



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**«Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας –
Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές»**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΣΑΓΑΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δ. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1) Μελλοντικό παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο	9
1.2) Η ανάγκη της ενεργειακής αποθήκευσης.....	10
1.3) Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης.....	12
1.4) Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	17
2.1) Εισαγωγή.....	17
2.2) Αιολική Ενέργεια	18
2.2.1) Άνεμος.....	18
2.2.2) Ανεμογεννήτριες	19
2.2.2.1) Γενικά.....	19
2.2.2.2) Τύποι ανεμογεννητριών	22
2.2.2.3) Παραγωγή ενέργειας.....	24
2.2.3) Υβριδικά συστήματα.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	29
3.1) Εισαγωγή.....	29
3.2) Σφόνδυλοι.....	29
3.3) Εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές.....	33
3.4) Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση	36

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3.5) Σύγκριση διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΡΦΗ – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	41
4.1) Εισαγωγή.....	41
4.2) Μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Lead – Acid Batteries)	42
4.3) Αλκαλικές μπαταρίες.....	43
4.4) Προηγμένες μπαταρίες.	44
4.4.1) Μπαταρίες λιθίου (Lithium Batteries).....	44
4.4.2) Μπαταρίες νατρίου – θείου (Sodium Sulphur Batteries, NaS).....	46
4.4.3) Μπαταρίες ροής (Flow Batteries).....	47
4.4.4) Μπαταρίες μετάλλου - αέρα (Metal – Air Batteries).....	48
4.5) Σύγκριση των διαφόρων τύπων μπαταριών.	49
4.6) Διαστασιολόγηση μπαταριών σε εφαρμογές ΑΠΕ.	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ	53
5.1) Αρχή αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας – Η υδραυλική ενέργεια στην Ελλάδα.....	53
5.2) Συστήματα αντλησιοταμίευσης.	58
5.2.1) Εισαγωγή.	58
5.2.2) Περιγραφή συστήματος αντλησιοταμίευσης – Το δίλημμα της σωλήνωσης.....	59
5.2.2.2) Αντλητική Εγκατάσταση	65
5.2.2.3) Υδροστρόβιλος.	70
5.2.2.4) Υδροηλεκτρικό Έργο.....	74
5.2.3) Λειτουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης.....	77
5.2.3.1) Περίπτωση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος	78
5.2.4) Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα.....	83
5.2.4.1) Σύστημα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση (ΑΕΑ).....	84
5.2.4.2) Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	95
6.1) Ενέργεια υδρογόνου.	95
6.2) Παραγωγή του υδρογόνου.....	102

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

6.2.1) Εισαγωγή.....	102
6.2.2) Θερμοχημικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....	103
6.2.2.1) Παραγωγή του υδρογόνου από τα ορυκτά καύσιμα.....	103
6.2.2.2) Παραγωγή του υδρογόνου από τη βιομάζα.....	105
6.2.2.3) Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....	105
6.2.2.4) Φωτολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.....	108
6.3) Διανομή του υδρογόνου.....	109
6.3.1) Τρόποι διανομής του υδρογόνου.....	109
6.4.1) Εισαγωγή.....	111
6.4.2) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν αέριο.....	111
6.4.3) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν υγρό.....	113
6.4.4) Αποθήκευση του υδρογόνου σε μέταλλα και κράματα μετάλλων.....	115
6.4.5) Αποθήκευση του υδρογόνου σε «καθαρά» ναοκρυσταλλικά μέταλλα και σε ναοκρυσταλλικά μεταλλικά κράματα.....	121
6.4.6) Αποθήκευση του υδρογόνου σε ναοδομημένες ενώσεις του με άνθρακα.....	124
6.4.7) Σύγκριση κυριότερων συμβατικών μεθόδων αποθήκευσης του υδρογόνου.....	130
6.4.8) Αποθήκευση του υδρογόνου που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες.....	132
6.5) Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου – Ηλεκτροχημική παραγωγή ηλεκτρισμού από υδρογόνο.....	134
6.5.1) Εισαγωγή - Αρχή λειτουργίας.....	134
6.5.2) Είδη κυψελών καυσίμου.....	136
6.6) Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ Υδρογόνου).....	140
6.6.1) Εισαγωγή.....	140
6.6.2) Καύση του υδρογόνου σε ΜΕΚ.....	141
6.7) Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή υδρογόνου.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ.....	145
7.1) Εισαγωγή.....	145
7.2) Περιγραφή συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ).....	145
7.2.1) Τμήμα συμπίεσης.....	146
7.2.2) Υπόγεια αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα.....	149
7.2.3) Τμήμα ισχύος.....	151
7.2.4) Λειτουργία συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.....	153
7.3) Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων ΕΑΣΑ - Εφαρμογές.....	154

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ..	157
8.1) Εισαγωγή.....	157
8.2) Χαρακτηριστικά λειτουργίας – Σύγκριση	157
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	161
9.1) Σύνοψη εργασίας.....	161
9.2) Συμπεράσματα εργασίας – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	162
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	164

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο σύγχρονο κόσμο, υπάρχει μια συνεχής παγκόσμια ανάγκη για περισσότερη ενέργεια, η οποία ταυτόχρονα πρέπει να είναι «καθαρότερη» από την ενέργεια που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η ανάγκη αυτή διευκόλυνε την αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η εκτεταμένη χρήση των οποίων στα σημερινά ηλεκτρικά δίκτυα μπορεί αδιαμφισβήτητα να ελαχιστοποιήσει την απειλή του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Παρόλα αυτά, η ποσότητα της ισχύος που παράγεται από τις διατάξεις τέτοιων πηγών δεν προσαρμόζεται εύκολα στις διακυμάνσεις της ζήτησης, δημιουργώντας την ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των σημαντικότερων διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, που είτε είναι εμπορικά διαθέσιμες είτε βρίσκονται ακόμα υπό εντατική έρευνα και ανάπτυξη. Ανάλογα με την εφαρμογή τους, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διατάξεις βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Τεχνολογίες με υψηλή πυκνότητα ισχύος και ικανότητα ανταπόκρισης στα αιτήματα σε μικρά χρονικά πλαίσια, όπως οι σφόνδυλοι, οι υπερ-πυκνωτές και τα υπεραγωγίμα μαγνητικά πηνία ανήκουν στην πρώτη κατηγορία. Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης με ικανότητα να απορροφούν και να αποδεσμεύουν την ηλεκτρική ενέργεια για περιόδους μακράς διάρκειας, όπως οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου εντάσσονται στη δεύτερη κατηγορία. Επιπρόσθετα, μια σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών κάθε κατηγορίας αποθήκευσης παρουσιάζεται υπό το πρίσμα των σημαντικότερων τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών της κάθε τεχνολογίας, όπως είναι για παράδειγμα η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, η ενεργειακή απόδοση, η διάρκεια ζωής και τα κόστη. Η σύγκριση δείχνει ότι προκειμένου να επιτύχουμε βέλτιστα αποτελέσματα, τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών αποθήκευσης πρέπει να μελετηθούν λεπτομερώς, πριν ληφθεί μια απόφαση για την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας αποθήκευσης.

***“The Need for Energy Storage –
Methods of Storage and Applications”***

ABSTRACT

In today's world, there is a continuous global need for more energy which, at the same time, has to be cleaner than the energy produced from the traditional generation units. This need has facilitated the increasing penetration of Renewable Energy Sources (RES), the extensive use of which in today's electricity networks can indisputably minimize the threat of global warming and climate change. However, the quantity of power produced by such sources doesn't adjust easily to changing demand cycles, creating the need for energy storage. Subject of this diploma thesis is the analysis of the most significant energy storage devices for electric power applications, which are either commercial available or they are still under intensive research and development. Depending on their application, energy storage devices can be classified into short and long term storage. Technologies with high power density and with the ability to respond to the requests in short time fractions like flywheels, supercapacitors or superconducting magnetic coils belong to the first category. Energy storage devices with the capability to absorb and supply electrical energy for long periods of time like batteries, pumping hydro, compressed air energy storage systems and technologies of hydrogen energy storage place among the second category. In addition, a comparison between the various storage technologies of each storage category is presented in terms of the most important technical and economical characteristics of each technology, as it is for example power and energy density, energy efficiency, lifetime and costs. The comparison shows that in order to achieve optimum results, the technical and economical characteristics of energy storage devices have to be studied thoroughly, before a decision for the most suitable storage technology to be selected is taken.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η σημερινή, μη βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας σε συνδυασμό με την ανάγκη για απεξάρτηση από την ηλεκτροπαραγωγή μέσω συμβατικών μέσων, λόγω των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, καθιστούν αναγκαία την προώθηση της εκμετάλλευσης των φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Όμως, οι ΑΠΕ βασίζονται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς) με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Αυτή η χρονική αναντιστοιχία παραγωγής – ζήτησης αποτέλεσε και τη βασική αιτία για τον καθορισμό του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θεωρήθηκε λοιπόν ενδιαφέρον να μελετηθούν οι διάφορες διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης. Γενικότερα, η αποθήκευση της ενέργειας φαίνεται να είναι ευεργετική για τα ηλεκτρικά συστήματα, επιτρέποντας την αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος, διευκολύνοντας τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών και βελτιώνοντας γενικότερα την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του δικτύου.

Ωστόσο, λόγω της παρούσας τεχνολογικής εξέλιξης και του κόστους των διατάξεων της ενεργειακής αποθήκευσης, η χρησιμοποίησή τους δεν έχει επεκταθεί σε σημαντικό βαθμό. Παρόλα αυτά, αρκετές τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υψηλών επιδόσεων, είναι διαθέσιμες σήμερα ή βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, επιτρέποντας ένα νέο φάσμα εφαρμογών αποθήκευσης. Η αύξηση της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ αποτελεί βασικό μοχλό της παρούσας ανάπτυξης.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, εξετάζουμε τις διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης, αφού πρώτα τις κατηγοριοποιήσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας και τις διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι σφόνδυλοι, οι υπερ-πυκνωτές και τα υπεραγωγιμα μαγνητικά πηνία, δηλαδή διατάξεις που έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα σε μικρές χρονικές περιόδους (δευτερόλεπτα ή λεπτά). Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα και τις τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου, που μπορούν να αποθηκεύουν και να αποδεσμεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας για περιόδους μακράς διάρκειας (ώρες ή ημέρες). Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται κυρίως στις τεχνολογίες της δεύτερης κατηγορίας, αφού πρόκειται για μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Για το λόγο αυτό, κάθε τεχνολογία μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης παρουσιάζεται σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Επιπρόσθετα, βασικό μέρος της εργασίας αυτής αποτελεί η παρουσίαση των σημαντικότερων τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών κάθε διάταξης ενεργειακής αποθήκευσης, όπως είναι για παράδειγμα η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, η ενεργειακή απόδοση, η διάρκεια ζωής και τα κόστη, με βάση τα οποία προβαίνουμε σε σύγκριση τόσο μεταξύ των τεχνολογιών βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, όσο και μεταξύ των τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Η σύγκριση αυτή διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της βέλτιστης κάθε φορά τεχνολογίας ανάλογα με την εφαρμογή και την κλίμακα της ενεργειακής αποθήκευσης.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτριο Παπαντώνη, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέπων αυτής της εργασίας, για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, αλλά πρωτίστως για τη συνεχή και την πολύτιμη καθοδήγησή του, καθώς και την εύρεση λύσης σε κάθε πρόβλημα που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κάραλη που μου παρείχε με προθυμία τη διδακτορική διατριβή του «Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμειωτήρων», συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση των συστημάτων αντλιοσταμειύσεως.

Επίσης, εκφράζω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κυρία Έλλη Βαρκαράκη, Δρ. Χημικό Μηχανικό και διευθύντρια του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), για τη φιλοξενία και τη ξενάγηση στο πάρκο δοκιμών ανεμογεννητριών του ΚΑΠΕ στο Λαύριο Αττικής, όπου έχει αναπτυχθεί μία πιλοτική εγκατάσταση για την παραγωγή, την αποθήκευση και την εμφιάλωση του υδρογόνου από την αιολική ενέργεια. Την ευχαριστώ θερμά για την προθυμία και το χρόνο που διέθεσε για συζήτηση και προβληματισμό σχετικά με την τεχνολογία του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας.

Θα ήθελα όχι μόνο να ευχαριστήσω, αλλά και να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της και την πολύτιμη συνεισφορά της σε κάθε μου απόφαση και βήμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, που είναι πάντα δίπλα μου με κατανόηση και υπομονή και με στήριξαν ιδιαίτερα σε όλα τα έτη των σπουδών μου.

Στόχος μου είναι η διπλωματική αυτή εργασία να μπορέσει να συντελέσει, όσο το δυνατόν περισσότερο, στην έρευνα για περαιτέρω ανάπτυξη των διαφόρων διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης, ώστε να αυξηθεί η ενσωμάτωση τους στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ και γενικότερα να μπορέσουν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα οι «προκλήσεις» των εφαρμογών των ηλεκτρικών συστημάτων.

Αγγελική Σαγάνη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1) Μελλοντικό παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο.

Η ενέργεια και ειδικότερα η ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί τη βάση της οικονομίας και της σύγχρονης διαβίωσης. Σε αυτήν στηρίζονται η βιομηχανία, η επιστημονική έρευνα, οι τηλεπικοινωνίες, ο τομέας των υπηρεσιών, η θέρμανση και ο κλιματισμός των κατοικιών και των άλλων χώρων. Η βιωσιμότητα στην παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας είναι επομένως ένα από τα κρισιμότερα προβλήματα κάθε χώρας όσον αφορά στην οικονομική της ανάπτυξη και τη βελτίωση του επιπέδου ζωής των κατοίκων της. Ως αποτέλεσμα, η ενεργειακή πολιτική, η οποία περιλαμβάνει συνοπτικά την εξασφάλιση, την εξοικονόμηση και τη διάθεση της ενέργειας, να αποτελεί πρώτιστο μέλημα των Κυβερνήσεων και των Παγκόσμιων Οργανισμών.

Ωστόσο, η σημερινή διαχείριση της ενέργειας κάθε άλλο παρά βιώσιμη είναι. Τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο) δεν είναι ανανεώσιμα, αλλά αναλώσιμα. Παράλληλα, η καύση των ορυκτών καυσίμων έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα και συνακόλουθα τη μεταβολή της σύνθεσης της ατμόσφαιρας και του κλίματος. Από την άλλη πλευρά, χρόνο με το χρόνο η κατανάλωση της ενέργειας αυξάνεται εκρηκτικά, λόγω του καταναλωτικού μοντέλου που ακολουθούν οι ανεπτυγμένες χώρες.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του Αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας (Department of Energy), ο σημερινός ρυθμός με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο είναι 13 TW, ενώ με βάση το σημερινό ρυθμό αύξησης των αναγκών προβλέπεται να φθάσει τα 25-30 TW το 2050 και τα 40-50 TW το 2100. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των καυσίμων στο μέλλον, έχει εκτιμηθεί ότι θα υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα 14 TW το 2050 (μεγαλύτερο του σημερινού συνολικού ρυθμού παραγωγής) και 33 TW το 2100 (*Κουτσογιάννης Δημήτρης, 2007*). Προφανώς τα ελλείμματα αυτά είναι εικονικά και στην πραγματικότητα η κατανάλωση ενέργειας δεν μπορεί παρά να προσαρμοστεί στη διαθεσιμότητα/παραγωγή. Εντούτοις, οι αριθμοί αυτοί είναι ενδεικτικοί του μεγέθους του προβλήματος και σηματοδοτούν την ανάγκη αλλαγής του σημερινού μοντέλου ζωής, αλλά και ειδικότερα του ενεργειακού τοπίου.

Η υποκατάσταση μορφών ενέργειας βασισμένων σε ορυκτά καύσιμα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς τη βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας. Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την επόμενη δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Αναφέρουμε επιγραμματικά ορισμένα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των ΑΠΕ (*Ζερβός Αρθούρος, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας"*):

- ✓ Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές.
- ✓ Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτόαρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- ✓ Συμβάλλουν στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.
- ✓ Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και σχετικά μικρή διάρκεια κατασκευής.
- ✓ Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.
- ✓ Συμβάλλουν στη δημιουργία θέσεων εργασίας.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναλάβει σοβαρές πρωτοβουλίες για την προώθηση των τεχνολογιών των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Για την Ελλάδα, ως στόχος για το 2010 τέθηκε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές να καλύπτει την ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 20,1% (Κουτσογιάννης, 2007). Η εξειδίκευση των απαιτήσεων για την Ελλάδα ανά τεχνολογία ΑΠΕ συνοψίζεται στον Πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1.1
Απαιτήσεις εγκατάστασης μονάδων ΑΠΕ στην Ελλάδα
για την επίτευξη του στόχου του 2010.
 (Πηγή: ΥΠΑΝ, “4^η Εθνική Έκθεση για το Επίπεδο Διείσδυσης” (2005))

Τεχνολογία ΑΠΕ	Απαιτήσεις εγκατεστημένης ισχύος το 2010 (MW)	Παραγωγή ενέργειας το 2010 (TWh)	Ποσοστιαία συμμετοχή ανά τύπο ΑΠΕ το 2010
Αιολικά πάρκα	3.648	7,67	10,67
Μικρά υδροηλεκτρικά έργα	364	1,09	1,52
Μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα	3.325	4,58	6,37
Βιομάζα	103	0,81	1,13
Γεωθερμία	12	0,10	0,14
Φωτοβολταϊκά	200	0,20	0,28
Σύνολα	7.652	14,45	20,10

1.2) Η ανάγκη της ενεργειακής αποθήκευσης.

