

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ  
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΠΙΛΑΛΗΣ (επιβλέπων)  
ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΤΣΑΦΑΡΑΚΗΣ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΝΑΡΑΚΗΣ

Ευάγγελος Γιαννόπουλος  
Χανιά 2014



Στη μνήμη της μάνας και της αδερφής μου

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον Διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης Γιάννη Κατσίγιαννη, δίχως την πολύτιμη συμβολή του οποίου, η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ / ABSTRACT	σελ. 6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	σελ.7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΗΣ	σελ.11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΟΙ ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	σελ. 19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ / ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ	σελ. 34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ	σελ. 40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	σελ. 49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ	σελ. 61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	
ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ	σελ. 72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	σελ. 78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10	
ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	σελ. 85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 88

## *ΠΕΡΙΛΗΨΗ*

Στη σημερινή ενεργειακή πραγματικότητα κυριαρχούν δυο σημαντικοί και μέχρι πρότινος αλληλοσυγκρουόμενοι παράγοντες. Από τη μια, οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας και από την άλλη, η συναίσθηση πως η κλιματική αλλαγή πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν να είναι πολύ αργά. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν μια σαφή εναλλακτική απαντώντας αποτελεσματικά και στα δυο αυτά ερωτήματα. Για να είναι όμως εφικτό ένα 100% ανανεώσιμο ενεργειακό προφίλ πρέπει να υπάρξει τουλάχιστον χρονική ισορροπία, αν όχι και υπερπροσφορά για λόγους ασφαλείας, ανάμεσα στο προσφερόμενο και το καταναλισκόμενο ποσό ενέργειας. Οι μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας που παρουσιάζονται στην εργασία, προσπαθούν να δώσουν απάντηση στο πρόβλημα αυτό, με μια πληθώρα επιλογών που κυμαίνονται από ήδη ώριμες εμπορικά λύσεις, μέχρι φιλόδοξες τεχνολογίες που είναι ακόμα σε ερευνητική φάση.

## *ABSTRACT*

In today's energy reality dominate two important and until recently conflicting factors. On one side, the humanity's ever-increasing energy demands and on the other, the realization that climate change has to be dealt with before it is too late. Renewable energy sources offer a clear alternative by answering efficiently to both these questions. But in order for a 100% renewable energy profile to be feasible there has to be at least a time balance, if not oversupply for safety reasons, between the offered and the consumed amount of energy. The energy storage methods presented in this thesis, try to answer this problem, with a plethora of choices which vary from already mature commercial solutions, until ambitious technologies being still in a research phase.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γεγονός πως τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο κομμάτι της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Χώρες όπως η Δανία και περιοχές όπως το κρατίδιο του Schleswig Holstein στη Γερμανία, αναμόρφωσαν το οικονομικό τους προφίλ βασιζόμενοι στην εισαγωγή αυτών των καινοτόμων μεθόδων ήδη από τη δεκαετία του '80. Ολόκληρες πόλεις ιδρύουν συνεταιριστικούς οργανισμούς για την εκμετάλλευση των πόρων αυτών στα πλαίσια της φιλελευθεροποίησης και αποκέντρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην Ελλάδα αν και έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια αξιόλογα βήματα προς τη θετική κατεύθυνση ειδικά στο κομμάτι των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, ο συνδυασμός οικονομικής κρίσης, γραφειοκρατικών διαδικασιών και διαρκών αλλαγών του επενδυτικού κλίματος έχει επιφέρει μια κάμψη στην αναπτυξιακή πορεία που βίωσε ο κλάδος.

Μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει σε τεράστιο βαθμό την επιθυμητή πορεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικά σε ότι έχει να κάνει με μεγάλους βαθμούς διείσδυσης στο παραγόμενο προφίλ είναι η ανισορροπία ανάμεσα στα χρονικά σημεία ζήτησης και κατανάλωσης, τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μακροπρόθεσμο επίπεδο.

Ας εξηγήσουμε λίγο τι εννοούμε με το παραπάνω με απλούς εμπειρικούς κανόνες. Έστω ότι μια αιολική εγκατάσταση λειτουργεί όλο το 24ωρο κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών σε μικρό νησί του Αιγαίου, καλύπτοντας θεωρητικά τα μέλη της εξίσωσης παραγωγή/κατανάλωση. Η ανάλυση όμως του χρονικού προφίλ δείχνει ότι η μεγαλύτερη παραγωγή επιτυγχάνεται τη νύχτα, όταν η ζήτηση είναι μειωμένη και αντίστοιχα τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες η απαιτήσεις υπερκαλύπτουν τη δεδομένη σε αυτή τη στιγμή παραγωγή, καθιστώντας υποχρεωτική την κάλυψη των αναγκών από το δίκτυο της ΔΕΗ, και μη επιτρέποντας την 100% ενεργειακή ανεξαρτησία.

Το τελευταίο λοιπόν διάστημα η στροφή της τεχνολογίας έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνικών αυτών που θα προσφέρουν λύση στο πρόβλημα αυτό σε διάφορες κλίμακες και απαντώντας στις διαφορετικές κάθε φορά απαιτήσεις της κάθε κατάστασης.

## 1.2 ANTIKEIMENA MEΛΕΤΗΣ

Σκοπός της εργασίας είναι να προσεγγίσει το αντικείμενο της αποθήκευσης ενέργειας. Αν και η αποθήκευση υπάρχει ήδη εδώ και πολλά χρόνια με αρκετές εφαρμογές, όπως πχ μπαταρίες αυτοκινήτου, είναι οι εφαρμογές παραγωγής ενέργειας και ειδικά η μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που έχει δώσει νέα ώθηση στον τομέα, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων και την αποκέντρωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αποθήκευση μπορεί να χωριστεί σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με το κριτήριο βάσει του οποίου θα οριστεί ο τρόπος ταξινόμησης των μεθόδων.

Μια ταξινόμηση σχετίζεται με το φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται η αποθήκευση: χημική (μπαταρίες) ή μηχανική (αντλησιοταμίευση). Άλλη διάκριση έχει να κάνει με το σκοπό που εξυπηρετεί, δηλαδή αν προορίζεται το σύστημα για μακροχρόνια παροχή ενέργειας (αντλησιοταμίευση) ή για βραχυχρόνια υποστήριξη του συστήματος (σφόνδυλοι). Σαφέστατα ο βαθμός διείσδυσης στην αγορά είναι ακόμα ένας τρόπος διαχωρισμού. Έτσι έχουμε ευρύτατα διαδεδομένες εφαρμογές (μπαταρίες) αλλά και ελάχιστα χρησιμοποιούμενες εναλλακτικές (υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση σε πηνία). Τέλος μπορούμε να μιλήσουμε για ώριμες τεχνολογίες, όπου τα περιθώρια εξέλιξης είναι περιορισμένα (μπαταρίες μολύβδου οξέως) και άλλες εφαρμογές όπου η έρευνα σε τομείς της επιστήμης των υλικών για παράδειγμα υπόσχονται στο μέλλον λαμπρά αποτελέσματα (υπερπυκνωτές).

Πίν. 1.1 Μορφή μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας στις τεχνολογίες αποθήκευσης (Τσικαλάκης)

Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπερπυκνωτές
Υπεραγώγιμα υλικά	Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφική)	Αντλησιοταμίευση
	Συμπιεσμένος αέρας
	Στρεφόμενοι σφόνδυλοι
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες (απλές, ροής, προχωρημένου τύπου)

## 1.3 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κινητήριοι μοχλός για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος ήταν το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η συνειδητοποίηση πως για την περαιτέρω εξάπλωσή τους αποτελούσε τροχοπέδη η στοχαστικότητα των πρωτογενών πηγών ενέργειας (πχ ήλιος, άνεμος). Οι



περισσότερες έρευνες ασχολούνται με τη μελέτη συγκεκριμένων καταστάσεων, ενώ λείπει μια συνολική θεώρηση του προβλήματος της αποθήκευσης ή και ακόμα και της αξιοποίησης της ενεργειακής περίσσειας σε εναλλακτικές τεχνολογικές εφαρμογές.

Αν και κάποιες μέθοδοι είναι σε επίπεδο αρχής γνωστές εδώ και πολλά χρόνια (πχ σφόνδυλοι, μπαταρίες) είναι σημαντικό να παρουσιαστεί πώς έχουν εξελιχθεί στο βάθος του χρόνου και πώς νέες προοπτικές εφαρμογών μπορούν να δώσουν λύσεις στην πολύπλοκη εξίσωση του μελλοντικού ευρωπαϊκού ενεργειακού προφίλ: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – αποκεντρωμένη παραγωγή – έξυπνα δίκτυα.

Μέσα από αυτή την εργασία γίνεται προσπάθεια αποτίμησης όλων προς το παρόν διαθέσιμων τεχνολογιών αποθήκευσης είτε αυτές είναι ήδη εμπορικά σε ώριμη φάση είτε σε φάση τεχνολογικής ανάπτυξης. Ο μελλοντικός ερευνητής μηχανικός, από όποιο φάσμα κι αν προέρχεται, μπορεί βασιζόμενος στο κείμενο να αποκτήσει μια γρήγορη αντίληψη των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων κάθε εφαρμογής και πάνω σε αυτά τα δεδομένα να κατευθύνει μετέπειτα και τη δική του έρευνα.

#### **1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η εργασία έχει την ακόλουθη μορφή:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται βασικά θέματα, παραγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας, ενώ στη συνέχεια ορίζονται ορισμένοι παράμετροι αξιολόγησης της κάθε τεχνολογίας αποθήκευσης.

Το Κεφάλαιο 3 αναφέρεται στις μηχανικές τεχνολογίες της αντλησιοταμίευσης και ωσμωτικής παραγωγής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται ακόμα δυο τεχνολογίες μηχανικού τύπου, τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου (CAES) και υγροποιημένου αέρα (LAES).

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στην τεχνολογία Power to Gas καθώς και στις κυψέλες καυσίμου. Και οι δυο αυτές εφαρμογές έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την χρήση του υδρογόνου.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύονται τεχνολογίες βραχυπρόσθεσμης αποθήκευσης, οι οποίες κυρίως χρησιμοποιούνται σε συστήματα ποιότητας ισχύος, ενώ από αυτές απουσιάζει ο παράγοντας της φορητότητας. Αυτές είναι οι σφόνδυλοι, η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση σε πηνία και τέλος οι υπερπυκνωτές.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι μπαταριών, οι οποίοι επίσης χρησιμοποιούνται σε βραχυπρόσθεσμες εφαρμογές.

Στο Κεφάλαιο 8 αναφερόμαστε σε άλλες χρήσεις, όπως τηλεθέρμανση, χρήση της τηλεθέρμανσης για ψύξη και γεωθέρμανση.

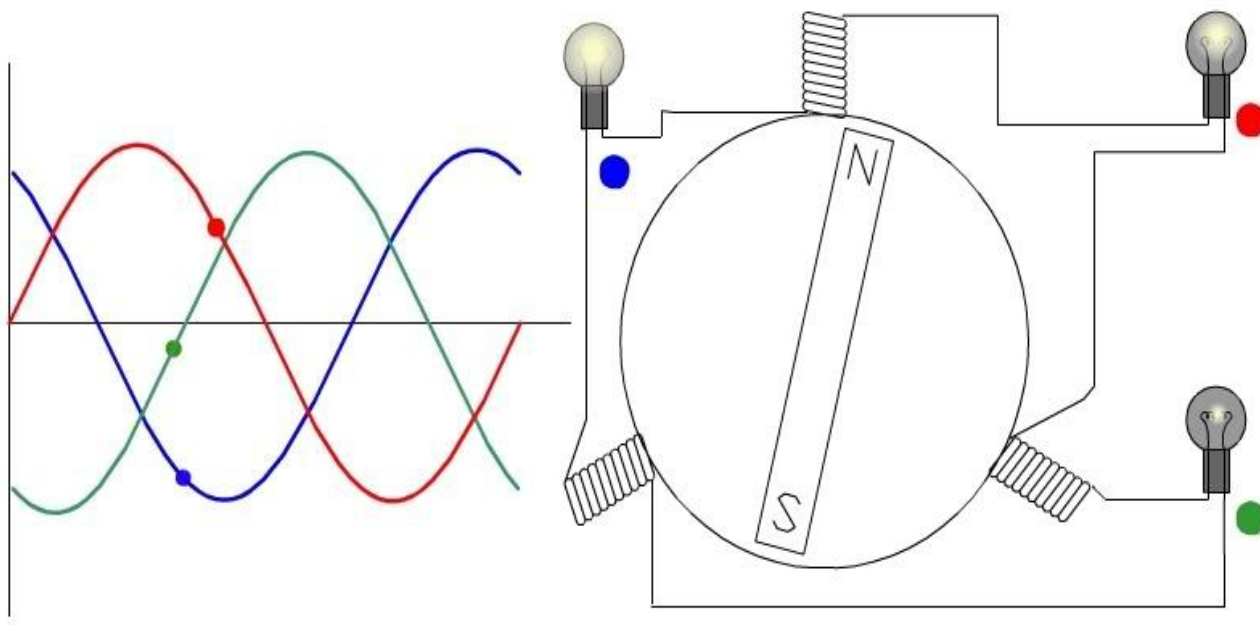
Στο Κεφάλαιο 9 ακολουθεί μια σύγκριση των παρουσιαζόμενων μεθόδων κάτω από το πρίσμα διαφόρων παραμέτρων, όπως κόστος, καταλληλότητα για χρήση σε μικρά ή μεγάλα έργα κλπ. Στο Κεφάλαιο 10 γίνεται μια μικρή σύνοψη με συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις.

### 2.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΗΣ

Από τα αρχαία χρόνια ο άνθρωπος κατάλαβε πως για να μπορέσει να πολλαπλασιάσει την απόδοση της εργασίας του θα έπρεπε να χρησιμοποιήσει μηχανικές διατάξεις που θα του έδιναν τη δυνατότητα να δημιουργήσει όλο και πιο περίπλοκες κατασκευές, με την τροχαλία ίσως να αποτελεί την πρώτη τέτοια περίπτωση. Αυτές οι διατάξεις όμως, όσο απλές και αν ήταν, απαιτούσαν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από όσα μπορούσαν να δώσουν οι μέχρι τότε διαθέσιμες πηγές, δηλαδή οι ίδιοι οι άνθρωποι και τα ζώα. Σε περιπτώσεις που οι τοπικές συνθήκες ήταν ευνοϊκές, κατέστη δυνατό να αξιοποιηθούν ο άνεμος και το νερό, γεγονός που μας έδωσε τους γνωστούς νερόμυλους και ανεμόμυλους. Έπρεπε όμως να περιμένουμε μέχρι τη βιομηχανική επανάσταση ώστε να υπάρξει μια μεγαλύτερη διείσδυση άλλων ενεργειακών πόρων, διαδικασία η οποία εντάθηκε κυρίως από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα με την υιοθέτηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται στην επαγωγή. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ονομάζεται η εμφάνιση ηλεκτρισμού εξαιτίας μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα είναι το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει. Έτσι, η διαταραχή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου. Πηνία περιστρέφονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των μαγνητών. Σχεδόν όλες οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (το οποίο συνήθως έχει συχνότητα 50 ή 60 κύκλους το δευτερόλεπτο). ([www.anadrassi.gr](http://www.anadrassi.gr))

Αρχικά το πηνίο είναι σταθερό και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα έχει τιμή μηδέν. Καθώς το πηνίο περιστρέφεται η τιμή του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλεται, αυξάνει σταδιακά, φθάνει σε μια μέγιστη θετική τιμή, στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται μηδενίζεται (όταν το πηνίο βρίσκεται "ανάποδα μέσα στο μαγνητικό πεδίο"), στη συνέχεια φθάνει σε μια μέγιστη αρνητική τιμή επιστρέφει στο μηδέν και ο "κύκλος" αυτός επαναλαμβάνεται. Αυτή η εναλλαγή γίνεται μερικές φορές το δευτερόλεπτο. Αν ο "οπλισμός", δηλαδή τα πηνία, αποτελείται από 2 σύρματα που σχηματίζουν μεταξύ τους ορθή γωνία, και συνδέονται σε διαφορετικές εξωτερικές συνδέσεις, τότε έχουμε 2 παραγόμενα ρεύματα όπου το ένα έχει μέγιστη ισχύ, όταν το άλλο μηδενίζεται. Αυτό ονομάζεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα 2 φάσεων.



Εικ.2.1 Τριφασική γεννήτρια τοπολογίας τριγώνου (delta alternator) (www. avsite.gr)

Αν έχουμε 3 οπλισμούς, (δηλαδή 3 πηνία) συνδεόμενους με γωνία 120 μοιρών, τότε το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα έχει 3 φάσεις, το γνωστό τριφασικό εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. (Garyfallidou)

Για να μετατραπεί λοιπόν η κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική χρειάζεται πρώτα να έχουμε κάποια άλλη μορφή που να αποδίδει μηχανική ενέργεια. Σήμερα οι πιο διαδεδομένοι τρόποι ηλεκτροπαραγωγής γίνονται με:

1. καύση υδρογονανθράκων σε διάφορες μορφές τους, (άνθρακας – στερεό), (φυσικό αέριο, βιοαέριο – αέριο), (πετρέλαιο – υγρή)
2. Πυρηνική ενέργεια,
3. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Αιολική, γεωθερμική, ηλιακή, υδροδυναμική).

Στην Ελλάδα τα έτη 2010-2011 το ενεργειακό προφίλ διαμορφωνόταν διαμορφώθηκε σύμφωνα με τα στοιχεία των Πινάκων 2.1 και 2.2 ως εξής (ΡΑΕ)

*Πίνακας 2.1 Ενεργειακό προφίλ ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (ΔΕΗ)*

	Συνδεδεμένο δίκτυο		Απομονωμένο δίκτυο		Σύνολο	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Λιγνίτης	27,57	53,15	-	-	27,57	47,98
Πετρέλαιο	0,009	0,02	4,76	85,15	4,77	8,30
Φυσικό αέριο	14,85	28,63	-	-	14,85	25,84
Μεγάλα υδροηλεκτρικά	3,68	7,09	-	-	3,68	6,40
Ανανεώσιμες πηγές	2,53	4,88	0,83	14,85	3,36	5,85
Εισαγωγές	3,23	6,23	-	-	3,23	5,62
<b>Σύνολο</b>	<b>51,87</b>	<b>100,00</b>	<b>5,59</b>	<b>100,00</b>	<b>57,46</b>	<b>100,00</b>

*Πιν. 2.2 Μεταβολή στη σύνθεση ηλεκτροπαραγωγής μεταξύ 2010 - 2011 στο διασυνδεδεμένο δίκτυο*

	2010 (TWh)	2011 (TWh)	% μεταβολή
Λιγνίτης	27,44	27,57	0,47
Πετρέλαιο	0,11	0,009	-91,82
Φυσικό αέριο	10,36	14,85	43,34
Μεγάλα υδροηλεκτρικά	6,70	3,68	-45,07
Ανανεώσιμες πηγές	2,04	2,53	24,02
Εισαγωγές	5,70	3,23	-43,33
<b>Σύνολο</b>	<b>52,35</b>	<b>51,87</b>	<b>-0,92</b>

Τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η παραπάνω μορφή, πέρα από την περιβαλλοντική εικόνα της μεγάλης εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, είναι η υπερσυγκέντρωση της παραγωγής στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλες απώλειες λόγω μεταφοράς μιας και το επίκεντρο της οικιακής αλλά και βιομηχανικής κατανάλωσης είναι στη Ν. Ελλάδα, η μικρή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών και η εξάρτηση των μη διασυνδεδεμένων νησιών από το ακριβό πετρέλαιο.

Για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, η λύση δόθηκε με την κατασκευή των επαγωγικών πηνίων, που αποτέλεσαν τους προδρόμους του σύγχρονου (ηλεκτρικού) μετασχηματιστή καθώς και το πρώτο πλήρες σύστημα υψηλής τάσης μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές και υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς, που αποτέλεσε τη βάση της σύγχρονης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαδικασία είναι η εξής: Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές που μετατρέπουν τη χαμηλή τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες. Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, στους οποίους μετατρέπεται η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας από υψηλή σε μέση και χαμηλή τάση, προκειμένου με τη βοήθεια εναέριων γραμμών να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε σπίτια που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση.

Έχουμε δύο τύπους δικτύου, ανάλογα με την τάση της ηλεκτρικής ισχύος που διακινεί, το δίκτυο (Σύστημα) Μεταφοράς και το δίκτυο Διανομής.

Το δίκτυο Μεταφοράς, μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (230/400V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20 kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

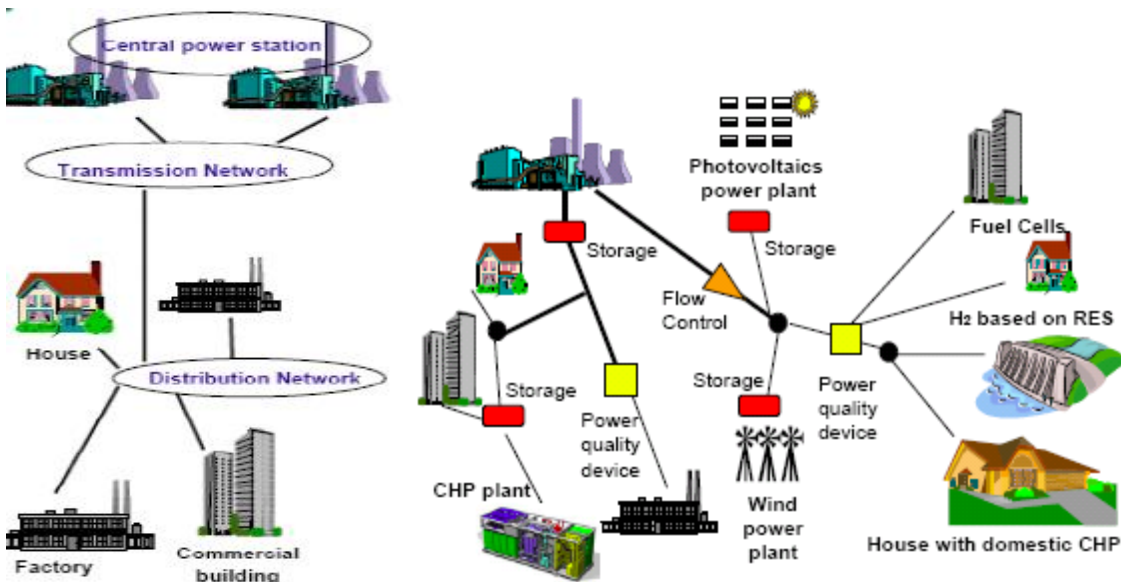
Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Το δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (230/400V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές (ΠΑΕ)

Η ανάγκη (οικονομική, οικολογική, νομική) για εντονότερη διεξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο προφίλ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχει επιπτώσεις και στο ίδιο το δίκτυο, το οποίο αρχίζει να αποκτά αποκεντρωμένα χαρακτηριστικά και χαρακτηρίζεται από την ορολογία της έξυπνης διαχείρισης (smart grids).



Εικ 2.2 Παλαιότερο (αριστερά) και σύγχρονο (δεξιά) πρότυπο δικτύου (Κυριακίδης)

Είναι φανερό από την παραπάνω εικόνα ότι οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας παίζουν σημαντικό ρόλο στη μελλοντική διάταξη των δικτύων. Γενικά οι τεχνολογίες αυτές χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους: (Σαγάνη, 2009)

A. Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Χρησιμοποιούνται σε κατακεντρωμένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα. 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. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συστήματα όπως οι σφόνδυλοι (flywheels), οι υπερ-πυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

B. Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους. 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. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συστήματα όπως 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).

Πίν. 2.3 Εφαρμογές μονάδων αποθήκευσης ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας τους (Τσικαλάκης)

Ομάδα εφαρμογών	Εφαρμογές	Διάρκεια κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης
Διαχείριση μονάδων ΑΠΕ	Εξασφάλιση ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ	4 – 10 ώρες
	Συμβόλαια ανάλογα με την ώρα παράδοσης της παραγωγής από ΑΠΕ	
Χειρισμοί συστήματος μεταφοράς ή διανομής	Υποστήριξη συστημάτων μεταφοράς	2 – 5 ώρες
	Μείωση των απαιτήσεων για εγκαταστημένη ισχύ συστήματος μεταφοράς	4 – 6 ώρες
	Υποκατάσταση κεντρικών μονάδων παραγωγής	
	Μείωση συμφόρησης δικτύων	2 – 6 ώρες
	Αναβολή επενδύσεων σε συστήματα μεταφοράς & διανομής	
	Παροχή βοηθητικών υπηρεσιών	1 – 5 ώρες
	Χρήση για εξομάλυνση των τιμών της αγοράς	1 – 10 ώρες
Σχέσεις εταιρειών ηλεκτρισμού και πελατών	Παροχή υπηρεσιών ποιότητας ισχύος (PQ)	10 sec – 1min
	Παροχή υπηρεσιών για εφαρμογές αξιοπιστίας (PR)	15 min – 5 ώρες
	Διαχείριση μεταβολής ζήτησης	4 – 12 ώρες
	Διαχείριση για τη χρήση τιμολογίων χρέωση ανάλογα με την ώρα κατανάλωσης (time of use rates)	(εξαρτώμενο από το σύστημα τιμολογίων)

Για να γίνουν περισσότερο κατανοητά τα χαρακτηριστικά αυτών των τεχνολογιών είναι σημαντικό να προχωρήσουμε στον ορισμό κάποιων όρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και σύγκρισή τους. Οι όροι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

Η ενεργειακή πυκνότητα (energy density), που ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποδοθεί από μία μονάδα ενεργειακής αποθήκευσης ανά μονάδα μάζας ή όγκου της. Μετριέται συνήθως σε Wh/kg. Σε συνδυασμό με το φυσικό μέγεθος και το βάρος της διάταξης αποθήκευσης, η ενεργειακή πυκνότητα καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που μπορεί η διάταξη να αποθηκεύσει και να αποδώσει.

Η αποθηκευτική ικανότητα (storage capacity), η οποία ορίζεται ως η ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης μετά τη φόρτιση. Συχνά η εκφόρτιση δεν είναι πλήρης. Για το λόγο αυτό, η αποθηκευτική ικανότητα καθορίζεται βάσει της συνολικής ενέργειας που



αποθηκεύεται και η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτή που αποδίδεται, λόγω των ενεργειακών απωλειών. Η αποθηκευτική ικανότητα εκφράζεται συνήθως σε MWh.

Η εκτιμώμενη ενέργεια (εκφραζόμενη σε kWh ή MWh), η οποία είναι σημαντική για τον καθορισμό του χρονικού διαστήματος που η διάταξη αποθήκευσης μπορεί να παρέχει ενέργεια. Καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να «αποδεσμευτεί» από τη διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης σε έναν καθορισμένο χρόνο.

Η ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας, ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται προς την ενέργεια που αποθηκεύεται. Η αποθήκευση της ενέργειας και στη συνέχεια η επαναπόδοσή της στην κατανάλωση γίνεται με την παρεμβολή απωλειών, με αποτέλεσμα η ενέργεια που αποδίδεται να είναι μικρότερη από την ενέργεια που αποθηκεύεται. Τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης εμφανίζουν απώλειες φόρτισης, αυτό-εκφόρτισης, καθώς και απώλειες λόγω απουσίας φορτίου. Ενεργειακές απώλειες παρατηρούνται επίσης και κατά τη μεταφορά της ενέργειας στον τόπο κατανάλωσης, αλλά και την μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος (αναστροφείς, συστήματα ελέγχου) προκειμένου να μπορεί να εκμεταλλευτεί με ασφάλεια και αξιοπιστία από τα φορτία. Για να είναι ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης πραγματικά ανταγωνιστικό πρέπει να έχει καλή ενεργειακή απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι, για βέλτιστη λειτουργία, πρέπει να περιορίζονται οι ενεργειακές απώλειες.

Ο χρόνος εκφόρτισης (discharge time), που ορίζεται ως η χρονική περίοδος κατά τη διάρκεια της οποίας μια διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης αποδεσμεύει την ενέργεια που έχει αποθηκεύσει. Ο χρόνος εκφόρτισης σχετίζεται με τη χωρητικότητα ισχύος (power capacity) της διάταξης, η οποία εκφράζεται σε kW ή MW.

Η αυτο-εκφόρτιση (self-discharge), η οποία ορίζεται ως το ποσοστό της ενέργειας που αποθηκεύτηκε αρχικά στη διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης και παρέμεινε τελείως αναξιοποίητο. Εκφράζεται συνήθως σε ποσοστό % ανά ώρα ή σε ποσοστό % ανά ημέρα.

Η διάρκεια ζωής (life-time), που αφορά το χρόνο λειτουργίας της διάταξης ενεργειακής αποθήκευσης και εκφράζεται σε έτη ή κύκλους. Εκφραζόμενη σε κύκλους, αναφέρεται στο μέγιστο αριθμό των κύκλων (N) που η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να αποδεσμεύσει την ποσότητα της ενέργειας για την οποία σχεδιάστηκε, μετά από κάθε επαναφόρτιση. Κάθε κύκλος αντιστοιχεί σε μια φόρτιση και μια εκφόρτιση. Όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υπόκεινται σε κόπωση ή φθορά από τη χρήση. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αποθήκευσης που

εξετάζει την αντοχή της μονάδας από την αποψη των κύκλων, πρέπει να είναι πρωταρχικής σημασίας κατά την επιλογή του συστήματος. Εντούτοις, οι πραγματικές διαδικασίες κόπωσης είναι συχνά σύνθετες και η διάρκεια ζωής της μονάδας αποθήκευσης σε κύκλους δεν καθορίζεται πάντα με ακρίβεια.

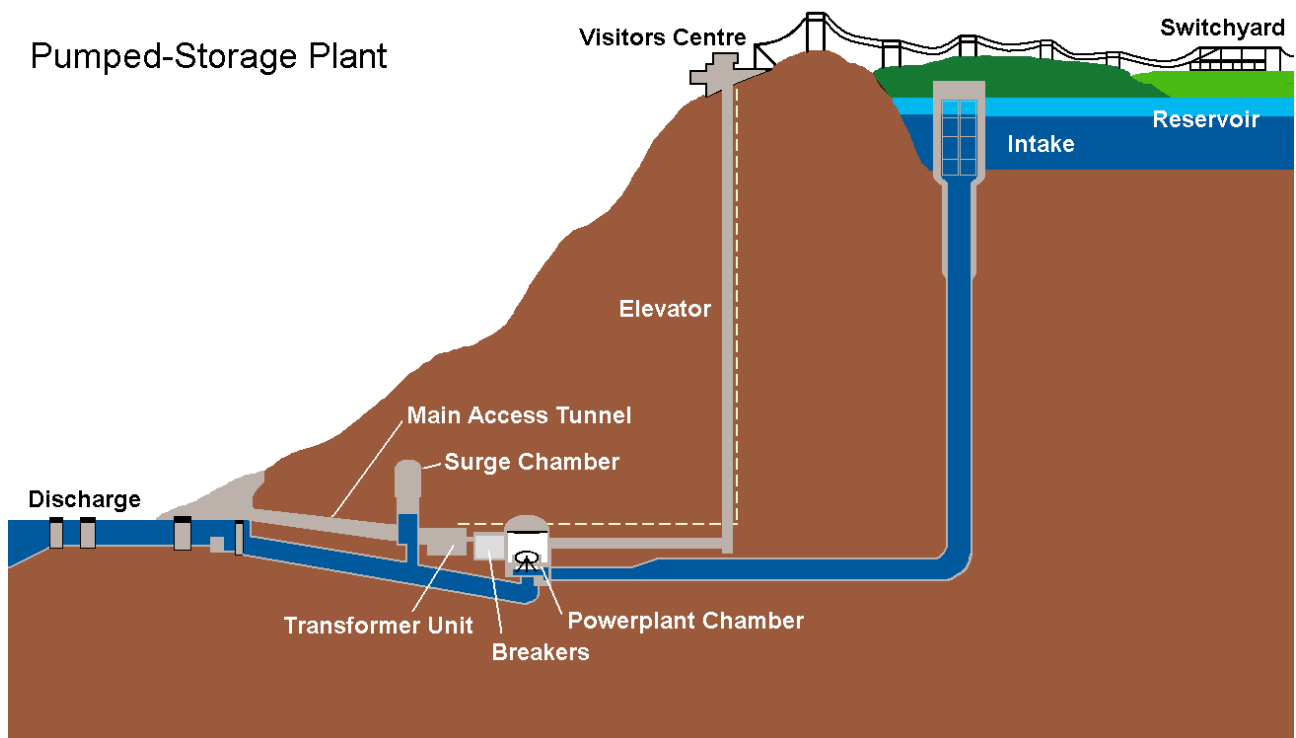
Τα κόστη (costs) των διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης, τα οποία αναγράφονται συνήθως ως κόστος/kWh ή κόστος/kW. Τα κόστη σχετίζονται συνήθως με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται οι διατάξεις. Επομένως, μερικές διατάξεις θα εμφανίζουν υψηλό κόστος/kWh, αλλά σχετικά χαμηλότερο κόστος/kW, ενώ άλλες το αντίθετο. Εξαρτάται δηλαδή από την εφαρμογή αν μια διάταξη είναι ενδεχομένως οικονομική ή όχι.

