοκρασιακή συμπίεση ο βαθμός απόδοσης είναι 100%
- γ) απώλειες εκτόνωσης: εξαρτώνται από το βαθμό απόδοσης της εκτόνωσης, για ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση ο βαθμός απόδοσης είναι 100%
- δ) απώλειες γεννήτριας
- ε) απώλειες μετασχηματιστών: υπάρχουν κατά την είσοδο της ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο για την κίνηση των συμπιεστών και κατά την έξοδο της ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο μετά τη γεννήτρια
- στ) απώλειες καύσης.

5.2.5 Διάγραμμα Sankey για μονάδα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Στα παρακάτω διαγράμματα Sankey θα παρασταθεί ο βαθμός απόδοσης η_{RT1} για τις μονάδες του Huntorf και του McIntosh θεωρώντας ως είσοδο φυσικού αερίου 60% της συνολικής ενέργειας εισόδου, και ως ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία των συμπιεστών 40% της συνολικής ενέργειας εισόδου. [32]



Διάγραμμα 5.2: Sankey για τη μονάδα του Huntorf



Διάγραμμα 5.3: Sankey για τη μονάδα του McIntosh

Κεφάλαιο 6 –Συμπεράσματα

Η αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, όπως μέσω της αντλησιοταμίευσης και των συστημάτων CAES, αποτελεί σημαντικό βήμα στο να τροφοδοτείται ο καταναλωτής με ποιοτική, ‘καθαρή’ αλλά και φθηνή ενέργεια. Καθώς το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου συνεχώς αυξάνεται μεγαλώνει η ανάγκη για λύσεις ‘καθαρής’ ενέργειας και κατά αυτόν τον τρόπο η αποθήκευση ενέργειας θα αποτελεί στο μέλλον τον ακρογωνιαίο λίθο του παγκόσμιου ενεργειακού ζητήματος.

Σε αυτό το σημείο της μελέτης θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας σε μεγάλη ισχύ (100 MW), της αντλησιοταμίευσης και της αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα-CAES.

Η αντλησιοταμίευση είναι μία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας με αποθηκευτικό μέσο το νερό. Ένας πλήρης κύκλος περιλαμβάνει άντληση νερού από ένα κάτω ταμιευτήρα σε ένα άνω ταμιευτήρα των οποίων η υψομετρική διαφορά είναι ίση προς h για την φάση της αποθήκευσης ενέργειας (όπου μετατρέπεται η ηλεκτρική ενέργεια σε υδραυλική) και για την φάση της παραγωγής ενέργειας διακίνηση του νερού από τον άνω ταμιευτήρα στον κάτω μέσω υδροστροβίλων, οπότε η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική.

Από την άλλη πλευρά τα συστήματα CAES χρησιμοποιούν σαν αποθηκευτικό μέσο τον αέρα. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα σε κατάλληλες δεξαμενές-αποθήκες. Στα συστήματα CAES, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται οδηγώντας σε αεριοστρόβιλους τα παράγωγα της καύσης του συμπιεσμένου αέρα που ανακτούμε από πηγές στο υπέδαφος, με μικρή ποσότητα φυσικού αερίου. Η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή στην υποστήριξη φορτίου, με τις μονάδες CAES να είναι της τάξης των εκατοντάδων έως χιλιάδων MW.

Η αντλησιοταμίευση είναι η ωριμότερη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας για κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Αυτό την καθιστά πιο αξιόπιστη τεχνολογία, σε σύγκριση με την αποθήκευση ενέργειας μέσω συμπιεσμένου αέρα, καθώς υπάρχει τόσο η ώριμη τεχνογνωσία όσο και ο μεγάλος όγκος εμπορικών δραστηριοτήτων. Επιπλέον, η αντλησιοταμίευση μπορεί να συνδυαστεί με αιολικά και φωτοβολταϊκά

Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα

πάρκα , χωρίς να είναι απαραίτητη και η καύση ορυκτού καυσίμου, όπως συμβαίνει με την τεχνολογία των CAES. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια που αποθηκεύεται με τη μέθοδο της αντλησιοταμίευσης μπορεί να προέρχεται μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και έτσι μπορεί να αποθηκεύει ενέργεια, η οποία είναι ‘καθαρή’ . Το γεγονός αυτό καθιστά τα συστήματα CAES λιγότερο ελκυστικά, καθώς η χρήση ορυκτού καυσίμου έρχεται σε πλήρη αντίθεση με το κύριο λόγο ύπαρξης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, που είναι ο απεγκλωβισμός από τα ορυκτά καύσιμα και η δυναμική είσοδος των Α.Π.Ε. στην αγορά ενέργειας.

Επιπλέον, η αντλησιοταμίευση έχει μεγαλύτερη διαθέσιμη ισχύ, αποθηκευτική ικανότητα και χρόνο ζωής, καθώς επίσης και μεγαλύτερη αποδοτικότητα ανά κύκλο φόρτισης-αποθήκευσης-αποφόρτισης. Τέλος , ενώ και οι δύο τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές στρεφόμενης εφεδρείας και εξισορρόπησης φορτίου, τα CAES χρησιμεύουν και για εφαρμογές μεταφοράς και διανομής ενέργειας.