Στην παράγραφο 1.1 έγινε φανερό ότι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν έναν συνεχώς εξελισσόμενο κλάδο που αποτελεί το παρόν και το μέλλον στην ηλεκτροπαραγωγή. Η σκέψη αυτή ενισχύεται από τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της χώρας μας και ιδιαίτερα των νησιών μας, όπου οι ανανεώσιμες πηγές (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) είναι άφθονες και καθιστούν την εκμετάλλευσή τους ιδιαίτερα επικερδή σε πολλούς τομείς.

Ωστόσο, η ενέργεια που παράγεται από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αναντιστοιχία αυτή σημαίνει ότι η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη τη ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις. Η ανάγκη της αποθήκευσης υπήρχε και παλαιότερα, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και κατά περιόδους (τη νύχτα) η ενέργεια που παράγουν είναι μεγαλύτερη της ζήτησης. Εντούτοις, η ανάγκη αυτή θα μεγαλώσει στο μέλλον σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ.

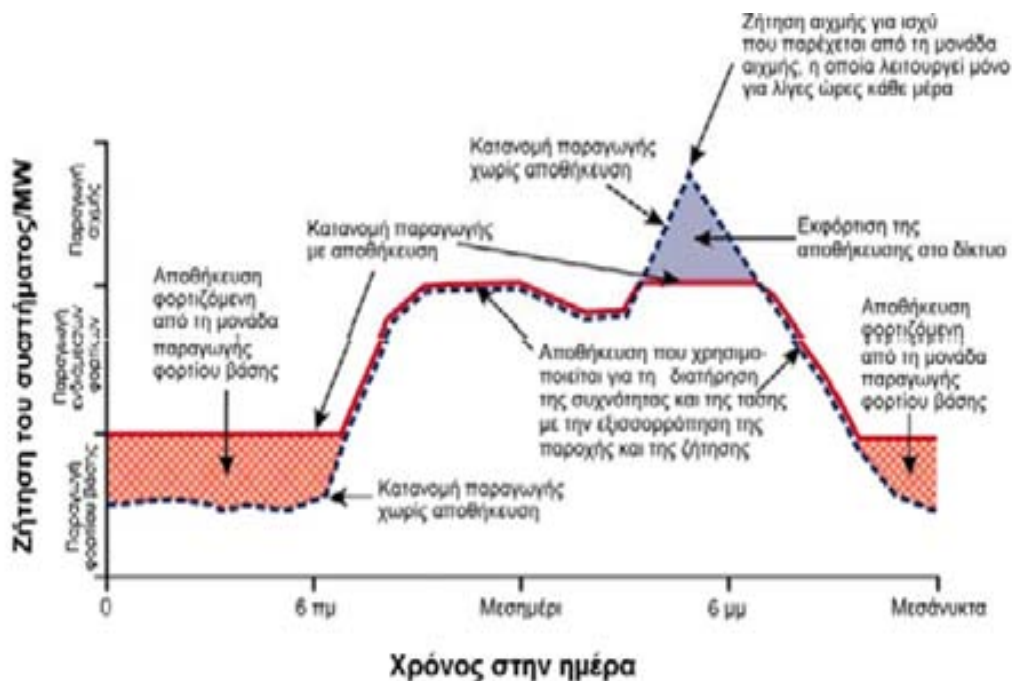
Στα αυτόνομα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, η αιολική ενέργεια είναι η πιο ελπιδοφόρα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την ηλεκτροπαραγωγή. Η παραγόμενη όμως ενέργεια από τις αιολικές μηχανές εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, δεδομένου ότι βασίζεται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. ταχύτητα ανέμου). Επομένως, σε τέτοια συστήματα η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμοποίησή της όταν υφίσταται έλλειμμα από ΑΠΕ (π.χ. σε περίπτωση άπνοιας). Μάλιστα, για την αύξηση της απόδοσης τέτοιων συστημάτων, η μονάδα αποθήκευσης

συνδέεται με τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα, δηλαδή συστήματα τα οποία διαχειρίζονται περισσότερες της μίας μορφής ενέργεια.

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

Γενικότερα, τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την ενεργειακή αποθήκευση είναι τα ακόλουθα (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”):

- Σε συνδυασμό με την ανανεώσιμη πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την τροφοδοσία να συμπίπτει με την περίοδο της μέγιστης ζήτησης της κατανάλωσης (Σχήμα 1.1). Παράλληλα, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ΑΠΕ, όπως τα αιολικά και τα ηλιακά συστήματα, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η εφαρμογή των διατάξεων των ανανεώσιμων πηγών παράλληλα με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, παρέχει στις ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Σχήμα 1.1

Η αρχή της ενεργειακής αποθήκευσης.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)

- Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει επίσης έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού, όσον αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση της συχνότητας για τις αυτόνομες

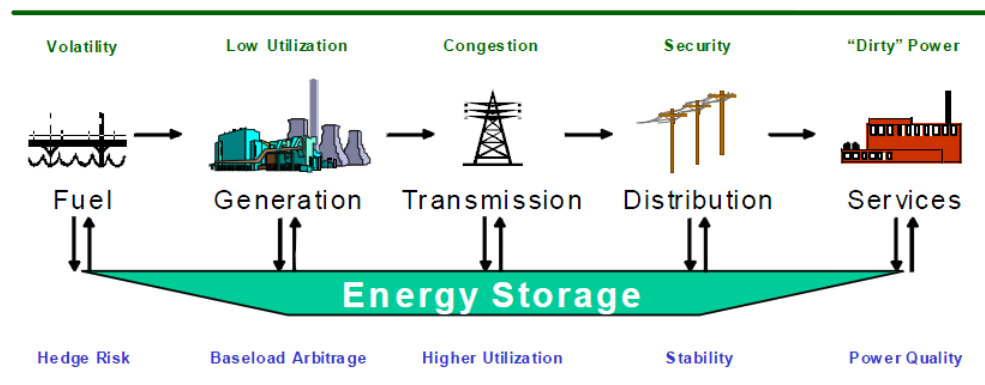
μονάδες, η αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Ακόμα, τα βάση στρατηγικής εγκατεστημένα συστήματα αποθήκευσης μπορεί να αυξήσουν τη χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής (M&D), μετατοπίζοντας ή εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για δαπανηρές προσθήκες M&D.

- Επιπρόσθετα, η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Μεταξύ των ειδικών οφελών για τη μεταφορά και διανομή είναι η ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, η ρύθμιση της τάσης ώστε να μην ξεφεύγει από το 5% της καθορισμένης τιμής, και η αναβολή της κατασκευής ή αναβάθμισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών. Καθώς εξελίσσεται η αναδόμηση του συστήματος, μπορούν να ανακύψουν ευκαιρίες για τους χειριστές των ανεξάρτητων συστημάτων προκειμένου να εφαρμόσουν την αποθήκευση για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των περιφερειακών φορτίων.
- Τέλος, η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες ως μια επιλογή ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρους της ζήτησης, που επίσης μπορεί να παράσχει ανταποδοτικές υπηρεσίες, περιλαμβανομένων της ποιότητας ισχύος σε βυθίσεις ή κυματισμούς που διαρκούν λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα, της αδιάλειπτης τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα σε διακοπές λειτουργίας που διαρκούν για περίπου δέκα λεπτά, και τη μείωση της ζήτησης αιχμής ώστε να μειωθούν οι λογαριασμοί του ηλεκτρισμού.

Benefits of Energy Storage

Along the Electricity Value Chain

Challenges



Benefits

Σχήμα 1.2

Οφέλη ενεργειακής αποθήκευσης.

(Πηγή: www.energystoragecouncil.org)

1.3) Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης.

Το ενδιαφέρον για την ενεργειακή αποθήκευση εστιάζεται στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της εύκολης μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά. Επειδή, όμως, δεν είναι εφικτή (οικονομικά) η απευθείας αποθήκευσή της, απαιτείται να

μετατραπεί πρώτα σε άλλη μορφή και όταν χρειαστεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές ενεργειακής αποθήκευσης, βασιζόμενες σε σχεδόν όλες τις μορφές ενέργειας (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*). Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις ακόλουθες μορφές:

- ✓ Σε χημική μορφή (μπαταρίες).
- ✓ Σε μηχανική μορφή υπό την μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο.
- ✓ Υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπερ-πυκνωτές).
- ✓ Υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης).
- ✓ Υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα).
- ✓ Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης).
- ✓ Υπό μορφή υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου).

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης είναι προφανώς διαφορετικών τύπων, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Επομένως, μια συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών αυτών καθίσταται δύσκολη, δεδομένου ότι, μεταξύ των άλλων, τα επίπεδα ανάπτυξής τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους (*Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, "An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications"*):

- 1) Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες 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.
- 2) Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους.

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

Από την άλλη μεριά, οι διατάξεις μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, και να συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα

συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (fuel cells – hydrogen energy storage).

1.4) Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης.

Έγινε φανερό ότι η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε διάφορες μορφές ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κάθε φορά διάταξη. Οι διαφορετικές αυτές μορφές αποθήκευσης της ενέργειας έχουν ως αποτέλεσμα οι διάφορες διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης να εμφανίζουν διαφορετικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά προβαίνουμε σε σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης, ώστε να επιλέγουμε, ανάλογα με την εφαρμογή, τη βέλτιστη κάθε φορά τεχνολογία.

Κρίθηκε, επομένως, σκόπιμο να παρουσιάσουμε συνοπτικά μερικούς ιδιαίτερα σημαντικούς όρους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών των διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης. Η κατανόηση των όρων αυτών θα μας βοηθήσει αργότερα στη σύγκριση των τεχνολογιών αποθήκευσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων για το πλήθος των εφαρμογών τους. Οι όροι αυτοί είναι οι ακόλουθοι (H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron, “Energy storage systems – characteristics and comparisons”):

- 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. Από την άλλη, η εκτιμώμενη ισχύς είναι σημαντική για τον καθορισμό της ποσότητας της ενέργειας που μπορεί να «αποδεσμευτεί» από τη διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης σε έναν καθορισμένο χρόνο. Για παράδειγμα, μια διάταξη των 100 kWh με ισχύ 20 kW μπορεί να αποδώσει 20 kW σε 5 ώρες ($20 \cdot 5 = 100kWh$).
- Η ενεργειακή απόδοση (energy efficiency) της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται προς την ενέργεια που αποθηκεύεται. Προφανώς, 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 άποψη 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). Αν και 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.

Τέλος, στον Πίνακα 1.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σύνοψη των σημαντικότερων τεχνικών απαιτήσεων των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ισχύος και ενέργειας. Υπενθυμίζουμε ότι σε εφαρμογές ισχύος οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης αποδεσμεύουν μεγάλο ποσό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα (δευτερόλεπτα ή λεπτά), ενώ σε ενεργειακές εφαρμογές οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης αποδεσμεύουν μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο (ώρες και μέρες).

Πίνακας 1.2
Απαιτήσεις συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης.

(Πηγή: Ervin Spahić, Gerd Balzer, Britta Hellmich and Wolfram Münch,
 "Wind Energy Storages – Possibilities")

Απαιτήσεις	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές Ενέργειας
Μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα (Large Storage Capacity) (MWh)	-	+
Υψηλή χωρητικότητα ισχύος (Large power capacity) (MW)	-	+
Πυκνότητα ισχύος (Power density) (kW /kg)	+	+
Ενεργειακή πυκνότητα (Energy density) (kWh / kg)	+	-
Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency) (%)	+	+
Διάρκεια ζωής (Life-time) (σε έτη)	+	+
Διάρκεια ζωής (Life-time) (σε κύκλους)	+	+
Χρόνος Πρόσβασης (Access time) (ms)	++	-
Χαμηλή αυτό-εκφόρτιση (Low self discharging) (%/ώρα ή %/ημέρα)	-	+

++ πολύ σημαντικό + σημαντικό - λιγότερο σημαντικό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° - ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1) Εισαγωγή.

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών, μη ανανεώσιμων καυσίμων αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης μας. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκόσμιων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, αλλά και όλων των ενημερωμένων πολιτών.

Η αναζήτηση της απαραίτητης ενέργειας από τον άνθρωπο, η επάρκεια των αποθηκών/πηγών της, η βέβαια και ταχεία εξάντληση μερικών από αυτές, οι βέλτιστοι τρόποι εκμετάλλευσης και εξοικονόμησής της, τα οικονομικά, κοινωνικά και ηθικά προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοβαρή, άλλοτε αλόγιστη χρήση της, καθώς και η μεγάλη και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τους μηχανισμούς και τα συστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας, συνιστούν το «ενεργειακό/περιβαλλοντικό» πρόβλημα. Ένα από τα κρισιμότερα, σήμερα, προβλήματα του ανθρώπου.

Για τον λόγο αυτόν, έχει ξεκινήσει μια παγκόσμια προσπάθεια για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων, με την ορθολογική χρήση της ενέργειας και την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησής της. Επιπρόσθετα, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), συμβάλλοντας οριστικά στην αιεφόρο ανάπτυξη. Πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδάτινη χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες, αφού ανανεώνονται συνεχώς και είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμες από τον άνθρωπο.

Οι ΑΠΕ έχοντας ξεπεράσει τα μειονεκτήματα του παρελθόντος, κρίνονται πλέον ανταγωνιστικές για την παραγωγή ενέργειας. Η μαζικότερη παραγωγή και εκτεταμένη έρευνα στο χώρο, έχουν οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής και αύξησης της απόδοσης των συστημάτων. Η τάση για εφαρμογή πειραματικών μελετών τεχνολογιών ΑΠΕ, θα συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους πόρους (κυρίως τα ορυκτά καύσιμα), ενώ παράλληλα θα συνεισφέρει στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, καθώς και στην ανάπτυξη και αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών. Τέλος, θα δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας, και το σπουδαιότερο θα αντικατασταθούν οι ρυπογόνοι τρόποι παραγωγής ενέργειας με φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα.

Αν και είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς τις μορφές ΑΠΕ, εντούτοις δεν παρουσιάζει ποσοστό αξιοποίησής τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Μεταξύ των παραγόντων που συμβάλλουν στη μη επιθυμητή αξιοποίηση των ΑΠΕ, μπορεί να αναφερθεί η άγνοια – καχυποψία για την περιβαλλοντική «συμβατότητα» των έργων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν.

Βέβαια, αξίζει να αναφέρουμε ότι σε παγκόσμιο επίπεδο, γίνεται όλο και πιο έντονα αποδεκτό το γεγονός ότι η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ συνδυάζεται και συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και την αιεφόρο ανάπτυξη, σε αντίθεση και συγκριτικά πάντα με τα προβλήματα που προκαλούνται από την εξόρυξη και χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Σήμερα, οι πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες ΑΠΕ βασίζονται κυρίως στην αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή. Για το λόγο αυτό, στην επόμενη υποενότητα θα εστιάσουμε στην αιολική ενέργεια.

2.2) Αιολική Ενέργεια.

2.2.1) Άνεμος.

Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα. Η ακανόνιστη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο προκαλεί τους ανέμους. Η θερμότητα που απορροφάται από το έδαφος ή το νερό, μεταφέρεται στον αέρα όπου προκαλεί διαφορές στη θερμοκρασία, την πυκνότητα και την πίεσή του. Με τη σειρά τους, οι διαφορές αυτές προκαλούν δυνάμεις που ωθούν τον αέρα ολόγυρα. Σύμφωνα με τη Μηχανική των Ρευστών, ο αέρας κινείται από τις υψηλής πίεσης προς τις χαμηλής πίεσης περιοχές του πλανήτη (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

Σε παγκόσμια κλίμακα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ισημερινού και των πόλων προκαλεί τους αληγείς ανέμους, οι οποίοι δρουν ως γιγαντιαίος εναλλάκτης θερμότητας εμποδίζοντας την περαιτέρω θέρμανση του ισημερινού και ψύξη των πόλων. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα, οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ του εδάφους και της θάλασσας και μεταξύ των βουνών και των κοιλάδων δημιουργούν συχνά ισχυρές αύρες. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται επίσης και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η περιστροφή της Γης, τα τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά και η τραχύτητα του εδάφους.

Για τον υπολογισμό της διανομής της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο επιφανειακό στρώμα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”):

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Όπου V_2 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z_2 , V_1 η μετρούμενη ταχύτητα σε ύψος z_1 . Ο εκθέτης α αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους. Ενδεικτικές τιμές του είναι: $\alpha=0,17$ για ανοικτά πεδία (π.χ. θάλασσα, χώρος αεροδρομίου), $\alpha=0,20$ για μικρές πόλεις με χαμηλές κατασκευές και $\alpha=0,25$ για πόλεις με μεγάλες και πολυώροφες κατασκευές.