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις (environmental impacts). Η παράμετρος αυτή δεν αποτελεί κριτήριο της απόδοσης των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης, η περιβαλλοντική «συμβατότητα» του συστήματος αποτελεί ισχυρή διαφήμιση για την προώθησή του. Δεν πρέπει επομένως να αγνοούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης. (Σαγάνη, 2009)

### 3.1 ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗ

#### 3.1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης είναι σήμερα η πιο ώριμη και ευρύτατα διαδεδομένη τεχνική αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Αποτελείται από δυο μεγάλες δεξαμενές, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε σημεία με σημαντική υψομετρική διαφορά και από διάταξη αντλιών και υδροστρόβιλου. Κατά τη χρονική περίοδο χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται άντληση νερού από την κάτω προς την πάνω δεξαμενή, όπου και αποθηκεύεται μέχρι να χρειαστεί. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης το νερό από την πάνω δεξαμενή απελευθερώνεται μέσα από τις σωληνώσεις και καταλήγει στον υδροστρόβιλο, οπότε λειτουργώντας σαν ένα κλασικό υδροηλεκτρικό έργο παράγει ενέργεια. Ο βαθμός απόδοσης μιας σύγχρονης τέτοιας εγκατάστασης ανέρχεται στο επίπεδο του 70% έως 85%. Παράγοντες που επηρεάζουν και περιορίζουν την περαιτέρω αποδοτικότητα είναι οι απώλειες στις σωληνώσεις και ο βαθμός απόδοσης αντλίας και στροβίλου. (Connolly, 2010)



Εικ. 3.1 Σχηματική απεικόνιση παραγωγής ενέργειας με τη μέθοδο της αντλησιοταμίευσης (Connolly, 2010)

Μέχρι πρόσφατα οι διατάξεις αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιούσαν φρέσκο νερό. Όμως το 1999 κατασκευάστηκε στην Ιαπωνία ένα έργο με χρήση θαλασσινού νερού. Φυσικά γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το μεγάλο πρόβλημα ήταν η αντιμετώπιση της διάβρωσης. Αυτό κατέστη δυνατό με τη χρήση πολλαπλών στρωμάτων χρωμάτων και ειδικών με μεταλλικών κραμάτων. Αυτό βέβαια είχε οικονομική επίπτωση στο όλο εγχείρημα, αλλά από την άλλη πλευρά η μη ύπαρξη ανάγκης κατασκευής κάτω δεξαμενής προσέφερε αντιστάθμισμα σε αυτή την παράμετρο. (Connolly, 2010), (Jap)

Μια τυπική εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης έχει υδραυλική πτώση 300m, δηλαδή τόση είναι η κάθετη απόσταση ανάμεσα στην άνω και κάτω δεξαμενή. Η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας είναι συνάρτηση της υδραυλικής πτώσης και του όγκου νερού που μπορεί να μεταφερθεί μέσω των σωληνώσεων, ενώ το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας είναι συνάρτηση της υδραυλικής πτώσης και του όγκου της άνω δεξαμενής.

Για να υπολογιστεί η συνολική ισχύ μιας τέτοιας εγκατάστασης, έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$P_c = \rho g Q H n_p \quad (3.1)$$

Όπου:

$P_c$  = Ισχύς σε Watt (W)

$\rho$  = πυκνότητα νερού σε  $\text{kg/m}^3$

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $\text{m/s}^2$

$Q$  = παροχή νερού σε  $\text{m}^3/\text{s}$

$H$  = ύψος υδραυλικής πτώσης σε m

$n_p$  = βαθμός απόδοσης της αντλίας

Για να υπολογίσουμε της αποθηκευτική ικανότητα της εγκατάστασης έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$S_c = \rho g H V n_T / 3.6 \times 10^9 \quad (3.2)$$

Όπου:

$S_c$  = δυνατότητα αποθηκευμένης ενέργειας σε megawattώρες (MWh)

$V$  = ο όγκος του νερού που αντλείται και ημερησίως σε  $\text{m}^3$

$\rho$  = πυκνότητα νερού σε  $\text{kg/m}^3$

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας σε  $\text{m/s}^2$

$H$  = ύψος υδραυλικής πτώσης σε m

$n_T$  = βαθμός απόδοσης του στροβίλου

Είναι σαφές ότι η ισχύς και οι δυνατότητες αποθήκευσης εξαρτώνται από το ύψος υδραυλικής πτώσης και από τους όγκους των δεξαμενών. Όμως η συνήθης πρακτική, όταν βέβαια το επιτρέπει

και η γεωλογία της περιοχής, είναι ο σχεδιασμός να δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην υδραυλική πτώση παρά στον όγκο των δεξαμενών με στόχο τον περιορισμό του κόστους. Οι λόγοι για αυτή την προσέγγιση είναι οι εξής:

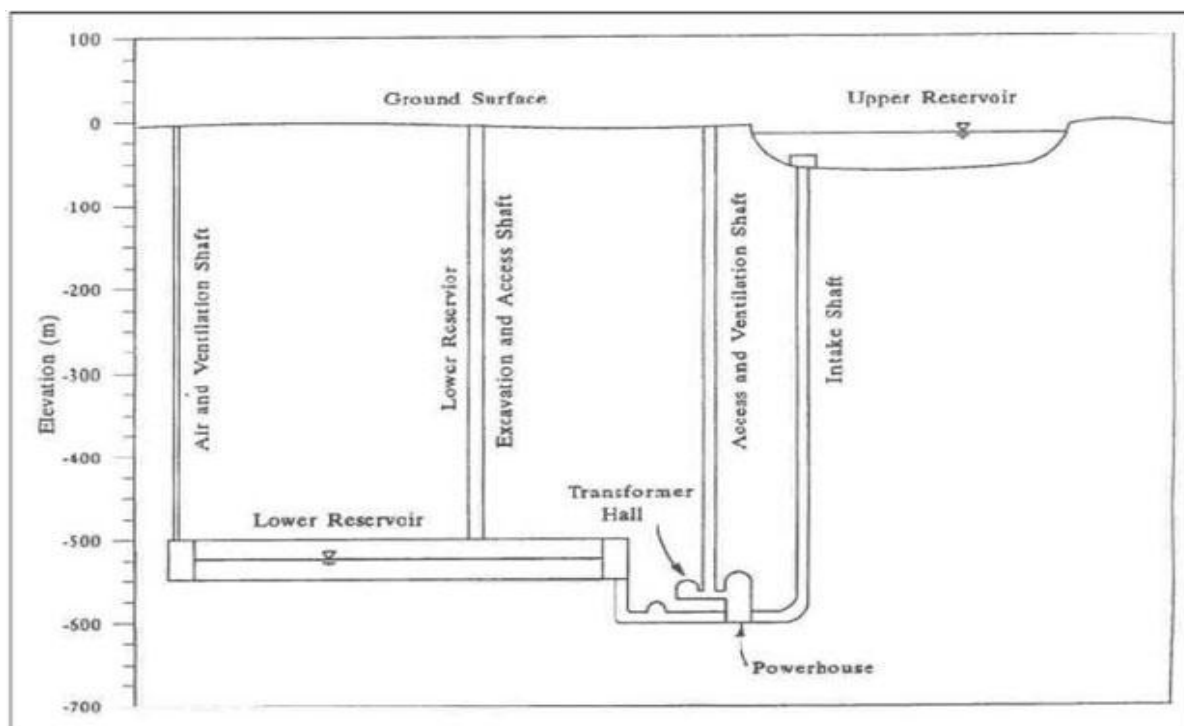
1. Μικρότερος όγκος χωματουργικών εργασιών για την κατασκευή των δεξαμενών
2. Οι σωληνώσεις είναι μικρότερες, συνεπώς μειώνεται το κόστος αγοράς και εγκατάστασής τους
3. Ο στρόβιλος είναι μικρότερος

### 3.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Συνολικά υπάρχουν περίπου 90GW σε παραπάνω από 240 εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης παγκοσμίως, που αντιπροσωπεύουν το 3% της συνολικής ενεργειακής παραγωγικής δυνατότητας. Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης, όπως βέβαια και των κλασικών υδροηλεκτρικών έργων είναι ο γρήγορος χρόνος απόκρισης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο και συνεπώς μπορεί ιδανικά να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές εξισορρόπησης φορτίου. Ο συνήθης χρόνος απόκρισης είναι 10 λεπτά (black start) σε πλήρη ισχύ. Αν το σύστημα είναι σε κατάσταση αναμονής τότε μπορεί να μπει στο δίκτυο μέσα σε 10 με 30 δευτερόλεπτα. Ανάλογα με το μέγεθος των δεξαμενών, μια τέτοια εγκατάσταση μπορεί να προσφέρει ενέργεια ακόμα και σε επίπεδο μηνών καθιστώντας την ιδανική για ενεργειακά αυτόνομα και απομονωμένα συστήματα, όπως νησιά ή απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Τέλος δεν πρέπει να αμεληθεί ο παράγοντας περαιτέρω κοινωνικής αξιοποίησης κυρίως με τη χρήση της αποθηκευμένης ποσότητας νερού για άρδευση γεωργικών καλλιεργειών, γεγονός που συμβάλλει ακόμα περισσότερο στο βαθμό οικονομικής απόδοσης του έργου. Το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης ανέρχεται από 500€ έως 2000€ ανά kW, εξαρτώμενο από παράγοντες όπως το μέγεθος, την περιοχή και τη σύνδεση με το δίκτυο.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα ενός έργου αντλησιοταμίευσης είναι η εξάρτηση από τη γεωλογία της περιοχής, καθώς χρειάζεται να βρεθεί το σωστό μέρος για να υποδεχθεί τις δεξαμενές (άνω και κάτω), το οποίο συνήθως προϋποθέτει την ύπαρξη βουνών. Βέβαια υπάρχουν και παραδείγματα όπου η κάτω δεξαμένη αντικαθίσταται από ελεύθερη μάζα νερού, όπως έχει γίνει στην Ιαπωνία (Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Station) και στη Γερμανία στον ποταμό Έλβα (Geesthacht, Schleswig Holstein). Ακόμα για να είναι αποδοτικό ένα τέτοιο έργο πρέπει να κατασκευαστεί σε μεγάλη κλίμακα. Παρά το γεγονός ότι το κόστος ανά kW είναι από τα μικρότερα για τις υπάρχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, το μέγεθος της κλίμακας μπορεί να είναι προβληματικό για το κόστος της αρχικής επένδυσης.

Μια μελλοντική και εξαιρετικά ενδιαφέρουσα εξέλιξη είναι η κατασκευή υπόγειων αντλησιοταμιευτικών έργων. Σε αυτά τα έργα η άνω δεξαμενή είναι στην επιφάνεια του εδάφους και η κάτω υπόγεια. Ο λόγος που μπορεί να επιλεγεί μια τέτοια λύση είναι η αντιμετώπιση της προβληματικής γεωλογίας της περιοχής (επίπεδο έδαφος). Φυσικά όπως γίνεται αντιληπτό εδώ το κόστος αυξάνεται λόγω της διαδικασίας εκσκαφής για την κάτω δεξαμενή. Βέβαια υπάρχουν περιοχές όπου φυσικά σχηματισμένες κοιλότητες στο έδαφος ή παλιά ορυχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως θα δούμε και παρακάτω στη μέθοδο CAES.



Εικ. 2.2 Σχηματική αναπαράσταση υπόγειας εγκατάστασης αντλησιοταμίευσης (3Ca)

Προς το παρόν η τεχνολογία αυτή δεν έχει αξιοποιηθεί εμπορικά και έτσι είναι δύσκολο να γίνει ασφαλής εκτίμηση των απαιτούμενων κεφαλαίων για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας επένδυσης.

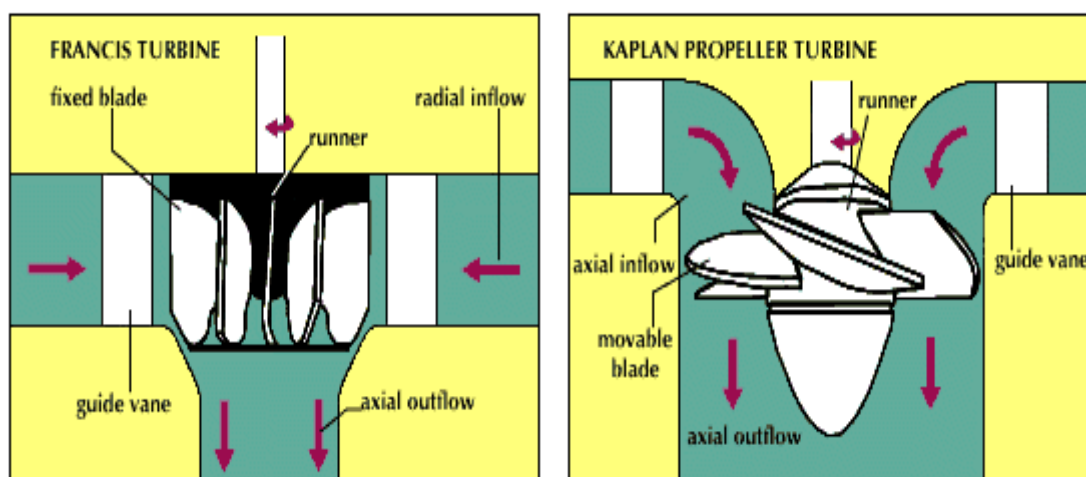
### 3.1.3 ΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Οι στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στα έργα αντιπροσωπεύουν μια σημαντική παράμετρο της επένδυσης. Η διεθνής πρακτική είναι πως δεν υπάρχουν τυποποιημένα μεγέθη, αλλά ανάλογα με την κάθε περίπτωση υπάρχει και η ανάλογη λύση (customized approach). Τρεις είναι οι κυριότεροι τύποι στρόβιλων: Pelton, Francis, Kaplan.

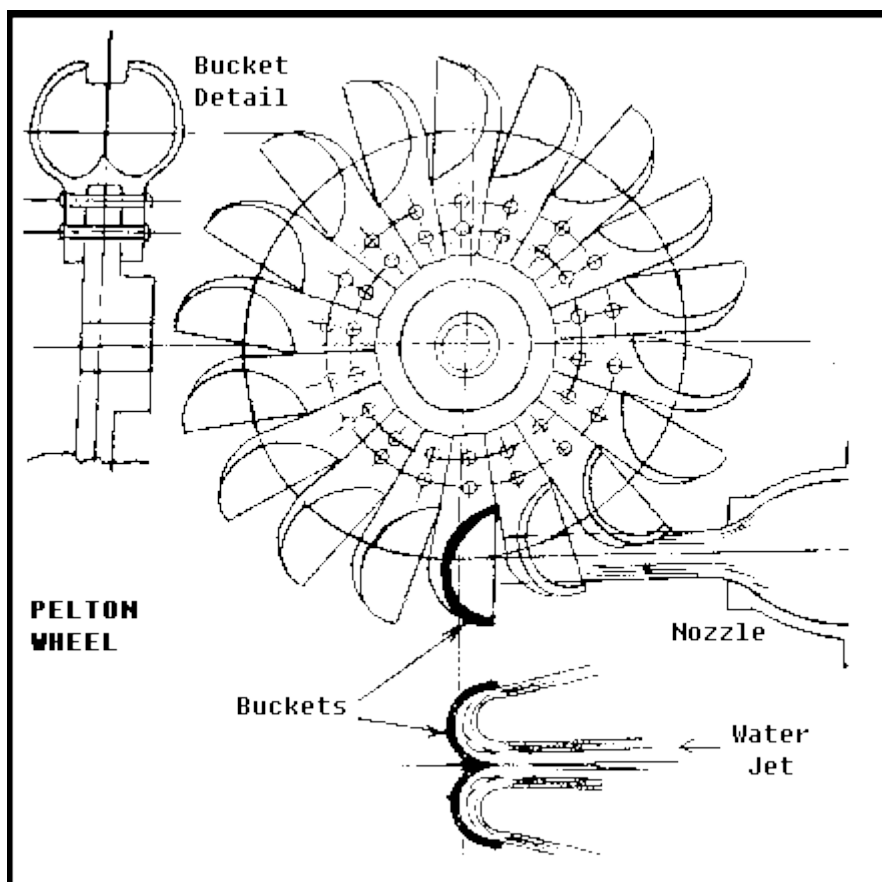
Ο υδροστρόβιλος είναι ουσιαστικά ένας ρότορας που χρησιμοποιεί την κινητική ενέργεια του

νερού για να τη μετατρέψει σε μηχανική και μετά μέσω καταλλήλων διατάξεων σε ηλεκτρική. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον τρόπο που μεταφέρεται η ενέργεια σε αυτούς: Στους υδροστροβίλους δράσης και αντίδρασης. Στην πρώτη κατηγορία το νερό εξέρχεται από ένα ή και περισσότερα ακροφύσια, τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα στο τέλος του αγωγού υδατόπτωσης. Εν συνεχεία αυτό προσπίπτει σε μια σειρά σκαφιδίων, που βρίσκονται τοποθετημένα στην περιφέρεια του ρότορα. Το νερό φεύγοντας από το ακροφύσιο βρίσκεται σε κατάσταση ατμοσφαιρικής πίεσης. Όλη η πίεση που έχει αναπτύξει στις σωληνώσεις έχει μετατραπεί σε κινητική ενέργεια. Ο στρόβιλος κινείται ελεύθερα και η μεταφορά ενέργειας συντελείται λόγω της ώθησης που δίνει το προσπίπτον νερό στα σκαφίδια. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι στρόβιλοι Pelton και Turgo.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος υδροστροβίλου είναι ο Pelton. Αποτελείται από διπλά ημισφαιρικά σκαφίδια, προσαρμοσμένα στην περιφέρεια του στροβίλου. Η δέσμη νερού προσπίπτει στο κέντρο αυτών των ημισφαιρικών σκαφιδίων (splitter) και χωρίζεται συμμετρικά στα δυο. Η εσωτερική γωνία πρόσπτωσης κυμαίνεται ανάλογα με τον σχεδιασμό ανάμεσα σε  $1^\circ$  και  $3^\circ$ . Θεωρητικά αν τα σκαφίδια είναι ακριβώς σφαιρικά τότε η δέσμη θα αναστρέψει τη διεύθυνση του διανύσμά της κατά  $180^\circ$  και θα είναι ακριβώς στην αντίθετη κατεύθυνση από τη σχετική ταχύτητα της εισερχόμενης δέσμης. Αυτό όμως είναι πρακτικά απευκαίριο γιατί τότε οι δυο δέσμες θα αλληλοαναιρούνταν κατά μεγάλο βαθμό μειώνοντας τη συνολική απόδοση του στροβίλου. Για αυτό στην πράξη ο βαθμός γωνιακής αναστροφής των σκαφιδίων περιορίζεται στο διάστημα ανάμεσα σε  $165^\circ$  και  $170^\circ$ , και τα σκαφίδια είναι ελαφρώς μικρότερα στο μέγεθος από πλήρη ημισφαίρια. Η ποσότητα του νερού αυξομειώνεται ανάλογα με τις ανάγκες μέσω μια ρυθμιστικής βαλβίδας που βρίσκεται μέσα στο στόμιο. Χαρακτηριστικό των διατάξεων Pelton είναι ότι ανάλογα με τις διαστάσεις αλλά και τις ανάγκες του έργου μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από μια δέσμες νερού μέσω αντίστοιχων στομιών. (Atthanayake, 2009)

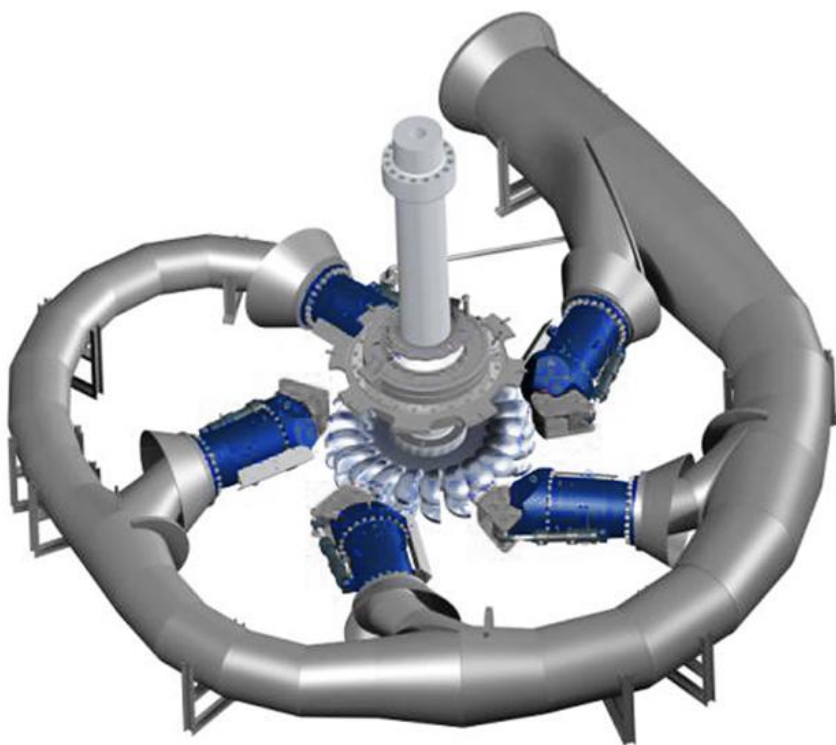


Εικ. 3.3 Σχηματική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας στροβίλων ανάδρασης τύπου Francis και Kaplan. Τα οδηγία περύγια χρησιμεύουν τόσο για ρύθμιση της ροής όσο και για ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης του νερού στα περύγια του στροβίλου μειώνοντας έτσι τη φθορά του μετάλλου από τα κρουστικά φαινόμενα, εξαιτίας των έντονων πιέσεων που ασκούνται.



Εικ. 3.4 Σκαρίφημα λειτουργίας στροβίλου Pelton (Wat)





*Εικ. 3.5 Αναπαράσταση στροβίλου Pelton με πολλαπλά στόμια (Wat)*

Σε έναν στρόβιλο αντίδρασης το νερό εισάγεται ολοκληρωτικά στην περιφέρεια του ρότορα και αυτός παραμένει πλήρης ύδατος καθόλη τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής. Μόνο τμήμα της δυναμικής ενέργειας μετατρέπεται μέσω των οδηγών πτερυγίων σε κινητική. Συνεπώς το νερό παραμένει πάντα υπό πίεση σαφώς μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Μετά την έξοδο από το στρόβιλο το νερό εκβάλλει μέσω βυθισμένου αγωγού κατάθλιψης. Αυτό γίνεται για να μην παραμβάλλεται ο παράγοντας της ατμοσφαιρικής πίεσης στην όλη διαδικασία. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι στρόβιλοι Francis και Kaplan. (Atthanayake, 2009)

Οι στρόβιλοι τύπου Francis χρησιμοποιούνται κυρίως για υδατοπτώσεις μέχρι 600 m και μεγάλους όγκους νερού. Τα χαρακτηριστικά τους επιτρέπουν μεγάλες ενεργειακές αποδόσεις για ένα μεγάλο εύρος τιμών των παραπάνω παραμέτρων. Πολύ μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των στροβίλων αποτελεί η δυνατότητα που παρέχει η σχεδιάσή τους να ενσωματώνουν στο ίδιο περίβλημα τόσο τον στρόβιλο όσο και την αντλία που χρειάζεται στο έργο παρέχοντας έτσι σημαντική οικονομία χώρου αλλά και επενδυτικού κεφαλαίου κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με το συνολικό μέγεθος του έργου. Το σημαντικότερο μειονέκτημα σχετίζεται με τις αυξημένες ενεργειακές ανάγκες της αντλίας λόγω της μεγαλύτερης μάζας που συνεπάγεται η παρουσία του στροβίλου στην ίδια κατασκευή.

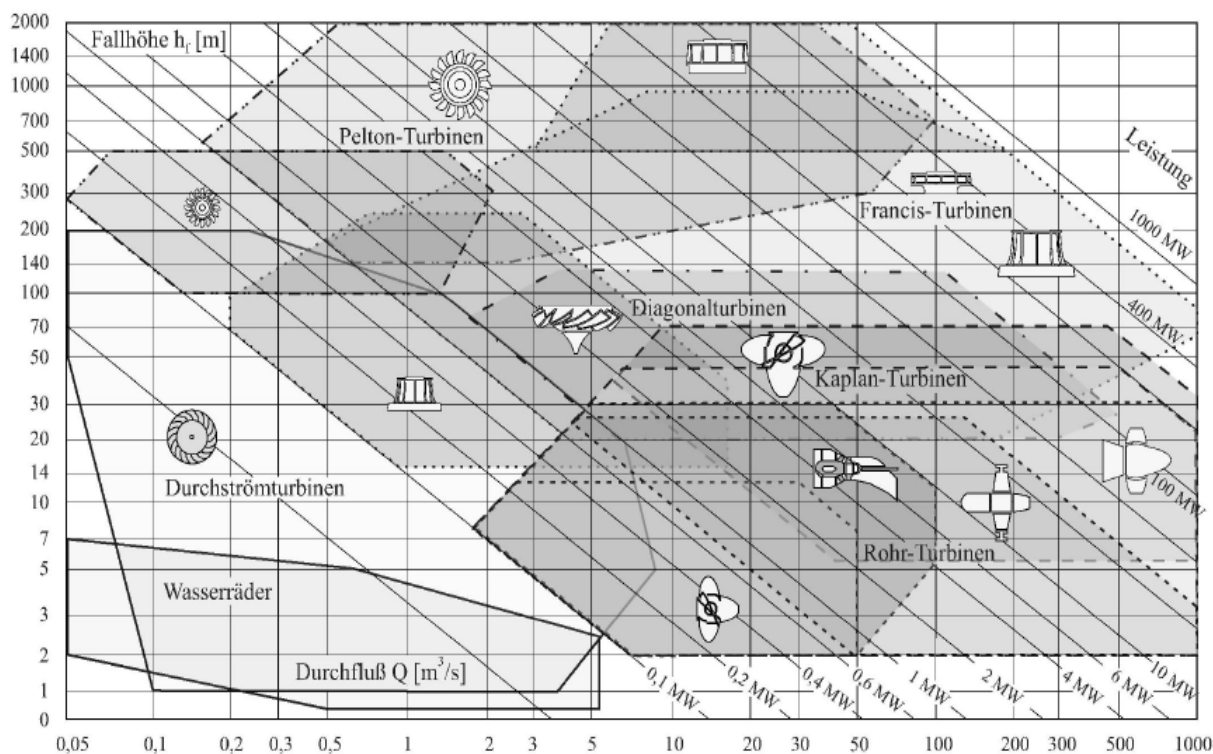


Εικ. 3.6 Αντλιοστρόβιλος τύπου Francis. Κατασκευαστής Voith Siemens. Στο κάτω μέρος διακρίνεται η διάταξη του στροβίλου ενώ στην περιφέρεια παρατηρούμε τα περύγια της αντλίας (Voith)



Εικ. 3.7 Αντλιοστρόβιλος 150 τόνων μεταφέρεται στην τοποθεσία Jocassee. (Pow)

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan χρησιμοποιούνται για μικρές υδατοπτώσεις και μεγάλες ροές. Συναντώνται συνήθως σε μεγάλους ποταμούς όπως ο Δούναβης (Gabčíkovo–Nagymaros Dams), οι οποίοι έχουν ομαλή ροή.



Εικ. 3.8 Εφαρμοφές στροβίλων σε συνδυασμό υδατόπτωσης και όγκου ύδατος (Giesecke, 2005)

### 3.2 ΩΣΜΩΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μέθοδος που θα περιγραφεί παρακάτω είναι γνωστή ως ωσμωτική παραγωγή ενέργειας. Αν και το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται (ώσμωση) είναι γνωστό εδώ και αρκετό καιρό, μόλις το 2013 άρχισε να λειτουργεί το πρώτο εργοστάσιο στα περίχωρα του Oslo (εταιρεία Statkraft) βασιζόμενο σε αυτή την τεχνολογία.

#### 3.2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

Ας εξηγήσουμε πώς γίνεται η όλη διαδικασία ξεκινώντας από τις πιο απλές έννοιες, δηλαδή την ίδια την ώσμωση. Ώσμωση ονομάζεται το φαινόμενο της διέλευσης περισσότερων μορίων διαλύτη, μέσω ημιπερατής μεμβράνης, από τον διαλύτη στο διάλυμα ή από το διάλυμα μικρότερης συγκέντρωσης (αραιότερο) προς το διάλυμα μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε διαλυμένη ουσία (πυκνότερο). Πρόκειται για μια φυσική διαδικασία κατά την οποία μόνο τα μόρια του διαλύτη διαπερνούν την μεμβράνη, ενώ τα μόρια της διαλυμένης ουσίας όχι. Χωρίς την ύπαρξη της μεμβράνης θα συνέβαινε απλή ανάμιξη των δύο διαλυμάτων ή του διαλύτη και του διαλύματος. Αν από την ημιπερατή μεμβράνη περνά και διαλυμένη ουσία, τότε η διαδικασία παύει να είναι ώσμωση και γίνεται μεταξύ των δύο διαλυμάτων. Η ώσμωση πραγματοποιείται με σκοπό να

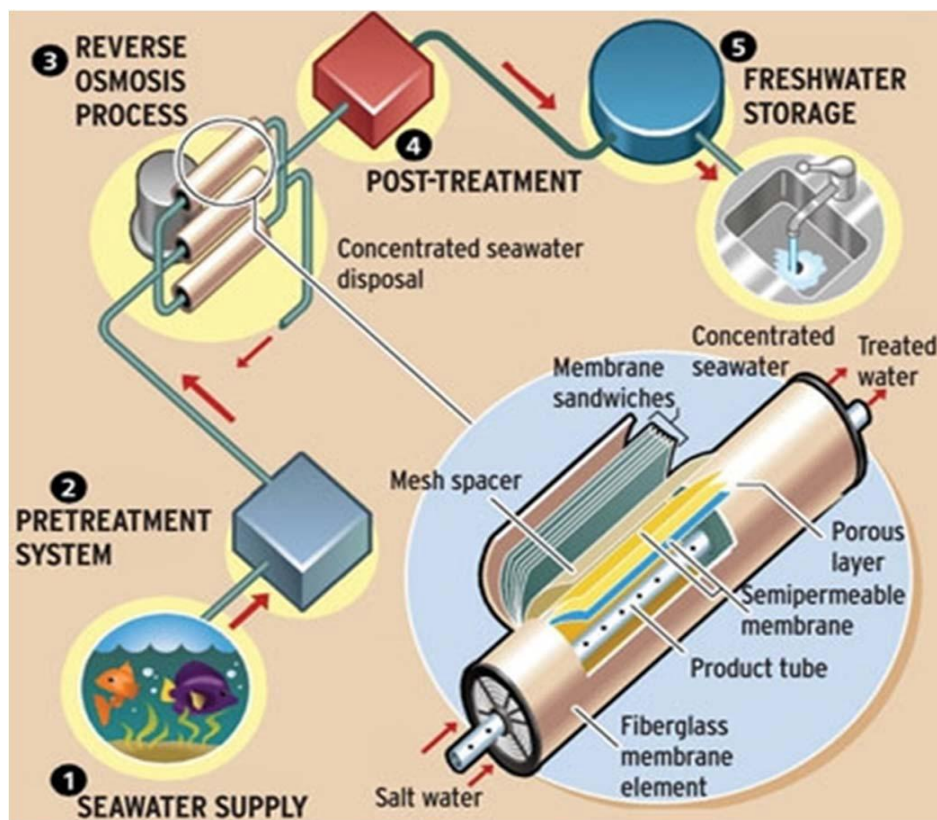
εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων από τις δύο πλευρές της ημιπερατής μεμβράνης. Το φαινόμενο της ώσμωσης είναι πολύ σημαντικό στα διάφορα βιολογικά συστήματα, καθώς πολλές βιολογικές μεμβράνες είναι ημιπερατές. (chem.gr)

Ωσμωτική πίεση διαλύματος, που διαχωρίζεται με ημιπερατή μεμβράνη από τον καθαρό διαλύτη, ονομάζεται η ελάχιστη πίεση που πρέπει να ασκηθεί εξωτερικά στο διάλυμα, ώστε να εμποδιστεί το φαινόμενο της ώσμωσης, χωρίς να μεταβληθεί ο όγκος του διαλύματος. Η ωσμωτική πίεση σε ορισμένη θερμοκρασία εξαρτάται από τον αριθμό γραμμομορίων ή μορίων του διαλυμένου σώματος σε ορισμένο όγκο διαλύματος και επομένως είναι μια προσθετική ιδιότητα. Όταν ένα διάλυμα αραιώνεται, η συγκέντρωσή του ελαττώνεται και επομένως η ωσμωτική του πίεση επίσης ελαττώνεται. Το αντίθετο συμβαίνει σε διάλυμα που συμπυκνώνεται. Ισοτονικά ονομάζονται αν έχουν την ίδια τιμή ωσμωτικής πίεσης. Υποτονικό ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μικρότερη τιμή ωσμωτικής πίεσης. Υπερτονικό ονομάζεται το διάλυμα που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ωσμωτικής πίεσης. (chem.gr)

Όταν στο διάλυμα που έρχεται σε επαφή μέσω της ημιπερατής μεμβράνης με τον καθαρό διαλύτη ασκηθεί πίεση μικρότερη από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος, τότε στο διάλυμα θα συνεχίσει να εισέρχεται διαλύτης, αλλά με μικρότερο ρυθμό. Όταν στο διάλυμα ασκηθεί εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος, τότε το φαινόμενο αντιστρέφεται και μόρια διαλύτη θα εξέρχονται από το διάλυμα προς τον καθαρό διαλύτη (ή από το πυκνότερο προς το αραιότερο διάλυμα). Το φαινόμενο αυτό λέγεται αντίστροφη ώσμωση. Το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης βρίσκει εφαρμογή στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού για την αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας. ([www.chemist.gr](http://www.chemist.gr))



Εικ. 3.9 Σχηματική αναπαράσταση της ώσμωσης και της αντίστροφης μορφής της ([www.chemist.gr](http://www.chemist.gr))



Εικ. 3.10 Απλοποιημένη διάταξη εργοστασίου αφαλάτωσης (Born, 2012)

### 3.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ήδη νησιωτικές περιοχές βασίζουν μεγάλο ή και όλο το μέρος της κατανάλωσης νερού σε εργοστάσια αφαλάτωσης (Σύμη, Σαντορίνη, Ιθάκη, Κύπρος). Το κυριότερο πρόβλημα αυτών των λύσεων είναι το υψηλό ενεργειακό κόστος. Μια πολύ όμορφη λύση προτάθηκε τουλάχιστον σε ερευνητικό επίπεδο από το Πανεπιστήμιο του Αιγαίου το 2007 (Υδριάδα). Αυτή περιλαμβάνει τη διαμόρφωση πλωτής μονάδας αφαλάτωσης και επί τόπου σύζευξή της με ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκά στοιχεία, μέσω της οποίας θα καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες της όλης διαδικασίας. Έχει απόδοση  $70 \text{ m}^3$  την ημέρα και μπορεί να εγκαθίσταται σε αρκετά βαθιά νερά, οπότε η παραγόμενη άλμη να ενσωματώνεται ευκολότερα στο περιβάλλον. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι αυτή η διάταξη είναι μεταφερόμενη, οπότε μπορεί τουλάχιστον σε εποχικό επίπεδο να εκμεταλλεύεται διαφορετικές τοπικές, κλιματολογικές συνθήκες. Δυστυχώς το έργο από το καλοκαίρι του 2013 βρίσκεται πρακτικά σε φάση εγκατάλειψης, λόγω ελλειπούς συντήρησης στο λιμάνι της Ηρακλείας. (ΣΚΑΙ)





Εικ. 3.11 Απεικόνιση της αυτόνομης πλωτής μονάδας αφαλάτωσης του Πανεπιστημίου Αιγαίου

Δυστυχώς όμως η παρούσα λύση σίγουρα δεν είναι αρκετή για την επίλυση της λειψυδρίας σε μεσαία και μεγάλα νησιά. Ίσως όμως η λογική της σύνδεσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αντίστροφης ώσμωσης να είναι η σωστή λύση με άλλη μορφή.