Όσο αφορά στα οικονομικά στοιχεία των δύο τεχνολογιών , η εγκατάσταση μονάδας αντλησιοταμίευσης είναι πιο δαπανηρή από εκείνη των CAES. Βέβαια, μεγάλο ρόλο στο κόστος εγκατάστασης, και για τις δύο τεχνολογίες, έχει η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας. Για παράδειγμα, το κόστος εγκατάστασης αλλάζει δραματικά στην αντλησιοταμίευση ανάλογα με το αν οι ταμιευτήρας είναι τεχνητοί ή φυσικοί. Αντίστοιχα, στα συστήματα συμπιεσμένου αέρα συμβαίνει το ίδιο ανάλογα με τον αν η κοιλότητα αποθήκευσης του αέρα είναι από ένα παλιό ορυχείο ή αν πρέπει να γίνουν έργα για να κατασκευαστεί από την αρχή.

Τελικά, η αντλησιοταμίευση αποτελεί μία απλή και αξιόπιστη λύση στην συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση. Από την άλλη μεριά τα CAES με τις καινοτόμες εξελίξεις στην τεχνολογία τους, μπορούν να αποτελέσουν μία ανταγωνιστική εναλλακτική λύση εκεί που η γεωμορφολογία της περιοχής δεν ενδείκνυται για την αντλησιοταμίευση. Σήμερα, τα εξελιγμένα αδιαβατικά CAES (AA CAES) κερδίζουν έδαφος, καθώς παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερες αποδόσεις και μπορούν έτσι να ανταγωνιστούν την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης. Τέλος, αν και η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης είναι σαφώς ωριμότερη οι γεωγραφικοί και οικονομικοί περιορισμοί εντείνουν την έρευνα για βελτιστοποίηση των CAES.

Βιβλιογραφία

- [1] Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied Energy, Volume 137, 1 January 2015, Pages 511-536
- [2] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, Energy storage systems—Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 5, June 2008, Pages 1221-1250
- [3]Αγγελική Χ. Λουκάτου,” Τεχνολογίες Αποθήκευσης Αιολικής Ενέργειας με Αντλησιοταμίευση “ ,Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αθήνα, 2013
- [4] Energy Storage Association – ESA)
- [5] <http://www.esru.strath.ac.uk/>
- [6] Αγγελική Σαγάνη, “Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές”, Επιβλέπων: Δημήτριος Παπαντώνης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009
- [7] <http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>
- [8]Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι”, Συμμεών,2004, Αθήνα
- [9] Ιωάννης Δ. Σπύρου, “Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση”
- [10]“Υδροδυναμικές μηχανές-τύποι υδροστροβίλων Τ.Ε.Ι. Κρήτης)
- [11] www.sfrang.com)
- [12]Νικόλαος Φύσσας,” Επισκόπηση και συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές”, Επιβλέπουσα: Δανάη Διακουλάκη, Σχολή Χημικών Μηχανικών,Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,2013

Βιβλιογραφία

- [13] cink-hydro-energy.com
- [14] www.toural.gr
- [15] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/D/AE_Deriaz_turbine.html
- [16] Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2006
- [17] Shafiqur Rehman, Luai M. Al-Hadhrami, Md. Mahbub Alam, Pumped hydro energy storage system: A technological review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 44, April 2015, Pages 586-598
- [18] <http://paris-prodromidis.blogspot.com/2008/03/10000-mw.html>
- [19] <http://thinkprogress.org>
- [20] <http://www.energystorageexchange.org/>- DOE Global Energy Storage Database
- [21] <http://people.duke.edu/>
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_accidents
- [23] Haisheng Chen, Xinjing Zhang, Jinchao Liu and Chunqing Tan, Energy Storage Technologies and Applications-Compressed Air Energy Storage, Chapter 4, January 2013, pages 101-112
- [24] Γεραλής Νικόλαος, “Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας”, επιβλέπων: Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009
- [25] Compressed air energy storage- Peter Vadasz, University of Durban-Westville, Durban 4000, South Africa
- [26] Energy Storage Technologies for Electric Applications- J.I. San Martín, I. Zamora, J.J. San Martín V. Aperribay, P. Eguía, Department of Electrical Engineering - University of the Basque Country
- [27] Progress in electrical energy storage system: A critical review-Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding

Βιβλιογραφία

- [28] IEC-electrical energy storage (executive summary)
- [29] Investigation of compressed air energy storage efficiency, California Polytechnic State University- Walter Keeney, December 2013
- [30] Νέες προοπτικές για την ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα- Τεχνολογία και τεχνολογικοί περιορισμοί-Δ. Παπαντώνης, ΤΕΕ, Ιωάννινα,2009
- [31] Samir Succar and Robert H. Williams, Energy Systems Analysis Group- Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources And Applications For Wind Power, Princeton Environmental Institute Princeton University, 2008
- [32] www.arup.com