Με τη βοήθεια επομένως του εκθετικού νόμου, όταν δίνονται μετρήσεις του ανέμου για ένα συγκεκριμένο ύψος, μπορούμε να ανάγουμε τα δεδομένα μας στο ύψος που μας ενδιαφέρει. Βέβαια, ο εκθετικός νόμος χρησιμοποιείται και για την αναγωγή της μετρούμενης ταχύτητας στο ύψος της ανεμογεννήτριας (Α/Γ), αφού σε αυτό το ύψος γίνεται η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, όπου έχουμε διαφορετικά δεδομένα σε σχέση με το ύψος μέτρησης.

Η ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνεμο είναι κινητική και δίνεται από τη σχέση (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”):

$$E_{\text{ΚΙΝΗΤΙΚΗ}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.2)$$

και έχει μονάδες $\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m$.

Εισάγοντας την πυκνότητα του αέρα ρ , υπολογίζουμε τη μάζα του αέρα που διέρχεται από μία επιφάνεια A ανά δευτερόλεπτο:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (2.3)$$

Αντικαθιστώντας τη μάζα προκύπτει η κινητική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο:

$$\dot{E}_{\text{ΚΙΝΗΤΙΚΗ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.4)$$

Είναι γνωστό όμως ότι η ισχύς ορίζεται ως ενέργεια ανά δευτερόλεπτο, επομένως:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.5)$$

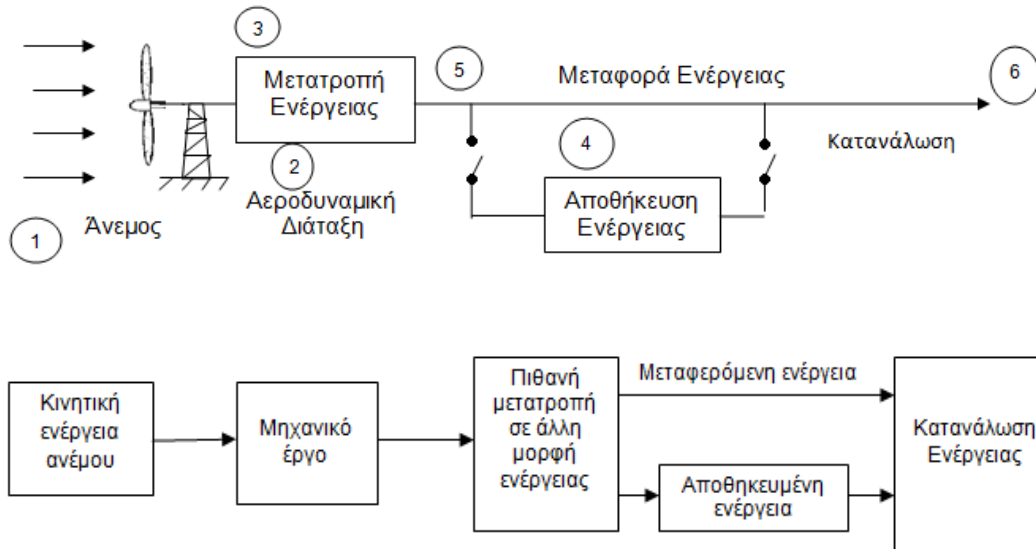
Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της επιφάνειας που διέρχεται ο άνεμος και ανάλογη του κύβου της ταχύτητάς του. Η ισχύς αυτή δεν είναι όμως σε καμμία περίπτωση η ισχύς που δεσμεύει ή παράγει η ανεμογεννήτρια. Αυτό συμβαίνει λόγω σημαντικών απωλειών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία δέσμευσης ενέργειας.

2.2.2) Ανεμογεννήτριες.

2.2.2.1) Γενικά.

Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες από την εποχή της εμφάνισής τους μέχρι σήμερα έχουν περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο τους (οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα τους. Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τις ανεμογεννήτριες σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας (Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”).

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, καθώς και της ροής της ενέργειας δίνεται στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.



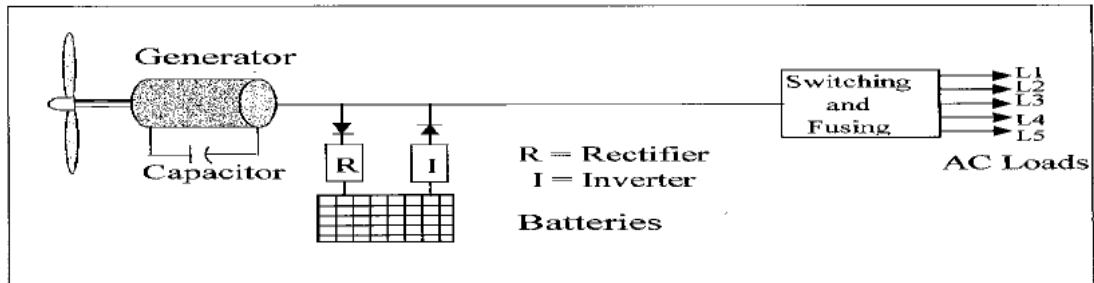
Σχήμα 2.1
Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.
 (Πηγή: Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”).

Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης. Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο επί τόπου (π.χ. άντληση νερού) και να αποφευχθούν οι απώλειες από τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας. Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του μηχανικού έργου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε γιατί δεν χρειαζόμαστε μόνο μηχανικό έργο είτε γιατί ο τύπος άντλησης δεν συμπίπτει με τον τύπο που είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Σε αυτήν την περίπτωση, η πιο πρόσφορη διάταξη είναι αυτή που μπορεί να μετατρέπει το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς της στον τόπο κατανάλωσης και της ικανότητας αποθήκευσής της στις διάφορες αποθηκευτικές διατάξεις (π.χ. μπαταρίες, συστήματα αντλησιοταμίευσης). Βέβαια, τα τελευταία χρόνια οι έρευνες στρέφονται προς τη χρησιμοποίηση του μηχανικού έργου για την παραγωγή επί τόπου υδρογόνου, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί και να καεί ως αέριο καύσιμο. Η παραπάνω λύση αποτελεί ίσως και τη βέλτιστη από πολλές απόψεις πρόταση αξιοποίησης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, δεδομένου ότι είναι οικονομικά αποδεκτή, διότι από την καύση του υδρογόνου παράγεται μόνο νερό σε μορφή υδρατμών (Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”).

Η ακολουθία των συμβάντων για την παραγωγή μέχρι την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, χονδρικά, για ένα τυπικό αυτόνομο σύστημα (Σχήμα 2.2) μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- ✓ Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με το δρομέα της Α/Γ παράγεται μια ροπή.
- ✓ Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει μια γεννήτρια.
- ✓ Η γεννήτρια παράγει ρεύμα μεταβλητής συχνότητας, το οποίο μετατρέπεται σε συνεχές (DC) μέσω ενός μετατροπέα (rectifier) και φορτίζει τις μπαταρίες, που αποτελούν το πιο κλασικό μέσο αποθήκευσης. Οι μπαταρίες συμβάλλουν στη σταθερότητα του συστήματος.

- ✓ Στη συνέχεια, ένας άλλος μετατροπέας (inverter) μετατρέπει το ανορθωμένο συνεχές ρεύμα, αποφορτίζοντας τις μπαταρίες, σε ορισμένης τάσης και συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο είναι άμεσα αξιοποιήσιμο από το τοπικό σύστημα.



Σχήμα 2.2

Αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΓ.

(Πηγή: Ιωάννης Δ. Σπύρου, "Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση")

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες οφείλουν την κίνηση των πτερυγίων τους στην άνωση που ασκείται πάνω τους από τον άνεμο. Σε αυτή την ιδέα στηρίχθηκε γενικά η ανάπτυξη των ανεμογεννητριών και ειδικότερα των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, οι οποίες έχουν γνωρίσει την μεγαλύτερη εμπορική ανάπτυξη. Μια τυπική ανεμογεννήτρια σήμερα είναι οριζόντιου άξονα με ισχύ από 800 kW έως 3000 kW.

Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από το βαθμό απόδοσης C_p , ο οποίος ονομάζεται και συντελεστής ισχύος. Ορίζεται από τη σχέση (Ζερβός Αρθούρος, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας"):

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \quad (2.6)$$

Όπου P είναι η ισχύς που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια, και στον παρονομαστή είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V διερχόμενος από επιφάνεια A . Ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ :

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (2.7)$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και R είναι η ακτίνα του. Η αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου καλείται και κατάσταση λειτουργίας του δρομέα.

Σε ιδανικές συνθήκες, η μέγιστη τιμή του C_p , η οποία είναι γνωστή και ως «όριο Benz» είναι ίση με $16/27=0,593$. Δηλαδή μια ανεμογεννήτρια μπορεί να αποσπάσει το 59,3% του ενεργειακού περιεχομένου της ροής του αέρα. Υπό πραγματικές όμως συνθήκες, ο συντελεστής ισχύος δεν υπερβαίνει την τιμή $C_p=0,5$, αφού περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της ΑΓ. Ένα τυπικό εύρος τιμών του συντελεστή ισχύος είναι 20-40% (ΚΑΠΕ, "Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ").

2.2.2.2) Τύποι ανεμογεννητριών.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε δύο κατηγορίες (Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”):

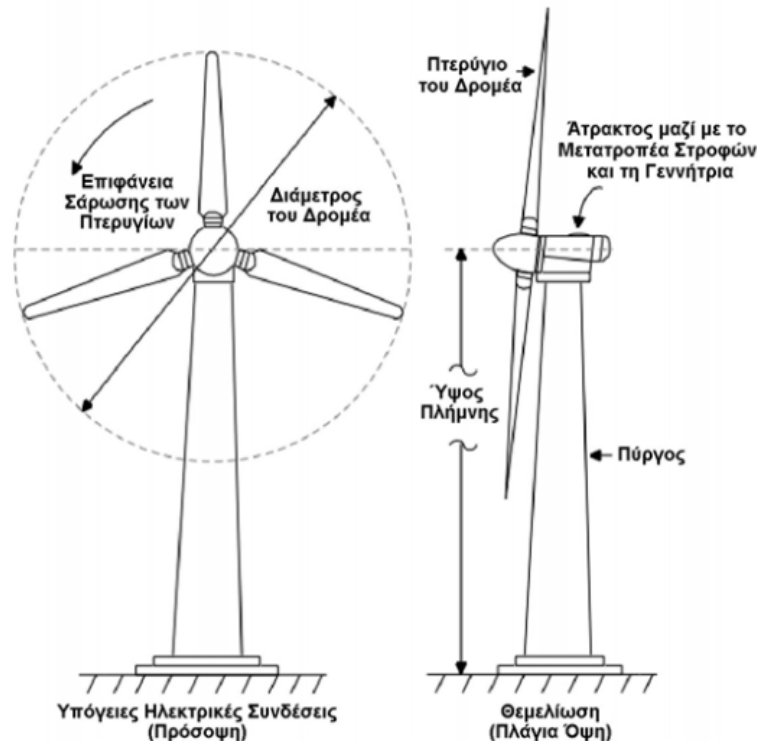
- Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι είτε παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου είτε παράλληλος προς την επιφάνεια της γης, αλλά κάθετος στην κατεύθυνση ροής του ανέμου.
- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν έχουν γνωρίσει την εμπορική ανάπτυξη που έχουν οι οριζοντίου άξονα και για το λόγο αυτό θα αναλυθούν μόνο οι δεύτερες στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα:

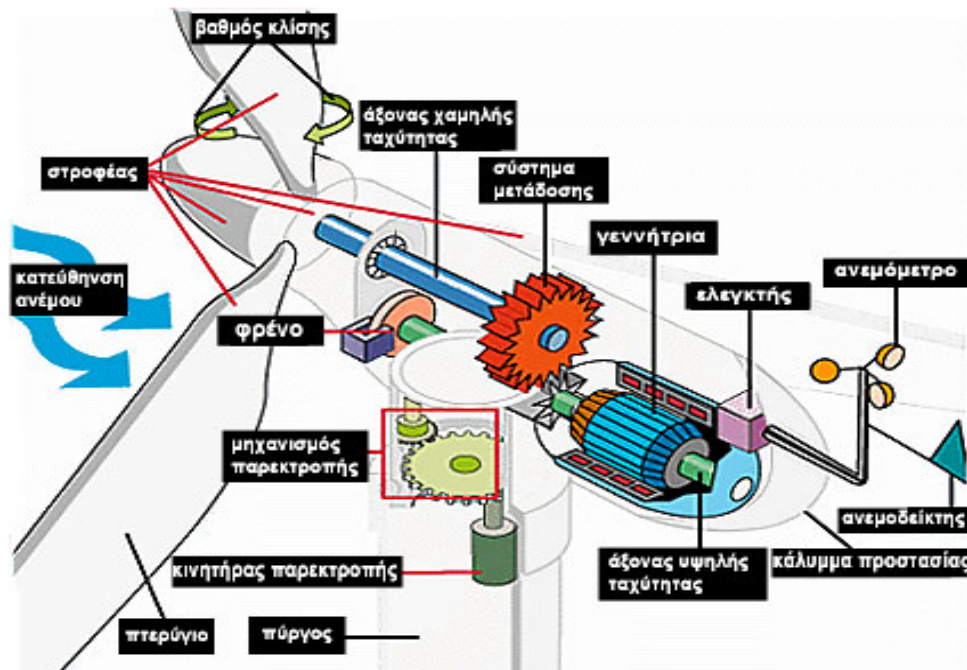
Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα αποτελούνται στη συντριπτική τους πλειοψηφία από τρία ή δύο πτερύγια και θυμίζουν έντονα έλικα αεροπλάνου ή ελικοπτέρου.

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται ένα γενικό σύστημα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.



Σχήμα 2.3
Σχηματική αναπαράσταση μια ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.
 (Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)

Τα κύρια μέρη των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα (Σχήμα 2.4) είναι ο δρομέας, το σύστημα αύξησης στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων), το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα και οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και τα θεμέλια (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”).



Σχήμα 2.4
Τα κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.
(Πηγή: www.energypoint.gr)

Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης.

Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια. Αν και οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε σύγχρονα δίκτυα, συνήθως προτιμούνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητας της κατασκευής τους.

Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας, ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει το δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν.

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει τη νασέλλα και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτυώματος, σωληνωτός και σπανιότερα από σκυρόδεμα (Σχήμα 2.5). Η θεμελίωση γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί στην αύξηση της αντοχής και στην εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση.



Σχήμα 2.5
Ανεμογεννήτριες με σωληνωτό χαλύβδινο πύργο (αριστερά) και δικτυωτό πύργο (δεξιά).
(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)

Τέλος, μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.

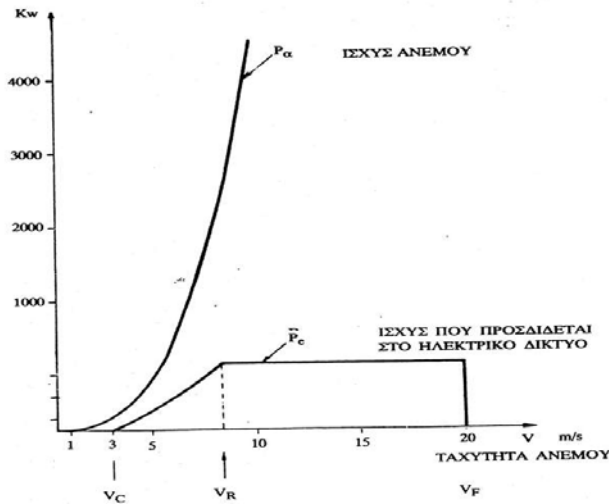
2.2.2.3) Παραγωγή ενέργειας.

Καμπύλη ισχύος.

Η παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, και κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της, η οποία εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το σχεδιασμό της (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”). Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές ταχύτητας:

- Την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{cut-in}), όπου η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ισχύ.
- Την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (V_F), όπου η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευθεί από τον πολύ δυνατό άνεμο.
- Την ονομαστική ταχύτητα (V_R), που είναι η μικρότερη ταχύτητα για την οποία η μηχανή παράγει την ονομαστική της ισχύ (P_R). Στην ονομαστική ισχύ, η ανεμογεννήτρια παρέχει τη μέγιστη ροπή.

Το Σχήμα 2.6 που ακολουθεί, είναι χαρακτηριστικό της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια σε σχέση με την ταχύτητα και την ισχύ του ανέμου. Γνωρίζοντας δηλαδή τη στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου μπορούμε να πούμε πόση ισχύ μπορεί να παράγει μια ανεμογεννήτρια, μέσω της καμπύλης ισχύος της.



Σχήμα 2.6
Καμπύλη ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτριας.
 (Πηγή: Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”)

Παραγόμενη ενέργεια αιολικής μηχανής.

Η παραγόμενη ενέργεια μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται τόσο από την καμπύλη ισχύος της μηχανής, όσο και από το ρόδο ανέμου στην περιοχή (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”).