Πιν.3.12 Εγκαταστημένη ικανότητα αφαλάτωσης σε νησιά της Ελλάδας (Τσικαλάκης)

Νησί	Εγκαταστημένη ικανότητα (m <sup>3</sup> /d)
Κυκλάδες	
Σύρος	4270
Ίος	1000
Μύκονος	3450
Πάρος	1200
Σίφνος	500
Τήνος	500
Σαντορίνη	380
Δωδεκάνησα	
Μεγίστη	50
Νίσυρος	650

Η άλλη αυτή μορφή είναι η σύνδεση της παραγωγής αφαλατωμένου νερού όταν λειτουργούν οι

ανεμογεννήτριες με ένα εργοστάσιο ωσμωτικής παραγωγής ενέργειας, το οποίο θα έχει το διπλό ρόλο να παρέχει πόσιμο νερό, αλλά και να λειτουργεί ως πηγή παραγωγής ενέργειας.

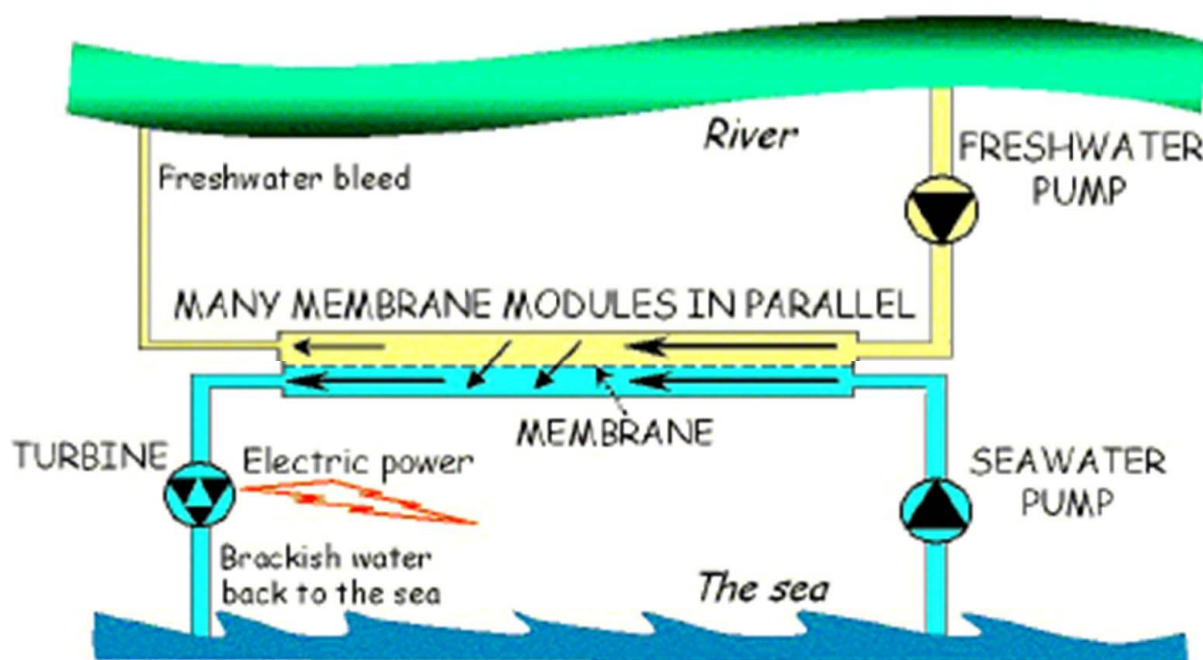
### 3.2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΩΣΜΩΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η λογική είναι ότι υπάρχει μια δεξαμενή χωρισμένη από μεμβράνες, στο ένα μέρος της οποίας βρίσκεται θαλασσινό νερό και στο άλλο γλυκό νερό, το οποίο στις περισσότερες μελέτες προέρχεται από ποτάμια, των οποίων οι εκβολές είναι σε κοντινή απόσταση. Οι μέχρι τώρα μελέτες έχουν δείξει ότι υπάρχουν δυο κύριοι τρόποι παραγωγής ενέργειας μέσω ώσμωσης:

I. Η πίεση καθυστερημένης ώσμωσης Pressure Retarded Osmosis (PRO)

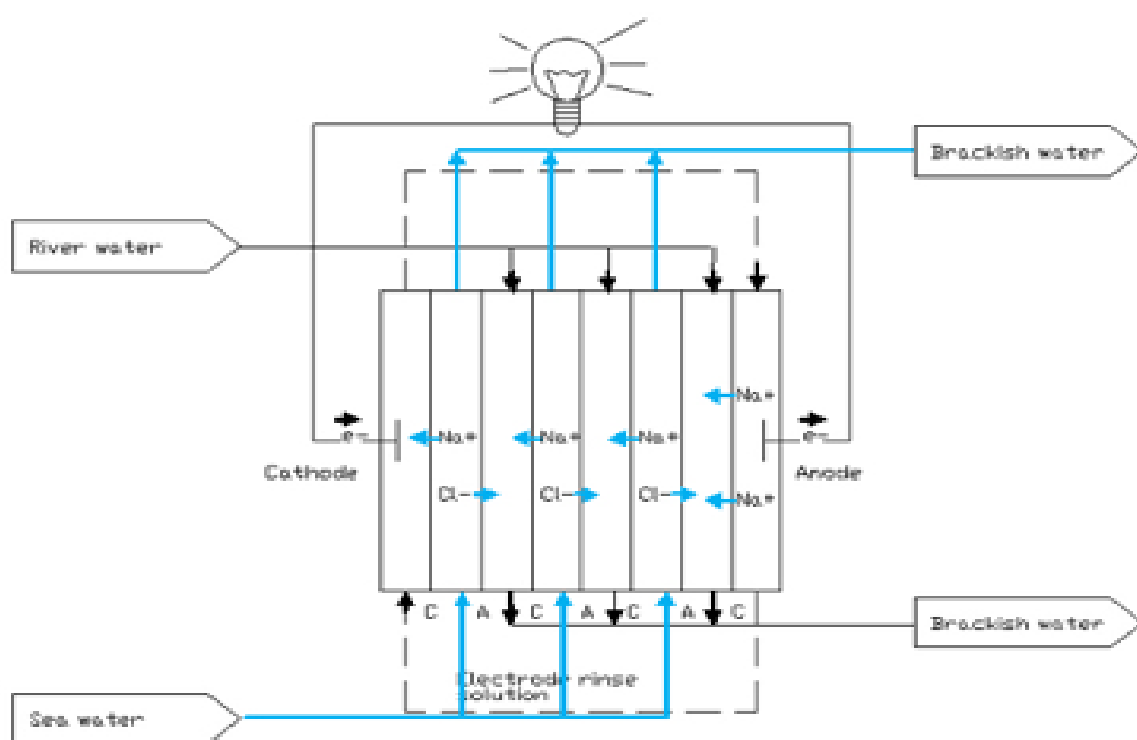
II. Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση Reversed Electro Dialysis (RED).

Η πίεση καθυστερημένης ώσμωσης (PRO) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί τη διαφορά ωσμωτικής πίεσης για την παραγωγή ενέργειας. Δυο διαλύματα διαφορετικής αλατότητας βρίσκονται σε μια δεξαμενή χωριζόμενα από μια ημιπερατή μεμβράνη, η οποία επιτρέπει στον διαλύτη (νερό) να μετακινείται από το πιο αραιό διάλυμα στο πιο πυκνό, ενώ εμποδίζει την κυκλοφορία του διαλυτού στοιχείου (άλατα). Με συνεχή παροχή γλυκού νερού, η ποσότητα του νερού στο θαλασσινό κομμάτι της δεξαμενής θα αυξάνεται, δημιουργώντας συνθήκες αυξημένης πίεσης. Εν συνεχεία το υφάλμυρο πλέον νερό οδηγείται μέσα από σωληνώσεις σε στρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας. (Kleiterp, 2012)



Εικ. 3.12. Αρχή λειτουργίας ωσμωτικών εργοστασίων με τη μέθοδο PRO (Born, 2012)

Η αντίστροφη ηλεκτροδιάλυση Reversed electro dialysis (RED) είναι μια διαδικασία, που χρησιμοποιεί την ηλεκτροχημική διαφορά δυναμικού για την παραγωγή ενέργειας. Σε αντίθεση με τη μέθοδο PRO, η RED χρησιμοποιεί πολλαπλές ευαίσθητες στα ιόντα μεμβράνες, αντί για μια ημιπερατή. Ένας αριθμός κατιόντων C και ανιόντων A ιοντοευαίσθητων μεμβρανών τοποθετούνται όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα ανάμεσα σε μια κάθοδο και μια άνοδο. Τα διαμερίσματα ανάμεσα στις μεμβράνες αυτές πληρούνται με γλυκό (αραιό διάλυμα) και με θαλασσινό νερό (πυκνό διάλυμα). Όταν λοιπόν τα δυο διαλύματα αναμιγνύονται διασπώνται τα μόρια άλατος σε  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ , με συνέπεια να παράγεται φορτίο σε κάθε μια από τις μεμβράνες, το οποίο αθροιζόμενο δεσμεύεται στα ηλεκτρόδια. (Kleiterp, 2012)



Εικ. 3.13 Αρχή λειτουργίας ωσμωτικών εργοστασίων με τη μέθοδο RED (Twente)

Η απόδοση του εργοστασίου της Statkraft κυμαίνεται περίπου στο 75% για ισχύ 2MW, το οποίο είναι μια πολύ καλή τιμή αν λάβει κανείς υπ' όψιν την πειραματική του μορφή. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα μέχρι τώρα ήταν η έλλειψη των κατάλληλων μεμβρανών καθώς και το μεγάλο κόστος των ήδη υπάρχοντων. Όμως η ανάγκη για νέα υλικά σε άλλες εφαρμογές, έδωσαν παράλληλη ώθηση και σε αυτόν τον τομέα με αποτέλεσμα σήμερα να μπορούμε να έχουμε μια αισθητή πτώση του σχετικού κόστους. Στον πίνακα 3.13 παρουσιάζεται ανάγλυφα αυτή η κατάσταση. (Born, 2012)



Πίν. 3.13 Διαχρονική εξέλιξη τιμών μεμβρανών (Born, 2012)

ΕΤΟΣ	ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ
1980	1,00
1985	0,65
1990	0,34
1995	0,19
2000	0,14

Με τα μέχρι τώρα δεδομένα η σχέση ισχύος – επιφάνειας μεμβρανών για τη μέθοδο PRO είναι η ακόλουθη: (STATKRAFT, 2013)

Πίν. 3.14 Αναλογία ισχύος – επιφάνειας μεμβρανών

4kW πρωτότυπη εφαρμογή Tofte	2000m <sup>2</sup>
2MW πιλοτική εφαρμογή	200.000-400.000m <sup>2</sup>
25MW demo εφαρμογή	5.000.000m <sup>2</sup>
25MW εμπορική εφαρμογή	5.000.000m <sup>2</sup>

Η διαδικασία RED είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν υπάρχουν ασφαλή δεδομένα για παρόμοια σύγκριση, διότι εκεί οι σχετικές αλατότητες παίζουν πολύ μεγαλύτερο ρόλο και η παρούσα λογική κινείται σε προσαρμοσμένες (customized) λύσεις.

#### 4.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (CAES, COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE)

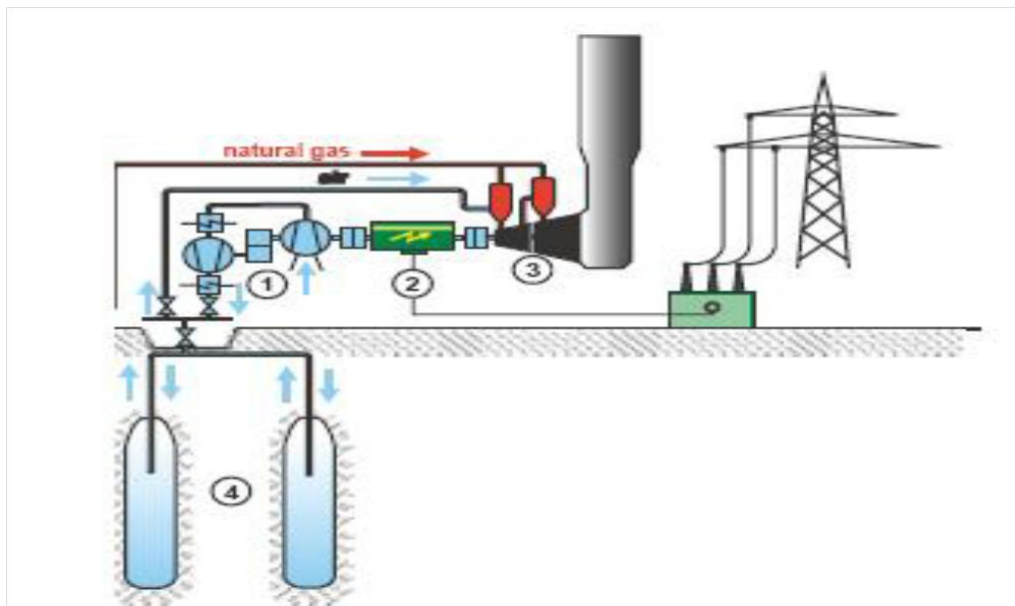
Ένας άλλος τρόπος αποθήκευσης περίσσειας παραχθείσας ενέργειας ονομάζεται CAES (Compressed Air Energy Storage). Η αρχή είναι απλή: Η επιπλέον ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση ατμοσφαιρικού αέρα σε υπόγειες σπηλαιώσεις σε πίεση 40-80 bar. Για να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια και πάλι, ο αέρας αποσυμπιέζεται. Η μέθοδος έχει απόδοση έως και 70% και την ικανότητα παροχής ενέργειας της τάξης των 250-220 MWh. Εκτός αυτού, απαιτεί λίγο χρόνο για να ενσωματωθεί στο δίκτυο, ώντας ανταγωνιστική ως προς αυτή την παράμετρο με τη μέθοδο της αντλησιοταμίευσης.

Μέχρι τώρα, υπάρχουν μόνο τρεις τέτοιες μονάδες σε όλο τον κόσμο:

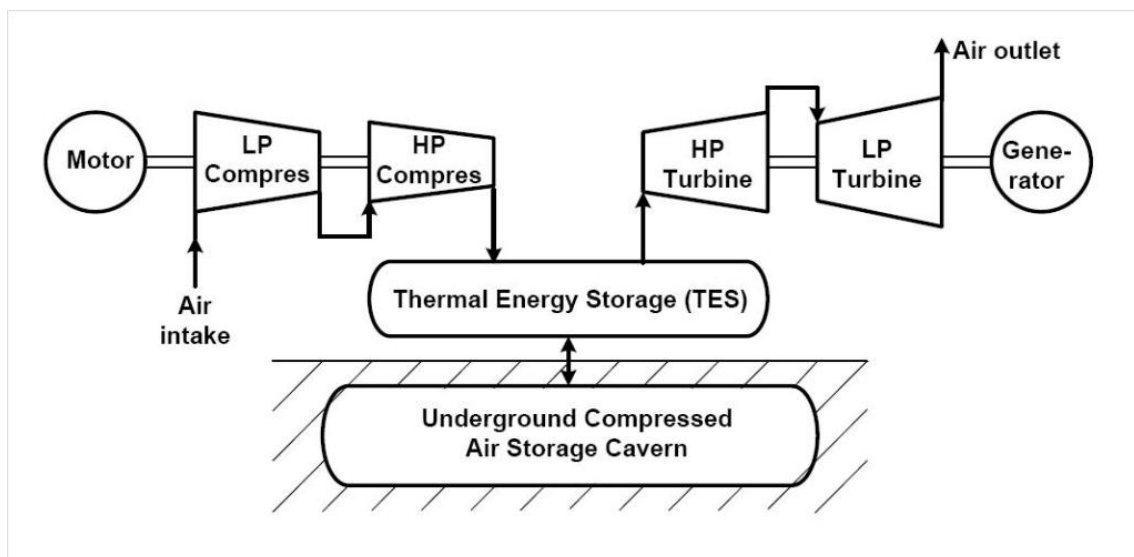
- Huntorf Γερμανία (1980), 290 MW X 2hrs
- Αλαμπάμα ΗΠΑ (1991), 110 MW X 26hrs
- Οχάιο ΗΠΑ (2008), 2.700 MW X 192hrs

Τα βασικά συστατικά ενός συστήματος συμπιεσμένου αέρα φαίνονται στην Εικόνα 4.1:

- 1 Συμπιεστής
- 2 Γεννήτρια
- 3 Αποσυμπίεση αέρα και ηλεκτροπαραγωγή
- 4 Μονωμένοι θάλαμοι αποθήκευσης



Εικ. 4.1 Σχηματική αναπαράσταση ενός απλού συστήματος CAES (Steta, 2003)



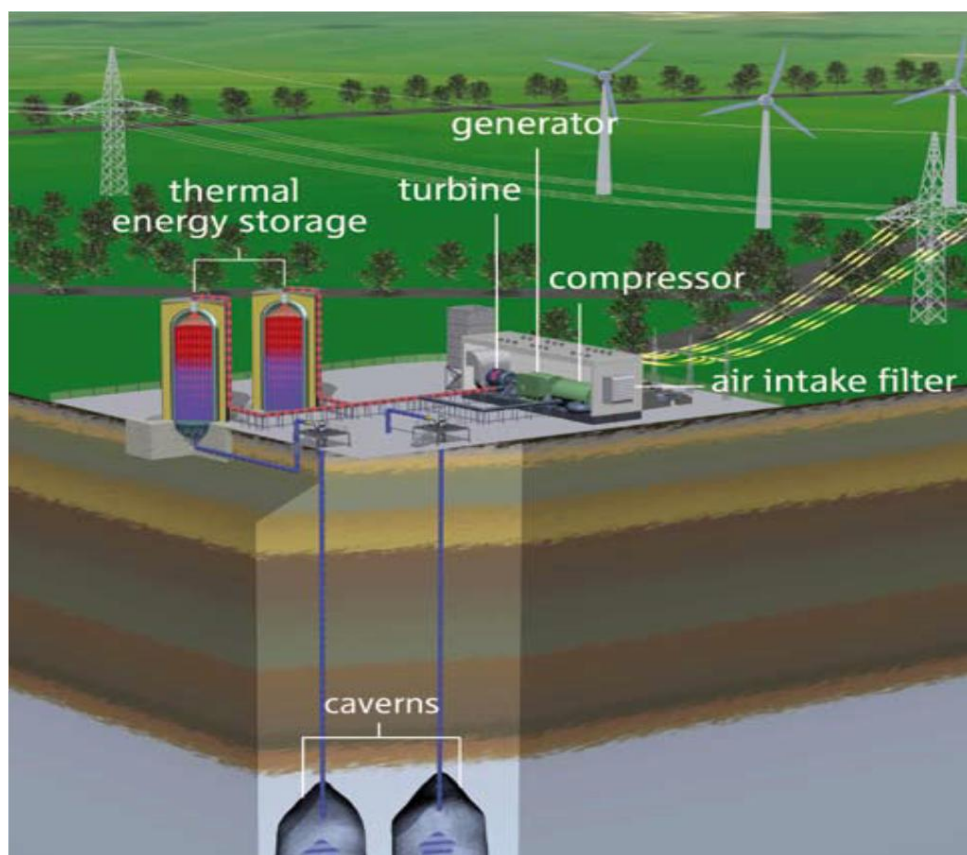
Εικ. 4.2 Σχηματική αναπαράσταση ενός αδιαβατικού (AA) συστήματος CAES (Steta, 2003)

Υπάρχουν δυο κύριες κατηγορίες τέτοιων συστημάτων, τα διαβατικά και τα αδιαβατικά. Αρχικά θα περιγραφεί η πρώτη κατηγορία. Πρέπει να επισημανθεί τα διαβατικά συστήματα δεν αποτελούν 100% ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αλλά μάλλον ένα υβριδικό σύστημα, διότι περιλαμβάνει και καύση φυσικού αερίου.

Κατά τη συμπίεση του αέρα η θερμοκρασία του αυξάνεται. Όταν όμως βρίσκεται μέσα στις αποθηκευτικές κοιλότητες τότε σταδιακά η θερμοκρασία επανέρχεται λόγω απωλειών στις φυσιολογικές της τιμές, ενώ η πίεση είναι αυξημένη. Όταν λοιπόν ο αέρας αποσυμπιέζεται, αναλογικά μειώνεται πάλι η θερμοκρασία του σε τιμές, κατά τις οποίες θα έβλαπτε τον στρόβιλο αν ποτέ ερχόταν έτσι σε επαφή μαζί του. Καθίσταται συνεπώς επιτακτική η ανάγκη για θέρμανσή του. Αυτό επιτυγχάνεται με καύση φυσικού αερίου και εν συνεχεία το μίγμα αυτό σε αποδεκτή πια θερμοκρασία οδηγείται στο στρόβιλο, παράγοντας ενέργεια. Οι μελέτες έχουν δείξει πως το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας αποδίδει ίση ενέργεια χρησιμοποιώντας το 50% των κλασικών ατμοηλεκτρικών με χρήση φυσικού αερίου, όμως το κόστος εγκατάστασης (κυρίως της μόνωσης των σπηλαιών) είναι ιδιαίτερα υψηλό. (Born, 2012)

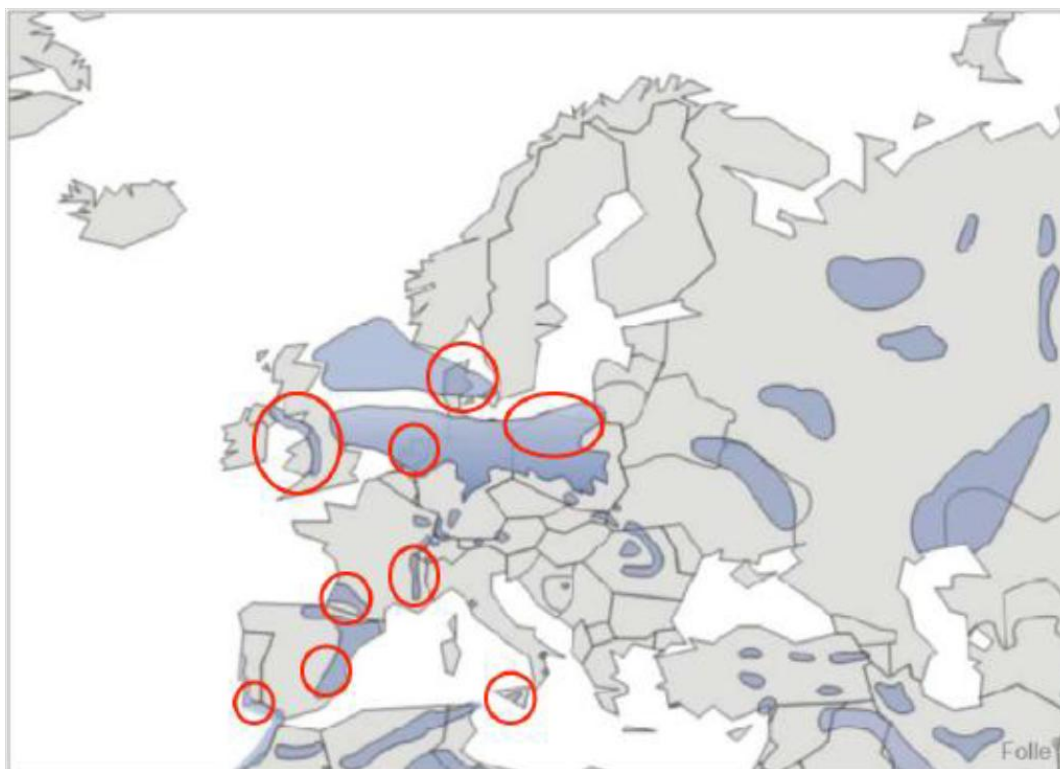
Η εταιρεία RWE (μια εκ των αντίστοιχων γερμανικών ΔΕΗ, μαζί με τις E.ON, Vattenfall, EnBW) έχει εκκινήσει το έργο ADELE. Στόχος είναι η μελέτη ενός εμπορικά αξιοποιήσιμου αδιαβατικού συστήματος, το οποίο θα χρησιμοποιεί τις θερμοκρασιακές απώλειες για τη θέρμανση νερού σε ειδικές αδιαβατικές δεξαμενές, κατά την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα και έπειτα θα θερμαίνει αντίστοιχα τον διασταλλόμενο αέρα καθιστώντας περιττό να υπάρχει διάταξη καύσης μετέπειτα. Επί του παρόντος το πρόβλημα είναι ότι εγκαταστάσεις καταπονούνται από διαρκείς

θερμοκρασίες της τάξης των 600°C. (Born, 2012)



Εικ. 4.3 Σχηματική αναπαράσταση εγκαταστάσεων αδιαβατικού CAES (Power)

Το πιο σημαντικό τμήμα σε ένα έργο αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα είναι να βρεθούν οι κατάλληλες θέσεις που να συνδυάζουν εγγύτητα ανάμεσα στην πρωτογενή παραγωγή ανανέωσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και στις αντίστοιχες γεωλογικές δομές. Η γεωλογική απαίτηση είναι η απουσία πορώδων υλικών τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα να διαχέεται ο αέρας μέσα από αυτά και συνεπώς να μειώνεται η πίεση του συστήματος. Τα σπήλαια πρέπει κατά προτίμηση να είναι παλαιά ορυχεία άλατος ή ανθρακωρυχεία, τα οποία είναι αρκετά βαθιά ώστε να αντέξουν τις συνεπαγόμενες πιέσεις. (40-80bar). Στην Ελλάδα θα μπορούσαν να γίνουν σχετικές μελέτες σε περιοχές όπου υπήρχαν κοιτάσματα βωξίτη (Παρνασσός), τα οποία μαζί με το υψόμετρο της περιοχής θα ήταν ίσως μια καλή λύση.



Εικ. 4.4 Γεωγραφική συσχέτιση περιοχών με έντονο σπηλαιολογικό και αιολικό δυναμικό. Οι κύκλοι δείχνουν περιοχές κατάλληλες για CAES και οι μπλε ζώνες δείχνουν περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού (Steta, 2003)

Γίνονται ακόμα προσπάθειες για ανάπτυξη συστημάτων CAES σε μικρή κλίμακα για αστική χρήση. Το 1995 δημοσιεύτηκε ένα άρθρο από το Πανεπιστήμιο του Tokai, όπου γινόταν μελέτη διαφόρων υλικών τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αναγκαίων δεξαμενών, όπως το τσιμέντο αλλά και νέα υλικά όπως μια ειδική γέλη (βαριά λάσπη) αποτελούμενη από νερό, πηλό, βαρίτη και αλκαλικά υλικά. Το συγκεκριμένο σύστημα παρείχε ισχύ της τάξης των  $3.000\text{kW} \times 14\text{hr}$ . Η γέλη εξελίσσεται με τη πάροδο του χρόνου μέχρι που γίνεται σταθερή. Αυτή η σταθερότητα επιτυγχάνεται όχι μόνο από την ηλεκτροχημική ισορροπία γύρω από τα μικροσκοπικά σωματίδια του αργιλώδους υλικού και του πυκνού βαρίτη, αλλά και από τις αλυσίδες πολυμερούς που δεσμεύει τα γύρω σωματίδια. (M.HAYASHI, *et al.*, 1995)

#### 4.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΓΡΟΥ ΑΕΡΑ (LIQUID AIR ENERGY STORAGE)

Μια εντελώς νέα τεχνολογία, η οποία άρχισε να αναπτύσσεται από το 2011 από το πανεπιστήμιο του Leeds, ονομάζεται ενεργειακή αποθήκευση υγρού αέρα (Liquid Air Energy Storage LAES ή Cryogenic Energy Storage CES). Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι η πίεση το καταστατικό μέγεθος

που μεταβάλλεται αλλά η θερμοκρασία.

$$(PV = nRT) \quad (4.1)$$

όπου

P: Πίεση

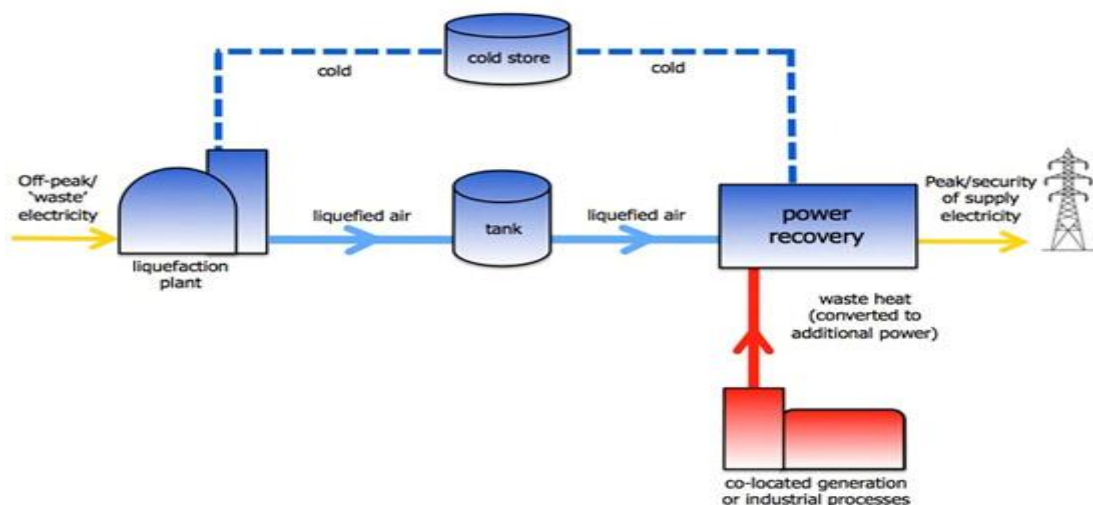
V: Όγκος

n: Ποσότητα mole

R: Παγκόσμια σταθερά αερίων

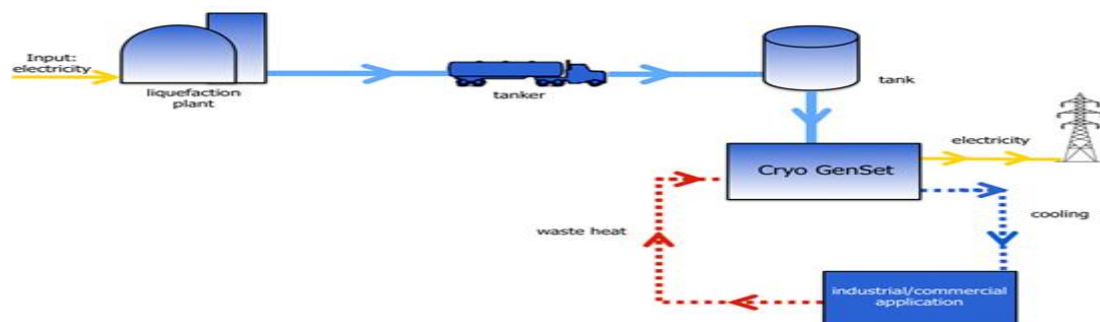
T: Απόλυτη θερμοκρασία

Η αρχή εδώ είναι απλή και πάλι. Η περίσσεια ενέργειας χρησιμοποιείται για να ψυχθεί στους  $-196^{\circ}\text{C}$  ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος εν τέλει υγροποιείται. Έπειτα αποθηκεύεται σε μονωμένη κρυογονική δεξαμενή. Αν χρειαστούμε τώρα να προχωρήσουμε σε παραγωγή ενέργειας, αφήνουμε τον αέρα να ζεσταθεί. Κατά αυτό τον τρόπο ο όγκος του αυξάνεται 700 φορές. Η συνεπαγόμενη υψηλή πίεση μπορεί να κινήσει αεριοστρόβιλο ώστε να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία θέρμανσης του αέρα μπορεί η διάταξη να συνδεθεί με το τοπικό σύστημα τηλεθέρμανσης (εξαιρετικά διαδεδομένο στη Γερμανία, στην Ελλάδα απαντάται μόνο στην Πτολεμαΐδα). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχουν για τη συγκεκριμένη διαδικασία ιδιαίτερες γεωλογικές απαιτήσεις όπως ισχύει στην περίπτωση της αντλησιοταμίευσης και των CAES. (Dalvi, 2012)



Εικ. 4.5 Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης LAES (USpace Communicate & Collaborate, 2011)

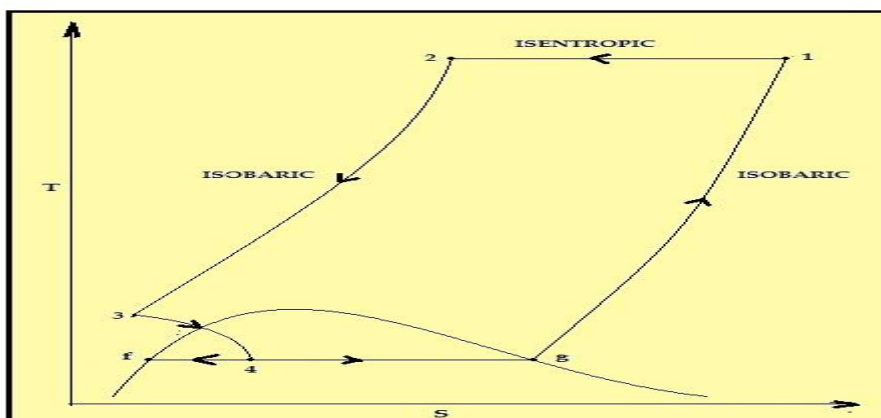
Υπάρχουν ακόμα σκέψεις πέρα από την επί τόπου παραγωγή και κατανάλωση να μεταφέρεται ο υγρός αέρας όπως γίνεται με τους κλασικούς υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο, υγροποιημένο φυσικό αέριο).