Για κάθε ταχύτητα ανέμου εντός των ορίων της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, δηλαδή ανάμεσα στην ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_{cut-in} και την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας V_F , η παραγόμενη ενέργεια προκύπτει από το γινόμενο του αριθμού των ωρών εμφάνισης της συγκεκριμένης ταχύτητας ετησίως με την ισχύ που αντιστοιχεί (για δεδομένη καμπύλη ισχύος). Με τον τρόπο αυτό φτιάχνεται η καμπύλη κατανομής της παραγόμενης ενέργειας. Η συνολική ετήσια ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα της παραγόμενης ενέργειας για όλες τις ταχύτητες του ανέμου που είναι σε λειτουργία.

Η παραγόμενη ενέργεια επηρεάζεται επίσης από τη διαθεσιμότητα της μηχανής, τις ενεργειακές απώλειες (απώλειες ενέργειας ανέμου, απώλειες μεταφοράς και μετατροπής) και το βαθμό απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Διαθεσιμότητα ανεμογεννήτριας:

Η διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που είναι διαθέσιμη η ανεμογεννήτρια να λειτουργήσει και εκφράζει το συντελεστή διαθεσιμότητας (ΣΔ). Ο συντελεστής διαθεσιμότητας σχετίζεται δηλαδή με το ποσοστό του χρόνου που η ανεμογεννήτρια προορίζεται για συντήρηση. Υπάρχει βέβαια και η πιθανότητα να σημειωθεί κάποια βλάβη, οπότε η μηχανή μένει αναγκαστικά εκτός λειτουργίας μέχρι να επισκευαστεί. Τυπικές τιμές του συντελεστή διαθεσιμότητας είναι 0,96-0,99.

Απώλειες ενέργειας:

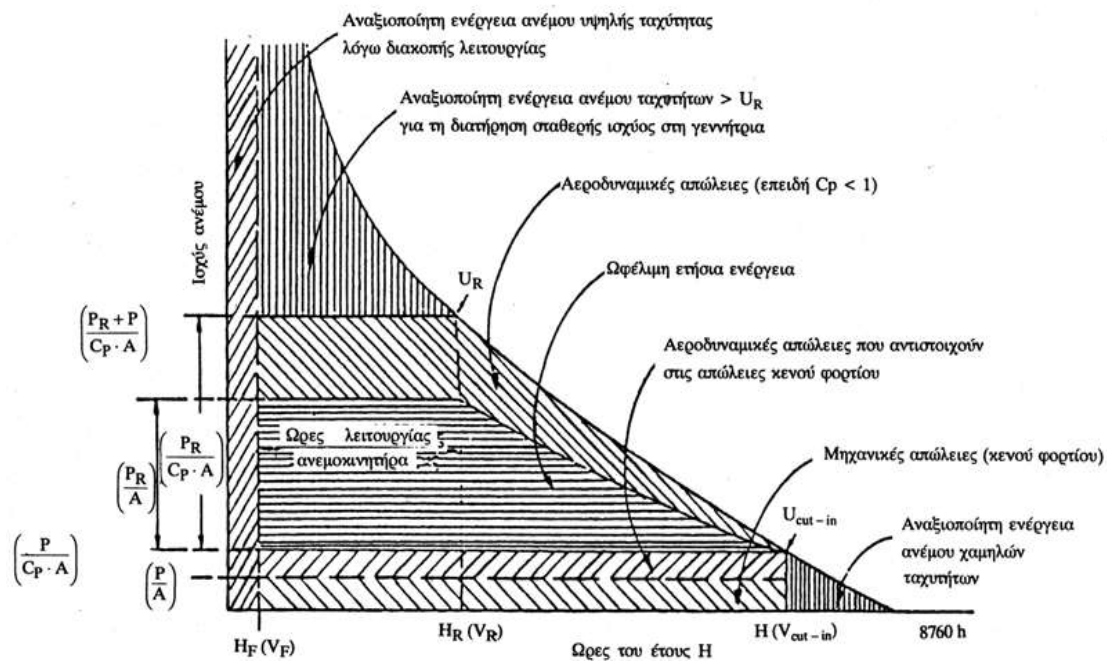
Μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την ετήσια ενέργεια του ανέμου για τους εξής λόγους (Γ. Μπεργελές, “Ανεμοκινητήρες”):

- ✓ Η ανεμογεννήτρια αποδίδει ωφέλιμη ισχύ μόνο όταν η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου (τριβές, άξονα, μειωτήρα,

γεννήτριας). Έτσι, σε περιόδους με ταχύτητες μικρότερες της V_{cut-in} , η ενέργεια του ανέμου μένει ανεκμετάλλευτη, αφού δεν είναι σε θέση δώσει ροπή στον δρομέα.

- ✓ Όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μεγαλύτερη της ονομαστικής, επιδιώκεται να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων ή με τα μικροπτερύγια (flats) ή με την αλλαγή της γωνιακής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο ή την αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, ανάλογα φυσικά με την γεννήτρια που έχει το σύστημα. Άρα για ταχύτητες μεγαλύτερες της V_R χάνεται ένα ποσό του αολικού δυναμικού.
- ✓ Όταν ο άνεμος φθάσει σε υψηλές ταχύτητες ενδείκνυται η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης για λόγους ασφαλείας. Επομένως, η ενέργεια του ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες της V_F παραμένει τελείως αναξιοποίητη.
- ✓ Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας έχουμε αεροδυναμικές απώλειες.
- ✓ Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας έχουμε πρόσθετα μηχανικές απώλειες στον άξονα, στον μειωτήρα και στη γεννήτρια, που μπορούν να θεωρηθούν σταθερές και ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου. Οι συνολικές απώλειες κενού φορτίου μπορεί να ανέρχονται και στο 10% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής.

Το Σχήμα 2.7 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις ετήσιες ενεργειακές απώλειες μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με την προηγούμενη περιγραφή των απωλειών.



Σχήμα 2.7
Ενεργειακές απώλειες στην καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου.
(Πηγή: Γ. Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες")

Ενεργειακές απώλειες παρατηρούνται επίσης και κατά τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια, αλλά και την μετατροπή του

ηλεκτρικού ρεύματος (αναστροφείς, συστήματα ελέγχου), προκειμένου να μπορεί να εκμεταλλευτεί με ασφάλεια και αξιοπιστία από τα φορτία.

Επομένως, αν E είναι η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ενέργεια, όπως αυτή υπολογίζεται από την καμπύλη ισχύος της για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, η ενέργεια που παρέχεται στο φορτία E_{net} θα είναι μειωμένη κατά ένα ποσοστό και θα δίνεται από τη σχέση:

$$E_{wind} = E \cdot n \quad (2.8)$$

Όπου n ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ανεμογεννητριών με τυπική τιμή 0,90.

Βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου:

Ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου εκφράζει τις απώλειες που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα. Οι απώλειες αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στο έλλειμμα της ταχύτητας που παρουσιάζεται στον ομόρρου της ανεμογεννήτριας και αντιστοιχεί στην κινητική ενέργεια που απορρόφησε η ανεμογεννήτρια.

2.2.3) Υβριδικά συστήματα.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η στοχαστικότητα του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια που παράγεται από τις αιολικές μηχανές να εμφανίζει έντονη διακύμανση. Η διακύμανση αυτή αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην εκτεταμένη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”).

Έγινε ήδη φανερό ότι ένα ηλεκτρικό σύστημα χαρακτηρίζεται από την παραγωγή (προσφορά) και την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια έχει το χαρακτηριστικό να μη μπορεί να αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες, αφού κάτι τέτοιο οδηγεί σε αύξηση του κόστους. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή ενέργειας πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή ισορροπία με τη ζήτηση (ισορροπία δηλαδή προσφοράς – ζήτησης). Από την άλλη, οι ανεμογεννήτριες αδυνατούν να ικανοποιήσουν την απαίτηση αυτή, αφού στηρίζονται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα.

Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται πιο έντονο σε μικρά αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, όπου η ζήτηση παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Η έλλειψη τοπικής βιομηχανίας που να καταναλώνει σημαντική ενέργεια τη νύχτα, καθώς και η κατακόρυφη αύξηση της ζήτησης τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω του τουρισμού και της εκτεταμένης χρήσης κλιματιστικών συσκευών, προκαλούν έντονες ανομοιομορφίες στο προφίλ της ζήτησης ενέργειας (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”).

Η ανομοιομορφία επομένως της ζήτησης τόσο ημερησίως όσο και ετησίως, σε συνδυασμό με τις σημαντικές διακυμάνσεις που εμφανίζει η παραγόμενη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, καθιστούν την εγκατάστασή τους σε ένα μη διασυνδεδεμένο νησί μη αποδοτική και συνεπώς οικονομικά ασύμφορη. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση συστημάτων που χρησιμοποιούν συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών και ονομάζονται υβριδικά συστήματα ή/και η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

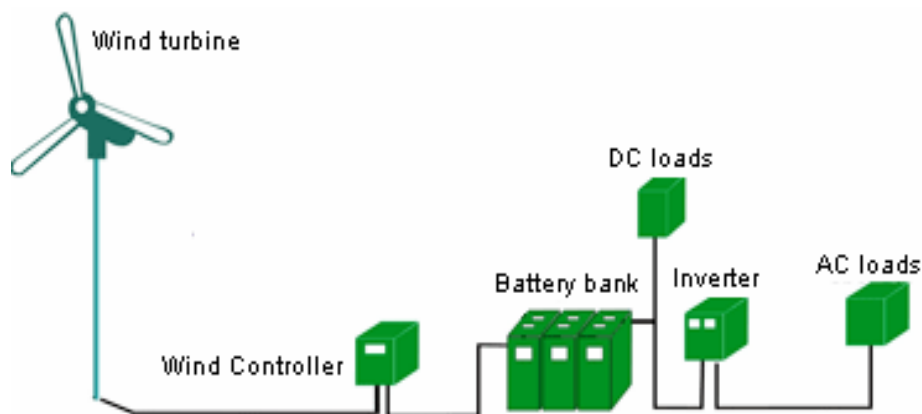
Η παράλληλη χρήση αιολικών συστημάτων με μηχανές εσωτερικής καύσης diesel αποτελεί μια ευρύτατη εφαρμοσμένη τεχνολογία. Πολλά ελληνικά νησιά

χρησιμοποιούν την παράλληλη λειτουργία αιολικών και diesel για την κάλυψη της ζήτησης. Σε τέτοια συστήματα οι αιολικές μηχανές λειτουργούν ως εφεδρεία και η χρήση τους μπορεί να αποφέρει μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου

Η χρήση κάποιου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. μπαταρία, αντλιοταμιευτήρας, κ.α.) επιτρέπει, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια, τη γρήγορη κάλυψη ενδεχόμενης απώλειας των αιολικών, πριν το σύστημα οδηγηθεί σε αδυναμία κάλυψης των φορτίων (black out).

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι ο συνδυασμός ανεμογεννητριών (Α/Γ) με φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) με ή χωρίς σύστημα αποθήκευσης, Α/Γ και Φ/Β με αφαλάτωση, ενώ η παράλληλη χρήση μικρών υδροηλεκτρικών μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος, λόγω της προβλέψιμης λειτουργίας και της γρήγορης απόκρισης τους. Σε περιπτώσεις εφαρμογής υβριδικών συστημάτων γίνεται βελτιστοποίηση στη διαστασιολόγηση των μονάδων, και δίνεται έμφαση στο σύστημα ελέγχου της λειτουργίας.

Στο Σχήμα 2.8 δίνεται ο τυπικός σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος με Α/Γ και μπαταρίες.



Σχήμα 2.8
Τυπικός σχεδιασμός ενός υβριδικού συστήματος με Α/Γ και μπαταρίες.
(Πηγή: <http://grapsas.blogspot.com/2008/01/3.html>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1) Εισαγωγή.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται για την ενίσχυση των ηλεκτρικών συστημάτων μετά από μια μικρής διάρκειας διαταραχή του συστήματος, η οποία προφανώς επηρεάζει την κανονική λειτουργία του, όπως είναι η βύθιση τάσης (η μείωση δηλαδή της ενεργούς τιμής της τάσης λόγω σφαλμάτων στο δίκτυο), οι διακοπές ισχύος, η δημιουργία υπερτάσεων, οι αλλαγές φορτίων. Η εφαρμογή των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας αποτρέπει την καθίζηση των ηλεκτρικών συστημάτων εξαιτίας των προαναφερθέντων διαταραχών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα του συστήματος.

Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν κατάλληλα και σε απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως είναι αυτά των ελληνικών νησιών, τα οποία χαρακτηρίζονται από σημαντική δειξή ανανεώσιμης ενέργειας, όπως είναι η αιολική. Στα συστήματα αυτά, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης εφαρμόζονται αφενός για την αποφυγή προσωρινών διαταραχών στο δίκτυο και αφετέρου για να εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, επιτρέποντας την στιγμιαία κάλυψη ενδεχόμενης απώλειας των αιολικών και τη συνεισφορά στην παραγωγή σε περιόδους μέγιστης ζήτησης (*Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, "An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications"*).

Στην κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας εντάσσονται οι σφόνδυλοι (flywheels), οι υπερ-πυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES). Οι διατάξεις αυτές και η λειτουργία τους παρουσιάζονται συνοπτικώς στις υποενότητες που ακολουθούν.

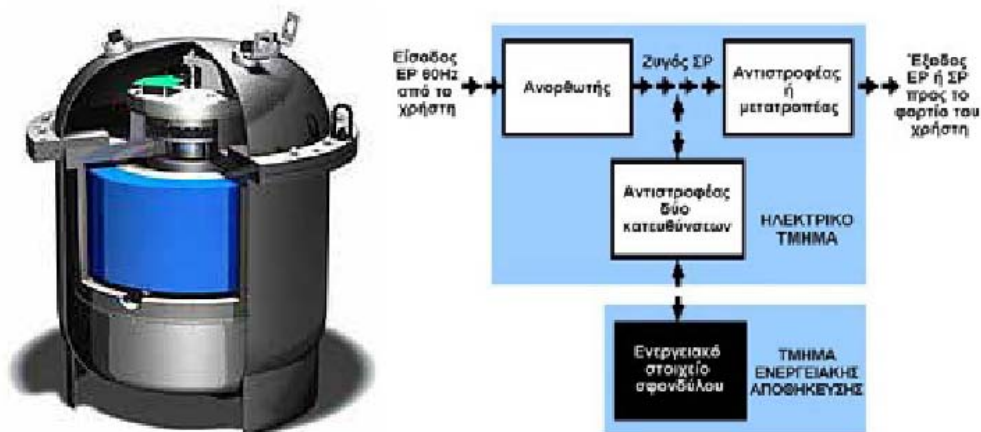
3.2) Σφόνδυλοι.

Οι σφόνδυλοι (flywheels) χρησιμοποιούνται προς το παρόν για μη ηλεκτροπαραγωγές εφαρμογές. Εντούτοις, πρόσφατα οι ερευνητές άρχισαν να διερευνούν την ενεργειακή αποθήκευση για εφαρμογές αυτού του είδους (ΚΑΠΕ, "Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ").

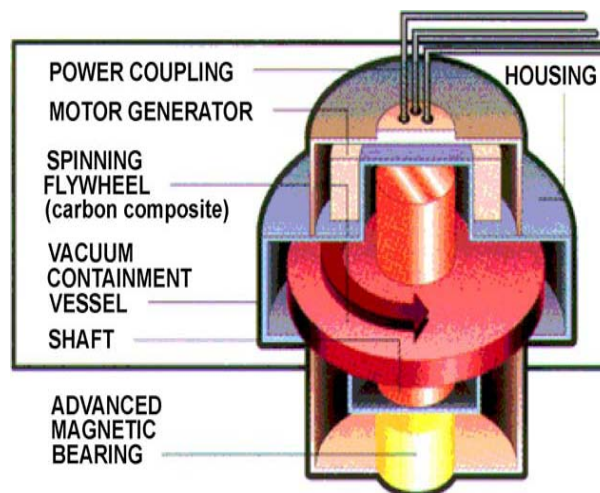
Ο σφόνδυλος είναι μια περιστρεφόμενη μάζα γύρω από έναν άξονα, η οποία μπορεί να αποθηκεύσει την ενέργεια μηχανικά υπό τη μορφή της κινητικής ενέργειας. Μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου αποτελείται από τον σφόνδυλο και μια ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή, που μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως κινητήρας για να περιστρέφει το σφόνδυλο και να αποθηκεύει ενέργεια. Πράγματι, μόλις ο σφόνδυλος αρχίσει να περιστρέφεται αποτελεί ουσιαστικά μια μηχανική μπαταρία η οποία εμπεριέχει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί ανάλογα με την περιστροφική ταχύτητα και τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου. Όσο πιο γρήγορα περιστρέφεται ο σφόνδυλος τόσο περισσότερη ενέργεια αποθηκεύει. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί επιβραδύνοντας το σφόνδυλο μέσω επιβραδυνόμενης

στρεπτικής ροπής και επιστρέφοντας την κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική συσκευή. Στην περίπτωση αυτή, η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρική ισχύ κατά τη ζήτηση χρησιμοποιώντας την ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο σφόνδυλο (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”). Επιπρόσθετα, για τη μείωση των ενεργειακών απωλειών χρησιμοποιούνται μαγνητικοί τριβείς και ένας θάλαμος υπό κενό. Ο τελευταίος συνεισφέρει στη μείωση των αεροδυναμικών απωλειών και των πιέσεων του στροφέα.