Εικ. 4.6 Σχηματική αναπαράσταση ξεχωριστής ψύξης και εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής (USpace Communicate & Collaborate, 2011)

Για την υγροποίηση του φυσικού αερίου, δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως. Η πιο κοινή είναι η Linde-Hampson. Αρχικά έχουμε συμπιέζουμε ατμοσφαιρικό αέρα στους 200 atm. Στη συνέχεια αυτός περνά μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας για να μειώσει τη θερμοκρασία. Ο αέρας τώρα πρέπει να οδηγηθεί σε μια βαλβίδα Joule-Thompson ώστε να διαχωριστεί το υγρό από το αέριο τμήμα του. Το υγρό τμήμα του αέρα συλλέγεται στη δεξαμενή και το κρύο κομμάτι στέλνεται πάλι πίσω μέσω του εναλλάκτη θερμότητας για την ψύξη του εισερχόμενου αέρα. Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται ως η διαδικασία Claude, και η κύρια διαφορά είναι ότι διεξάγεται στο στάδιο υγροποίησης, όπως και οι συνθήκες πίεσης μειώνεται σε περίπου 40 atm.

Η τρέχουσα εκτίμηση είναι πως μια εγκατάσταση LAES έχει κόστος επένδυσης από 1.100 \$/kW και κόστη διαχείρισης από 0,09\$/kWh. Ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής είναι 25-40 έτη, ενώ η απόδοση προσδιορίζεται από 300 kW έως 10 MW. (Dalvi, 2012)



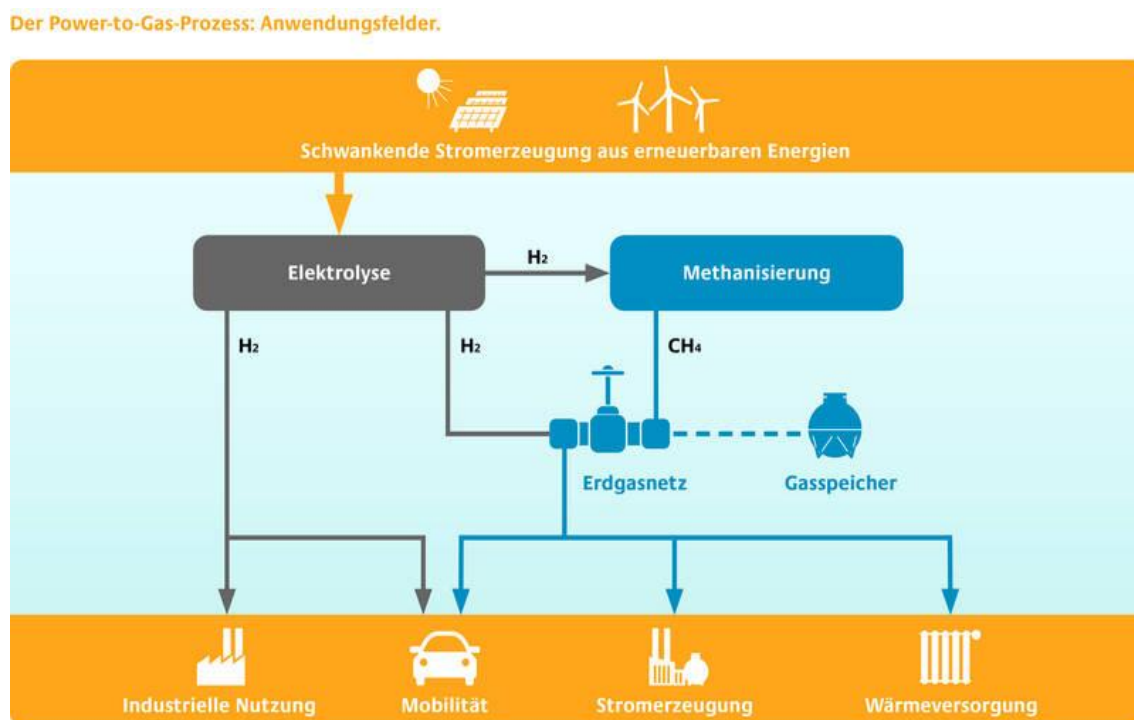
Εικ. 4.7 Διάγραμμα T-S (θερμοκρασίας-εντροπίας) για τη διαδικασία Linde- Hampson (Dalvi, 2012)



Αν και το υδρογόνο είναι το πιο διαδεδομένο μόριο που συναντάται στη φύση, μόλις σχετικά πρόσφατα μπόρεσε να βρει ενεργειακές εφαρμογές. Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθεί η τεχνολογία Power to Gas, δηλαδή η παραγωγή υδρογόνου και έπειτα η μεθανοποίησή του, καθώς και οι κυψέλες υδρογόνου, που αποτελούν τις δυο διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης με βάση το πολύ απλό αλλά με τόσες δυνατότητες χημικό στοιχείο.

### 5.1 POWER TO GAS

Η αρχή για την τεχνολογία Power to Gas είναι ότι η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και έπειτα με τη χρήση νερού για τη μετατροπή του σε μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ). Η διαδικασία μπορεί να βρει πρακτική εφαρμογή σε τσιμεντοβιομηχανίες, εργοστάσια αλουμινίου ή σε μονάδες βιοαερίου. Η μέθοδος περιλαμβάνει ηλεκτρόλυση του νερού για παραγωγή υδρογόνου και έπειτα τη χρήση του τελευταίου στη διαδικασία Sabatier ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Το μεθάνιο μπορεί έπειτα να καεί πάλι επί τόπου στη βιομηχανία που παρείχε το  $\text{CO}_2$  ή να μεταφερθεί αλλού είτε σε υγροποιημένη μορφή είτε μέσω αγωγών.



Εικ. 5.1 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας **Error! Reference source not found.**  
(PowertoGas.info)



Στον Πίνακα 5.1 απεικονίζεται η θερμοχημική διαδικασία που απαιτείται για την τεχνολογία PtG.

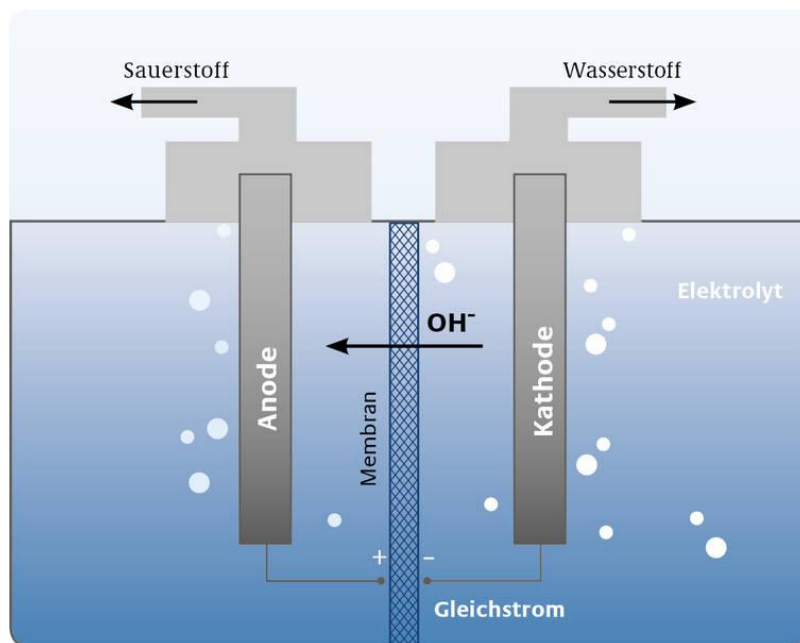
Redoxreaktion Wasserelektrolyse		
$2 \text{ H}_2\text{O (l)}$	$\rightarrow 2 \text{ H}_2 \text{ (g)} + \text{O}_2 \text{ (g)}$	$\Delta H_R^0 = + 572 \text{ kJ/mol}$
Methanisierungsreaktion		
$3 \text{ H}_2 + \text{CO}$	$\rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O (g)}$	$\Delta H_R^0 = - 206 \text{ kJ/mol}$
$4 \text{ H}_2 + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O (g)}$	$\Delta H_R^0 = - 165 \text{ kJ/mol}$
Wassergas-Shift-Reaktion		
$\text{H}_2\text{O (g)} + \text{CO}$	$\rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$	$\Delta H_R^0 = - 41 \text{ kJ/mol}$

Υπόμνημα πίνακα  
 Redoxreaktion Wasserelektrolyse: Οξειδοαναγωγική αντίδραση ηλεκτρόλυσης ύδατος  
 Methanisierungsreaktion: Αντίδραση μεθανοποίησης  
 Wassergas Shift Reaktion: Αντίδραση μετατόπισης νερού αερίου

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον Πίνακα 5.1, ενέργεια απαιτείται μόνο στη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου (θετικό πρόσημο, που σημαίνει απορρόφηση ενέργειας), ενώ στις υπόλοιπες διεργασίες εκλύεται ενέργεια.

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι ηλεκτρόλυσης νερού:

1. Η τεχνολογία αλκαλικής ηλεκτρόλυσης με βασικό υγρό ηλεκτρολύτη (Εικόνα 5.2). Είναι σε χρήση από το 1950 σε μεγάλες μονάδες παραγωγής υδρογόνου.
2. Η ηλεκτρόλυση PEM (Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων - Proton Exchange Membrane) με ένα στερεό πολυμερή ηλεκτρολύτη, η οποία είναι ακόμα σε φάση ανάπτυξης και δεν έχει τύχη ευρείας εμπορικής χρήσης. Ο περιορισμός για τη βιομηχανική εφαρμογή έχει να κάνει με την απαραίτητη μελέτη γύρω από το υλικό της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης.
3. Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας με όξινο στέρεο ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Electrolysis Cell SOEC), που είναι επίσης σε φάση έρευνας (PowertoGas.info)



Εικ. 5.2 Αλκαλική ηλεκτρόλυση για παραγωγή υδρογόνου (PowertoGas.info)

Συμφωνα με ερευνητικούς υπολογισμούς ένα σύστημα PtG μπορεί να έχει απόδοση της τάξης του 69.9%, ακόμα και με δίκτυο μεταφοράς αερίου σε απόσταση 500km. Οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης είναι 76.3% για την ηλεκτρόλυση, 95% για τη μεταφορά και 85.8%για τη μεθανοποίηση. (Born, 2012)

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχουν 1.8 εκατομμύρια χλμ δικτύου φυσικού αερίου. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια στέρεη υποδομή που μπορεί να δεχθεί το παραχθέν αέριο μέσα στο σύστημα, δημιουργώντας αποκεντρωμένες ενεργειακές δομές, το οποίο είναι χαρακτηριστικό της εποχής των ανανεώσιμων πηγών. Στη Γερμανία το πρώτο πιλοτικό εργοστάσιο PtG, όπου μελετήθηκε εμπορικά η μεθανοποίηση, φτιάχτηκε στη Στουτγκάρδη για τη SolarFuel το 2009.

Για την όλη διαδικασία χρειάζεται  $\text{CO}_2$ , το οποίο μπορεί να βρεθεί από διαφορετικές πηγές που έχουν η καθεμία διαφορετικά οικολογικά αλλά και οικονομικά αποτυπώματα. Μια πηγή είναι τα εργοστάσια βιοαερίου, τα οποία παράγουν ένα μίγμα αερίου, που αποτελείται από 55-60% μεθάνιο και 40-45%  $\text{CO}_2$ . Ακολούθως υπάρχουν δυο τρόποι χρήσης:

1. Να γίνει διαχωρισμός των αερίων βάσει της διαδικασίας παραγωγής φυσικού αερίου από βιοαέριο. Έτσι το διοξείδιο του άνθρακα από παραπροϊόν, γίνεται και αυτό αξιοποιήσιμο προϊόν.
2. Η καύση του βιοαερίου και εν συνεχεία η δέσμευση του παραχθέντος διοξειδίου του άνθρακα. Μια δυσκολία είναι ότι θα πρέπει να απομακρυνθούν πριν από την καύση οι θειούχες ενώσεις.

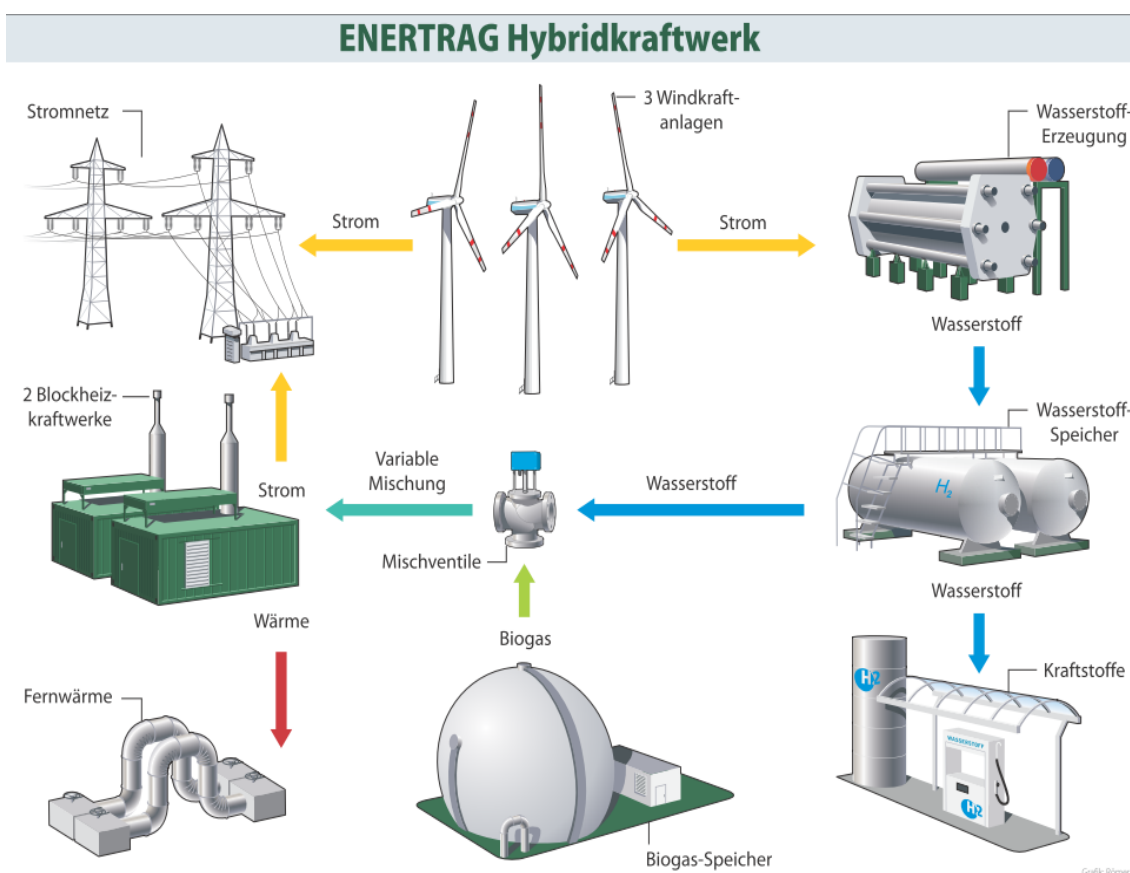
Για τη χρήση CO<sub>2</sub> από εργοστάσιο βιοαερίου, με τελική ενέργεια 500 kWh πρέπει να δαπανηθεί ενέργεια 2500 kWh από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δίνοντάς μας ένα πολύ φτωχό 20% απόδοσης. (Born, 2012)

Μια άλλη δυνατότητα είναι η αφαίρεση διοξειδίου του άνθρακα από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ήδη το 2012 η Νορβηγία ανακοίνωσε ότι πρόκειται να κατασκευάσει υπόγειες δεξαμενές για να αποθηκεύσει δεσμευμένο CO<sub>2</sub>, οπότε μια πολύ καλή λύση για την περαιτέρω οικονομική αξιοποίηση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία PtG. Παρά τη μικρή περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στον εν λόγω αέριο (περίπου 0,035%), υπάρχουν υπέρμαχοι αυτής της άποψης, στην προσπάθεια μείωσης του ήδη υπάρχοντος και πλεονάζοντος αερίου στην ατμόσφαιρα με γρήγορους ρυθμούς και συνεπώς στην αναστοφή του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Τέλος, η πιο πρόσφορη λύση, τόσο από ποσοτική αλλά και από οικονομική άποψη είναι η δέσμευση από βιομηχανικές δραστηριότητες. Στην Ελλάδα, οι τσιμεντοβιομηχανίες, τα εργοστάσια της ΔΕΗ, ειδικά σε Μεγαλόπολη και Πτολεμαΐδα και το εργοστάσιο αλουμινίου στην Αντίκυρα, είναι ίσως οι κυριότεροι παράγοντες έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Μια πολύ σημαντική παράμετρος σε αυτή την επιλογή είναι και τα επιπλέον δικαιώματα που καρδίζουν οι εταιρείες αυτές στο λεγόμενο χρηματιστήριο ρύπων.

Ας εξηγήσουμε όμως τι είναι ακριβώς είναι αυτός ο όρος. Από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα συμφωνήθηκε για λόγους περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, (όπως διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, κ.α.) να θεσμοθετηθούν ποσοστώσεις για τις επιτρεπόμενες εκπομπές τέτοιων αερίων που μπορεί να κάνει κάθε κράτος. Αντίστοιχα οι κυβερνήσεις μοίρασαν τα μερίδια αυτά σε εταιρείες. Αυτές μπορούν να λειτουργούν ελεύθερα μέσα στα καθορισμένα πλαίσια, ενώ για τυχόν υπερβάσεις θεσμοθετήθηκαν υψηλά πρόστιμα. Παράλληλα όμως αποφασίστηκε και η φιλευθεροποίηση της αγοράς. Η λογική είναι η εξής. Αν μια εταιρεία Α έχει δυνατότητα να εκπέμψει Χ ποσότητα, αλλά για κάποιους λόγους, όπως μειωμένη παραγωγή ή εγκατάσταση νέων διατάξεων που μειώνουν αυτές τις εκπομπές, προβλέπει ότι δε θα φτάσει σε αυτό το όριο, μπορεί να διαθέσει προς πώληση την υπολοιπόμενη αυτή Ν ποσότητα ισοδύναμου CO<sub>2</sub>. Αντίστοιχα μια εταιρεία Β μπορεί να εκπέμψει χωρίς πρόβλημα Ψ ποσότητα, αλλά εκτιμά ότι η αυξημένη παραγωγή της θα την αναγκάσει να εκπέμψει τελικά παραπάνω και συνεπώς θα αναγκαστεί να πληρώσει το σχετικό πρόστιμο. Αντί τούτου όμως μπορεί να αγοράσει τη Ν ποσότητα από την εταιρεία Α, σε τιμή φυσικά μικρότερη του αναμενόμενου προστίμου και να προχωρήσει κανονικά στην παραγωγική της διαδικασία. Έτσι και τα θεσμοθετημένα όρια τηρούνται και οι δυο εταιρείες βγαίνουν οικονομικά ωφελημένες. (Hauser, 2012)

Τον Οκτώβριο του 2011 ξεκίνησε τη λειτουργία του το πρώτο υβριδικό εργοστάσιο στον κόσμο, στο Βραδεμβούργο με ονομασία ENERTRAG και ηλεκτρική ισχύ 600 kW. Η μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι συνδυασμός αιολικού πάρκου, ηλεκτρόλυσης και βιοαερίου. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αρχικά από τρεις ανεμογεννήτριες. Σε περίπτωση περισσεύας έχουμε ηλεκτρόλυση που μας δίνει υδρογόνο, το οποίο και αποθηκεύεται σε πιέσεις μέχρι 60 bar. Το υδρογόνο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί σε υβριδικά οχήματα είτε να αναμειχθεί με βιοαέριο και να καεί παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια αλλά και θέρμανση για το τοπικό δίκτυο. Το σύστημα έχει χρόνο τριών λεπτών από black start σε πλήρες φορτίο. Ακόμα μπορεί να αποδώσει 120 m<sup>3</sup> υδρογόνου την ώρα. Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 1200km ενός αυτοκινήτου που κινείται με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. (Enertrag)



Εικ. 5.3 Τεχνολογία Power to Gas (Enertrag)

Τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει αυτή τη στιγμή η τεχνολογία PtG μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω αιτίες:

- υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος
- έλλειψη εναλλακτικών μεθόδων ηλεκτρόλυσης
- αυξημένο κόστος συντήρησης

Σε βιομηχανική κλίμακα η ηλεκτρόλυση κοστίζει περίπου 1000€ με 2000€ ανά kW. Σε ένα εργοστάσιο PtG ο υπόλοιπος εξοπλισμός ανεβάζει το κόστος μερικές εκατοντάδες ευρώ παραπάνω ανά kW. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρξουν ραγδαίες αλλαγές στις τεχνολογίες μέχρι να βρει η διαδικασία το δρόμο για ευρεία εμπορική εφαρμογή. (Born, 2012)

## 5.2 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL CELLS)

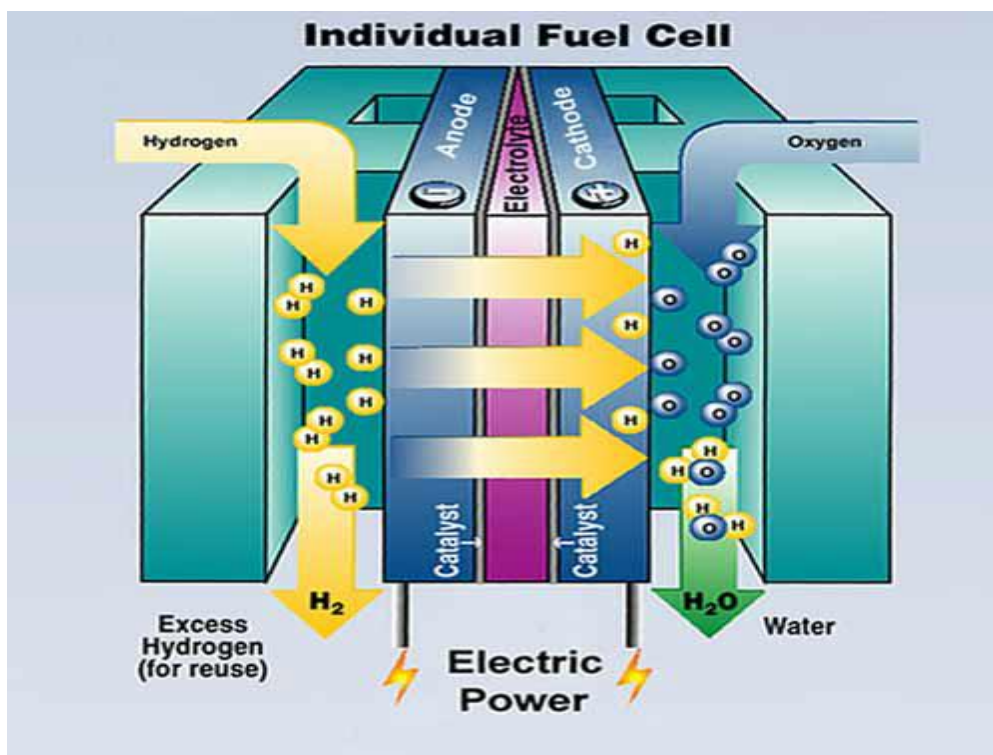
Όπως φαίνεται από την προηγούμενη εικόνα υπάρχει η προοπτική χρήσης υδρογόνου για κίνηση αυτοκινήτων. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται κυψέλες καυσίμου ή fuel cells και ορισμένοι τη θεωρούν ότι είναι η τεχνολογία του μέλλοντος, ικανή να αντικαταστήσει πλήρως την παρουσία ορυκτών καυσίμων, ειδικά στο κομμάτι της μετακίνησης, όπου οι υπόλοιπες εναλλακτικές όπως πχ μπαταρίες, παρουσιάζουν θεμελιώδη μειονεκτήματα (βάρος, αυτονομία κλπ)

Οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι νέα τεχνολογία. Ανακαλύφθηκαν το 1839 από ένα Άγγλο φυσικό, ο οποίος πειραματιζόταν στη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Ο William Grove τυχαία ανακάλυψε πως επανενώνοντας υδρογόνο και οξυγόνο, μπορούσε να παραγάγει ενέργεια. Όμως έπρεπε να περάσουν 56 χρόνια μέχρι ο W.W. Jacques να κατασκευάσει τις πρώτες κυψέλες καυσίμου που μπορούσαν να παράξουν επαρκή ποσότητα ενέργειας. Ενώνοντας 100 στοιχεία μπόρεσε να φωτίσει 25 λαμπτήρες. Το 1960 η NASA ξεκίνησε να αναπτύσσει και εκείνη αντίστοιχες διατάξεις για να ενεργειακές ανάγκες του προγράμματος Απόλλο. Πέρα από την ενεργειακή παράμετρο, θεωρητικά οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μακρινά ταξίδια στο διάστημα παρέχοντας ποσιμο νερό στους αστροναύτες. Σήμερα γίνεται μεγάλη έρευνα (πχ υβριδικό όχημα Πολυτεχνείου Κρήτης) ώστε η τεχνολογία αυτή να καταστεί διαθέσιμη και οικονομικά πρόσφορη για καθημερινές εφαρμογές. Οι περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες τρέχουν αντίστοιχα προγράμματα, με τις πρώτες παραγωγές (BMW) να προσανατολίζονται στα επόμενα έτη.

Μέχρι τώρα τα περισσότερα συστήματα, χρησιμοποιούνται ως άλλες μπαταρίες (backup) σε απομονωμένες περιοχές, όπου είναι δύσκολο να συντηρηθεί και να τροφοδοτηθεί μια γεννήτρια ντίζελ. Η αλήθεια είναι ότι τα συστήματα έχουν αρκετά κοινά με τις μπαταρίες, αλλά και θεμελιώδεις διαφορές. Η πιο βασική είναι ίσως ότι έχουν άπειρους κύκλους λειτουργίας γιατί λειτουργούν όσο αέρας (για παροχή οξυγόνου) και υδρογόνο ή και μεθανόλη τροφοδοτούνται στο σύστημα. ([www.ird.dk](http://www.ird.dk))

Αν και είναι πολύπλοκες διατάξεις η αρχή λειτουργίας τους είναι εξαιρετικά απλή. Η κυψέλη ποτελείται από δυο πλάκες (ηλεκτρόδια) που χωρίζονται από μια μεμβράνη, η οποία πρακτικά

αποτελείται από 3-7 επίπεδα ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο διαχέεται από την άνοδο (αρνητικό) και το οξυγόνο από την κάθοδο (θετικό), δημιουργώντας στην άνοδο ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος για να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ τα ιόντα υδρογόνου περνούν από την άνοδο στην κάθοδο. Εκεί συνδυάζονται με το οξυγόνο για να παράξουν νερό. Η ενέργεια που παράγεται από τους διαφόρους τύπους κυψέλων εξαρτάται από τον τύπο των ηλεκτροδίων, τον καταλύτη, τη θερμοκρασία λειτουργίας και το είδος της μεμβράνης. Οι κυψέλες δεν έχουν κινούμενα μέρη, άρα έχουν εξαιρετικά υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. (Connolly, 2010)



Εικ. 5.4 Σχηματική απεικόνιση μια κυψέλης υδρογόνου (Connolly, 2010)

Τα μόνα παραπροϊόντα των κυψελών είναι η έκλυση θερμότητας και το νερό. Ακόμα θεωρητικά θα μπορούσαν να φτάσουν σε πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης μιας και ο κύριος περιορισμός προέρχεται από την τεχνολογία των ηλεκτρολυτικών μεμβρανών. Συγκριτικά οι παραδοσιακές μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν αποδόσεις της τάξης του 30%, ενώ οι κυψέλες καυσίμου αυτή τη στιγμή μπορούν να φτάσουν το 40-70% με αυξητική τάση. (www.ird.dk)

Ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο από όλους τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είναι η μεμβράνη που χρησιμοποιείται. Από τη δεκαετία του 1960 έχει γίνει εισαγωγή της πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEM-FC), η οποία έχει γνωρίσει εμπορική επιτυχία σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπως διαστημόπλοια και υποβρύχια, όπου οι συνθήκες είναι αυστηρά καθορισμένες.

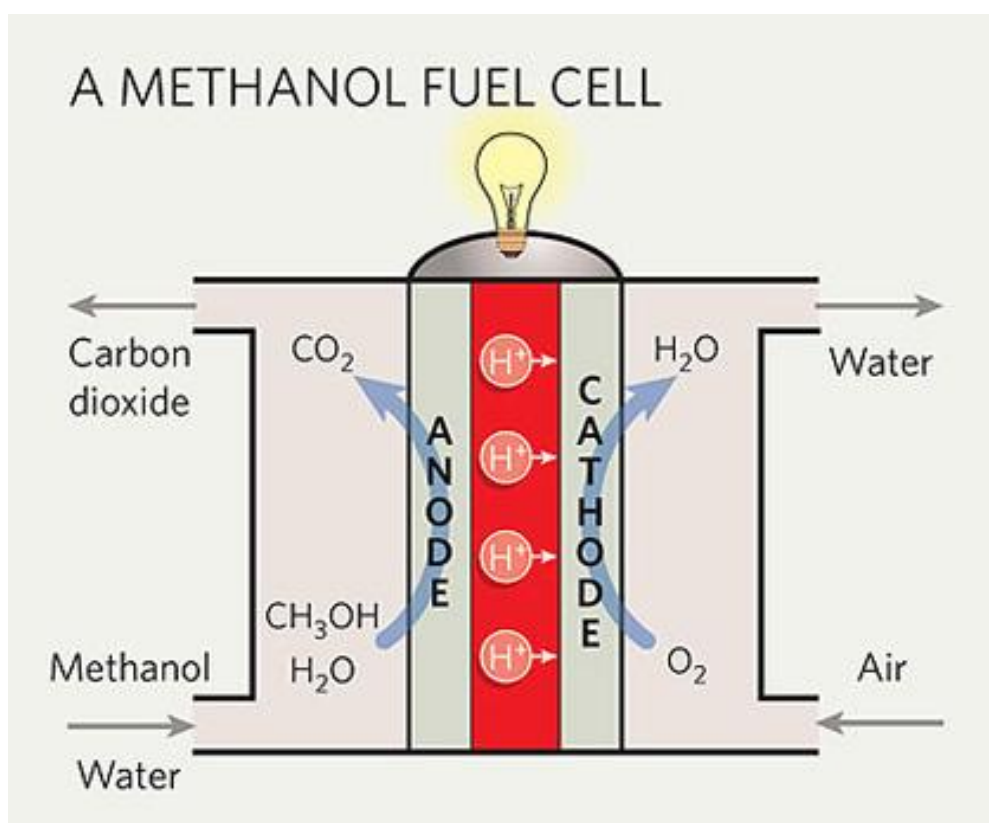
Όμως το τελευταίο χρονικό διάστημα η ανάγκη για μαζικές εφαρμογές όπως ηλεκτροκίνητα οχήματα και φορητές συσκευές έχουν ωθήσει την έρευνα στην εξερεύνηση νέων υλικών, πέρα από το κλασικά χρησιμοποιούμενο ένυδρο υπερφθοροσουλφονικό πολυμερές, γνωστό και ως NAFION. Ο συγκεκριμένος τύπος λειτουργεί εξαιρετικά καλά σε περιβάλλον μέτριων θερμοκρασιών (<90<sup>0</sup> C) και υψηλή σχετική υγρασία, με υδρογόνο υψηλής καθαρότητας ως καύσιμο. Οι περιορισμοί του κόστους παραγωγής τους είναι προς το παρόν αποτρεπτικοί παράγοντες για ευρείες εφαρμογές. Επιπρόσθετα τίθεται το ερώτημα το του μέλλει γενέσθαι όταν ζητείται η καλή λειτουργία σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και με υδρογόνο μειωμένης καθαρότητας. Συνήθως έχουμε να κάνουμε με αέρια που περιέχουν σημαντικές ποσότητες CO, το οποίο μειώνει την αποτελεσματικότητα των κραμάτων πλατίνας, από τα οποία είναι συνήθως φτιαγμένοι οι άνοδοι. Η ανοχή όμως σε αυξημένη παρουσία CO αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας, και για αυτό είναι επιθυμητό να υπερβαίνουμε σε τέτοιες περιπτώσεις τους 100<sup>0</sup>C. Έτσι η τάση είναι να αναπτυχθούν νέα υλικά, τα οποία να δίνουν ευρύτητα εφαρμογών σε διαφόρους τύπους παραμέτρων. (Kreue, 2001)

Πιν. 5.2 Πίνακας των μέχρι τώρα γνωστών τύπων κυψέλων καυσίμου (Connolly, 2010)

FUEL CELL	Ηλεκτρολύτης	Καταλύτης	Απόδοση %	Θερμοκρασία λειτουργίας <sup>0</sup> c	Ισχύς kW	Εφαρμογές
Αλκάλια AFC	Υδροξείδιο του καλίου	Πλατίνα	70	150-200	0,3-12	NASA. Δίνει πόσιμο νερό. Ευαίσθητο σε παρουσία CO <sub>2</sub>
Πολυμερής ηλεκτρολυτική μεμβράνη PEM	Στέρεο οργανικό πολυμερές	Πλατίνα	45	80	50-250	Αυτοκίνητα. Θέλει υδρογόνο καλής ποιότητας
Φωσφωρικό οξύ PAFC	Φωσφωρικό οξύ	Πλατίνα	40	150-200	200	Εφαρμογή σε σταθερές εγκαταστάσεις. Συμπαγωγή με βιοαέριο
Τηγμένος άνθρακας MCFC	Ανθρακικό άλας λιθίου, καλίου, νατρίου	Διάφορα μη πολύτιμα μέταλλα	60	650	10-2000	Συμπαγωγή με βιοαέριο. Αύξηση απόδοσης κατά 85%
Στέρεα οξείδια SOFC	Στέρεο οξείδιο ζirkονίου	Διάφορα μη πολύτιμα μέταλλα	60	1000	100	Εξειδικευμένες εφαρμογές. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών έχει αργή εκκίνηση

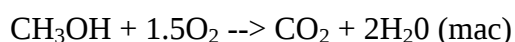
Στη Δανία από το 2008 υπήρξε μια συνεργασία ανάμεσα στην εταιρεία IRD και την κοινότητα του χωριού Vestenskon, καθιστώντας το ενεργειακά αυτόνομο με χρήση κυψέλων υδρογόνου. Νησιά στην Ελλάδα, ειδικά στις Κυκλάδες (πχ, Κίμωλος) με μικρό πληθυσμό και υψηλό αιολικό δυναμικό θα μπορούσαν να γίνουν άξιοι μιμητές τέτοιων παραδειγμάτων.