Στο Σχήμα 3.1 δίνεται σχηματικά μια ενεργειακή μονάδα σφονδύλου και η λειτουργία της, ενώ στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται τα κύρια συστατικά μέρη της διάταξης αποθήκευσης σφονδύλου.



Σχήμα 3.1
Σχηματική άποψη μιας ενεργειακής μονάδας σφονδύλου και της λειτουργίας της.
(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)



Σχήμα 3.2
Κύρια συστατικά μέρη του συστήματος της διάταξης αποθήκευσης σφονδύλου.
(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στη στρεφόμενη μάζα είναι ανάλογο της μάζας (m) του στροφέα και ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας (v) του στροφέα, σύμφωνα με την εξίσωση της κινητικής ενέργειας:

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Όπου K είναι η κινητική ενέργεια του σφονδύλου. Από την εξίσωση αυτή είναι προφανές ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στον σφόνδυλο αυξάνεται ταχύτερα όσο αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα σε σχέση με την αύξηση της μάζας του στροφέα. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια, στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών, το ενδιαφέρον έχει επικεντρωθεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

Γενικότερα, η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου μπορεί να είναι είτε χαμηλή (6.000 rpm) είτε υψηλή (50.000 rpm). Οι χαμηλής ταχύτητας περιστροφής σφόνδυλοι αποτελούνται κυρίως από χαλύβδινους στροφείς και συμβατικά ρουλεμάν. Οι σφόνδυλοι αυτοί παρουσιάζουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 5 Wh/kg. Οι υψηλής ταχύτητας περιστροφής σφόνδυλοι χρησιμοποιούν προηγμένα σύνθετα υλικά για τον στροφέα, ενώ τα ρουλεμάν χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλούς συντελεστές τριβής. Αυτοί οι ελαφριοί και υψηλών λόγων λειτουργικής αντοχής προς πυκνότητα σύνθετοι στροφείς μπορούν να επιτύχουν ενεργειακή πυκνότητα 100 Wh/kg, με αποτέλεσμα οι μηχανικοί να έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξή τους. Ακόμα, οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας περιστροφής επιταχύνονται σχεδόν μέσα σε λεπτά, παρά τις ώρες που απαιτούνται για να εκφορτιστεί μια μπαταρία (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*).

Στη διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου, όπως άλλωστε και σε όλες τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος, καθώς και ελεγκτές ισχύος. Στη συγκεκριμένη αποθηκευτική διάταξη, ο μετατροπέας ισχύος είναι μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, συνήθως αμφίδρομης ρύθμισης και παλλόμενου πλάτους. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να είναι μονοφασικός (εναλλασσόμενο ρεύμα → συνεχές ρεύμα) ή διφασικός (εναλλασσόμενο ρεύμα → συνεχές ρεύμα → εναλλασσόμενο ρεύμα). Τέλος, ο ελεγκτής ισχύος είναι αναγκαίος για τον έλεγχο της μεταβλητότητας των ηλεκτρικών συστημάτων.

Τα σημαντικότερα οφέλη που παρέχει μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου είναι τα ακόλουθα (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*):

- ✓ Η άμεση απόκριση στην απαίτηση ενέργειας. Οι σφόνδυλοι χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες φόρτισης – εκφόρτισης για πολλούς κύκλους.
- ✓ Η ικανότητά του σφονδύλου να δώσει στιγμιαία μεγάλα ποσά ενέργειας. Οι σφόνδυλοι προτιμούνται όλο και περισσότερο για την ικανοποίηση της ενεργειακής ζήτησης σε ώρες αιχμής, όπου απαιτείται άμεση παροχή σχετικά μεγάλης ποσότητας ενέργειας.
- ✓ Η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, η οποία, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, κυμαίνεται από 5-100 Wh/kg.

- ✓ Η υψηλή ενεργειακή απόδοση, η οποία μπορεί να φθάσει και το 90%.
- ✓ Η μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία φθάνει τα 15-20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές συχνότητες), καθώς και η ελάχιστη συντήρηση και παρακολούθηση που απαιτείται.
- ✓ Η μη ευαισθησία του σφονδύλου στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας του σφονδύλου είναι το υψηλό κόστος, ο κίνδυνος ατυχήματος σε περίπτωση που σπάσει κάποιος δίσκος, αλλά και οι ενεργειακές απώλειες όταν οι κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς. Τα ποσοστά αυτοεκφόρτισης για τα συστήματα σφονδύλου είναι υψηλά, με ελάχιστο ποσοστό το 20% της αποθηκευτικής ικανότητας ανά ώρα. Αυτά τα υψηλά ποσοστά χειροτερεύουν την ενεργειακή απόδοση, όταν ο κύκλος φόρτισης – εκφόρτισης δεν είναι συνεχής, για παράδειγμα όταν αποθηκεύεται ενέργεια για μια χρονική περίοδο μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Τέτοια υψηλά ποσοστά εκφόρτισης ενισχύουν την άποψη ότι ο σφόνδυλος δεν αποτελεί επαρκή διάταξη για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση, αλλά μόνο για να παρέχει αξιόπιστη εφεδρική ενέργεια.

Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι η ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης της ενέργειας του σφονδύλου σε συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η παραγόμενη ισχύς από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις λόγω της στοχαστικότητας του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Ακόμα και όταν οι συμβατικές τεχνολογίες παράγουν ηλεκτρική ισχύ σε ένα σταθερό ποσοστό, παρουσιάζονται διακυμάνσεις στη ζήτηση καθόλη τη διάρκεια της ημέρας. Η μη πλήρης αντιστοίχιση προσφοράς – ζήτησης σημαίνει ότι η ισχύς μπορεί να μην είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται και σε άλλες περιπτώσεις να υπάρχει πλεόνασμα ισχύος. Οι διατάξεις αποθήκευσης σφονδύλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν ισχύ, όταν η παραγόμενη ισχύς από τις ανανεώσιμες πηγές είναι ανεπαρκής, και να αποθηκεύουν την περίσσεια ισχύος. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή για τη διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου είναι η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και η παροχή ισχύος όταν υπάρχει ολική απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, ως αποτέλεσμα της “αστοχίας” του ηλεκτρικού δικτύου (black-out).

Αυτή τη στιγμή, στην Πορτογαλία υπάρχουν δύο υβριδικά συστήματα βασιζόμενα στην τεχνολογία των σφονδύλων, τα οποία εφαρμόζονται στα νησιά Φλόρες και Γκρασιόζα (νησιά Αζόρες). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο χρόνων, η EDA (Azores Electricity Company) συνεργάστηκε με τη PowerCorp για την αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα των δύο αυτών νησιών. Έτσι, το Μάρτιο του 2005, η EDA και η PowerCorp εγκατέστησαν μία διάταξη σφονδύλου 350 kW / 5 kWh στο νησί Φλόρες. Το υβριδικό σύστημα περιλάμβανε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2 ανεμογεννήτριες, 4 μηχανές Diesel και 2 υδροστροβίλους, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4,2 MW. Τα αποτελέσματα της λειτουργίας του συστήματος ήταν ικανοποιητικά όσον αφορά στη σταθερότητα του δικτύου, ενθαρρύνοντας την εφαρμογή ενός παρόμοιου συστήματος στο νησί Γκρασιόζα (*Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, “An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”*).

Γενικότερα, όσον αφορά στις εφαρμογές των σφονδύλων, η ανάπτυξη τους στα ηλεκτρικά συστήματα έχει στραφεί στις εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Ακόμα, σφόνδυλοι έχουν προταθεί για τη βελτίωση του εύρους, της αποδοτικότητας και της

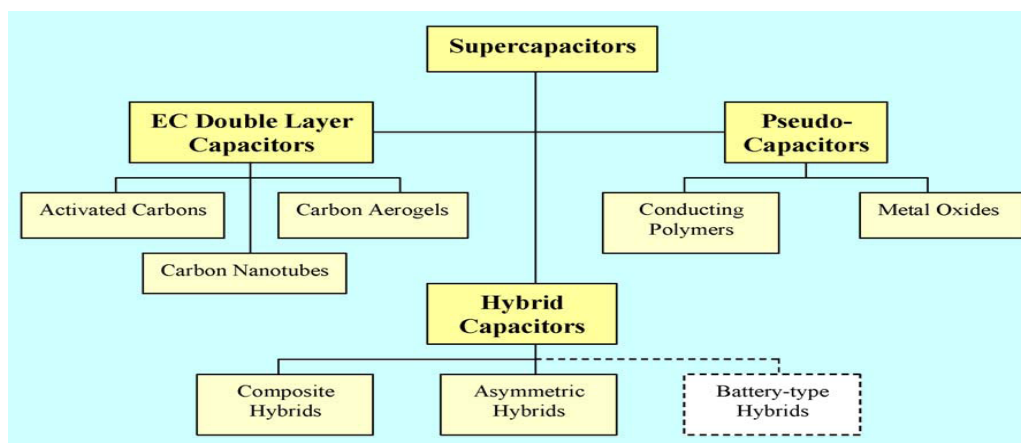
ενεργειακής αποδοτικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

3.3) Εξελιγμένοι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές.

Μια εναλλακτική λύση για την εξυπηρέτηση των γρήγορων και απότομων μεταβολών του φορτίου είναι ο υπερ-πυκνωτής (supercapacitor). Ωστόσο, οι υπερ-πυκνωτές βρίσκονται στα πρώιμα στάδια της ανάπτυξής τους ως τεχνολογία ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

Ο υπερ-πυκνωτής δεν είναι τίποτα άλλο από ηλεκτροχημικός πυκνωτής (EC capacitor). Έχει συνιστώσες που σχετίζονται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή. Συνεπώς, η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Ο υπερ-πυκνωτής χρησιμοποιεί ένα μοριακά-λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη σαν διηλεκτρικό για το διαχωρισμό της φόρτισης. Η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτό, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά, δηλαδή χωρίς να πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Ένας υπερ-πυκνωτής αποτελείται από δυο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος.

Ανάλογα με την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, οι υπερ-πυκνωτές μπορούν να ταξινομηθούν σε ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (electrochemical double layer capacitors, ECDL) και σε ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors). Οι υβριδικόι πυκνωτές (hybrid capacitors) είναι επίσης μια νέα κατηγορία υπερ-πυκνωτών (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”). Στο Σχήμα 3.3 δίνεται σχηματικά η ταξινόμηση των υπερ-πυκνωτών. Δεδομένου ότι οι ECDL supercapacitors είναι συνήθως οι λιγότερο δαπανηροί ως προς την κατασκευή τους και οι πιο διαδεδομένοι τύποι υπερ-πυκνωτών, θα παρουσιασθούν αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 3.3.
Ταξινόμηση υπερ-πυκνωτών.

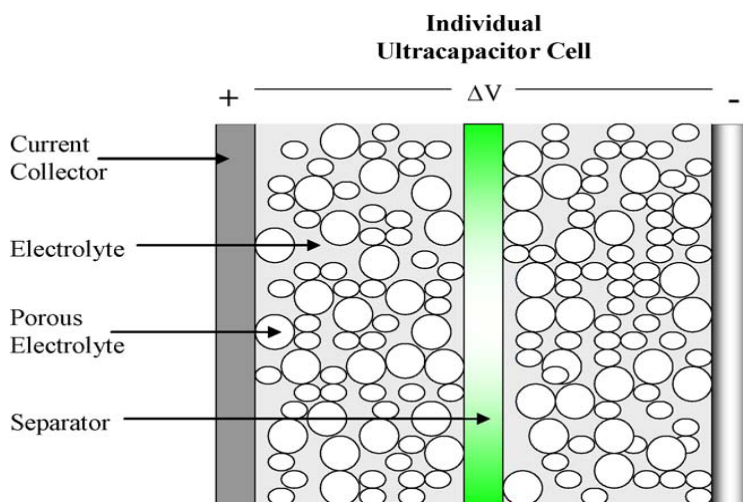
(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Τα κύρια μέρη ενός ECDL supercapacitor παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4. Οι ECDL supercapacitors έχουν μια κατασκευή διπλού στρώματος που αποτελείται από

ηλεκτρόδια, εμβαπτισμένα σε υγρό ηλεκτρολύτη (που περιέχει επίσης τον διαχωριστή). Ως υλικό ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται συνήθως πορώδης ενεργός άνθρακας. Οι πρόσφατες τεχνολογικές πρόοδοι έχουν επιτρέψει να χρησιμοποιηθούν επίσης ως υλικό ηλεκτροδίου αεροζέλ άνθρακα και νανοσωλήνες άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης είναι είτε οργανικός είτε υδατώδης. Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν συνήθως ακετονιτρίλιο και επιτρέπουν ονομαστική τάση μέχρι 3 Volt. Οι υδατώδεις ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούν είτε οξέα είτε βάσεις (H_2SO_4 , KOH), αλλά η ονομαστική τάση περιορίζεται σε 1 Volt (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα στον ηλεκτρολύτη μεταναστεύουν προς τα ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των φορτισμένων ηλεκτροδίων που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμοζόμενη τάση. Κατά συνέπεια, παράγονται δύο ξεχωριστά φορτισμένα στρώματα. Παρόμοια με μια μπαταρία, ο διπλού στρώματος υπερ-πυκνωτής βασίζεται στην ηλεκτροστατική δράση. Δεδομένου όμως ότι καμμία χημική αντίδραση δεν συμβαίνει, το αποτέλεσμα είναι εύκολα αναστρέψιμο με ελάχιστη υποβάθμιση σε μεγάλη φόρτιση ή υπερφόρτιση και η τυπική διάρκεια ζωής είναι εκατοντάδες χιλιάδες κύκλοι. Ο περιοριστικός παράγοντας από την άποψη της διάρκειας ζωής μπορεί να είναι τα έτη λειτουργίας, συγκεκριμένα έχει αναφερθεί διάρκεια ζωής μέχρι 12 έτη.

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι το υψηλό ποσοστό αυτο-εκφόρτισης. Αυτό το ποσοστό είναι πολύ υψηλότερο στις μπαταρίες, που φθάνουν σε ένα επίπεδο 14% της ονομαστικής ενέργειας κάθε μήνα. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε μεγάλες φορτίσεις, το γεγονός ότι καμμία χημική αντίδραση δεν πραγματοποιείται σημαίνει ότι οι υπερ-πυκνωτές μπορούν εύκολα να φορτιστούν και να εκφορτιστούν σε δευτερόλεπτα, πολύ ταχύτερα δηλαδή από τις μπαταρίες. Παράλληλα, ούτε θερμότητα ούτε επικίνδυνες ουσίες απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ υψηλή και κυμαίνεται από 85% έως 98% (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).



Σχήμα 3.4
Δομή ενός ECDL supercapacitor.

(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Συγκριτικά με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερ-πυκνωτές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίου. Πράγματι, η ποσότητα του ρεύματος

που μπορεί να απορροφήσει ένας συμβατικός πυκνωτής εξαρτάται άμεσα από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Η τεχνολογία, όμως, των υπερ-πυκνωτών βασίζεται στην ανάπτυξη «ενεργούς επιφάνειας» σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο συνολικός όγκος σε ένα μικρό μόλις κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών και πολλαπλασιάζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους. Έχει αναφερθεί χωρητικότητα υπερ-πυκνωτή 5.000 F, ενώ η ενεργειακή του πυκνότητα φθάνει τις 5 Wh/kg, σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που παρουσιάζουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 0,5 Wh/kg (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*). Επιπρόσθετα, η πυκνότητα ισχύος των υπερ-πυκνωτών είναι εξαιρετικά υψηλή, παίρνοντας τιμές όπως 10.000 W/kg, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από τις πυκνότητες ισχύος των μπαταριών. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υπερ-πυκνωτή, το υψηλό αυτό ποσό ισχύος θα είναι διαθέσιμο μόνο για πολύ μικρή χρονική διάρκεια.

Το κόστος του υπερ-πυκνωτή είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την περαιτέρω εμπορική χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκριτικά με τα κόστη των καθιερωμένων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης, όπως είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ο υπερ-πυκνωτής εμφανίζει σημαντικά υψηλότερο κόστος. Επομένως, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση του κόστους του ιδιαίτερα στους τομείς του άνθρακα, του ηλεκτρολύτη και του διαχωριστή. Σήμερα, η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ισχύος των υπερ-πυκνωτών σε συνδυασμό με τους πολύ σύντομους κύκλους εκφόρτισης, καθιστά ιδανική την εφαρμογή τους στην παροχή συμπληρωματικής φόρτισης για την ικανοποίηση ξαφνικών ενεργειακών αναγκών.

Ωστόσο, πρόσφατες εξελίξεις στην κατασκευή του υπερ-πυκνωτή έχουν δείξει ότι η χρήση των κάθετα ευθυγραμμισμένων, μονοφλοιϊκών νανοσωλήνων του άνθρακα (οι οποίοι είναι μόνο μερικές ατομικές διαμέτροι σε πλάτος) αντί του πορώδους, άμορφου άνθρακα που συνήθως χρησιμοποιείται, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την χωρητικότητα και την πυκνότητα ισχύος του υπερ-πυκνωτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εμβαδόν της επιφάνειας των ηλεκτροδίων αυξάνεται εντυπωσιακά με τη χρήση τέτοιων υλικών. Ενεργειακές πυκνότητες της τάξης των 60 Wh/kg και πυκνότητες ισχύος της τάξης των 100.000 W/kg μπορούν να επιτευχθούν με αυτήν την τεχνολογία (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*).

Οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors) και οι υβριδικοί πυκνωτές (hybrid capacitors) είναι επίσης υποσχόμενες τεχνολογίες, επειδή μπορούν να επιτύχουν βελτιωμένες αποδόσεις σε τομείς που οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (electrochemical double layer capacitors, ECDL) παρουσιάζουν κατώτερες δυνατότητες. Οι ψευδοπυκνωτές χρησιμοποιούν οξειδία μετάλλων ή αγώγιμα πολυμερή ως υλικό ηλεκτροδίου και μπορούν να αποθηκεύσουν 80% περισσότερη ενέργεια από των ίδιων διαστάσεων ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος, χάρη στη μεγαλύτερη πυκνότητα των ηλεκτροδίων τους. Οι υπερ-πυκνωτές μεταλλικών οξειδίων χρησιμοποιούν υδατώδεις ηλεκτρολύτες και μεταλλικά οξείδια, όπως το οξείδιο του ρουθηνίου, το οξείδιο του ιριδίου και το οξείδιο του νικελίου. Παρόλα αυτά, οι υπερ-πυκνωτές μεταλλικών οξειδίων είναι πολύ ακριβοί και μπορεί να «πάσχουν» από χαμηλότερες αποδόσεις και χαμηλότερη τάση, εξαιτίας της ανάγκης για υδατώδη ηλεκτρολύτες. Οι υβριδικοί υπερ-πυκνωτές μπορούν να επιτύχουν ακόμα υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας και ισχύος από τους άλλους υπερ-πυκνωτές, είναι όμως ακόμα μια νέα τεχνολογία, που απαιτεί περισσότερη έρευνα για πληρέστερη κατανόηση.

Προς το παρόν, υπερ-πυκνωτές πολύ μικρού μεγέθους της τάξης των 7 έως 10 Watt, διατίθενται στο εμπόριο για εφαρμογές ποιότητας ισχύος από την πλευρά του καταναλωτή και βρίσκονται συνήθως σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές (Σχήμα 3.5). Η εξέλιξη για τους πυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει εστιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα. Μέχρι σήμερα, η ποιότητα ισχύος μικρής κλίμακας (<250 kW) θεωρείται ως η πιο ελπιδοφόρος ηλεκτροπαραγωγική χρήση για τους υπερ-πυκνωτές (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).



Χωρητικότητα	2700 Farads (-10% / +30%)
Τάση	2,5 V
Ονομαστικό ρεύμα	625 A (5 sec ρυθμός εκκένωσης στα 0,5V)
Μέγεθος	161 x 61,5 x 61,5 mm
Βάρος	725 gr
Θερμοκρασία	-40°C έως 70 °C
Διαρροή	6 mA (μετά από 72 ώρες)

Σχήμα 3.5

Αποψη ενός υπερ-πυκνωτή του εμπορίου και τα χαρακτηριστικά του.

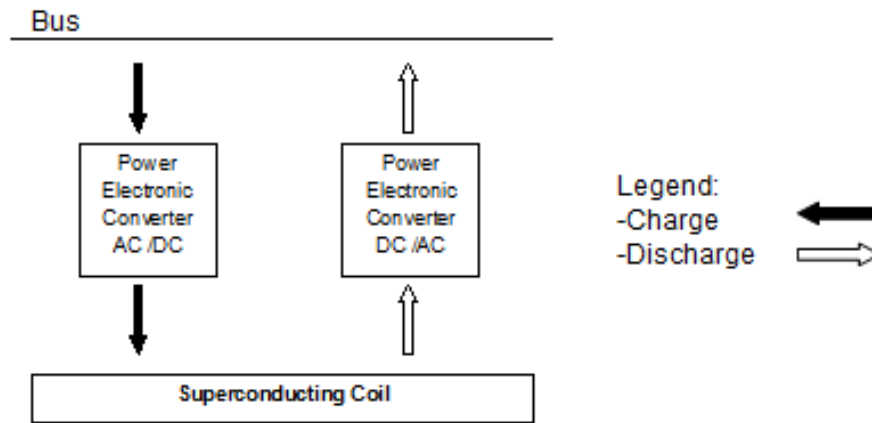
(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)

3.4) Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση.

Ένας άλλος τύπος διάταξης που αναπτύσσεται κυρίως για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της τάσης του δικτύου και την ενίσχυση της ισχύος σε ώρες αιχμής, αλλά και με προοπτική για εφαρμογή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι το υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Σε ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης αποθηκεύεται ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο από υπεραγώγιμο υλικό. Συγκεκριμένα, τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα από ένα ηλεκτρικό σύστημα σε συνεχές ρεύμα, το οποίο ρέει μέσα στην υπεραγώγιμη σπείρα και αποθηκεύει την ενέργεια υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 3.6). Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, όταν το απαιτούν οι συνθήκες (Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, “An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”).

Προκειμένου να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του, βυθίζεται σε υγρό ήλιο που περιέχεται σε έναν μονωμένο υπό κενό κρουστάτη. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης του υπεραγώγιμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα για να “εγκλωβίζουν” αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 3.6

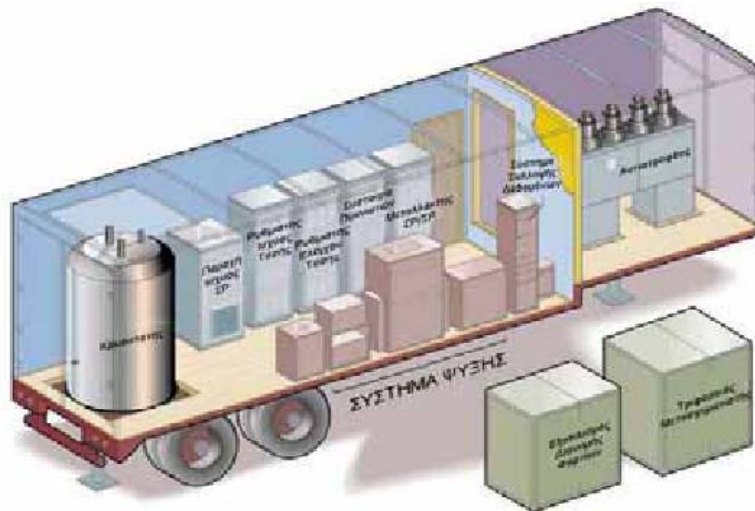
Αρχή λειτουργίας υπεραγώγιμου μαγνητικού συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης.

(Πηγή: Sérgio Fajás, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, "An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications")

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης είναι η πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης. Η ισχύς διατίθεται σχεδόν στιγμιαία και η πολύ υψηλή παροχή ισχύος διατίθεται για σύντομη χρονική περίοδο. Ακόμα, η συχνή φόρτιση και εκφόρτιση δεν έχει καμμία επίδραση στη διάρκεια ζωής του. Τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, πλήρη ανακύκλωση και συνεχή ρυθμό λειτουργίας. Η ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να γίνει μεγαλύτερη από 97%.

Στα μειονεκτήματα των συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης συγκαταλέγονται η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά και η αστάθεια που εμφανίζουν κυρίως τα μεγάλα συστήματα αυτού του είδους, η οποία προκαλείται από το δημιουργούμενο ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των μεγάλων συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο μπορεί να έχει και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (*Ervin Spahić, Gerd Balzer, Britta Hellmich and Wolfram Münch, "Wind energy storages – Possibilities"*).

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε διατάξεις της τάξης των 1 έως 10 MW. Οι διατάξεις μικρο-συστημάτων διατίθενται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος (ΚΑΠΕ, "Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ"). Στο Σχήμα 3.7 που ακολουθεί, παρατίθεται σχηματικά μια μονάδα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης με απόδοση 3 MW πραγματικής ισχύος και ένα χρόνο απόκρισης <0,5 ms. Αυτή η μονάδα μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυα μεταφοράς από 69 έως 500 kV.



Σχήμα 3.7
Σχηματική άποψη μιας μονάδας υπεραγώγιμης μαγνητικής
ενεργειακής αποθήκευσης απόδοσης 3MW.
 (Πηγή: ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”)

Τέλος, νέες παρουσιάσεις εφαρμογών διανομής ενέργειας στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη καθιστούν φανερό ότι και τα συστήματα υπεραγώγιμης ενεργειακής μαγνητικής αποθήκευσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές, ειδικά όπου υπάρχει ήδη κατάλληλη υποδομή ψύξης. Τα πρώιμα υπεραγώγιμα υλικά για να αποδώσουν χρειάζονται κρυογόνο ψύξη, η οποία έχει μεγάλο κόστος. Τελευταία εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί (“High Temperature Superconductors”), οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, που είναι περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Λόγω αυτού του γεγονότος, αρκετές αμερικανικές επιχειρήσεις έχουν καταφέρει να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο υπεραγώγιμα καλώδια και ταινίες.

3.5) Σύγκριση διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.

Μετά την ανάλυση της τεχνολογίας του σφονδύλου, του υπερ-πυκνωτή και του συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης και λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1, θα προσπαθήσουμε να προβούμε σε μία σύγκριση των τριών αυτών τεχνολογιών βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης.

Για το σκοπό αυτόν, στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί, παρουσιάζουμε τις τρεις αυτές διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους.

Πίνακας 3.1
Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας
και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

(Πολλαπλές πηγές: US Department of Energy (EERE 2006), The INVESTIRE network (INVESTIRE, 2003), Energy Storage Association (ESA, 2007), UK Department of Trade and Industry (DTi, 2004 και DTi, 2006) ,Baxter (2006))

Χαρακτηριστικά	Διάταξη βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας		
	Σφόνδυλοι (Flywheels)	Υπερ-πυκνωτές (Supercapacitors)	Συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnet Energy Storage, SMES)
Ενεργειακή Πυκνότητα (Energy Density)	5 - 100 Wh/kg ή 1.000 kWh/m ³	0,1 – 5,0 Wh/kg ή 5,0 kWh/m ³	2,8 kWh/m ³
Αποθηκευτική Ικανότητα (Storage Capacity)	2,5 MWh	μικρή	3 kWh
Χωρητικότητα Ισχύος (Power Capacity)	25 MW	πολύ μεγάλη	10 MW
Ενέργεια/Ισχύς (Energy/Power)	25 MW για 5 min ή 5 MW για 30 min	η ισχύς εκτιμάται για sec μέχρι μερικά min	υψηλή ισχύς για μερικά sec
Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency)	90%	85 - 98%	97-98%
Αυτό-εκφόρτιση (Self-discharge)	1-10 % / hour	10 % / ημέρα	ψυκτική ισχύς
Διάρκεια ζωής (Life-time) (cycles)	10 ⁶ κύκλοι	10 ⁶ κύκλοι	10 ⁶
Διάρκεια ζωής (Life-time) (years)	15 – 20 έτη	12 έτη	20 έτη
Κόστος (Cost)	3.000 - 10.000 €/kW	200 -1.000 €/kW (το έτος 2002)	350 €/kW
Ανάπτυξη	Διαθέσιμη	Αναπτυσσόμενη	Έχουν αναπτυχθεί τα συστήματα μέχρι 10 MW, δυνατότητα αύξησης σε 2.000 MW
Διάδοση	-	Διαδεδομένοι οι μικρές κλίμακας υπερ-πυκνωτες	Σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος
Πλεονεκτήματα	Υψηλή ισχύς	Μεγάλη διάρκεια ζωής σε κύκλους, υψηλή αποδοτικότητα	Υψηλή ισχύς
Μειονεκτήματα	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, τοξικές και διαβρωτικές ενώσεις	Επιπτώσεις στην υγεία από συστήματα μεγάλης κλίμακας
Καταλληλότητα για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης	✓✓	✓✓	✓
Καταλληλότητα για εφαρμογές ποιότητας ισχύος	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Καταλληλότητα για εφαρμογές μεταφοράς	✓	✓✓✓	*
Περιβαλλοντική Επίδραση (Environment impact)	Μικρή	Μεσαία	Μικρή

✓✓✓ κατάλληλο

✓✓ μερικώς κατάλληλο

✓ περιορισμένα κατάλληλο

* μη κατάλληλο

Συμπεράσματα:

Οι σφόνδυλοι και οι υπερ-πυκνωτές, παρά τις τελευταίες εξελίξεις στα υλικά κατασκευής τους, είναι αρκετά γνωστές τεχνολογίες στους κατασκευαστές, αντίθετα με τα συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης. Ωστόσο, τα συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης είναι οι πιο «συμπαγείς» διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης, παρουσιάζουν τους πιο απλούς μηχανισμούς λειτουργίας και δεν απαιτούν συντήρηση, σε αντίθεση για παράδειγμα με τους σφονδύλους που εγκυμονεί ο κίνδυνος να σπάσει κάποιος δίσκος.

Όσον αφορά στην αποθηκευτική ικανότητα, οι υπερ-πυκνωτές παρουσιάζουν τη μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα συγκριτικά με τις άλλες δύο διατάξεις αποθήκευσης. Ακολουθούν τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης με αποθηκευτική ικανότητα 3 kWh και τέλος οι σφόνδυλοι με 2,5 MWh. Παράλληλα, οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (5 - 100 Wh/kg) συγκριτικά με τους υπερ-πυκνωτές και τα συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης, με αποτέλεσμα να αποδίδουν υψηλά ποσά ισχύος για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Για παράδειγμα, ένας σφόνδυλος μπορεί να αποδώσει υψηλή ισχύ σε μερικά λεπτά, ενώ ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης σε μερικά δευτερόλεπτα.

Από την άλλη, τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης και οι υπερ-πυκνωτές παρουσιάζουν μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις από τους σφονδύλους (97-98% και 85-98% έναντι 90% αντίστοιχα). Η χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση του σφονδύλου οφείλεται στο υψηλό ποσοστό αυτό-εκφόρτισης, που είναι της τάξης του 1-10%/ημέρα. Επίσης, ο σφόνδυλος παρουσιάζει και μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης από τις άλλες δύο διατάξεις. Ένας σφόνδυλος για να εκφορτιστεί απαιτεί αρκετά δευτερόλεπτα έως και μερικά λεπτά, σε αντίθεση με τις άλλες δύο διατάξεις που απαιτούν μόνο μερικά δευτερόλεπτα. Ωστόσο, ως προ τη διάρκεια ζωής, οι υπερ-πυκνωτές έχουν μόνο 12 έτη λειτουργίας, σε αντίθεση με τους σφονδύλους και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης που φθάνουν τα 20 έτη λειτουργίας.

Με κριτήριο το κόστος, τα συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας εμφανίζουν το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα ισχύος (350 €/kW). Ακολουθούν οι υπερ-πυκνωτές με κυμαινόμενο κόστος ανά μονάδα ισχύος 200 -1.000 €/kW. Τέλος, οι σφόνδυλοι είναι οι πιο δαπανηρές διατάξεις αποθήκευσης, αφού το κόστος τους ανά μονάδα ισχύος κυμαίνεται από 3.000 - 10.000 €/kW. Όσον αφορά στην περιβαλλοντική «συμβατότητα», οι σφόνδυλοι και τα συστήματα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης έχουν μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (π.χ. από τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα), ενώ οι υπερ-πυκνωτές επιδρούν ελαφρώς πιο αρνητικά στο περιβάλλον, λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.

Τέλος, όσον αφορά στο πλήθος των εφαρμογών τους, και οι τρεις διατάξεις είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι υπερ-πυκνωτές και οι σφόνδυλοι είναι επίσης μερικώς κατάλληλες διατάξεις για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης και ακόμα λιγότερο κατάλληλες για εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών. Από την άλλη, τα συστήματα υπεραγώγιμης ενεργειακής μαγνητικής αποθήκευσης είναι ελαφρώς κατάλληλα για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης, ενώ δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίησή τους στον τομέα των μεταφορών.

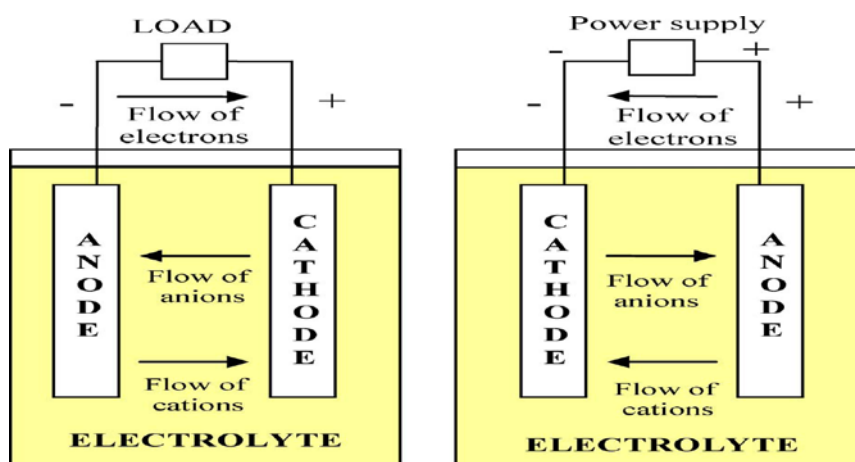
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΧΗΜΙΚΗ ΜΟΡΦΗ – ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

4.1) Εισαγωγή.