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα υποκατηγορία κυψελών καυσίμων είναι η τεχνολογία συνεχούς συστήματος καυσίμου μεθανόλης direct methanol fuel system (DMFC – Εικόνα 5.5), η οποία ξεκίνησε το 1990. Η τεχνολογία αυτή μετατρέπει υγρή μεθανόλη σε ηλεκτρική ενέργεια με περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο (μικρότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σχέση με τις κλασικές καύσεις). Αποτελεί μια πολύ καλή εναλλακτική χρήση βιοκαυσίμων, για τα οποία υπάρχουν ήδη οι υποδομές στην αγορά κυρίως για φορητές εφαρμογές. Η απόδοση είναι μικρή σε σχέση με τις κλασικές κυψέλες καυσίμων αλλά η συνολική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει είναι ιδιαίτερα υψηλή.



Εικ. 5.5 Σχηματική απεικόνιση κυψέλης τύπου DMFC (mac)

Η οξειδοαναγωγική αντίδραση που περιγράφει το φαινόμενο είναι η εξής:

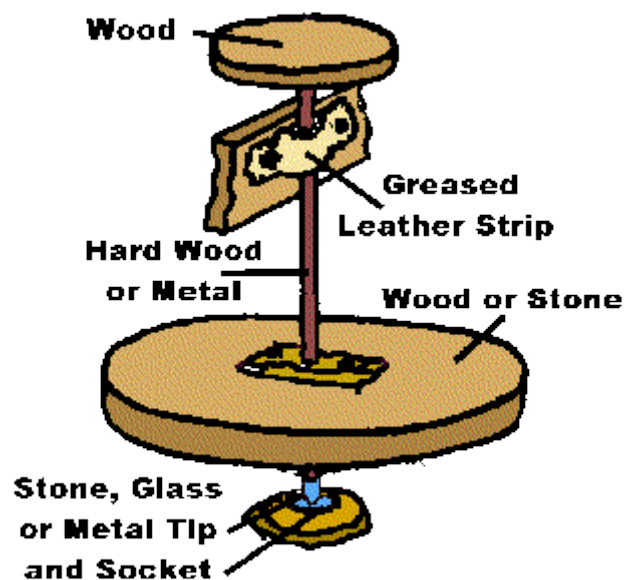


Προς το παρόν είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο και έχει βρει λίγες εφαρμογές (πχ φάρος Lismore Lighthouse, Σκωτία)



### 6.1 ΣΦΟΝΔΥΛΟΙ

Πέρα από τις διατάξεις αντλησιοταμίευσης, συμπιεσμένου και υγροποιημένου αέρα υπάρχει ακόμα μια διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας, η οποία βασίζεται σε μηχανικές εφαρμογές. Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας τύπου σφονδύλων λειτουργεί με την επιτάχυνση μιας κυλινδρικής διάταξης, η οποία ονομάζεται σφόνδυλος (flywheel) σε πολύ υψηλές ταχύτητες και τη διατήρηση της ενέργειας στο σύστημα με τη μορφή της περιφερειακής ταχύτητας. Η ενέργεια ανακτάται πάλι πίσω μέσω μιας γεννήτριας. Το σύστημα του σφόνδουλου είναι κατ' ουσία μια κινητική μηχανική μπαταρία.



Εικ. 6.1 Ο τροχός του κεραμοποιού. Ο πρώτος τύπος σφονδύλου (Ceramics)

Η χρήση της τεχνολογίας σφονδύλων προέρχεται ήδη από τα αρχαία χρόνια, μέσω του τροχού του κεραμοποιού (Εικόνα 6.1). Εκεί μέσω του ποδόπληκτρου ο πλάστης παρείχε ενέργεια, η οποία αποθηκευόταν στον περιστρεφόμενο κάτω τροχό για αρκετό χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρώσει ο τεχνίτης την εργασία του. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '60 η NASA προώθησε προγράμματα για χρήση των σφονδύλων σε διαστημικά ταξίδια. Όμως η πραγματική επανάσταση ήρθε από το 1980 και έπειτα, όταν ήρθαν στο προσκήνιο απαραίτητα μέρη για τη βελτίωση του συστήματος, όπως μαγνητικά ρουλεμάν και γεννήτριες υψηλής ισχύος.

Η ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας στο σφόνδυλο εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα με την οποία αυτός περιστρέφεται, αλλά και από τη μάζα του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Η εξίσωση που

δείχνει αυτό το μέγεθος είναι:

$$E=k*M*\omega^2 \quad (6.1)$$

όπου

$k$ =παράμετρος που εξαρτάται από το σχήμα της περιστρεφόμενης μάζας

$M$ = μάζα του σφόνδylου

$\omega$ =γωνιακή ταχύτητα

(Tanzler)

Όταν έχουμε να κάνουμε με στέρεο κύλινδρο η εξίσωση μετασχηματίζεται σε

$$E=0,5*I*\omega^2 \quad (6.2)$$

όπου

$I$ =ροπή αδράνειας

Η τιμή της οποίας εν συνεχεία δίνεται

$$I=0,5*r^2*M \quad (6.3)$$

όπου  $r$  η ακτίνα του σφόνδylου

Είναι λοιπόν σαφές ότι για δεδομένο όγκο, η πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο σφόνδylος παίζει σημαντικό ρόλο. ([www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com))

Πιν. 6.1 Πυκνότητες των κυριότερων υλικών που χρησιμοποιούνται για κατασκευή σφονδύλων  
([www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com))

Υλικό	Πυκνότητα ( $kg/m^3$ )
Κράμα αλουμινίου	2700
Κόντρα πλακέ	700
Συνθετικά ανθρακονήματα	1550
Ίνες γυαλιού τύπου E	1900
Ίνες Kevlar	1400
Ατσάλι	8000
Κράμα τιτανίου	4500
"Super paper"	1100
Ίνες γυαλιού τύπου S	1900

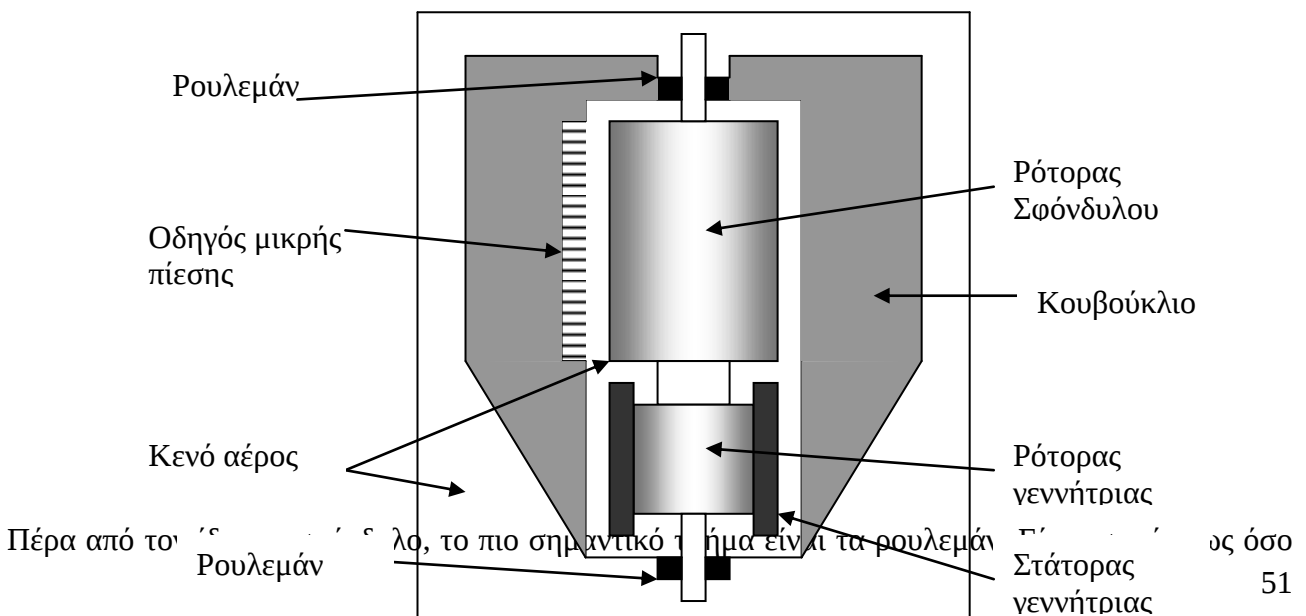
Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες σφονδύλων διαθέσιμες στην αγορά:

- Οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας, που είναι σχετικά ελαφροί
- Οι σφόνδυλοι χαμηλής ταχύτητας που συνήθως λειτουργούν κάτω από 10.000rpm και είναι πιο ογκώδεις και βαρείς.

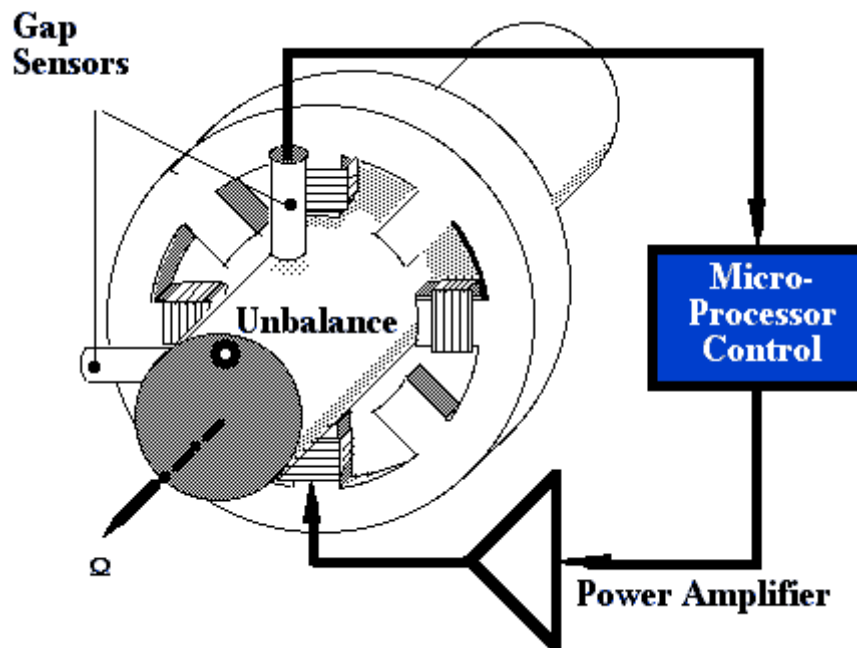
Οι σύγχρονοι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας λειτουργούν με χαμηλότερες απώλειες, λόγω του ότι βρίσκονται μέσα σε κενό αέρος, το οποίο ελαχιστοποιεί τις τριβές, το υπ' αριθμόν ένα πρόβλημα αυτής της τεχνολογίας. Οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας συνήθως προτιμούνται, αφού μπορούν με πολύ λιγότερη μάζα, άρα και κόστος υλικού, να αποθηκεύσουν την ίδια ποσότητα ενέργειας. Ακόμα η μικρότερη μάζα καθιστά ευκολότερο για τα μαγνητικά ρουλεμάν, που πια έχουν αντικαταστήσει τα μηχανικά, να σηκώσουν το σφόνδυλο.

Πολύ μεγάλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα που έχουν οι διατάξεις αυτές να επιχειρούν σε ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, περιορίζοντας έτσι την ανάγκη ενεργοβόρου κλιματισμού. Σε σχέση με τις διατάξεις μπαταριών έχουν μειωμένο κόστος συντήρησης και πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, η οποία κυμαίνεται στα 20 χρόνια. Η απουσία τοξικών υλικών, τους καθιστά εξαιρετικά φιλική επιλογή προς το περιβάλλον, ενώ και η απόρριψή τους μετά το τέλος της χρηστικής τους περιόδου είναι εύκολη. Ακόμα είναι εφικτό ένας αριθμός σφονδύλων να τοποθετηθεί εν παραλλήλω ώστε να αυξηθεί η ισχύς ενός συστήματος ή ο χρόνος που χρειάζεται μέχρι αυτό να απωλέσει την ενέργειά του. Η συνήθης πρακτική είναι ότι αποτελούν λόγω της ευκολίας με την οποία αντιδρούν σε ανωμαλίες στο δίκτυο την πρώτη εναλλακτική λύση, μέχρι άλλες διατάξεις με μεγαλύτερη χρονική αντοχή, πχ γεννήτριες diesel, να μπουν στο σύστημα.

Εικ 6.2 Σχηματική τομή ενός συστήματος σφόνδουλου (Bolund, 2007)



καλύτερα αυτά μπορούν να λειτουργούν, τόσο μικρότερες θα είναι οι απώλειες ενέργειας. Δυστυχώς με τα κλασικά μηχανικά, ήταν σχεδόν αδύνατη η μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας μια και ο ρυθμός απωλειών ήταν αρκετά υψηλός. Έτσι λοιπόν σήμερα γίνεται λόγος μόνο για μαγνητικά ρουλεμάν σε ρότορες σφονδύλων. Διακρίνονται και αυτά σε δυο βασικές κατηγορίες. Τα παθητικά και τα ενεργητικά. Τα πρώτα βασίζονται σε μόνιμους μαγνήτες και έτσι δεν απαιτούν για τη λειτουργία τους ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά είναι πιο πολύπλοκα στο σχεδιασμό και την κατασκευή.



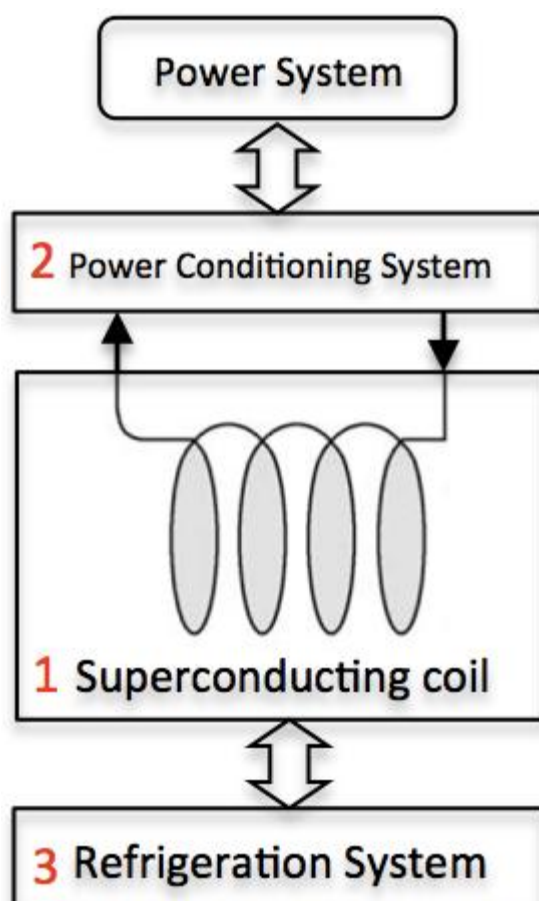
Εικ. 6.3 Αρχή λειτουργίας ενεργού μαγνητικού ρουλεμάν (Schweitzer)

Η παραπάνω εικόνα δίνει μια εικόνα και για τα μέρη και τη λειτουργία τους. Ένας αισθητήρας μετράει την απόκλιση του σφόνδουλου από τη θέση αναφοράς του. Ένας μικροεπεξεργαστής παίρνει το σήμα από τη μέτρηση, ένας ενισχυτής μετατρέπει το σήμα σε ρεύμα ελέγχου, το οποίο εν συνεχεία παράγει τις αναγκαίες μαγνητικές δυνάμεις ώστε ο σφόνδυλος να παραμείνει μέσα στα προκαθορισμένα όρια. (Schweitzer)

Μέχρι σήμερα οι σφόνδυλοι δε χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ενέργειας, αλλά μάλλον για σταθεροποίηση δικτύου και ως σύστημα άμεσης εφεδρείας. Όμως η εταιρεία Beacon Power στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ επένδυσε το 2013, 53.000.000\$ στην κατασκευή 200 συστημάτων ροτόρων, οι οποίοι θα μπορούν να δώσουν στο σύστημα 20 MW μέσα σε δευτερόλεπτα αν χρειαστεί ανοίγοντας ένα νέο κεφάλαιο στην τεχνολογία αυτή.

## 6.2 ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Ένα σύστημα υπεραγώγιμης αποθήκευσης ενέργειας (Superconducting Magnetic Energy Storage) (SMES) αποθηκεύει ενέργεια σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος (DC) διαμέσου του πηνίου. Για να είναι φορτισμένο το σύστημα, το πηνίο πρέπει να ψύχεται επαρκώς σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για να διατηρεί τις υπεραγώγιμες ιδιότητες, δηλαδή τη μηδενική αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Αυτό επιτρέπει την επ' αόριστον, χωρίς απώλειες κυκλοφορία του ρεύματος και συνεπώς την αποθήκευση της ενέργειας με τη μορφή μαγνητικού πεδίου. Με την αποφόρτιση του πηνίου, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να μετατραπεί πάλι από μαγνητική σε ηλεκτρική και να διατεθεί μέσω του δικτύου. Τα συστατικά ενός συστήματος SMES δείχνονται στην Εικόνα 6.4 και περιλαμβάνουν ένα υπεραγώγιμο πηνίο (1), ένα σύστημα μετατροπής ισχύος (2) και μια ψυκτική μονάδα (3).



Εικ 6.4 Σχηματική αναπαράσταση συστήματος SMES (Pat)

Το σύστημα SMES διαφέρει από τις άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης στο γεγονός ότι ένα συνεχές κυκλοφορούμενο ρεύμα μέσα στο υπεραγώγιμο πηνίο παράγει την αποθηκευμένη ενέργεια. Η μόνη

μετατροπή μέσα στο σύστημα είναι από συνεχές σε εναλασσόμενο ρεύμα και αντίστροφα. Συνεπώς δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας λόγω μετατροπών και έτσι η απόδοση του συστήματος είναι εξαιρετικά υψηλή. Η τεχνολογία υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης μέχρι σήμερα παρά τα προφανή πλεονεκτήματά της είχε περιορισμένες εφαρμογές, λόγω του υψηλού κόστους των υλικών που χρειάζονται. Αυτή την περίοδο υπάρχουν αρκετές μελέτες σε εξέλιξη με στόχο την επίλυση αυτού του προβλήματος.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης, τα συστήματα SMES έχουν μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης, γρήγορη απόκριση (της τάξης των milliseconds) και θεωρητικά απεριόριστο χρόνο ζωής, αλλά προσφέρουν ενέργεια για σχετικά σύντομα χρονικά διαστήματα. Αυτό τα κάνει ιδανικά για εφαρμογές υψηλής ισχύος αλλά σύντομης διάρκειας. Για εφαρμογές αποθήκευσης μεγάλου ενεργειακού ποσού θα ήταν αντισυμβατικά. Χρησιμοποιούνται λοιπόν για να λυθούν προβλήματα σταθερότητας της τάσης και ποιότητας ισχύος για μεγάλες βιομηχανικές μονάδες και για ευαίσθητες ηλεκτρικές συσκευές. Ένα επί τόπου σύστημα SMES είναι κατάλληλο για να μειώνει τις αρνητικές επιδράσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σχέση με την ποιότητα της ισχύος, ειδικά με ότι έχει να κάνει με τους μετασχηματιστές. Βρίσκει εφαρμογές τόσο σε φωτοβολταϊκά όσο και σε αιολικά πάρκα. Για παράδειγμα μπορεί να βελτιώσει ένα αιολικό έργο σταθεροποιώντας τις μεταβολές της τάσης και αποτρέποντας έτσι τις ανεμογεννήτριες να επιφέρουν βλάβη στο δίκτυο.

Μεγάλα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ακόμα η δυνατότητά τους για σχεδόν πλήρη εκφόρτιση, δίχως να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητά τους, καθώς και η απουσία κινούμενων μερών, γεγονός που μειώνει τις πιθανότητες γήρανσης υλικού. Ακόμα δεν εξαρτώνται από το γεωγραφικό ανάγλυφο και έτσι μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά οπουδήποτε. Σε σχέση με τις μπαταρίες που αποτελούν ίσως τον άμεσο αντίπαλό τους έχουν το πλεονέκτημα ότι δε χρειάζονται υλικά τα οποία επιβαρύνουν το περιβάλλον και έτσι είναι μια οικολογική και ασφαλή ως προς αυτό επιλογή. Από την άλλη ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι η ανάγκη διάθεσης μεγάλου ποσού ισχύος για να μένει το πηνίο σε χαμηλή θερμοκρασία και φυσικά το κόστος των υλικών. Πέρα από αυτό η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές που αποδίδουν ενέργεια για μερικές ώρες μόνο, ενώ οι απώλειες μπορούν κατά περιπτώσεις να φτάσουν και το 10 με 15% ημερησίως.

Τα συστήματα SMES πρωτοαναφέρθηκαν από τον Ferrierin το 1969 στη Γαλλία. Το 1971 η έρευνα ξεκίνησε στο πανεπιστήμιο του Wisconsin και κατασκευάστηκε η πρώτη διάταξη. Αρχικά η απουσία Υπεραγωγών Υψηλής Θερμοκρασίας (High Temperature Superconductors HTS) έκανε ακριβή και δύσκολη τη λειτουργία των SMES. Το πρώτο σημαντικό σύστημα HTS-SMES

κατασκευάστηκε το 1997 από την American Superconductor και συνδέθηκε σε ένα μικροαυτόνομο δίκτυο στη Γερμανία. Συσκευές Micro-SMES της τάξης 1–10 MW είναι εμπορικά διαθέσιμες και πάνω από 30 από αυτές με συνολική ισχύ περίπου 50 MW είναι εγκαταστημένες σε διαφορετικά μέρη των ΗΠΑ. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση περιλαμβάνει 6 μονάδες στο Wisconsin από την American Superconductor το 2000. Οι μονάδες των 3 MW/0.83 kWh χρησιμοποιούνται από την American Transmission Company και βρίσκουν εφαρμογή σε δράσεις ποιότητας ισχύος και ακόμα σε υποστήριξη άεργης ισχύος, όπου η κάθε μια παρέχει 8 MVA. Υπολογίζεται ότι παγκοσμίως περίπου 100 MW μονάδων SMES είναι σε λειτουργία. Άλλα σχέδια έχουν να κάνουν με το συνδυασμό SMES συστημάτων με ψύξη υγρού υδρογόνου μαζί με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Ο σκοπός αυτού του υβριδικού συστήματος είναι το σύστημα υπεραγωγίσιμης αποθήκευσης να μπορεί σε περίπτωση ανάγκης να παρέχει μέσω της γρήγορης απόκρισής του ηλεκτρική ενέργεια μέχρι να μπορέσουν να συνδεθούν στο δίκτυο οι κυψέλες υδρογόνου. Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτό το σύστημα θα έχει να κάνει με την ασφάλεια γύρω από το υγρό υδρογόνο και τις συνεπαγόμενες ψυκτικές διατάξεις.

Τα συστήματα υπεραγωγίσιμης αποθήκευσης ενέργειας είναι μια αναπτυσσόμενη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία, που είναι όμως ακριβή σε σχέση με άλλες εναλλακτικές. Χρειάζεται όμως αρκετή δουλειά μέχρι να θεωρηθεί ώριμη επιλογή. Ειδικά η επιλογή για έργα μεγάλης κλίμακας είναι σχεδόν απαγορευτική. Σημαντικό περιθώριο βελτίωσης θα αποτελέσει η ανάπτυξη υλικών που θα επιτρέπουν τη λειτουργία υπεραγωγίσιμων πηνίων σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Για την υιοθέτηση όμως σε έργα μεγάλης κλίμακας είναι απαραίτητο να μελετηθούν επαρκώς οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον από τα μαγνητικά πεδία. (Pat)

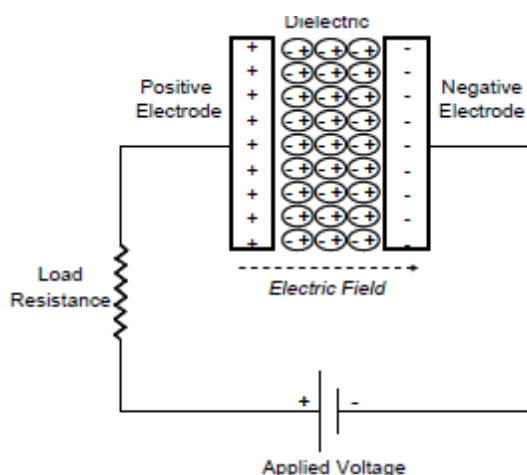
*Πίνακας 6.5 Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά Υπεραγωγίσιμης Μαγνητικής Αποθήκευσης Ενέργειας (Pat)*

Πυκνότητα ισχύος και ενέργειας (Wh/L – W/L)	Ισχύς (MW)	Διάρκεια (ώρες)	Αποδοτικότητα [%]	Κόστος ενέργειας [\$ / kWh]	Κόστος [\$ / kW]	Ζωή (έτη)
1000-4000 W/L, 0.5-5 Wh/L	0,1-10	milliseconds – 8 seconds	97+	1.000-10.000	200-300	20+

### 6.3 ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΕΣ

Μια ακόμα εναλλακτική στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας είναι αυτή των υπερπυκνωτών (supercapacitors). Οι υπερπυκνωτές διέπονται από τους ίδιους νόμους όπως και οι απλοί πυκνωτές, αλλά χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια με μεγαλύτερη επιφάνεια και λεπτότερα διηλεκτρικά για να επιτύχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες. Έτσι έχουν μεγαλύτερες ενεργειακές πυκνότητες από τους απλούς πυκνωτές και μεγαλύτερες πυκνότητες ισχύος από τις μπαταρίες. Συνεπώς, αν και είναι ακόμα νέα τεχνολογία, μπορεί να αποτελούν μια σοβαρή εναλλακτική σε αρκετές περιπτώσεις.

Οι συμβατικοί πυκνωτές αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια που είναι χωρισμένα από ένα μονωτικό διηλεκτρικό υλικό (Εικόνα 6.6). Όταν εφαρμόζεται τάση στον πυκνωτή, αντίθετα φορτία συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων.



Εικ. 6.6 Σχηματική αναπαράσταση απλού πυκνωτή (Halper, 2006)

Οι υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

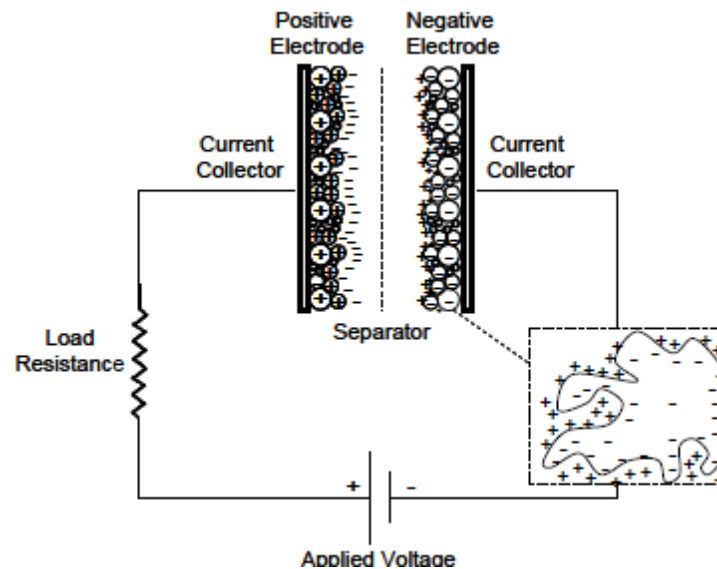
A. Ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος // μη Faradaic

B. Ψευδοπυκνωτές // Faradaic

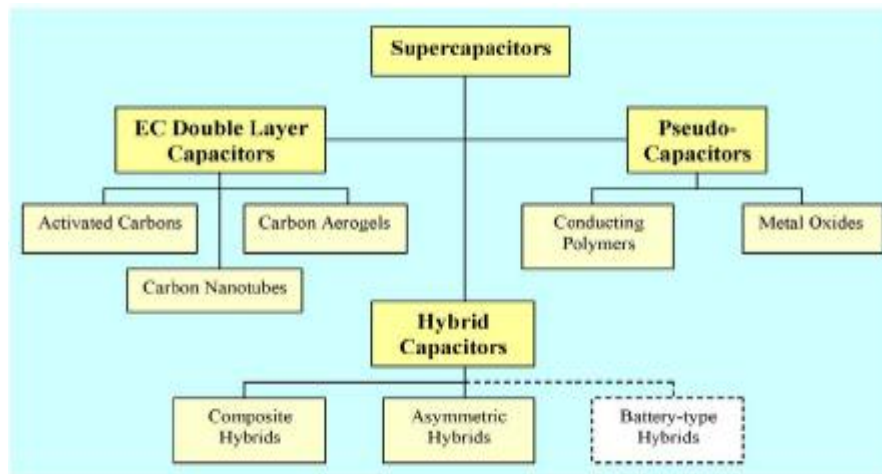
Γ. Υβριδικοί πυκνωτές // συνδυασμός των δυο

Οι διαδικασίες Faradaic, όπως οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, περιλαμβάνουν τη μεταφορά φορτίου ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη. Ένας μη Faradaic μηχανισμός δεν σχετίζεται με κάποια χημική αντίδραση. Τα φορτία διανέμονται στις επιφάνειες με φυσικές διαδικασίες που δεν περιλαμβάνουν τη διάσπαση ή σύνθεση χημικών δεσμών.





Εικ. 6.7 Σχηματική αναπαράσταση πυκνωτή διπλού στρώματος (Halper, 2006)



Εικ. 6.8 Ταξινόμηση υπερπυκνωτών (Σαγάνη, 2009)

Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (Electrochemical double-layer capacitors EDLCs) αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια με βάση τον άνθρακα, έναν ηλεκτρολύτη και ένα διαχωριστή. Αποθηκεύουν το φορτίο ηλεκτροστατικά και δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και ηλεκτρολύτη. Οι EDLCs χρησιμοποιούν ένα ηλεκτροχημικό διπλό στρώμα για να αποθηκεύσουν την ενέργεια. Όταν ασκείται τάση, το φορτίο συσσωρεύεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Τα ιόντα έχουν την τάση να έλκονται από τα αντίθετά τους. Όμως τα ηλεκτρόδια είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να αποτρέπουν αυτή την κίνηση. Συνεπώς σε κάθε ηλεκτρόδιο δημιουργείται ένα διπλό στρώμα φορτίου. Αυτά τα διπλά στρώματα συνδυασμένα με αύξηση της επιφάνειας και μείωση της απόστασης επιτρέπουν στους υπερπυκνωτές διπλού στρώματος να επιτυγχάνουν μεγαλύτερες ενεργειακές πυκνότητες από τους απλούς πυκνωτές. Η απουσία μεταφοράς φορτίου, οδηγεί και σε απουσία χημικής αντίδρασης και έτσι αυτοί οι πυκνωτές έχουν

κύκλους υψηλής σταθερότητας για πολλές επαναλήψεις (μέχρι και 106). Από την άλλη οι αντίστοιχες μπαταρίες φτάνουν μέχρι 103 επαναλήψεις. Λόγω αυτής της ιδιότητας οι EDLCs βρίσκουν εφαρμογή σε απομονωμένα συστήματα, εκεί όπου η ανθρώπινη παρουσία δεν είναι πάντα εφικτή. (Halper, 2006)

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους εξαρτώνται από τη φύση του ηλεκτρολύτη. Ένας υπερπυκνωτής διπλού στρώματος χρησιμοποιεί είτε υδατικό είτε οργανικό ηλεκτρολύτη. Οι υδατικοί, πχ  $H_2SO_4$  and  $KOH$ , έχουν γενικά μικρότερη αντίσταση και μικρότερες απαιτήσεις ελάχιστης διαμέτρου πόρων σε σχέση με τους οργανικούς, όπως το ακετονιτρίλιο. Από την άλλη μεριά, έχουν όμως μικρότερη ανοχή σε υψηλές τάσεις. Οι υποκατηγορίες των EDLCs διαχωρίζονται κυρίως ανάλογα με τον τύπο άνθρακα που χρησιμοποιούν στα ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια άνθρακα έχουν γενικά μεγαλύτερη επιφάνεια, χαμηλότερο κόστος και πιο εύκολες διαδικασίες παραγωγής από άλλα υλικά, όπως πολυμερή και οξείδια μετάλλων. Μερικές μορφές άνθρακα είναι ο ενεργός άνθρακας, τα αεροτζέλ άνθρακα και οι νανοσωλήνες. (Halper, 2006)

Ο ενεργός άνθρακας είναι πιο φτηνός και έχει τη μεγαλύτερη επιφάνεια από όλα τα άλλα ανθρακούχα υλικά και αποτελεί την πιο συνήθη επιλογή. Αν και η χωρητικότητα είναι ευθέως ανάλογη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, η εμπειρία δείχνει ότι για τον ενεργό άνθρακα δεν συμμετέχει όλη η επιφάνεια στη διαδικασία. Ίσως αυτό να έχει να κάνει με ιόντα τα οποία είναι αρκετά μεγάλα ώστε να διαλυθούν μέσα στους μικροπόρους. Ακόμα φαίνεται πως υπάρχει σχέση ανάμεσα στα μεγέθη των πόρων και στα χαρακτηριστικά του πυκνωτή. Όπου επικρατούν μεγάλοι πόροι έχουν μεγάλες πυκνότητες ισχύος και όπου επικρατούν μικρότεροι πόροι παρουσιάζονται μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες.

Τα αεροτζέλ άνθρακα σχηματίζονται από ένα συνεχές δίκτυο αγωγίμων μικροσωματιδίων άνθρακα με διάσπαρτους μεσοπόρους. Λόγω της συνεχούς δομής και της ικανότητας να σχηματίζουν χημικούς δεσμούς δεν απαιτείται η παρουσία άλλου συνδετικού παράγοντα. Σε σχέση με τον ενεργό άνθρακα παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση και συνεπώς έχουν να κάνουν με υπερπυκνωτές με μεγαλύτερη ισχύ.

Τα ηλεκτρόδια που είναι κατασκευασμένα από νανοσωλήνες σχηματίζουν ένα ανοιχτό και προσβάσιμο δίκτυο από μεσοπόρους, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, επιτρέποντας μια συνεχή ροή φορτίου που χρησιμοποιεί έτσι σχεδόν όλη τη διαθέσιμη επιφάνεια. Συνεπώς οι χωρητικότητες που επιτυγχάνονται είναι παρόμοιες με αυτές του ενεργού άνθρακα αλλά μικρότερες διαστάσεις υπερπυκνωτή. Η αντίσταση είναι ακόμα μικρότερη από αυτή του ενεργού άνθρακα και υπάρχουν μελέτες σε εξέλιξη για την ακόμα μεγαλύτερη μείωσή της. (Halper, 2006)

Οι ψευδοπυκνωτές αποθηκεύουν την ενέργεια με μεταφορά φορτίου ανάμεσα σε ηλεκτρόδιο και ηλεκτρολύτη. Έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν μεγαλύτερες χωρητικότητες και ενεργειακές πυκνότητες από τους υπερπυκνωτές διπλού στρώματος. Χρησιμοποιούν δυο είδη υλικών, τα αγωγιμα πολυμερή και τα οξειδία μετάλλων.

Τα αγωγιμα πολυμερή έχουν σχετικά υψηλή χωρητικότητα και αγωγιμότητα, χαμηλή αντίσταση και κόστος που μπορεί ίσως να συγκριθεί με τους υπερπυκνωτές που έχουν άνθρακα στα ηλεκτρόδιά τους. Όμως η μηχανική καταπόνηση που υφίσταται το πολυμερές κατά τον κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης επηρεάζει αρνητικά τη σταθερότητα του συστήματος και αυτό είναι και το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους.

Τα οξειδία μετάλλων έχουν υψηλή αγωγιμότητα. Η έρευνα έχει να κάνει κυρίως με το οξείδιο του ρουθενίου. Επικεντρωνόμαστε κυρίως σε αυτό το μέταλλο λόγω της δομής που αποκτά στο οξείδιό του. Ακόμα η αντίσταση του ένυδρου οξειδίου είναι μικρότερη από αυτή άλλων υλικών. Το μεγάλο μειονέκτημά τους είναι το κόστος του ίδιου του μετάλλου και η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη φτηνότερων οξειδίων με παρόμοιες ιδιότητες. (Halper, 2006)

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές επιχειρούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα και να μειώσουν να μειονεκτήματα των δυο παραπάνω κατηγοριών. Η έρευνα επικεντρώνεται πάνω σε τρεις τύπους ανάλογα με τον τύπο ηλεκτροδίου του καθενός: Σύνθετου, ασυμμετρικού, και τύπου μπαταρίας. Τα ηλεκτρόδια συνδυάζουν ανθρακούχα υλικά με είτε αγωγιμα πολυμερή είτε με οξειδία μετάλλων και έτσι σε ένα και μόνο ηλεκτρόδιο έχουν τόσο φυσικούς όσο και χημικούς μηχανισμούς αποθήκευσης. Τα σύνθετα ηλεκτρόδια που κατασκευάζονται από νανοσωλήνες και πολυπυρρόλη έχουν σημειώσει ιδιαίτερη επιτυχία, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερες χωρητικότητες από τους απλούς τύπους των συστατικών τους μερών. Ακόμα η δομή του υλικού μειώνει τη γήρανση που υφίσταται από τη μηχανική καταπόνηση.

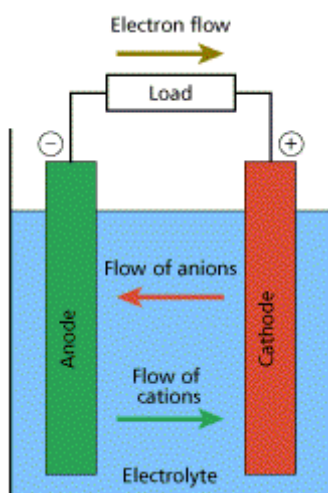
Οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί κυρίως στη χωρητικότητα των υλικών των ηλεκτροδίων. Όμως υπάρχει σημαντικό περιθώριο βελτίωσης και σε τομείς όπως βελτιστοποίηση του ηλεκτρολύτη, μείωση της αντίστασης και μείωση της αυτοεκφόρτισης. Λόγω της ευελιξίας τους, οι υπερπυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρόλους που οι μπαταρίες δεν μπορούν να ανταποκριθούν. Σε γενικές γραμμές είναι η ιδανική λύση για προτάσεις όπου απαιτείται συνδυασμός μεγάλης ισχύος, μικρού χρόνου εκφόρτισης, υψηλής σταθερότητας και μεγάλου κύκλου ζωής.

Παρά τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών, η παραγωγή και αξιοποίησή τους είναι περιορισμένη

μέχρι σήμερα. Πιθανοί λόγοι είναι το υψηλό πολλές φορές κόστος και ο ρυθμός εκφόρτισης. Η μελλοντική έρευνα ίσως δώσει λύση σε μερικά από τα προβλήματα και μπορεί οι υπερπυκνωτές να αποτελέσουν ρεαλιστική λύση αποθήκευσης ενέργειας και ισχύος.

## 7.1 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

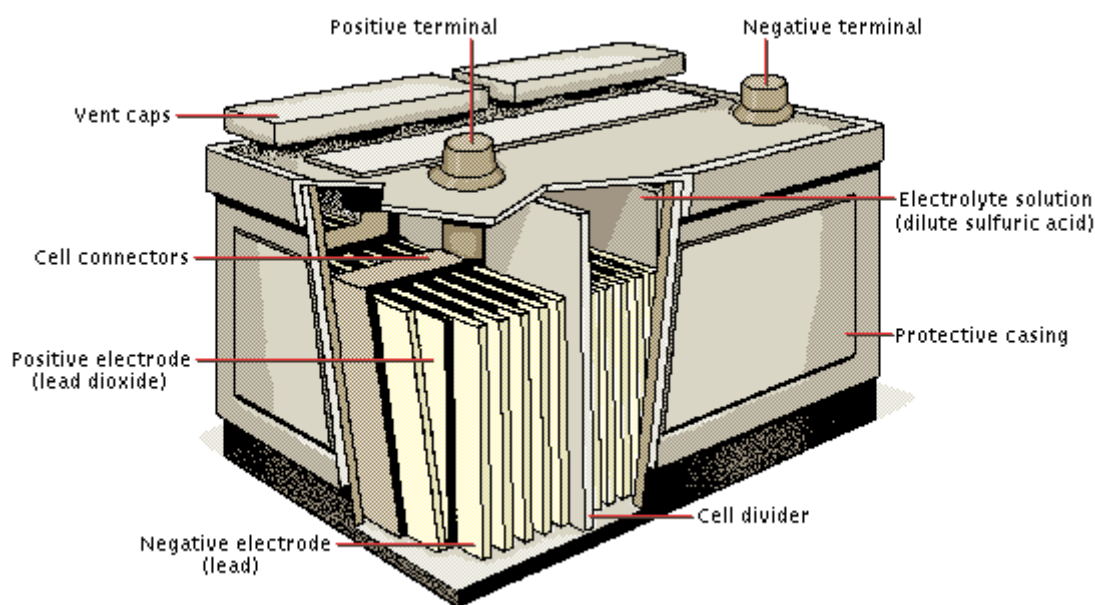
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η ηλεκτροχημική προσέγγιση στην αποθήκευση ενέργειας, αυτό που στην καθημερινότητα ονομάζουμε μπαταρίες ή συσσωρευτές. Ως μπαταρία ορίζουμε ένα στοιχείο που έχει τη δυνατότητα να παράξει ηλεκτρική ενέργεια από μια χημική αντίδραση. Κατ' ουσία μια μπαταρία αποτελείται από δυο ή και περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα, αλλά έχει καθιερωθεί ο όρος στοιχείο και μπαταρία να είναι ταυτόσημος. Σε κάθε στοιχείο υπάρχει ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο ή ηλεκτρολύτης, που είναι αγωγός ιόντων, ένας διαχωριστής, που είναι επίσης αγωγός ιόντων και ένα θετικό ηλεκτρόδιο. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι υδατικός ή μη και να βρίσκεται σε υγρή, ημίρευστη ή στερεή φάση. Όταν το στοιχείο συνδέεται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα ή σε μια συσκευή που χρειάζεται φόρτιση, το αρνητικό ηλεκτρόδιο παρέχει ένα ρεύμα ηλεκτρονίων που ρέουν μέσα στο κύκλωμα και καταλήγουν στο θετικό ηλεκτρόδιο. Όταν το κύκλωμα ανοίγει τότε σταματάει και η αντίδραση. Μια κύρια μπαταρία μπορεί να μετατρέψει τα χημικά της στοιχεία σε ηλεκτρική ενέργεια μόνο μια φορά και μετά πετιέται. Μια δευτερεύουσα μπαταρία έχει τη δυνατότητα να απανασυνθέσει τα ηλεκτρόδιά της περνώντας πάλι πίσω σε αυτά ηλεκτρική ενέργεια. Ονομάζεται επαναφορτιζόμενη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές. (Bellis, 2013)



Εικ. 7.1 Απλοποιημένη διάταξη μπαταρίας (Bellis, 2013)

## 7.2 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπαταριών, ο καθένας με τις δικές του ιδιότητες, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τους πιο γνωστούς και ευρύτατα χρησιμοποιούμενους τύπους είναι οι μπαταρίες μολύβδου. Σε μια μπαταρία μολύβδου, τα ηλεκτρόδια και τα καλώδια είναι φτιαγμένα από μολύβδο. Συνήθως μέσα στο μολύβδο περιλαμβάνεται και κάποιο πρόσθετο όπως ασβέστιο για καλύτερη απόδοση. Η πολικότητα καθορίζεται από κάποιο ενεργό υλικό που είναι σε επαφή με τις καλωδιώσεις και συνήθως αποτελείται από οξείδια μολύβδου. Ο ηλεκτρολύτης είναι θεικό οξύ και για αυτό ονομάζονται επίσης και μπαταρίες οξέος-μολύβδου.



Εικ. 7.2 Μπαταρία μολύβδου (batteries)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπαταριών μολύβδου-οξέως

**Ανοιχτού τύπου (Flooded):** Είναι ο παραδοσιακός τύπος που χρησιμοποιείται ευρύτατα στα αυτοκίνητα για την εκκίνηση της μηχανής. Ο υγρός ηλεκτρολύτης είναι ελεύθερος να κινείται μέσα στο στοιχείο. Ο χρήστης έχει πρόσβαση και να προσθέτει απεσταγμένο νερό όταν τα λεγόμενα υγρά της μπαταρίας στερεύουν.

**Κλειστού τύπου (Sealed):** Ο όρος αυτός αντιπροσωπεύει αρκετές περιπτώσεις με την πιο κλασική να είναι μια μικρή παραλλαγή του τύπου Flooded. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης δεν μπορεί να έχει πρόσβαση στη μπαταρία σε περίπτωση ανάγκης. Ο κατασκευαστής έχει προβλέψει ότι υπάρχει μέσα στο στοιχείο επαρκής ποσότητα οξέως ώστε με κανονική χρήση να υπερβεί την εγγυημένη

διάρκεια ζωής.

*VRLA*: Ο όρος σημαίνει Valve Regulated Lead Acid (Ρυθμιζόμενης βαλβίδας). Είναι επίσης σφραγισμένου τύπου. Ο μηχανισμός της ρυθμιστικής βαλβίδας επιτρέπει την ασφαλή διαφυγή αερίων οξυγόνου και υδρογόνου κατά τη φόρτιση.

*AGM*: Ο όρος σημαίνει Absorbed Glass Mat. Η κατασκευή της επιτρέπει στον ηλεκτρολύτη να καθίσταται ανενεργός όταν είναι σε εγγύτητα με το ενεργό υλικό των ηλεκτροδίων, έτσι βελτιώνοντας τουλάχιστον θεωρητικά την απόδοση σε φόρτιση και εκφόρτιση.

*Gel*: Τα στοιχεία τύπου Gel είναι παρόμοια με τα AGM γιατί ο ηλεκτρολύτης είναι ανενεργός, αλλά διαφέρουν ως προς την κατάσταση του ηλεκτρολύτη, όπου εδώ είναι ημίρευστος ενώ στο AGM είναι σε υγρή μορφή. Η ημίρευστη μορφή επιτυγχάνεται με την προσθήκη σιλικονούχου πρόσθετου. Αυτός ο τύπος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία από όλους σε αυκομειώσεις της τάσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης γιατί μπορεί να αλλοιωθεί η μορφή του ηλεκτρολύτη, μέσω δημιουργίας μικρορωγμών. (tender)

Γενικά οι μπαταρίες μολύβδου είναι από τους πιο οικονομικούς τύπους, αλλά περιβαλλοντικά είναι δύσκολη η απόρριψή τους. Στην αγορά κυκλοφορούν συστήματα από τις εταιρείες SolarWorld, IBC κλπ, που μπορούν να υποστηρίξουν την περίσσεια ενέργειας από μικρά οικιακά φωτοβολταϊκά συστήματα με ένα κόστος περίπου στα 6.500€. Οι μπαταρίες από τη SolarWorld έχουν διάρκεια ζωής 13.5 ετών (2700 φορτίσεις), ενώ της IBC μόνο 10 έτη (2000 φορτίσεις). Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι 5 φορές μικρότερη από αυτή των μπαταριών λιθίου. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι 5% το μήνα και ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται ανάμεσα σε 65-90% (ibc-solar.de, 2012).

Η πρώην εταιρεία Berlin AG (αντίστοιχη της ΔΕΗ στην πρώην Αν. Γερμανίας) είχε κατασκευάσει ένα σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες μολύβδου για συνολικό ποσό ενέργειας 14MWh και ισχύος 17 MW κυρίως για τη σταθεροποίηση του απομονωμένου δικτύου. Ένα ενδεικτικό κόστος μπορεί να δώσει ένα έργο στην Αλάσκα πάλι για χρήση ως σταθεροποιητής συχνότητας σε απομονωμένο δίκτυο με ενέργεια 1,4MWh και 1MW συνολικού κόστους 1,2 εκ.\$ το 1997 (alaskarenewableenergy.org, 2013)

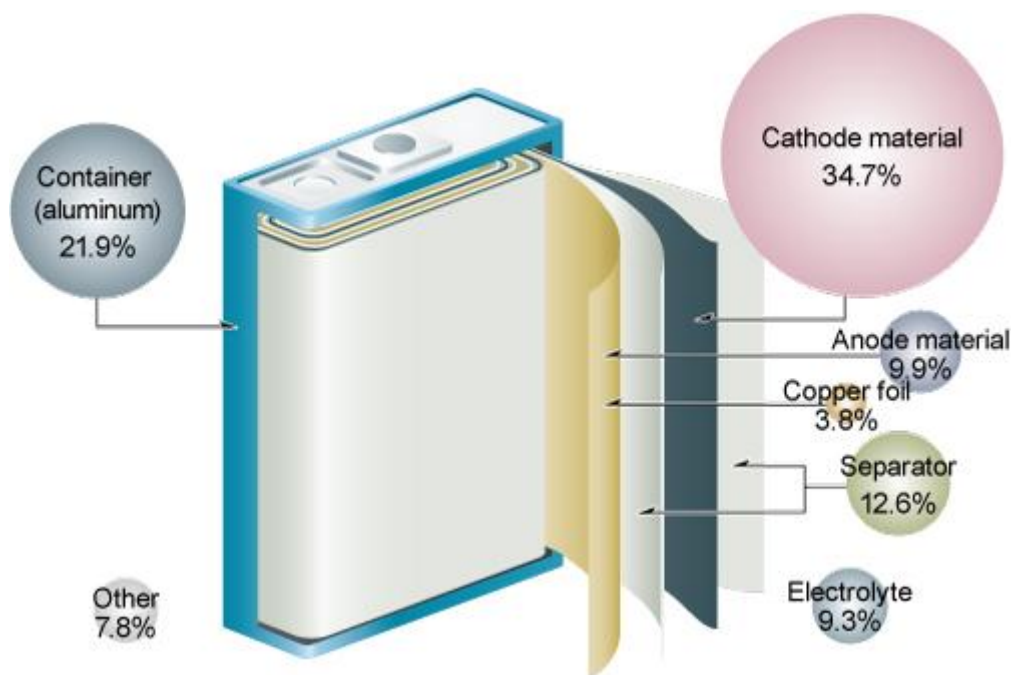
Πιν. 7.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες μπαταρίας μολύβδου-οξέως (Bargiel, 2012)

Τεχνολογία	Μπαταρία μολύβδου-οξέως
Πεδίο εφαρμογής	Σταθεροποιητής δικτύου, γεννήτρια, μπαταρία αυτοκινήτου
Απόδοση	65 – 90 %
Ισχύς	μέχρι 17 MW
Ενέργεια	1kW – 40 MWh
Ενεργειακή πυκνότητα	25 – 40 Wh/kg
Χρόνος εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα μέχρι μέρες
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	5% ανά μήνα
Αριθμός φορτίσεων	50 – 2000
Κόστος επένδυσης	25 – 250€ ανά kWh
Εμπορική κατάσταση	Εμπορικά διαθέσιμη
Δυνατότητες ανάπτυξης	Χρόνος ζωής, απόδοση

### 7.3 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΟΥ ΤΥΠΟΥ

Ένας άλλος τύπος είναι αυτός των μπαταριών ιόντων λιθίου. Αρχικά ο κύριος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών για φορητές εφαρμογές ήταν ο νικελίου καδμίου. Όμως από το 1990 (SONY) και έπειτα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου τις έχουν πλέον αντικαταστήσει. Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μέταλλο, έχει το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και παρέχει τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Αρχικά όμως ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λόγω προβλημάτων ασφάλειας, ειδικά κατά τη φόρτιση. Μια λύση που βρέθηκε ήταν η μετάβαση στη μη μεταλλική μορφή των ιόντων, θυσιάζοντας προς χάριν της ασφάλειας ένα τμήμα της ενεργειακής πυκνότητας.



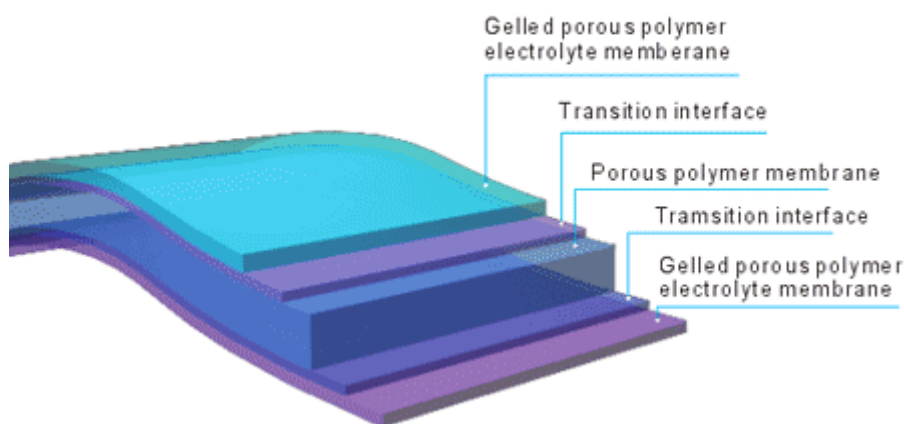


Εικ. 7.3 Μπαταρία ιόντων λιθίου και σχετικά κόσθη των μερών της (fuel, 2010)

Σε μια τέτοια μπαταρία, τα ιόντα λιθίου είναι τα κατιόντα που πηγαίνουν από την άνοδο στην κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένας συνδυασμός αλάτων λιθίου όπως  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ , ή  $\text{LiClO}_4$ , σε έναν οργανικό διαλύτη, όπως είναι ο αιθέρας. Στην άνοδο έχουμε συνήθως γραφίτη και στην κάθοδο χρησιμοποιείται οξείδιο λιθίου κοβαλτίου  $\text{LiCoO}_2$ . Παρά τα πλεονεκτήματα της φορητότητας και της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας (μικρότερης βέβαια από άλλες εφαρμογές που χρησιμοποιούν χημικές διεργασίες, πχ βενζίνη) υπάρχουν και μειονεκτήματα. Η μπαταρία είναι εύθραυστη και χρειάζεται ένα προστατευτικό κύκλωμα για να διατηρήσει την ασφάλή της λειτουργία. Αυτό το κύκλωμα περιορίζει την τάση αιχμής του κάθε στοιχείου στη φόρτιση και αποτρέπει να πέσει πολύ χαμηλά κατά την εκφόρτιση. Μια άλλη παράμετρος είναι η πτώση της απόδοσης με τη χρήση συν τω χρόνω. Η αποθήκευση σε κρύο μέρος, περίπου  $15^\circ\text{C}$ , επιβραδύνει αυτή τη διαδικασία, ενώ αν η αποθήκευση είναι μακροχρόνια συνίσταται να είναι φορτισμένη τουλάχιστον κατά 40%. Ο πιο οικονομικός τύπος σε σχέση με την παρεχόμενη ενέργεια είναι ο κυλινδρικός (μέγεθος 18mm X 65,2mm). Αν όμως η γεωμετρία της εφαρμογής πρέπει να είναι πολύ λεπτή τότε υιοθετείται πρισματικό στοιχείο. (aldrich)

Μια ακόμα μορφή επαναφορτιζόμενης μπαταρίας λιθίου είναι αυτή του πολυμερούς, όπου εδώ χρησιμοποιούμε ένα ξηρό, στερεό ηλεκτρολύτη πολυμερούς. Αποτελείται όπως φαίνεται στην Εικ. 7.4 από δυο πορώδεις ηλεκτρολυτικές μεμβράνες γέλης πολυμερούς, που εσωκλείουν μια τρίτη στερεή μεμβράνη πολυμερούς, η οποία προστατεύεται εκατέρωθεν από δυο λεπτά στρώματα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να γίνει η συγκεκριμένη μπαταρία πολύ λεπτή, μέχρι

πάχους 1mm, ενώ θεωρείται ακόμα πιο ασφαλής από την κλασική των ιόντων. Το μεγαλύτερο πρόβλημά της είναι η χαμηλή αγωγιμότητα. Η εσωτερική αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και δεν μπορεί να δώσει γρήγορα τις ποσότητες ενέργειας που χρειάζονται σε εφαρμογές όπως τηλεπικοινωνίες. Η λύση που προσφέρεται είναι η αύξηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα των 60°C, με προφανείς άλλες παρενέργειες σε φορητές εφαρμογές. Μπορεί να προστεθεί εναλλακτικά ηλεκτρολύτης σε μορφή gel, αλλά έχει ως αντίτιμο την αύξηση του πάχους. Αυτού του είδους οι μπαταρίες έχουν βρει ελάχιστες εφαρμογές στην αγορά, κυρίως όπου είναι αναγκαία εξαιρετικά λεπτό σχήμα ή και ευελιξία της ίδιας της μπαταρίας. (Gaston)



Εικ. 7.4 Στρώσεις μπαταρίας πολυμερούς λιθίου (Gaston)

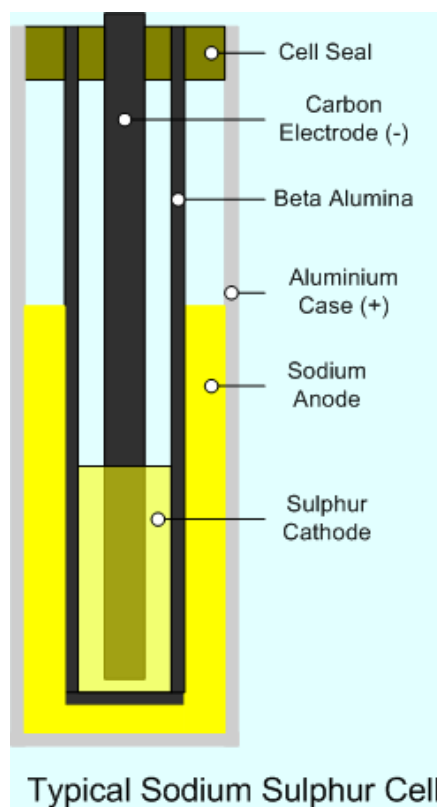
Σε εφαρμογές σχετικές με αποθήκευση ενέργειας κλίμακος με μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι περισσότερες εταιρείες προσφέρουν λύσεις σε μικρά οικιακά συστήματα, κυρίως ως γεννήτρια, λόγω των μικρών απωλειών. Με τον τρέχοντα ρυθμό ανάπτυξης νέων υλικών σε 20 χρόνια , ίσως όμως έχουμε μια εντελώς νέα οπτική.

Πιν. 7.2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες μπαταρίας ιόντων λιθίου (Bargiel, 2012)

Τεχνολογία	Μπαταρία ιόντων λιθίου
Πεδίο εφαρμογής	γεννήτρια έκτακτης ανάγκης , ηλεκτροκίνηση, φορητή μπαταρία
Απόδοση	90 – 95 %
Ισχύς	πολλά MW
Ενέργεια	πολλές MWh
Ενεργειακή πυκνότητα	90 – 190 Wh/kg
Χρόνος εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα μέχρι βδομάδες
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	5% ανά έτος
Αριθμός φορτίσεων	7000
Κόστος επένδυσης	800 - 1500 € ανά kWh
Εμπορική κατάσταση	Εμπορικά διαθέσιμη
Δυνατότητες ανάπτυξης	Μείωση κόστους, ενεργειακή πυκνότητα, αριθμός φορτίσεων

#### 7.4 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΤΥΠΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ ΘΕΙΟΥ

Μια άλλη μορφή μπαταριών είναι αυτές νατρίου-θείου. Ανήκουν στην κατηγορία θερμικών μπαταριών. Η μεγαλύτερη διαφοροποίησή τους είναι ότι σε αντίθεση με τις άλλες μπαταρίες έχουν στέρεο ηλεκτρολύτη και υγρά ηλεκτρόδια. Η άνοδος είναι φτιαγμένη από νάτριο και η κάθοδος από θείο. Ο ηλεκτρολύτης είναι κεραμικό υλικό (sodium beta alumina, που αποτελείται από 11 μέρη οξείδιο αλουμινίου  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και 1 μέρος οξείδιο νατρίου  $\text{NaO}$ ). Για να λειτουργήσει η μπαταρία πρέπει να είναι σε θερμοκρασία, όπου ο ηλεκτρολύτης να μπορεί να λειτουργεί ως αγωγός ιόντων, δηλαδή στους  $350^\circ\text{C}$ , γεγονός που απαιτεί από μόνο του σημαντικά ποσά ενέργειας. Η διάταξη αποτελείται από ένα ζεύγος ομόκεντρων σωλήνων, όπου ο εσωτερικός είναι φτιαγμένος από τον ηλεκτρολύτη και περιέχει ένα από τα ηλεκτρόδια και ο άλλος είναι φτιαγμένος από αλουμίνιο ή παρεμφερές μέταλλο και περιέχει το άλλο ηλεκτρόδιο. Το σύστημα είναι μονωμένο ώστε να μη διαφεύγουν αέρια.



Εικ. 7.5 Μπαταρία τύπου NaS (VoxSolaris)

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της είναι η χαμηλή τιμή και μεγάλη διαθεσιμότητα των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένη. Συνήθως χρησιμοποιούνται για να σταθεροποιήσουν το δίκτυο ειδικά στις διακυμάνσεις από τη μεγάλη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όμως στην Ιαπωνία υπάρχουν έργα όπου τοποθετούνται σε μεγάλες διατάξεις και θερμαίνονται κεντρικά, ώστε να

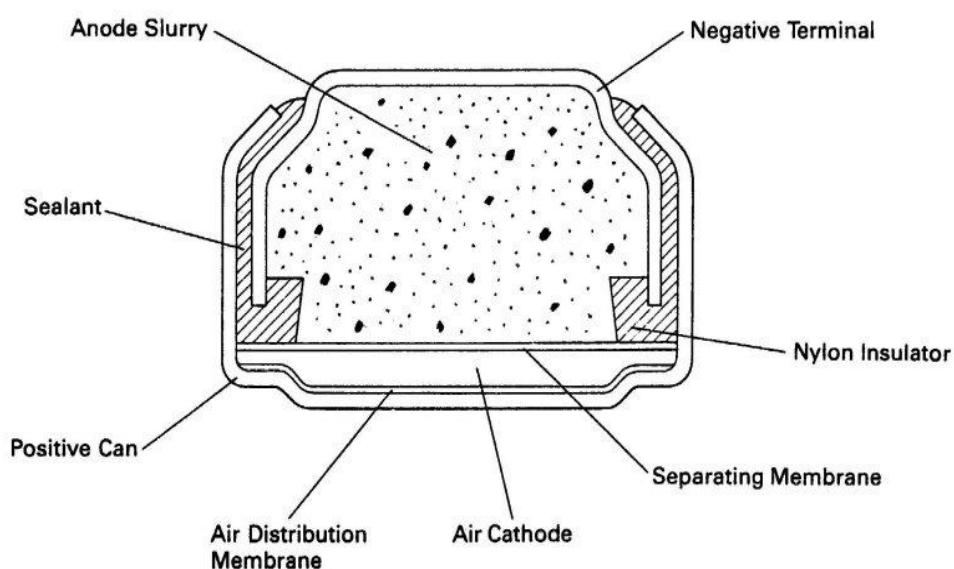
χρησιμοποιούνται για παροχή ενέργειας σε ώρες αιχμής. (VoxSolaris)

Πιν. 7.3 Χαρακτηριστικές ιδιότητες μπαταρίας νατρίου θείου (Bargiel, 2012)

Τεχνολογία	Μπαταρία νατρίου θείου
Πεδίο εφαρμογής	Σταθεροποιητής δικτύου
Απόδοση	70 – 85 %
Ισχύς	μέχρι 1 MW
Ενέργεια	πολλές MWh
Ενεργειακή πυκνότητα	200 Wh/kg
Χρόνος εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα μέχρι ημέρες
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	0% - 20% ανά ημέρα
Αριθμός φορτίσεων	10.000
Κόστος επένδυσης	60-200 € ανά kWh
Εμπορική κατάσταση	Εμπορικά διαθέσιμη
Δυνατότητες ανάπτυξης	Μείωση θερμοκρασίας, ρυθμός αυτοεκφόρτισης

#### 7.5 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΑΕΡΑ

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου αέρα αποτελούνται από ένα κεντρικά τοποθετημένα πολτό από ψευδάργυρο (άνοδος) μέσα σε ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (ηλεκτρολύτης). Ως κάθοδος λειτουργεί ατμοσφαιρικός αέρας από τον οποίο δεσμεύεται οξυγόνου για να σχηματιστούν οξείδια ψευδαργύρου κατά την ηλεκτροπαραγωγή.



Εικ. 7.6 Μπαταρία ψευδαργύρου αέρα (Bargiel, 2012)

Το μειονέκτημά τους είναι ότι η μπαταρία, λόγω της επικοινωνίας με τον αέρα, αποτελεί ένα ανοιχτό σύστημα και αν αφεθεί ελεύθερη μπορεί λόγω αυτού του γεγονότος να εκφορτιστεί με ευκολία. Η ενεργειακή της πυκνότητα είναι τρεις φορές παραπάνω από αυτή των ιόντων λιθίου. Συνήθως χρησιμοποιείται σε ακουστικά βαρηκοΐας ή συσκευές τηλεειδοποίησης. (Bargiel, 2012)

Πιν. 7.4 Χαρακτηριστικές ιδιότητες μπαταρίας ψευδαργύρου αέρα (Bargiel, 2012)

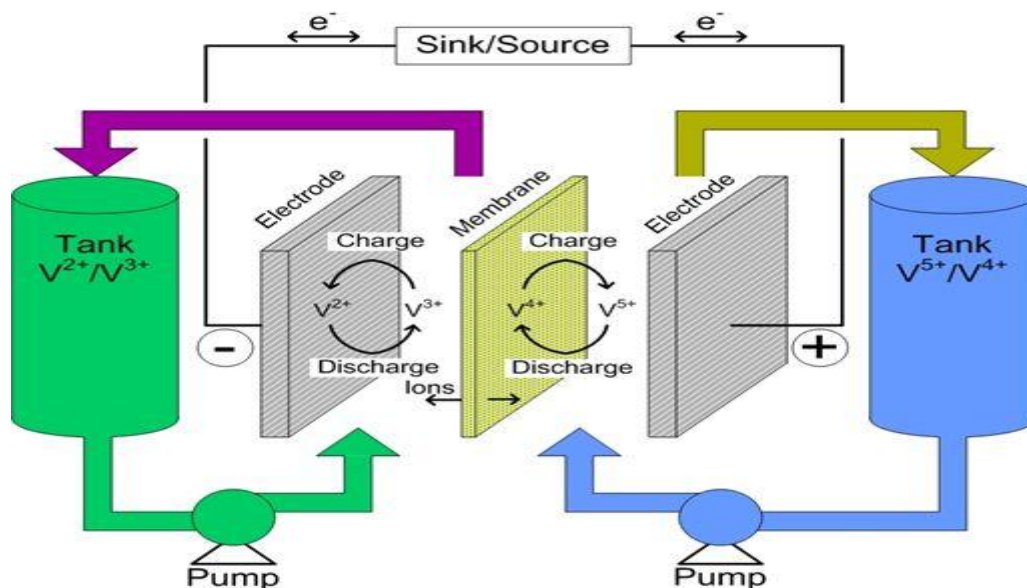
Τεχνολογία	Μπαταρίες ψευδαργύρου αέρα
Πεδίο εφαρμογής	Σταθερότητα δικτύου, ηλεκτροκίνηση, φορητή μπαταρία
Απόδοση	70 – 85 %
Ισχύς	μέχρι 1 MW
Ενέργεια	πολλές MWh
Ενεργειακή πυκνότητα	350 Wh/kg
Χρόνος εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα μέχρι βδομάδες
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	<5% ανά έτος
Αριθμός φορτίσεων	>10.000
Κόστος επένδυσης	160€ ανά kWh
Εμπορική κατάσταση	Σε ανάπτυξη
Δυνατότητες ανάπτυξης	Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, φορητότητα

## 7.6 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, μια νέα προσέγγιση που είναι σε φάση έντονης έρευνας και ανάπτυξης είναι οι μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν κυρίως δυο εφαρμογές που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει τη χρήση ουρανίου (Πανεπιστήμιο Tochoh, Japan) και η άλλη βανάδιο. Για προφανείς λόγους, το πρώτο στοιχείο δε θα μελετηθεί μιας και ανήκει στην εξαιρετικά ευαίσθητη κατηγορία των πυρηνικών υλικών και έτσι η διαδεδομένη χρήση του θεωρείται ελάχιστη πιθανή.