Τελευταία, η εξέλιξη της τεχνολογίας αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας επικεντρώνεται κυρίως στις διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών.

Μια μπαταρία (ή αλλιώς συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψει σε χημική, και όταν χρειαστεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Σχηματίζεται από ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο πλάκες, φτιαγμένες από διαφορετικά μέταλλα και βυθισμένες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες πρέπει να είναι αγωγίμες, ονομάζονται ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό είναι και αυτό αγωγίμο και καλείται ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν χημικά με τον ηλεκτρολύτη και η αντίδραση περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου. Δηλαδή, η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας). Η εκφορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ ταυτόχρονα αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί, παρατίθεται σχηματικά η δομή κάθε ηλεκτρικού στοιχείου. Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή αλλιώς άνοδος, παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα/φορτίο και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ακολουθώντας, το θετικό ηλεκτρόδιο, ή αλλιώς κάθοδος, δέχεται τα ηλεκτρόνια και κατά συνέπεια μειώνεται το θετικό του φορτίο κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων μεταξύ ανόδου και καθόδου. Τέλος, για ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 4.1

Διάγραμμα μπαταρίας.

(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Σήμερα χρησιμοποιούνται ή τελούν υπό ανάπτυξη μια πληθώρα τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης μπαταρίας. Προς το παρόν εμπορικά διαθέσιμες είναι οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου – οξέος και οι VRLA (ρυθμιζόμενες με βαλβίδα μολύβδου – οξέος), καθώς επίσης και μερικές αλκαλικές μπαταρίες (NiCd, NiMH). Ορισμένες εξελιγμένες μπαταρίες που βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης, είναι οι μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου, οι λιθίου, οι νατρίου-θείου (NaS) και οι μετάλλου-αέρα (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

Στις υποενότητες που ακολουθούν, θα εξετάσουμε ξεχωριστά κάθε τεχνολογία ενεργειακής αποθήκευσης μπαταρίας, παρουσιάζοντας παράλληλα τις ιδιαίτερες δυνατότητες και αδυναμίες καθεμίας από αυτές.

4.2) Μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Lead – Acid Batteries).

Οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου – οξέος είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διοξείδιο του μολύβδου (PbO₂) για το σχηματισμό του ηλεκτροδίου καθόδου, μόλυβδο (Pb) για το σχηματισμό του ηλεκτροδίου ανόδου και θειικό οξύ (H₂SO₄) που ενεργεί ως ηλεκτρολύτης. Η τάση ενός ηλεκτρικού στοιχείου μολύβδου – οξέος εκτιμάται στα 2 Volt και η τυπική ενεργειακή πυκνότητα είναι περίπου 30 Wh/kg, με πυκνότητα ισχύος γύρω στα 180 W/kg. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ παρουσιάζουν ικανοποιητικές ενεργειακές αποδόσεις, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 60 και 95%, εγκαθίστανται εύκολα, απαιτούν χαμηλού επιπέδου συντήρηση και παρουσιάζουν χαμηλό κόστος επένδυσης. Ακόμα, τα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης για αυτό το είδος μπαταριών είναι πολύ χαμηλά (γύρω στο 2-5% ανά μήνα), καθιστώντας τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος ιδανικές για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας (*Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, “OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES”*).

Εντούτοις, οι περιοριστικοί παράγοντες για αυτό το είδος μπαταριών είναι ο σχετικά χαμηλός αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης και η λειτουργική διάρκεια ζωής τους. Η τυπική διάρκεια ζωής των μπαταριών κυμαίνεται μεταξύ 300 και 1500 κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης επηρεάζεται αρνητικά από το βάθος εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Οι προσπάθειες για πλήρη εκφόρτιση της μπαταρίας μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστρεπτικές για τα ηλεκτρόδια, μειώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής. Όσον αφορά στα επίπεδα θερμοκρασιών, οι υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 45 °C, που είναι το ανώτερο όριο για τη λειτουργία των μπαταριών) δύνανται να βελτιώσουν την απόδοση των μπαταριών από την άποψη της υψηλότερης χωρητικότητας, καθώς επίσης και την ενεργειακή τους απόδοση (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”*).

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας μολύβδου – οξέος, λόγω του χαμηλού τους κόστους, έχουν κυριαρχήσει στην αγορά. Συγκεκριμένα, είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές της αιολικής ενέργειας, έχει προταθεί η αποθήκευση ισχύος της τάξης των 100 MW ή περισσότερο σε τέτοιου είδους μπαταρίες.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η τεχνολογία μπαταριών εμβάπτισης μολύβδου σε οξύ βελτιώνεται σταδιακά και με ποικίλους τρόπους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μπαταρίες VRLA, που χρησιμοποιούν την ίδια βασική ηλεκτροχημική τεχνολογία με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, με τη διαφορά αυτές φράσσονται με

μια βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης. Επιπλέον, ο όξινος ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης νερού στις κυψέλες για να διατηρείται η κατάλληλη λειτουργία του ηλεκτρολύτη, ή ανάμειξης του ηλεκτρολύτη για να αποτρέπεται η διαστρωμάτωση. Η ανακύκλωση του οξυγόνου και οι βαλβίδες των VRLA αποτρέπουν τον εξαερισμό των αερίων υδρογόνου και οξυγόνου, καθώς και την είσοδο αέρα στις κυψέλες (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

Το υποσύστημα των μπαταριών αυτών μπορεί να χρειάζεται να αντικαθίσταται συχνότερα από ότι με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, αυξάνοντας το σταθμισμένο κόστος του συστήματος. Οι μπαταρίες VRLA παρουσιάζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι των μπαταριών εμβάπτισης σε οξύ:

- ✓ Μειώνεται δραματικά η απαραίτητη συντήρηση για να διατηρείται η μπαταρία σε λειτουργία.
- ✓ Οι κυψέλες των μπαταριών μπορούν να συσσωματώνονται πιο στενά λόγω της ερμητικά κλειστής κατασκευής και του ακινητοποιημένου ηλεκτρολύτη, οπότε έτσι μειώνεται το ίχνος και το βάρος της μπαταρίας.

Τα μειονεκτήματα των VRLA είναι ότι είναι λιγότεροι στιβαρές από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος, ενώ είναι πιο ακριβές και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Οι VRLA θεωρούνται ως μη χρήσιμες συντήρησης και ασφαλείς, και έχουν καταστεί δημοφιλείς για την εφεδρική τροφοδοσία ισχύος σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, καθώς επίσης και για την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να διατεθούν ειδικό χώρο για την τοποθέτηση των μπαταριών.

4.3) Αλκαλικές μπαταρίες.

Οι αλκαλικές μπαταρίες είναι κυρίως οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd), νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH) και οι νικελίου – ψευδαργύρου (NiZn). Και οι τρεις αυτοί τύποι χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη, το οποίο είναι υδροξείδιο του νικελίου και υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου με υδροξείδιο του λιθίου αντίστοιχα. Όσον αφορά στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, η μπαταρία νικελίου – καδμίου (NiCd) χρησιμοποιεί υδροξείδιο του καδμίου ως αρνητικό ηλεκτρόδιο, η νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH) ένα κράμα μετάλλων και η νικελίου – ψευδαργύρου (NiZn) υδροξείδιο του ψευδαργύρου.

Η τάση για τις αλκαλικές μπαταρίες εκτιμάται γύρω στα 1,2 Volt (1,65 Volt για τον τύπο NiZn), ενώ οι τυπικές μέγιστες ενεργειακές πυκνότητες είναι υψηλότερες από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος. Συγκεκριμένα, η μπαταρία NiCd παρουσιάζει ενεργειακή πυκνότητα 50 Wh/kg, η NiMH 80 Wh/kg και η NiZn 60 Wh/kg. Η τυπική διάρκεια ζωής λειτουργίας και ο αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών NiCd και NiMH οξέος (1000 - 2000 κύκλοι) είναι επίσης υψηλότεροι των μπαταριών μολύβδου - οξέος, ενώ η μπαταρία NiZn εμφανίζει παρόμοια ή μικρότερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”). Τέλος, και τα τρία αυτά είδη μπαταριών νικελίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως και τους -50 °C), ενώ παράλληλα μπορούν να επαναφορτιστούν ταχέως.

Παρά τα ανωτέρω πλεονεκτήματα των μπαταριών νικελίου (κυρίως των NiCd και NiMH) έναντι των μπαταριών μολύβδου – οξέος, και τα τρία αυτά είδη μπαταριών νικελίου παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος από την άποψη της βιομηχανικής χρήσης, καθώς και της

εφαρμογής για την ενίσχυση ηλεκτρικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές:

- Γενικά, η μπαταρία NiCd είναι η μοναδική από τους τρεις τύπους αλκαλικών μπαταριών που χρησιμοποιείται σε συστήματα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Παρόλα αυτά, η μπαταρία NiCd μπορεί να είναι 10 φορές πιο ακριβή από μια μπαταρία μολύβδου – οξέος.
- Οι μπαταρίες νικελίου εμφανίζουν χαμηλότερες ενεργειακές αποδόσεις από τις μολύβδου – οξέος. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή απόδοση της NiCd κυμαίνεται μεταξύ 65 και 70%, ενώ της NiZn είναι της τάξης του 80% (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*).
- Οι μπαταρίες NiCd παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης από τις μπαταρίες μολύβδου – οξέος.
- Το σημαντικότερο, όμως, μειονέκτημα των μπαταριών Ni-Cd είναι η υψηλή τοξικότητα του καδμίου. Αν και αυτό το μέταλλο είναι ιδιαίτερα ανακυκλώσιμο, είναι υπερβολικά τοξικό.

Όσον αφορά στις εφαρμογές των μπαταριών νικελίου, οι μπαταρίες Ni-Cd χρησιμοποιούνται ευρέως στις επικοινωνίες και τον ιατρικό εξοπλισμό, ενώ έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς και σε υπό ανάπτυξη ηλεκτρικά οχήματα. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής τους και στα ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το μεγάλης κλίμακας σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης μπαταριών Ni-Cd που εγκαταστάθηκε στην Αλάσκα για να παρέχει ηλεκτρική ισχύ 27 MW για το ελάχιστο χρονικό διάστημα των 15 λεπτών, προκειμένου να σταθεροποιεί το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο σε περίπτωση ξαφνικής απώλειας της παραγωγής. Τα στοιχεία Ni-Cd τοποθετήθηκαν σε τέσσερις παράλληλες σειρές. Η ονομαστική τάση του συστήματος ανέρχεται στα 4.000 Volt. Αξίζει να αναφέρουμε ότι πρόκειται για το «ισχυρότερο» παγκοσμίως σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης μπαταριών Ni-Cd, με απόδοση ισχύος 45 MW ισχύος για μόνο 5 λεπτά υποστήριξης και για το λόγο αυτό του απενεμήθη το «Παγκόσμιο Ρεκόρ Γκίνες» (*Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, "OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES"*).

Τέλος, οι μπαταρίες NiMH χρησιμοποιούνται προς το παρόν στους υπολογιστές, τον ιατρικό εξοπλισμό και σε άλλες εφαρμογές. Οι μπαταρίες NiZn είναι υπό ανάπτυξη και συνεπώς δεν είναι διαθέσιμες εμπορικά.

4.4) Προηγμένες μπαταρίες.

4.4.1) Μπαταρίες λιθίου (Lithium Batteries).

Η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου δεν έχει εφαρμοσθεί ακόμα για ενεργειακή αποθήκευση στα πλαίσια ενός συστήματος αδιάκοπης παροχής ισχύος, αν και τέτοιες εφαρμογές αναπτύσσονται. Μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και άλλο φορητό εξοπλισμό σε μεγέθη μικρού κομβίου και κυλινδρικού πρίσματος, ενώ στο άμεσο μέλλον προβλέπεται να εφαρμοστούν στα υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα. Οι μπαταρίες λιθίου διακρίνονται στις μπαταρίες ιόντος λιθίου (lithium-ion batteries, Li-ion) και τις μπαταρίες πολυμερούς λιθίου (lithium-polymer batteries). Συγκριτικά με τις μπαταρίες νικελίου – καδμίου (NiCd) και μολύβδου – οξέος, οι μπαταρίες λιθίου εμφανίζουν υψηλότερες ενεργειακές

πυκνότητες και ενεργειακές αποδόσεις, χαμηλότερα ποσοστά αυτό-εκφόρτισης, ενώ απαιτούν εξαιρετικά μικρή συντήρηση. Ειδικότερα, οι μπαταρίες ιόντος λιθίου, με ονομαστική τάση γύρω στα 3,7 Volt, έχουν ενεργειακές πυκνότητες που κυμαίνονται μεταξύ 80 και 150 Wh/kg, ενώ οι ενεργειακές πυκνότητες των μπαταριών πολυμερούς λιθίου είναι μεταξύ 100 και 150 Wh/kg. Και για τα δύο αυτά είδη μπαταριών λιθίου η ενεργειακή απόδοση κυμαίνεται από 90-100% (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).



Σχήμα 4.2

Σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης μπαταρίας ιόντος λιθίου των 100 kW.
(Πηγή: Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, “OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES”).

Στις μπαταρίες ιόντος – λιθίου, το ποσοστό αυτο-εκφόρτισης είναι πολύ χαμηλό (μέχρι 5 %/μήνα) και η διάρκεια ζωής τους μπορεί να ξεπεράσει τους 1500 κύκλους. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας ιόντος – λιθίου μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και σε πλήρεις εκφορτίσεις. Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που οι μπαταρίες ιόντος – λιθίου είναι ακατάλληλες για εφαρμογές “back-up”, όπου μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες ιόντος λιθίου είναι εύθραυστες και απαιτούν ένα κύκλωμα προστασίας για να διατηρηθούν σε ασφαλή λειτουργία. Τοποθετημένο σε κάθε συστοιχία ηλεκτρικών στοιχείων, το κύκλωμα ασφαλείας περιορίζει την τάση αιχμής κάθε στοιχείου κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αποτρέπει την υπερβολική μείωση της τάσης στην εκφόρτιση. Ακόμα, η θερμοκρασία του στοιχείου ελέγχεται ώστε η θερμοκρασία να μην λαμβάνει ακραίες τιμές. Το ρεύμα μέγιστης φόρτισης και εκφόρτισης ελέγχεται περιορίζεται επίσης στις περισσότερες συστοιχίες. Αυτές οι προφυλάξεις είναι απαραίτητες προκειμένου να εξαλειφθεί κάθε δυνατότητα μεταλλικής επιμετάλλωσης του λιθίου, η οποία προκαλείται λόγω υπερφόρτισης.

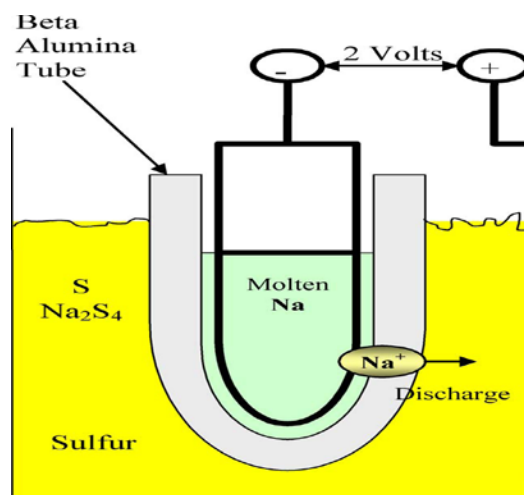
Όσον αφορά στις μπαταρίες πολυμερούς λιθίου, η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φθάσει τους 600 περίπου κύκλους. Το ποσοστό αυτό-εκφόρτισης εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και εκτιμάται γύρω στο 5% ανά μήνα. Συγκριτικά με τη μπαταρία ιόντος λιθίου, οι λειτουργικές προδιαγραφές των μπαταριών πολυμερούς λιθίου υπαγορεύουν ένα πολύ μικρότερο εύρος θερμοκρασιών, αποφεύγοντας τις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Εντούτοις, οι μπαταρίες πολυμερούς λιθίου είναι ελαφρύτερες και ασφαλέστερες, με ελάχιστο ποσοστό αυτό-ανάφλεξης.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών λιθίου είναι το υψηλό κόστος τους, το οποίο υπερβαίνει τα 420 €/kWh. Το υψηλό αυτό κόστος οφείλεται στα εσωτερικά κυκλώματα προστασίας. Πρόσφατα οι έρευνες επικεντρώνονται στη μείωση του κόστους αυτού του είδους των μπαταριών με χρήση φθηνότερων υλικών, καθώς και στην αύξηση της διάρκειας ζωής τους και τη μείωση της αναφλεξιμότητάς τους. Η αυτοκινητοβιομηχανία εργάζεται κυρίως προς αυτή την ανάπτυξη (*Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, "OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES"*).