Τα ενεργά υλικά σε μια μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής είναι διαλυμένα άλατα σε υγρούς ηλεκτρολύτες. Ο ηλεκτρολύτης είναι αποθηκευμένος σε δεξαμενές από όπου αντλείται για φόρτιση ή για εκφόρτιση σε μια κεντρική μονάδα αντίδρασης. Η μονάδα αυτή χωρίζεται στα δυο από μια μεμβράνη. Εκεί μέσω της οξειδοαναγωγικής αντίδρασης παράγεται ή αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια. Το μέγεθος των δεξαμενών καθορίζει το ενεργειακό περιεχόμενο της μπαταρίας και το

μέγεθος της κεντρικής μονάδας την ισχύ φόρτισης/εκφόρτισης. Συνεπώς μπορούν αυξάνοντας το μέγεθος αυτών των παραμέτρων να χρησιμοποιηθούν εύκολα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το βανάδιο παρουσιάζει εξαιρετική εφαρμογή σε αυτές τις μπαταρίες γιατί μπορεί να χρησιμοποιεί και στις δυο δεξαμενές, όντας σε 4 διαφορετικές ηλεκτροχημικές καταστάσεις. Έτσι αποφεύγεται οποιαδήποτε πιθανή επιμόλυνση του συστήματος από ενδεχόμενη αστοχία της μεμβράνης. Όμως το μεγάλο μειονέκτημα είναι το υψηλό του κόστος, μιας κα κατατάσσεται στις σπάνιες γαίες με τη μεγαλύτερη παραγωγή του να μοιράζεται σε Ν. Αφρική, Κίνα, Ρωσία και Καζακστάν. (Bargiel, 2012)



Εικ. 7.7 Απεικόνιση λειτουργίας μπαταρίας Vanadium Redox-Flow Battery (VRB) (Messib)

Πιν. 7.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες μπαταρίας οξειδοαναγωγικής ροής (Bargiel, 2012)

Τεχνολογία	Μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής
Πεδίο εφαρμογής	Σταθερότητα δικτύου, μακροχρόνια αποθήκευση
Απόδοση	70 – 80 %
Ισχύς	πολλά MW
Ενέργεια	πολλές MWh
Ενεργειακή πυκνότητα	15-70 Wh/kg
Χρόνος εκφόρτισης	Δευτερόλεπτα μέχρι έτος
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	<1% ανά έτος
Αριθμός φορτίσεων	10.000
Κόστος επένδυσης	100€ - 1000€ ανά kWh
Εμπορική κατάσταση	Σε ανάπτυξη
Δυνατότητες ανάπτυξης	Μείωση κόστους, υλικό μεμβράνης

Τύπος μπαταρίας	Οξέων μολύβδου	Νικελίου και καδμίου	Θείου και νατρίου	Ιόντων λιθίου	Νατρίου και χλωριδίου του νικελίου	Μεταλλικού στοιχείου και αέρα
<i>Χαρακτηριστικά</i>						
<b>Αποδιδόμενη ισχύς</b>	x10MW- 100MW	x10MW	Κλίμακα MW	x10KW	x100KW	1-10KW
<b>Ειδική ενέργεια (Wh/Kg)</b>	35-50	75	150-240	150-200	125	200-600
<b>Ειδική ισχύς (W/Kg)</b>	75-300	150-300	90-230	200-315	130-160	-
<b>Κύκλοι ζωής (cycles)</b>	500-1500	2500	2500	1000- 10000+	2500+	100-200
<b>Βαθμός απόδοσης φόρτισης / εκφόρτισης (%)</b>	Περίπου 80	Περίπου 70	Έως 90	Περίπου 95	Περίπου 90	Περίπου 50
<b>Αυτοεκφόρτιση</b>	2-5% ανά μήνα	5-20% ανά μήνα	5-20% ανά μήνα	Περίπου 1% ανά μήνα	Περίπου 1% ανά μήνα	-

Πιν. 7.6 Συγκριτικός πίνακας επικρατέστερων τύπων μπαταριών (Τεχ)

Στον παραπάνω πίνακα απεικονίζονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων μπαταριών, όπως αυτές αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο τούτο. Δεν περιλαμβάνονται εδώ τύποι που είναι σε φάση ανάπτυξης, παρά μόνο όσες μορφές είναι ήδη εμπορικά ώριμες επιλογές. Παρατηρούμε πως ο πιο παλιός τύπος, αυτός των μπαταριών μολύβδου αποδίδει και τη μεγαλύτερη ισχύ. Για αυτό το λόγο συναντώνται σε έργα μεγάλης κλίμακας για ρύθμιση και ποιότητα ισχύος, αν και ο όγκος απαιτεί μεγάλες και βαριές εγκαταστάσεις. Οι κύκλοι ζωής είναι σίγουρα μια σημαντική παράμετρος και ο μεγάλος αριθμός τους για τις μπαταρίες λιθίου, δικαιολογεί τη διάδοσή τους σε καθημερινές εφαρμογές και συσκευές (πχ κινητά τηλέφωνα). Το ίδιο ισχύει και για την ειδική ισχύ, καθιστώντας τις ελαφριές σε σχέση με τον ανταγωνισμό. Για τις μπαταρίες νικελίου και θείου, ο μεγάλος ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι οπωσδήποτε σημαντικό πρόβλημα για την εγκατάστασή τους ειδικά σε συστήματα, όπου απαιτείται μόνο από καιρού εις καιρόν η χρήση τους. Τέλος οι μπαταρίες μεταλλικού στοιχείου – αέρα έχουν πολύ μικρή ισχύ γεγονός που περιορίζει σημαντικά το εύρος των εφαρμογών τους.

### 8.1 ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

Πέρα από τις λύσεις που έχουν ήδη παρουσιαστεί, υπάρχει και μια κατηγορία καταστάσεων που προσανατολίζεται σε άλλους ορίζοντες πέρα από την αποθήκευση ενέργειας για να παραχθεί έπειτα ηλεκτρισμός.

Μια από τις πιο γνωστές λύσεις είναι η αποθήκευση της περίσσειας ως θερμότητα σε δεξαμενές ζεστού νερού. Παρά το ότι οι απώλειες είναι συνήθως αρκετά υψηλές, αυτή η λύση παρουσιάζει χαμηλό κόστος, τόσο στην κατασκευή, όσο και στα ωφέλη που έχει για τη θέρμανση μιας περιοχής κατά τους χειμερινούς μήνες ως υποκατάστατο των παραδοσιακών και κοστοβόρων μεθόδων θέρμανσης (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ξυλεία). Απαιτεί βέβαια την υποδομή ενός δικτύου τηλεθέρμανσης.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη θέρμανση του νερού που βρίσκεται στη μονωμένη δεξαμενή μέσω ηλεκτροδίων. Η μέγιστη θερμοκρασία πρέπει να είναι μικρότερη του σημείου βρασμού του νερού και συνήθως κυμαίνεται στους 95°C. Στιγμιαία όταν υπάρχει υπερπαραγωγή ενέργειας μπορεί η δεξαμενή να δράση και ως καταστροφέας ενέργειας με τις θερμοκρασίες να φτάνουν και τους 120-130 ° C. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε διαφόρους τύπους δεξαμενών σε διαφορετικές περιοχές της Γερμανίας (αριστερά Münster 4x2,000m<sup>3</sup>, κέντρο Linz 36.000m<sup>3</sup> και δεξιά Dresden 40x165m<sup>3</sup>).



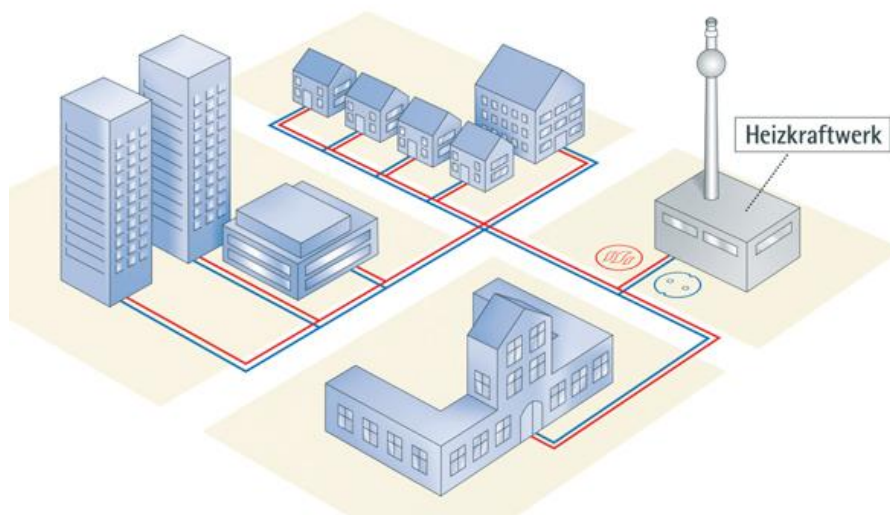
Εικ. 8.1 Δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού (Prognos, 2012).

Η λύση αυτή αν και έχει βρει ευρεία εφαρμογή στην Ευρώπη, στην Ελλάδα έχει περιορισμένη



χρησιμότητα λόγω του κλίματος με αποτέλεσμα να είναι για τις περισσότερες περιοχές εφαρμόσιμη μόνο από Νοέμβριο μέχρι Μάρτιο. Σε περιοχές όμως όπως Μακεδονία και Θράκη θα μπορούσε να συζητηθεί μια τέτοια επένδυση ως τοπική λύση στο κόστος των καυσίμων. Αξίζει όμως να γίνει μια γενική περιγραφή ενός δικτύου τηλεθέρμανσης.

Ως τηλεθέρμανση ορίζεται το δίκτυο μεταφοράς θερμότητας μέσω μονωμένου συστήματος σωληνώσεων. Η θερμότητα παρέχεται είτε από ένα ατμοηλεκτρικό εργοστάσιο που έχει αποκλειστικά αυτό το ρόλο είτε από μια μονάδα που συμπαράγει θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια αυξάνοντας έτσι το βαθμό ενεργειακής απόδοσης. Το νερό που διατρέχει τους σωλήνες χρησιμοποιείται τόσο για θέρμανση κτιρίων όσο και κατανάλωση σε διάφορες οικιακές ή ακόμα και βιομηχανικές λειτουργίες. Το νερό αφού έχει μια υποστεί πτώση θερμοκρασίας επιστρέφει μέσω του κλειστού κυκλώματος στο εργοστάσιο. (Born, 2012)



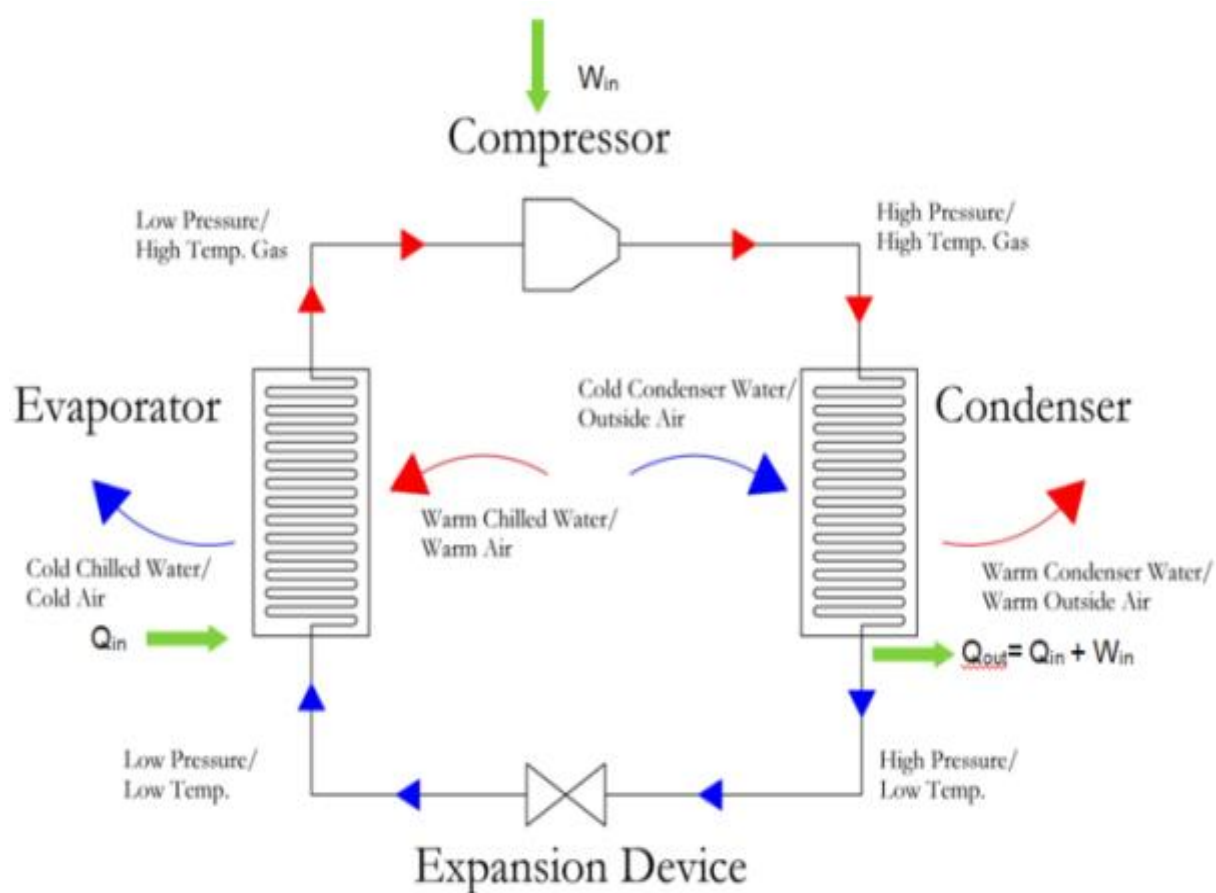
Εικ. 8.2 Δίκτυο τηλεθέρμανσης (AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2006)

Συνήθως τα εργοστάσια αυτά λειτουργούν όταν πρόκειται για μεγάλες μονάδες με άνθρακα ή λιγνίτη, ενώ σε μικρές τοπικές μονάδες συναντάται συχνά βιοαέριο, απορρίματα και pellets. Στο εργοστάσιο του Αλουμινίου της Ελλάδας στην Αντίκυρα χρησιμοποιείται η ίδια λογική στην παροχή ζεστού νερού στα ντους των εργατών με μη βιομηχανικά αξιοποιήσιμη θερμική ενέργεια, που προέρχεται από τις λεκάνες ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας.

Το συνηθέστερο μέσο μεταφοράς της θερμικής ενέργειας είναι το νερό, τόσο λόγω της διαθεσιμότητάς του ως υλικό, όσο και λόγω της σημαντικής θερμοχωρητικότητάς του. Μπορεί να

χρησιμοποιηθεί τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση του. Προτιμάται όμως η υγρή μορφή για απλοποίηση της πίεσης, οικονομία στην απαιτούμενη ενέργεια αλλαγής φάσης και για ευκολία στη χρήση σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. (Flensburg)

Μια ακόμα περίπτωση θα ήταν να χρησιμοποιηθεί η περισσευούμενη ενέργεια για ψύξη εγκαταστάσεων, κάτι το οποίο θα είχε σίγουρα περισσότερο νόημα στην Ελλάδα. Η πρώτη από τις δυο τεχνικές που θα δούμε ονομάζεται ψύκτης απορρόφησης (absorption chiller). Αυτή η τεχνολογία έχει το προνόμιο ότι μπορεί να συνδυάσει την ψύξη με ένα πιθαό δίκτυο τηλεθέρμανσης από το οποίο αντλεί την αναγκαία ενέργεια.

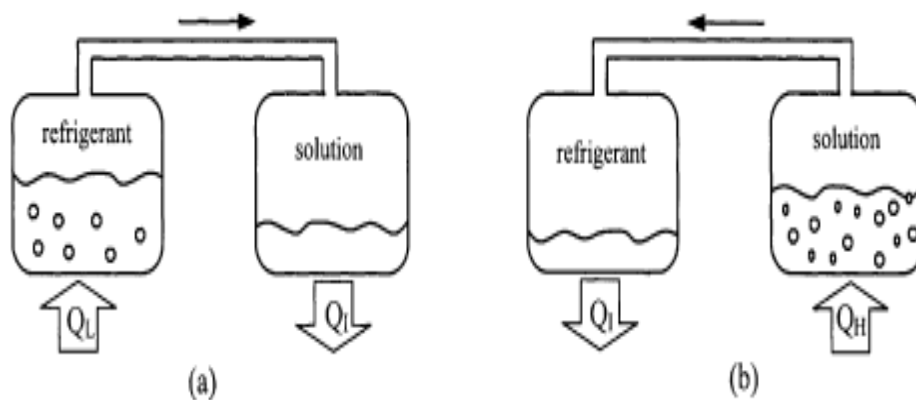


Εικ. 8.3 Κύκλος ψύξης (Guides)

Για να καταλάβουμε το τι γίνεται ας αναλύσουμε πρώτα τον παραδοσιακό κύκλο ψύξης. Το ψυκτικό μέσο εισάγεται αρχικά στον συμπιεστή. Εκεί θα αυξηθεί η πίεσή του και συνεπώς και η θερμοκρασία του. Εν συνεχεία στον συμπυκνωτή η θερμοκρασία πέφτει και το αέριο υγροποιείται. Έπειτα μπαίνει στη συσκευή διαστολής και τέλος στον ατμοποιητή. Από εκεί αντλεί θερμότητα από το περιβάλλον και έπειτα η διαδικασία ξεκινά από την αρχή. Η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας

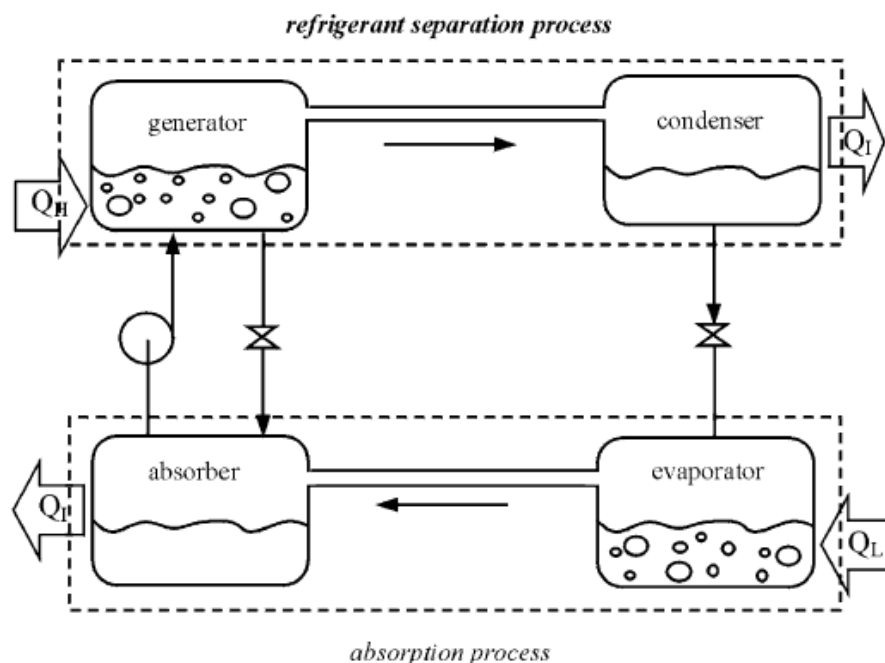
καταναλώνεται στον συμπιεστή. Αντίθετα με την τεχνική του ψύκτη απορρόφησης, ο συμπιεστής παραλείπεται, μειώνοντας έτσι το κόστος.

Βασικά, υπάρχουν δυο συγκοινωνούντα δοχεία. Το αριστερό δοχείο περιέχει ψυκτικό υγρό, ενώ το δεξί ένα απορροφητικό του διάλυμα. Όταν θερμαίνουμε το αριστερό δοχείο τότε, ατμοί ψυκτικού υγρού κινούνται προς το απορροφητικό διάλυμα μέχρι να φτάσουν ένα σημείο ισορροπίας. Εν συνεχεία, όταν σταματάμε να εφαρμόζουμε θερμότητα τότε το ψυκτικό υγρό φεύγει από το διάλυμα μειώνοντας τη συνολική πίεση στο δεξί δοχείο και συνεπώς επιφέροντας και μείωση της θερμοκρασίας. (Srikhirin, 2001)



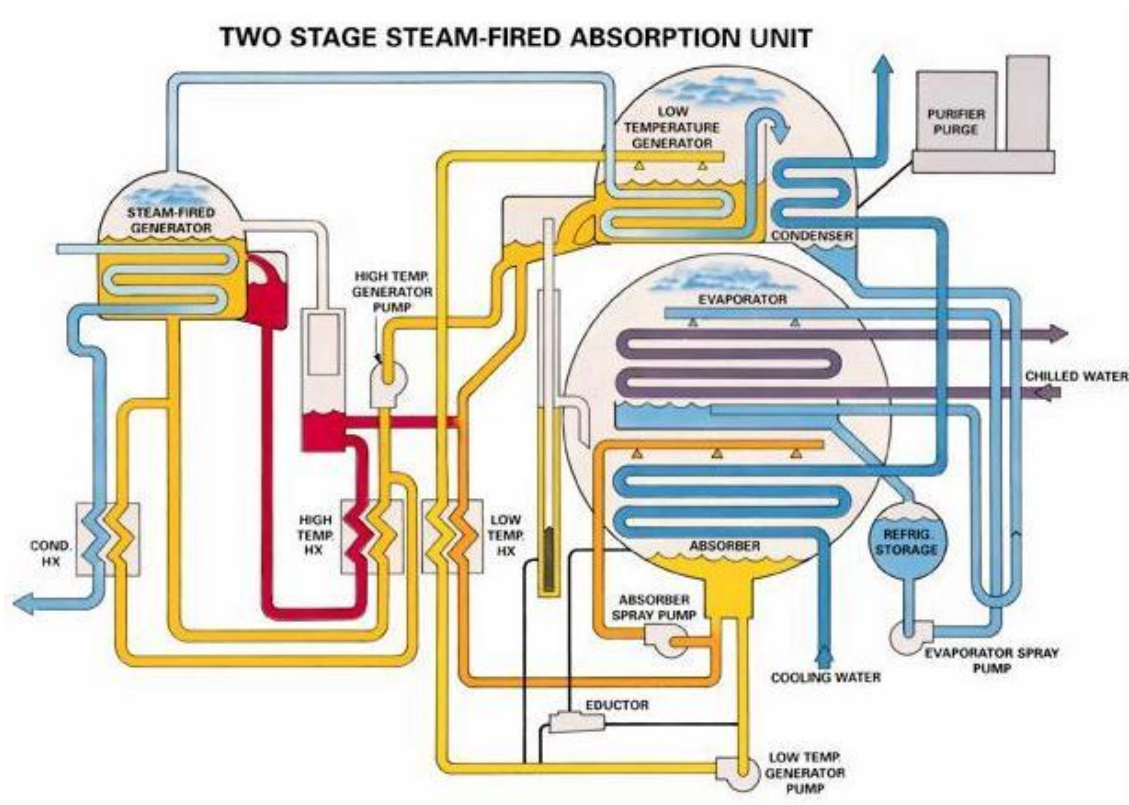
Εικ. 8.4 Σχηματική αναπαράσταση *absorption chiller* (Srikhirin, 2001)

Αν και παραπάνω περιγράφηκε η γενική αρχή, η πραγματικότητα είναι πιο πολύπλοκη ώστε να μπορέσουμε να έχουμε συνεχή και όλη διακοπτόμενη ψύξη.



Εικ. 8.5 Απεικόνιση ψύξης μέσω *absorption* (2 φάσεις) (Srikhirin, 2001)

Πρακτικά στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν δυο διαδικασίες οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και συμπληρωματικά η μια της άλλης. Η πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό απόδοσης. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό lithium bromide (LiBr) ως απορροφητικό μέσο ή ένυδρη αμμωνία ( $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$ ) ως ψυκτικό και νερό ως απορροφητικό παράγοντα. Δυστυχώς η υψηλή αποδοτικότητα συνδυάζεται με το αυξημένο κόστος (περίπου € 50,000 για μια μέση αποθήκη τροφίμων). (Robert A. Zogg, Michael Y. Feng, Detlef Westphalen, April 2005 )

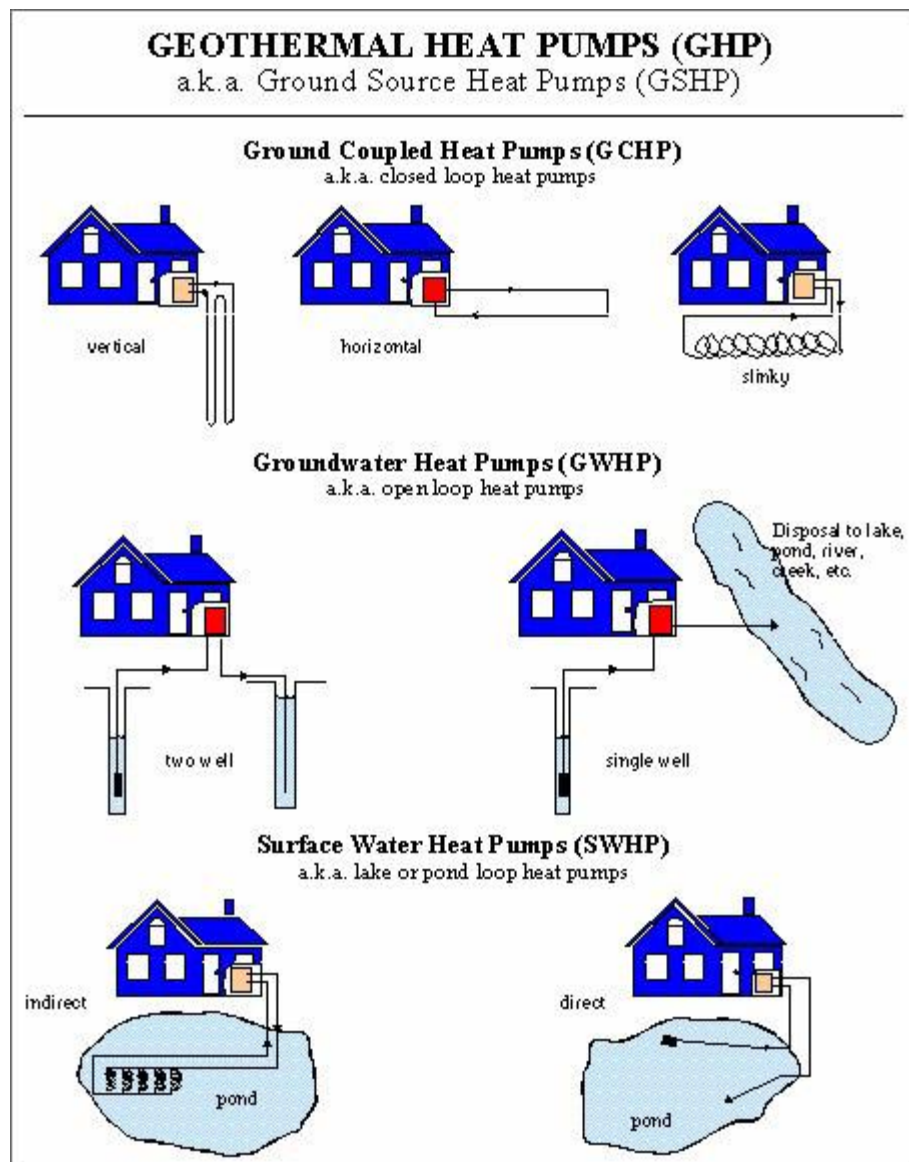


Εικ. 8.6 Ρεαλιστική απεικόνιση διαδικασίας *absorption* (Platzhalter6)

Μια άλλη λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι οι γεωθερμικές αντλίες. Συνήθως είναι γνωστές ως αρκετά αποδοτικά μέσα θέρμανσης ενός κτιρίου, αλλά έχουν αποτελεσματική χρήση και για κλιματισμό. Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την καλή τους απόδοση είναι η σταθερή θερμοκρασία εδάφους. Η αρχή είναι ότι νερό μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος αντλιών από το κτίριο στο έδαφος και έπειτα πάλι πίσω. Το χειμώνα το νερό απορροφά θερμότητα από το έδαφος, ενώ το καλοκαίρι η θερμότητα από το κτίριο παροχετεύεται στο έδαφος.

Οι γεωθερμικές αντλίες (GHP) αποτελούνται από τρία κύρια μέρη. Τον εναλλάκτη θερμότητας, την αντλία και το σύστημα σωληνώσεων. Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος είναι το χαμηλό

κόστος λειτουργίας και συντήρησης που κυμαίνονται περίπου στο 25-50% των συμβατικών μεθόδων ψύξης θέρμανσης. Τα κόστη εγκατάστασης είναι 13.000-20.000€ για μια διώροφη μονοκατοικία με ένα μέσο ρυθμό απόσβεσης της επένδυσης τα 7-10 έτη με τα τρέχοντα δεδομένα. Ανάλογα με τα γεωλογικά δεδομένα και το διαθέσιμο χώρο, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι εγκατάστασης για ένα τέτοιο σύστημα όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. (Born, 2012)



Εικ. 8.7 Διάφοροι τύποι εγκαταστάσεων γεωθερμικών αντλιών (2012)

Η πιο συνήθης μορφή είναι κάθετοι βρόγχοι με βάθη 30-100m καθώς και οριζόντιοι με αποστάσεις 30-200m από το κτίριο. Η διαφορετική προσέγγιση έχει να κάνει με τον διαθέσιμο χώρο. Είναι προφανές ότι είναι αρκετά πιο οικονομικό να γίνει μια τέτοια εγκατάσταση κατά το χτίσιμο ενός κτιρίου, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στις επιλογές.

### 9.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο θα γίνει μια γενικότερη αξιολόγηση των μεθόδων που παρουσιάστηκαν. Ξεκινώντας από τις μπαταρίες μπορούμε να πούμε ότι ενδιαφέρουσες τεχνολογίες όπως αυτές των κατηγοριών redox και ψευδαργύρου αέρα είναι ακόμα σε φάση ανάπτυξης και δεν μπορούν προς το παρόν τουλάχιστον να θεωρηθούν ως επαρκή εναλλακτική λύση για κάποιο έργο. Οι μπαταρίες νατρίου-θείου ενώ είναι αρκετά αναπτυγμένες παρουσιάζουν το μειονέκτημα των απωλειών ειδικά αν η ενέργεια πρόκειται να αποθηκευτεί για μέρες. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ίσως από τις καλύτερες επιλογές αν αμελήσει κανείς το υψηλό τους κόστος σε σχέση με αυτές του μολύβδου. Οι τελευταίες αντιπροσωπεύουν την πιο διαδεδομένη και οικονομική λύση αν και ο χρόνος ζωής τους είναι σχετικά σύντομος.

Η λύση Power-to-Gas είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης με το κυριότερο πρόβλημα να είναι πως τα μέχρι τώρα συστήματα δεν είναι οικονομικά βιώσιμα. Οι κυψέλες καυσίμου φαίνεται ότι ίσως αποτελέσουν το καύσιμο και την εναλλακτική πρόταση για τον αιώνα που διανύουμε. Έχουν γίνει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας και όσο η τεχνολογία υλικών αναπτύσσεται τόσο θα βελτιώνεται και η αποδοτικότητά τους. Προς το παρόν χρησιμοποιούνται εμπορικά σε ειδικευμένες εφαρμογές.

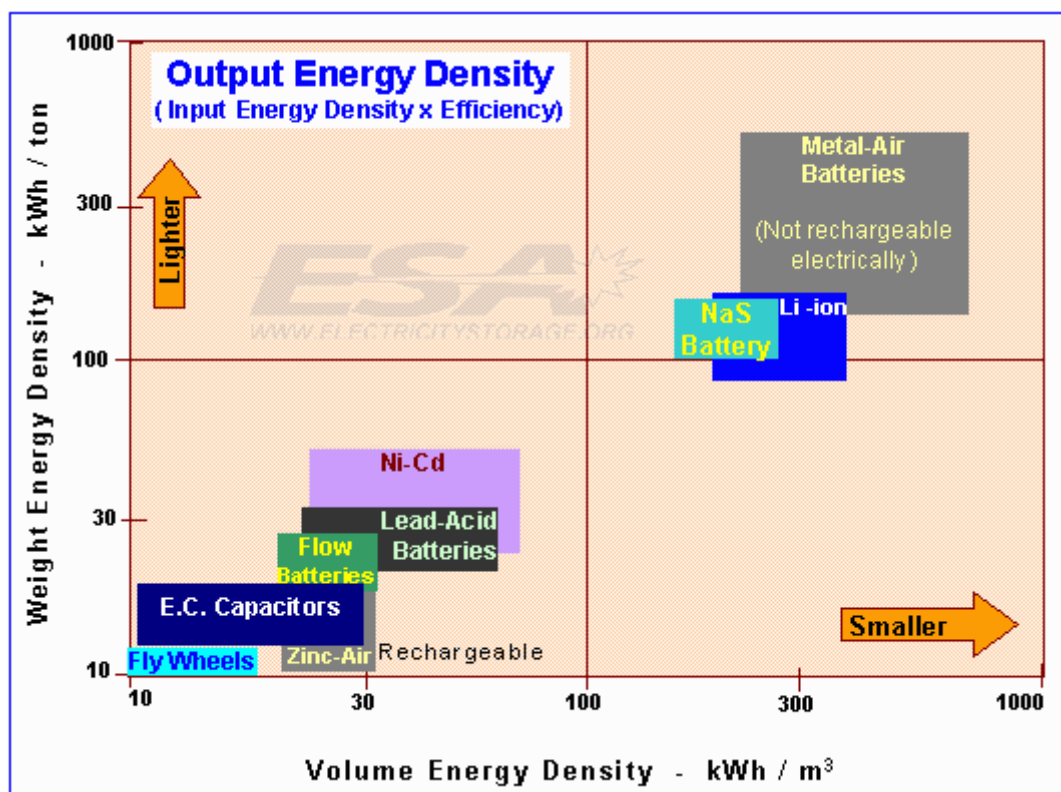
Από τις μηχανικές μεθόδους σίγουρα η ωσμωτική ενέργεια και το σύστημα υγρού αέρα είναι ακόμα πολύ πρόωρο να μελετηθούν εμπορικά. Από την άλλη η τεχνολογία συστημάτων συμπιεσμένου αέρα, ειδικά στην αδιαβατική της μορφή, οι σφόνδυλοι για μικρές και μεσαίες εφαρμογές και τέλος η αντλησιοταμίευση αποτελούν πραγματικές λύσεις στο πρόβλημα της αποθήκευσης περίσσειας ενέργειας. Κάτω από δεδομένες συνθήκες θα μπορούσαν να δώσουν από μόνες τους ή και σε συνδυασμό μια πραγματική διείσδυση 100% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για όσους πιστεύουν ότι κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, είναι χρήσιμο να τονιστεί πως αυτός είναι ήδη δεδομένος στόχος σε χώρες όπως η Δανία και η Γερμανία, οι οποίες με επενδύσεις στις κατάλληλες υποδομές θέλουν να παρουσιάζουν μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το 2050. Για να το επιτύχουν αυτό προσανατολίζονται σε λύσεις όπως smart grids και γραμμές HVDC (high voltage direct current) για μεταφορές ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

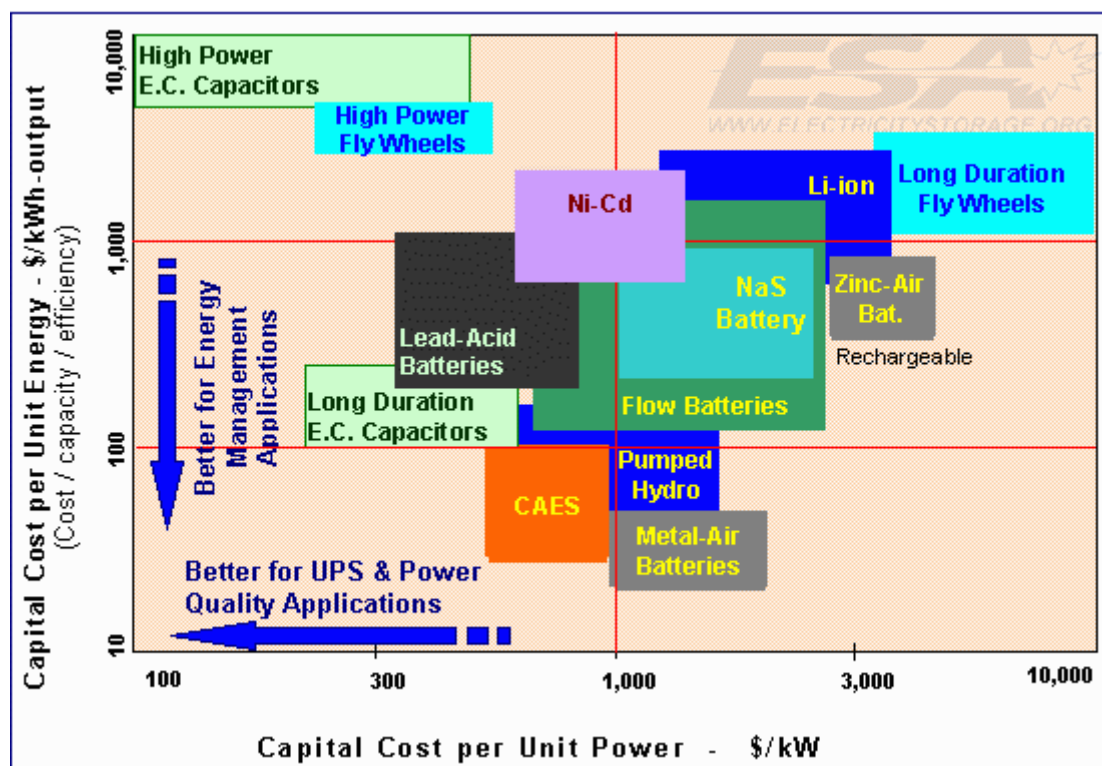
Μερικές συγκριτικοί παράμετροι των όσων αναφέραμε παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα όπως αυτά υπάρχουν στην ιστοσελίδα της Electricity Storage Association (ESA). Τα κυριότερα



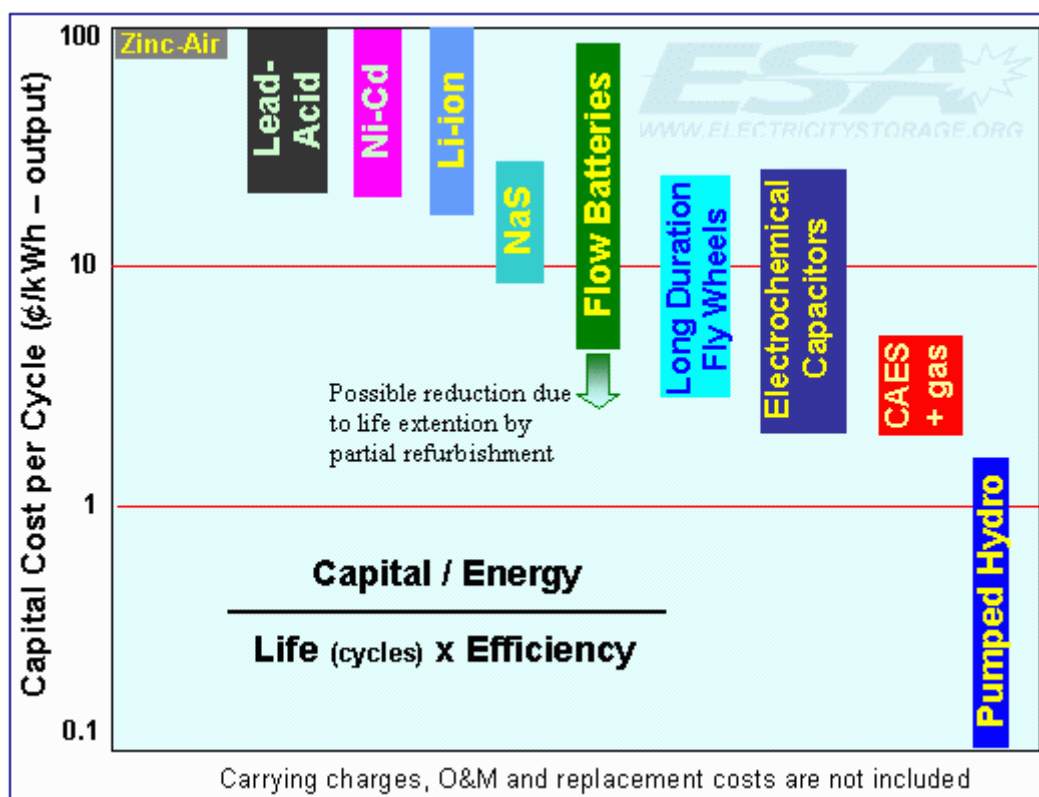
συμπεράσματα είναι τα εξής. Το μέγεθος και ο όγκος των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι σημαντικοί παράγοντες. Οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα έχουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Όμως οι επαναφορτιζόμενοι τύποι τους (πχ ψευδάργυρος) είναι ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο, ενώ έχουν και σχετικά μικρό κύκλο ζωής. Ενώ το κόστος επένδυσης είναι σημαντικός οικονομικός παράγοντας, το ολικό κόστος χρήσης (απόκτηση, διάρκεια ζωής, συντήρηση και λειτουργία) είναι μια ακόμη πιο ουσιώδης παράμετρος. Οι μπαταρίες μολύβδου για παράδειγμα είναι φτηνές αλλά ο μικρός κύκλος ζωής τους αυξάνει το όλο κόστος. Απόδοση και κύκλος ζωής είναι δυο σημαντικοί παράμετροι, που επηρεάζουν το συνολικό κόστος αποθήκευσης. Μικρή απόδοση σημαίνει ότι μπορούμε να ανακτήσουμε μόνο ελάχιστο τμήμα της αποθηκευμένης ενέργειας. Μικρός κόστος ζωής σημαίνει ότι το ολικό κόστος αυξάνεται λόγω των συχνών αντικαταστάσεων.

Εικ. 9.1 Διάγραμμα βάρους-όγκου ενεργειακής πυκνότητας. (ESA)



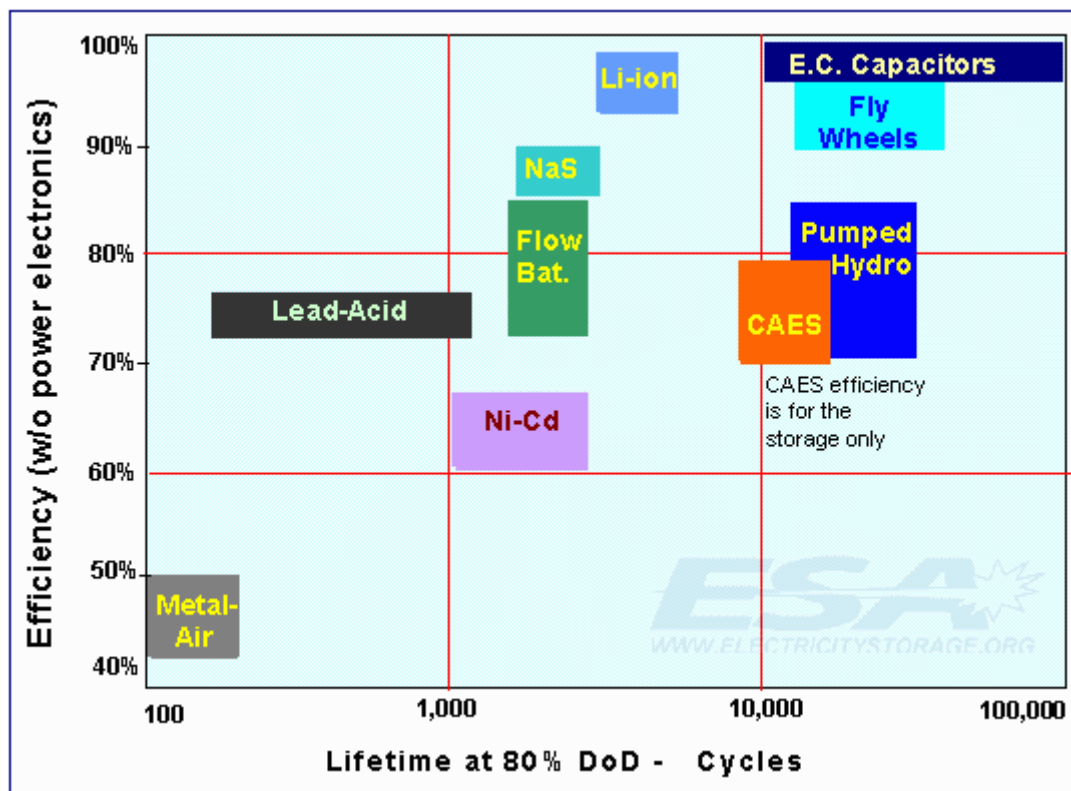


Εικ. 9.2 Διάγραμμα κόστους ενέργειας-ισχύος (ESA)

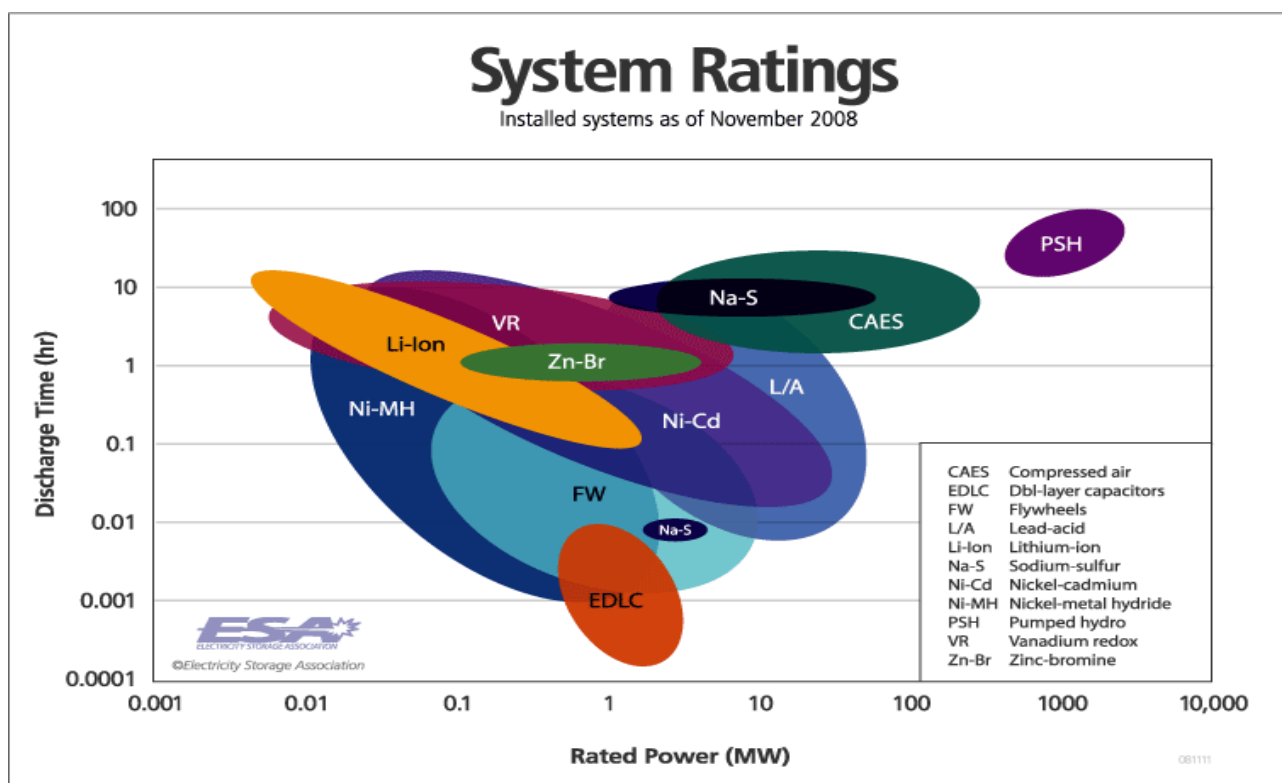


Εικ. 9.3 Διάγραμμα κόστους ανά κύκλο. Δεν περιλαμβάνονται κόστη διαχείρισης, αντικατάστασης, απόρριψης που δεν είναι διαθέσιμα για τις μη ώριμες τεχνολογίες. (ESA)





Εικ. 9.4 Διάγραμμα απόδοσης και κύκλου ζωής. (ESA)



Εικ. 9.5 Διάγραμμα συνολικής αξιολόγησης. (ESA)

Συνολικά οι σταθερές μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αποθήκευσης περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

**Ποιότητα ισχύος.** Η αποθηκευμένη ενέργεια σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται μόνο για

δευτερόλεπτα για να έχουμε συνεχή ποιοτική παροχή ισχύος.

**Γεφύρωμα ισχύος.** Η αποθηκευμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για δευτερόλεπτα ή λεπτά για να έχουμε απρόσκοπτη παροχή όταν περνάμε από τη μια μέθοδο παραγωγής σε άλλη.

**Διαχείριση ενέργειας.** Τα μέσα αποθήκευσης εδώ χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση της χρονικής διαφοράς παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η εξισσορόπηση φορτίου, που περιλαμβάνει φόρτιση του αποθηκευτικού μέσου όταν το ενεργειακό κόστος είναι χαμηλό και τη χρήση της ενέργειας όταν υπάρχει ζήτηση.

Αν και κάποιες εφαρμογές μπορούν να τεχνικά να λειτουργήσουν σε όλες τις κατηγορίες, συνήθως μια τέτοια επιλογή δε θα έφερνε τα επιθυμητά οικονομικά αποτελέσματα

Ο Πίνακας 9.1 παρουσιάζει μια σύνοψη των μεθόδων που είδαμε μέχρι τώρα. Βέβαια όσο η τεχνολογία εξελίσσεται πολλές από αυτές τις παραμέτρους, ειδικά στο οικονομικό τμήμα μπορεί να διαφοροποιηθούν (με αστερίσκο σημειώνονται όσες είναι σε φάση ανάπτυξης).

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Χρήση για ισχύ	Χρήση για ενέργεια
Αντλησιοταμίευση	Υψηλό δυναμικό, χαμηλό κόστος	Ειδικά γεωγραφικά δεδομένα	Δεν είναι δυνατή	NAI
Αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα* (αδιαβατική μορφή)	Υψηλό δυναμικό, χαμηλό κόστος	Ειδικά γεωγραφικά δεδομένα, αναγκαία καύση φυσικού αερίου (διαβατική μορφή)	Δεν είναι δυνατή	NAI
Power to Gas*	Υψηλό δυναμικό	Υψηλό Κόστος	Δυνατή αλλά αντιοικονομική	NAI
Αποθήκευση ενέργειας υγρού αέρα*	Υψηλό δυναμικό	Υψηλό Κόστος	Δυνατή αλλά αντιοικονομική	NAI
Ωσμωτική παραγωγή*	Υψηλό δυναμικό	Ειδικά γεωγραφικά δεδομένα, Κόστος μεμβρανών	Δεν είναι δυνατή	NAI
Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου*	Εφαρμογές σε αυτόνομα συστήματα	Υψηλό κόστος	Δυνατή	NAI
Μπαταρίες λιθίου	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και	Υψηλό κόστος παραγωγής, ειδικό	NAI	Δυνατή αλλά αντιοικονομική

	ενέργειας	κύκλωμα φόρτισης		
Μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής*	Υψηλό δυναμικό, καλή χρήση σε εφαρμογές ισχύος και ενέργειας	Μικρή ενεργειακή πυκνότητα	Δυνατή	ΝΑΙ
Μπαταρίες μετάλλου-αέρα	Πολύ μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα	Δύσκολη φόρτιση	ΝΑΙ	Δυνατή αλλά αντισυμβατική
Μπαταρίες μολύβδου οξέως	Μικρό κόστος επένδυσης	Μικρός κύκλος ζωής	ΝΑΙ	Δυνατή αλλά αντισυμβατική
Σφόνδυλοι	Μεγάλη ισχύς	Μικρή ενεργειακή πυκνότητα	ΝΑΙ	Δυνατή αλλά αντισυμβατική
Υπερπυκνωτές *	Γρήγορη απόκριση	Μικρή ενεργειακή πυκνότητα	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Υπεραγωγίμα πηνία*	Γρήγορη απόκριση	Ανάγκη ισχυρής ψύξης	ΝΑΙ	ΟΧΙ

*Πιν. 9.1 Σύνοψη πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων και καταλληλότητα χρήσης μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας (Τσικαλάκης)*

## 9.2 Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Για την Ελλάδα η λύση στο οικονομικό πρόβλημα μπορεί να περνάει από τη στροφή στην ενέργεια. Ίσως όμως όχι στη μορφή που έχει διαφημιστεί, δηλαδή στους από μηχανής θεούς με τη μορφή υδρογονανθράκων, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, αλλά με τη ραγδαία διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με τις κατάλληλες τεχνολογίες αποθήκευσής της, όπου και όταν αυτό χρειάζεται. Αυτό θα περιελάμβανε τα εξής βήματα αρχικά σε βραχυχρόνιο και έπειτα σε μακροχρόνιο διάστημα.

1. Διασύνδεση των νησιών με το ηπειρωτικό δίκτυο ή δημιουργία ομάδων νήσων με δικό τους δίκτυο σε αντικατάσταση της υπάρχουσας κατάστασης, όπου κάθε νησί είναι ενεργειακά απομονωμένο με δικό του εργοστάσιο, το οποίο καταναλώνει κοστοβόρο πετρέλαιο. Εδώ μπορεί να γίνει χρήση των γραμμών Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος HVDC.
2. Έντονη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ειδικά με αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα.
3. Σε παραθαλάσσιες περιοχές με έντονο ανάγλυφο, κατασκευή μονάδων αντλησιοταμίευσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι νότιες ακτές της Κρήτης, η περιοχή του Κορινθιακού κόλπου από τον Ελικώνα μέχρι το Γαλαξίδι και τα Ιόνια, όπως Λευκάδα και Κεφαλλονιά.

4. Στον ηπειρωτικό κορμό κατασκευή CAES ακόμα και στην απλή μορφή τους. Μπορεί κάλλιστα να γίνει συνδυασμός περιοχών με ορυχεία και υπάρχουσες ατμοηλεκτρικές μονάδες (Μεγαλόπολη, Πτολεμαΐδα), μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που επιβαρύνουν περιβάλλον, υγεία και οικονομία.
5. Στις δυσπρόσιτες περιοχές επένδυση σε κυψέλες καυσίμου, ειδικά όταν σε κάποια χρόνια η τεχνολογία θα έχει ωριμάσει.
6. Δημιουργία μονάδων αφαλάτωσης, είτε με βάση το πρόγραμμα Υδριάδα, είτε με ταυτόχρονη χρήση με την τεχνολογία ωσμωτικής παραγωγής ενέργειας.

### 10.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με το θέμα των σημαντικότερων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας καθώς και με εναλλακτικές που υπάρχουν ως προς τη διάθεση της περίσσειάς της, όταν η αποθήκευση για διάφορους λόγους δεν είναι η προτιμητέα λύση.

Στα δυο πρώτα κεφάλαια κατ'ουσίαν γίνεται η εισαγωγή στο θέμα και σε κάποιες βασικές έννοιες. Έγινε αναφορά στην ανάγκη διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύγχρονο προφίλ ηλεκτροπαραγωγής και στη συνεπακόλουθη ανάγκη για αξιοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων, ώστε να αντιμετωπιστεί η στοχαστικότητα που παρουσιάζουν πηγές όπως ο άνεμος και ο ήλιος και ακόμα να βελτιωθεί η αξιοπιστία και η απόδοση του συστήματος είτε αυτό είναι διασυνδεδεμένο είτε απομονωμένο. Παρουσιάστηκαν στη συνέχεια κάποιες βασικές αρχές παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και εν συνεχεία έγινε μνεία βασικών όρων – δεικτών που σχετίζονται με την αξιολόγηση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας.

Στα κεφάλαια 3 και 4 έγινε αναφορά σε τεχνολογίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για μακροπρόθεσμη αποθήκευση (αντλησιοταμίευση, ωσμωτική παραγωγή ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας σε συμπιεσμένο ή σε υγρό αέρα). Αυτές οι τεχνολογίες είναι κατάλληλες για υιοθέτηση σε μεγάλη κλίμακα, αποθηκεύοντας ενέργεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα και για μεγάλες χρονικές περιόδους και έτσι έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν λύση για 100% αυτόνομα συστήματα (πχ νησιά Αιγαίου Πελάγους), τα οποία θα ήθελαν να υιοθετήσουν μια πλήρων οικολογικά ηλεκτροπαραγωγή. Από αυτές, η αντλησιοταμίευση είναι η πιο ώριμη λύση αλλά έχει τον περιορισμό της εύρεσης κατάλληλου τόπου ή διαμόρφωσής του.

Στο κεφάλαιο 5 έγινε αναφορά στις τεχνολογίες Power to Gas και κυψέλων καυσίμου. Είναι και οι δυο καινοτόμες λύσεις, οι οποίες δέχονται ακόμα μεγάλη έρευνα ώστε να γίνουν πλήρως τεχνικά και οικονομικά αξιοποιήσιμες. Οι κυψέλες καυσίμου φαίνεται πάντως από την εξέλιξή τους να είναι ίσως μια από τις δυο σοβαρές εναλλακτικές για αντικατάσταση των παραδοσιακών καυσίμων, (βενζίνη, πετρέλαιο) από τα μέσα μεταφοράς. Μια τέτοια προοπτική θα είχε θετική απόκριση επιλύοντας το πρόβλημα της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από την αυτοκίνηση.

Στο κεφάλαιο 6 αναφερθήκαμε σε τρεις τεχνολογίες (σφόνδυλοι, υπεραγωγίμα πηνία και υπερπυκνωτές), οι οποίες είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι σφόνδυλοι, λόγω

της σχετικά υψηλότερης αποθηκευτικής τους ικανότητας, αποτελούν τις πιο κατάλληλες διατάξεις για να διατηρούν σταθερή την τάση, ειδικά σε συστήματα με σημαντική διείσδυση διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας, όπως η αιολική. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται κατάλληλα για την ενίσχυση των ηλεκτρικών συστημάτων μετά από μια μικρής διάρκειας διαταραχής του συστήματος. Τέλος, τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης είναι οι πλέον κατάλληλες διατάξεις για εφαρμογές μεταφοράς και διανομής.

Μια άλλη εναλλακτική παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7 και είναι αυτή που αφορά τις μπαταρίες. Οι μπαταρίες ως διατάξεις χρησιμοποιούνται εδώ και περίπου έναν αιώνα. Η εξέλιξη όμως της επιστήμης των υλικών μας έχει επιτρέψει να μειώσουμε σταδιακά τον όγκο τους, την επικινδυνότητά τους και παράλληλα να αυξήσουμε την αξιοπιστία και απόδοσή τους. Καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών από την κίνηση υποβρυχίων μέχρι μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα. Η διαρκής έρευνα μας επιτρέπει να ελπίζουμε σε ακόμα καλύτερες επιδόσεις καθώς και σε νέους τύπους, όπως είναι οι μπαταρίες βαναδίου, με μειωμένο κόστος. Δεν μπορούμε να πούμε ότι είναι πρόσφορη λύση για αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, αλλά σε μικρά αυτόνομα συστήματα θα προσέφεραν μια εναλλακτική.

Στο κεφάλαιο 8 έγινε μνεία σε διατάξεις που χρησιμοποιούν την περίσσεια της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για άλλες εφαρμογές και δεν προσανατολίζονται στην αποθήκευση. Η βάση τους είναι η διάθεση ή μετατροπή της περίσσειας σε θερμική ενέργεια και εν συνεχεία η χρήση της είτε για θέρμανση είτε για ψύξη. Αυτό μπορεί να γίνει ιδανικά σε ένα οργανωμένο δίκτυο τηλεθέρμανσης, το οποίο να υφίσταται παράλληλα με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο περιορισμός είναι ότι ιδανικά θα πρέπει για λόγους μείωσης των απωλειών μεταφοράς να υάρχει εγγύτητα ανάμεσα στην παραγωγή και στην κατανάλωση. Σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις με οργανωμένη τηλεθέρμανση, οι μονάδες βρίσκονται ενταγμένα μέσα ή στα όρια του αστικού ιστού, αλλά με αυστηρή και πλήρη τήρηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για την υγεία των κατοίκων.

Στο κεφάλαιο 9 έγινε μια μικρή σύγκριση των αναφερομένων μεθοδολογιών. Η βασική διαπίστωση είναι πως πέρα από τη βασική κατηγοριοποίηση σε μεθόδους μακροχρόνιας και βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, κάθε περίπτωση που αναζητάει μια λύση τέτοιου είδους θα πρέπει να προσεγγίζεται ως *suí generis*. Φυσικά μιας και η αποθήκευση ως ιδέα σχετίζεται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι σαφέστατα αρκετά νέα και επιδέχεται εκτεταμένης έρευνας πάνω σε διάφορες παραμέτρους της, όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μείωση κόστους, αύξηση αξιοπιστίας.

Σίγουρα το θέμα της αποθήκευσης ενέργειας είναι πολύπλευρο και δέχεται μεγάλη ανάλυση. Η παρούσα εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια συγκεντρωτικής ανάλυσης και αξιολόγησης του εν λόγω θέματος. Αισιοδοξώ ότι ίσως αποτελέσει εφαλτήριο με επόμενους συναδέλφους που θα θελήσουν να προσεγγίσουν στην πράξη το σίγουρα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο ούτως ώστε να μελετηθεί η αποδοτικότητα κάθε τρόπου ενέργειας βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα και στις ιδιαιτερότητες της ελληνικής πραγματικότητας (διαθέσιμες πηγές ενέργειας, γεωγραφική κατανομή σε ηπειρωτικό και νησιωτικό δίκτυο) καθώς και στην κατάσταση της ελληνικής αγοράς ηλεκτρισμού.

Ιστοσελίδες

1. [www.abc-solar.de/batteriesystem-abc-solstore.html](http://www.abc-solar.de/batteriesystem-abc-solstore.html)
2. [www.chemist.gr/2011/03/4923](http://www.chemist.gr/2011/03/4923)
3. [www.gaston-lithium.com/tech-certificates.html](http://www.gaston-lithium.com/tech-certificates.html)
4. [www.garyfallidou.org/gr\\_electricity\\_production.html](http://www.garyfallidou.org/gr_electricity_production.html)
5. [www.flensburg.de](http://www.flensburg.de)
6. [www.chem.gr](http://www.chem.gr)
7. [www.ceramicstudies.me.uk/frame1tu2.html](http://www.ceramicstudies.me.uk/frame1tu2.html)
8. [www.reuk.co.uk/Lead-Acid-Batteries.htm](http://www.reuk.co.uk/Lead-Acid-Batteries.htm)
9. [www.anadrassi.gr](http://www.anadrassi.gr)
10. [www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d\\_945.html](http://www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d_945.html)
11. [www.ird.dk](http://www.ird.dk)
12. [www.utwente.nl/tnw/mtg/people/phd/guler/info/research](http://www.utwente.nl/tnw/mtg/people/phd/guler/info/research)
13. [www.alaskarenewableenergy.org/wp-content/uploads/2010/09/Abbas-Akhil\\_Metlakatla-Battery.pdf](http://www.alaskarenewableenergy.org/wp-content/uploads/2010/09/Abbas-Akhil_Metlakatla-Battery.pdf)
14. [www.statkraft.com/Images/Osmotic%20Power%20Presentation%20Quingdao%20June%202011\\_tcm9-19287.pdf](http://www.statkraft.com/Images/Osmotic%20Power%20Presentation%20Quingdao%20June%202011_tcm9-19287.pdf)
15. [www.batterytender.com/resources/introduction-to-lead-acid-batteries.htm/#answer5](http://www.batterytender.com/resources/introduction-to-lead-acid-batteries.htm/#answer5)
16. [www.messib.eu/about\\_project/MESSIB\\_results/redox\\_flow\\_batteries.php](http://www.messib.eu/about_project/MESSIB_results/redox_flow_batteries.php)
17. [www.voxsolaris.com/batnas.html](http://www.voxsolaris.com/batnas.html)
18. [www.eere.energy.gov/tribalenergy/guide/geothermal\\_heat\\_pumps.html](http://www.eere.energy.gov/tribalenergy/guide/geothermal_heat_pumps.html)
19. [www.machine-history.com/Direct%20Methanol%20Fuel%20Cell](http://www.machine-history.com/Direct%20Methanol%20Fuel%20Cell)
20. [www.newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/04/the-battery-explosion-is-coming-part-one/lithium-ion-battery-component-cost-shares](http://www.newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/04/the-battery-explosion-is-coming-part-one/lithium-ion-battery-component-cost-shares)
21. [www.energieregion-st-michaelisdonn.de/index.php](http://www.energieregion-st-michaelisdonn.de/index.php)
22. [www.skai.gr/news/environment/article/236152/kuklades-katastrefetai-i-proti-ploti-monada-afalatoxis-pou-kataskeuasan-ellines-epistimonas](http://www.skai.gr/news/environment/article/236152/kuklades-katastrefetai-i-proti-ploti-monada-afalatoxis-pou-kataskeuasan-ellines-epistimonas)
23. [www.electricitystorage.org/about/welcome](http://www.electricitystorage.org/about/welcome)
24. [www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html](http://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html)
25. [www.globalccsinstitute.com/publications/operating-flexibility-power-plants-ccs/online/106076](http://www.globalccsinstitute.com/publications/operating-flexibility-power-plants-ccs/online/106076)
26. [www.inventors.about.com/od/bstartinventions/ss/How-A-Battery-Works.htm](http://www.inventors.about.com/od/bstartinventions/ss/How-A-Battery-Works.htm)
27. [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)
28. [www.jcold.or.jp/Eng/Seawater/Seawater.htm](http://www.jcold.or.jp/Eng/Seawater/Seawater.htm)
29. [www.engproguides.com/evaporator.html](http://www.engproguides.com/evaporator.html)
30. [www.mcgs.ch/active\\_magnetic\\_bearings.html](http://www.mcgs.ch/active_magnetic_bearings.html)
31. [www.machine-history.com](http://www.machine-history.com)
32. [www.permaculturewest.org.au/ipc6/ch08/shannon/index.html](http://www.permaculturewest.org.au/ipc6/ch08/shannon/index.html)
33. [www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-6/Features/opportunities-in-pumped-storage-hydropower.htm](http://www.power-eng.com/articles/print/volume-114/issue-6/Features/opportunities-in-pumped-storage-hydropower.htm)
34. <http://www.storiesproject.eu/?secid=6>
35. <http://www.avsite.gr/forum/threads/Για-το-ηλεκτρικό-ρεύμα-ac-power.104303/>
36. [www.powertogas.info](http://www.powertogas.info)

Άρθρα – πρακτικά συνεδρίων – βιβλία – εργασίες

1. **A review of absorption refrigeration**, Srikuhirin Pongsid. - Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001
2. **Batteries in St. Michaelisdonn** /Bargiel Lars. - Flensburg, 2012



3. **Leitfaden zur strategischen Planung von Inselnetzen** /AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.. – 2006
4. **A Review of Energy Storage Technologies** /Connolly. – 2010
5. **Analytical Study On Flow Through a Pelton** / Atthanayake I.U.. – 2009
6. **Notes in Green engineering** / Born. - Flensburg : Fachhochschule Flensburg, 2012
7. **Flywheel energy and power storage systems** / Bolund. - Elsevier, 2007. - Renewable and Sustainable Energy Reviews
8. **CDM in China** / Hauser. - Flensburg, 2012
9. **On the development of proton conducting polymer membranes for** / Kreue // Journal of Membrane Science. - 2001. – 185
10. **Flywheel energy and power storage systems** / Bolund. - Elsevier, 2007. - Renewable and Sustainable Energy Reviews
11. **national report 2012/PAE**
12. **Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας** /Σαγάνη – 2009
13. **Κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα** / Κουσκούριδης. – TEE
14. **ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ** / Κυριακίδης Δρ. Ηλίας
15. **Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας** - Τει Πειραιά
16. **Pathways for energy storage in the UK**
17. **Voith pumped storage plants** /Voith Siemens. - Siemens Voith
18. **Wärmespeicher** / Prognos. – 2012
19. **Wasserkraftanlagen, Planung, bau und Betrieb** / Giesecke Jürgen und Mosonyi, Emil. - Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2005
20. **Heavy Mud Backfilled In Submerged Shaft In Deep Soft Rock** / M.HAYASHI  
Department of Civil Engineering, University of Tokai, Tokai - Tokyo : International Society for Rock Mechanics, 1995
21. **The Benefits of Flywheel technology** / Tanzer Rob
22. **Supercapacitors: A Brief Overview** / Halper Marin S. – 2006
23. **The feasibility of an osmotic power plant** /Kleiterp. - TU Delft, 2012
24. **Guide to Developing AirCooled LiBr Absorption** /Robert A. Zogg, Michael Y. Feng, Detlef Westphalen. - US Department of energy, April 2005