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι οι μπαταρίες λιθίου έχουν περιορισμένη περιβαλλοντική επίδραση δεδομένου ότι τα οξείδια και τα άλατα του λιθίου μπορούν να ανακυκλωθούν.

4.4.2) Μπαταρίες νατρίου – θείου (Sodium Sulphur Batteries, NaS).

Η μπαταρία νατρίου – θείου (NaS) είναι ο πιο εξελιγμένος τύπος υψηλής θερμοκρασίας μπαταρίας. Χρησιμοποιεί υγρό (λιωμένο) θείο ως υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο και υγρό λιωμένο νάτριο για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα στερεό ηλεκτρολύτη από αλουμίνιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου του και να αντιδράσουν με το θείο σχηματίζοντας τα πολυσουλφίδια νατρίου.



Σχήμα 4.3

Δομή ηλεκτρικού στοιχείου NaS.

(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications").

Οι μπαταρίες NaS παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 150 – 240 Wh/kg. Ακόμα, η διάρκεια ζωής τους εκτιμάται στα 15 έτη (ή 2500-4500 κύκλοι), ενώ η ενεργειακή τους απόδοση φθάνει και το 90%. Οι μπαταρίες NaS μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια οικονομικά αποδεκτή διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης, η οποία χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό χρόνο εκφόρτισης. Τα ικανοποιητικά αυτά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους τις καθιστούν κατάλληλες για την αποθήκευση μεγάλου ποσού αιολικής ενέργειας. Μπορούν να τροφοδοτούν το σύστημα με υψηλό ποσό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή με μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Τέλος, όσον αφορά στην περιβαλλοντική «συμβατότητα» των μπαταριών NaS, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες από τη χρήση τους είναι περιορισμένες, δεδομένου ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται περιβαλλοντικά αδρανή υλικά. Εγκυμονεί βέβαια μικρός κίνδυνος

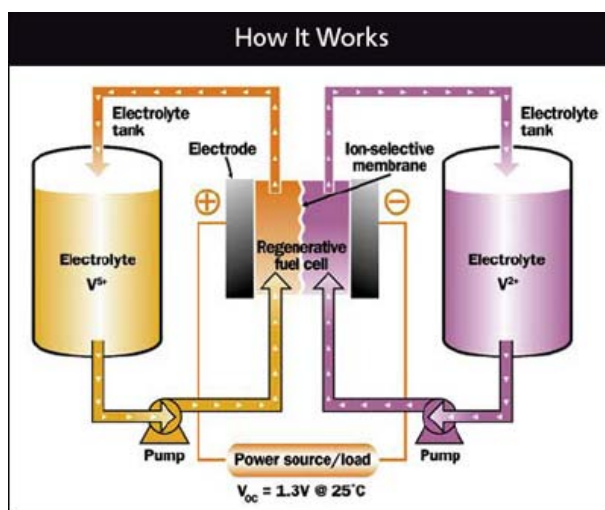
από τις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να λειτουργήσουν, προκειμένου να διατηρήσουν το θείο στη λιωμένη του μορφή (Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, "OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES").

Αυτήν την περίοδο, οι μπαταρίες νατρίου – θείου (NaS) χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος (να βελτιώσουν δηλαδή την ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου) ή σε εφαρμογές εξομάλυνσης αιχμών.

4.4.3) Μπαταρίες ροής (Flow Batteries).

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε μεγάλα συστήματα εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας η παραγωγή ενέργειας (προσφορά) πρέπει να βρίσκεται σε διαρκή ισορροπία με την κατανάλωση ενέργειας (ζήτηση). Για την πλήρη όμως αντιστοιχία προσφοράς-ζήτησης, απαιτείται η μεγάλης κλίμακας και μακράς διάρκειας αποθήκευση ενέργειας. Μια πολλά υποσχόμενη λύση αποτελούν οι μπαταρίες ροής.

Οι μπαταρίες ροής είναι κατάλληλες για αποθηκεύουν υψηλές ποσότητες ισχύος, κυμαινόμενες από 5 – 500 MW, για περιόδους διάρκειας από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 12 ώρες. Οι μπαταρίες αυτού του είδους αποθηκεύουν και αποδεσμεύουν την ενέργεια μέσω μιας αντίστροφης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών. Ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε χωριστές δεξαμενές, από τις οποίες ρέει μέσα σε σωλήνες, συγκρατώντας τη συναρμολόγηση των ηλεκτροδίων της μπαταρίας (Σχήμα 4.4). Αυτή η διάταξη διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους ογκομετρικούς περιορισμούς που τίθενται σχετικά με την ποσότητα του ηλεκτρολύτη που μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σύστημα, και ως εκ τούτου αυξάνει και την ποσότητα της ισχύος που μπορεί να αποθηκευτεί.



Σχήμα 4.4

Διάγραμμα μπαταρίας ροής.

(Πηγή: Dr. Chris Naish, Dr. Ian McCubbin, Mr. Oliver Edberg, Mr Michael Harfoot, "OUTLOOK OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES")

Η ηλεκτροχημική απελευθέρωση της ενέργειας εμφανίζεται όταν οι δύο διαφορετικές ενώσεις άλατος (ηλεκτρολύτες) φέρνονται κοντά η μία στην άλλη μέσα στην κυψέλη, χωριζόμενες από μία μεμβράνη διεξαγωγής ιόντων. Η ροή ρεύματος μέσω της μεμβράνης δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια και κατά συνέπεια ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτή ή ροή ρεύματος συνοδεύεται από

χημικές μεταβολές και στους δύο ηλεκτρολύτες. Αυτές οι μεταβολές αναιρούνται αν κατά τη διάρκεια του κύκλου επαναφόρτισης εφαρμοστεί εξωτερικά στα ηλεκτρόδια ένα αντίστροφο δυναμικό. Με αυτό τον τρόπο οι συνδεδεμένοι ηλεκτρολύτες επιστρέφουν στην αρχική ηλεκτροχημική τους κατάσταση (Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, “An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”).

Αυτή την περίοδο, τρεις μπαταρίες ροής που βρίσκονται στο τελευταίο στάδιο της ανάπτυξης είναι οι ψευδαργύρου/βρωμιδίου (zinc – bromine flow battery), οι οξειδοαναγωγής βαναδίου (vanadium redox batteries, VRB) και οι πολυσουλφιδίου βρωμιδίου (polysulphide bromide batteries, PSB). Από τα τρία αυτά είδη μπαταριών ροής, θα εστιάσουμε στη συνέχεια στις μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου.

Στο σύστημα ψευδαργύρου/βρωμιδίου χρησιμοποιείται ένας ρέοντας υδάτινος ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του ψευδαργύρου. Ο μεταλλικός ψευδάργυρος αποτίθεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το βρωμίδιο που παράγεται στο θετικό αποθηκεύεται σε εξωτερικές δεξαμενές (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”).

Η τεχνολογία των μπαταριών ψευδαργύρου/βρωμιδίου εμφανίζει πολλαπλά πλεονεκτήματα, όπως είναι το χαμηλό κόστος, η πολυ-συναρτησιακότητα, η ευκολία μεταφοράς, το χαμηλό βάρος και η ευέλικτη λειτουργία. Λόγω της χημικής φύσης των αντιδραστηρίων και των συνθηκών λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου, το περίβλημα και οι συνιστώσες μπορούν να κατασκευάζονται από χαμηλού κόστους και ελαφρά υλικά διαμορφώσιμου πλαστικού και άνθρακα.

Τα κύρια μειονεκτήματα των μπαταριών ψευδαργύρου/βρωμιδίου επικεντρώνονται γύρω από τις απαιτήσεις συντήρησης, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης των αντλιών που απαιτούνται για την κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη, και την κάπως χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση. Επίσης, ο ψευδάργυρος που επικάθεται κατά τη διαδικασία της φόρτισης πρέπει να αφαιρείται εντελώς περιοδικά.

Το πρώτο σύστημα βασιζόμενο στην τεχνολογία των μπαταριών ροής και συγκεκριμένα στις μπαταρίες πολυσουλφιδίου βρωμιδίου άρχισε να κατασκευάζεται στο Little Barford της Αγγλίας, μαζί με μια εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου, με στόχο την εξομάλυνση των φορτίων. Είχε προβλεφτεί να λειτουργήσει το 2003, αλλά λόγω ορισμένων καθυστερήσεων δεν λειτούργησε τελικά και το 2004 οι Regenesys σταμάτησαν την ανάπτυξη των μπαταριών τύπου πολυσουλφιδίου βρωμιδίου. Το σύστημα αυτό είχε δύο δεξαμενές 1800 m³ που περιείχαν υγρούς ηλεκτρολύτες πολυσουλφιδίων νατρίου και βρωμιδίων νατρίου. Είχε επίσης προγραμματιστεί χωρητικότητα των 120 MWh, με ισχύ αιχμής των 15 MW, διάρκεια ζωής 15 έτη και ενεργειακή απόδοση 60-65% με χρόνο εκφόρτισης λιγότερο από 100 ms. Επρόκειτο δηλαδή για τη μεγαλύτερη μπαταρία παγκοσμίως (Sérgio Faias, Patrícia Santos, Jorge Sousa, Rui Castro, “An Overview on Short and Long -Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”).

4.4.4 Μπαταρίες μετάλλου - αέρα (Metal – Air Batteries).

Οι μπαταρίες μετάλλου – αέρα είναι υπό συνεχή έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη ώστε να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες. Σε αυτές τις μπαταρίες, ως αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα, όπως είναι το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος ή ακόμη και σίδηρος, τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο ηλεκτρολύτη π.χ. από κάλιο, και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια κατά τη μετέπειτα αντίδραση οξειδωσης. Τα ηλεκτρόνια καθώς έλκονται από την κάθοδο καταλύτη και άνθρακα και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας.

Οι ενεργειακές πυκνότητες των μπαταριών μετάλλου αέρα είναι υψηλές (συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος) και κυμαίνονται μεταξύ 110-420 Wh/kg. Ακόμα, είναι από τις πιο φθηνές μπαταρίες και παρουσιάζουν περιβαλλοντική «συμβατότητα», αφού κανένα τοξικό υλικό δεν περιλαμβάνεται στην κατασκευή τους. Σημαντικό όμως μειονέκτημά τους είναι η δυσκολία τους να επαναφορτιστούν, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση της τάξης του 50%, καθώς και το ότι το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας τους είναι περιορισμένο.

4.5) Σύγκριση των διαφόρων τύπων μπαταριών.

Μετά την ανάλυση των διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης μπαταριών, θα προσπαθήσουμε να προβούμε σε μία σύγκριση μεταξύ των διατάξεων αυτών με βάση τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Για το σκοπό αυτό, στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος μπαταριών, επειδή είναι φθηνές και ευρέως διαθέσιμες. Είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μπαταρίες σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Από την άλλη, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται σε ψυχρά κλίμακα, όπως είναι οι πολικές περιοχές, λόγω της δυνατότητας λειτουργίας τους και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Εφαρμόζονται εξίσου καλά με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος σε εφαρμογές ΑΠΕ, καθώς λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και μπορούν να αποφορτίζονται έως και κάτω από το 10% της ονομαστικής τους χωρητικότητας, είναι όμως πιο ακριβές και έτσι χρησιμοποιούνται μόνο όταν αναμένεται υψηλή αξιοπιστία ή αντίξοες κλιματικές συνθήκες. Η διάδοση των μπαταριών νικελίου, όπως και των υπόλοιπων τύπων μπαταριών (λιθίου, ψευδαργύρου/βρωμιδίου, θείου-νατρίου, μετάλλου-αέρα) είναι περιορισμένη, καθώς οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης.

Οι μπαταρίες λιθίου παρουσιάζουν τις υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις (90-100%) από τους υπόλοιπους τύπους μπαταριών. Είναι ο μοναδικός τύπος μπαταριών που μπορεί να εκφορτιστεί πλήρως και για αυτό το λόγο είναι οι πιο κατάλληλες μπαταρίες για εφαρμογές “back-up”. Ακολουθούν κατά σειρά, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος με ενεργειακές αποδόσεις 60-95%, οι νικελίου με 60-91%, οι νατρίου-θείου με 90% και οι ψευδαργύρου/βρωμιδίου με 75%. Τη μικρότερη ενεργειακή απόδοση παρουσιάζουν οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα (~50%), εξαιτίας της δυσκολίας επαναφόρτισής τους. Όσον αφορά στις ενεργειακές πυκνότητες, οι μπαταρίες μετάλλου αέρα παρουσιάζουν τις υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες, οι οποίες κυμαίνονται από 110-420 Wh/kg. Ακολουθούν οι νατρίου-θείου με 150-240 Wh/kg, οι λιθίου με 80-150 Wh/kg, οι νικελίου με 20-120 Wh/kg και τέλος οι μολύβδου-οξέος και οι ψευδαργύρου/βρωμιδίου με 25-45 Wh/kg και 37 Wh/kg αντίστοιχα.

Συγκριτικά με τα άλλα είδη μπαταριών, οι μπαταρίες ροής έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν υψηλότερες ποσότητες ισχύος, οι οποίες κυμαίνονται από 5 – 500 MW για περιόδους διάρκειας από 1 δευτερόλεπτο μέχρι 12 ώρες. Η διάταξη αυτού του είδους μπαταριών διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό τους ογκομετρικούς περιορισμούς που τίθενται σχετικά με την ποσότητα του ηλεκτρολύτη που μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σύστημα, αυξάνοντας έτσι την ποσότητα της ισχύος που μπορεί να αποθηκευτεί. Οι μπαταρίες νατρίου-θείου έχουν επίσης τη δυνατότητα να τροφοδοτούν το σύστημα με υψηλό ποσοστό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή με μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, ενώ παράλληλα είναι κατάλληλες για την αποθήκευση μεγάλου ποσού αιολικής ενέργειας. Αντίθετα, η ισχύς των συστημάτων π.χ. με μπαταρίες λιθίου – ιόντος κυμαίνεται συνήθως από 1 ως 100kW, με μπαταρίες νικελίου – καδμίου από 1kW ως 5MW και με μπαταρίες μολύβδου - οξέως από 1kW ως 10MW. Τόσο οι μπαταρίες ιόντος λιθίου όσο και οι

μπαταρίες μολύβδου-οξέος και νικελίου-καδμίου απαιτούν αρκετά λεπτά για να εκφορτιστούν.

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η διάρκεια ζωής κάθε τύπου μπαταριών είναι ισάξια. Εντούτοις, σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας μια κυψέλη νικελίου-καδμίου διαρκεί περισσότερο αφενός γιατί δεν διαβρώνονται εύκολα οι πλάκες της και αφετέρου γιατί δεν αντιμετωπίζει το φαινόμενο της θείωσης και της διαστρωμάτωσης. Όσον αφορά όμως στον αριθμό των κύκλων επαναφόρτισης, οι μπαταρίες νατρίου-θείου εμφανίζουν τον μεγαλύτερο αριθμό κύκλων επαναφόρτισης, οποίος κυμαίνεται από 2.500 - 4.500 κύκλους. Ακολουθούν οι μπαταρίες νικελίου και μολύβδου οξέος με αριθμό κύκλων επαναφόρτισης 1.000 – 2.000 κύκλους και 300 – 1.500 κύκλους αντίστοιχα. Μικρό αριθμό κύκλων επαναφόρτισης παρουσιάζουν οι μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου, που είναι περίπου 500 κύκλοι.

Με κριτήριο το κόστος ανά μονάδα ενέργειας, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παρουσιάζουν το χαμηλότερο κόστος, που ανέρχεται σε 50-150 €/kWh. Από την άλλη, οι μπαταρίες νικελίου είναι οι αρκετά δαπανηρές, με κυμαινόμενο κόστος από 200 έως και 750 €/kWh. Υψηλό κόστος της τάξης των 150-250 €/kWh, παρουσιάζουν όμως και οι μπαταρίες λιθίου, λόγω των εσωτερικών κυκλωμάτων προστασίας που απαιτούν.

Τέλος, όσον αφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι μπαταρίες μετάλλου αέρα είναι περισσότερο περιβαλλοντικά «συμβατές» από τα υπόλοιπα είδη μπαταριών, αφού κανένα τοξικό υλικό δεν περιλαμβάνεται στην κατασκευή τους. Αντίθετα, στα υπόλοιπα είδη μπαταριών τα υλικά κατασκευής τους απαιτούν ανακύκλωση, ενώ χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η μπαταρία νικελίου-καδμίου περιέχει το υπερβολικά τοξικό κάδμιο.

Πίνακας 4.1
Διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών
και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

(Πολλαπλές πηγές: US Department of Energy (EERE 2006), The INVESTIRE network (INVESTIRE, 2003), Energy Storage Association (ESA, 2007), UK Department of Trade and Industry (DTi, 2004 και DTi, 2006), Baxter (2006))

Χαρακτηριστικά	Διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών					
	Νικελίου	Λιθίου	Μολύβδου-Οξέος	Ψευδαργύρου/βρωμιδίου	Μετάλλου - Αέρα	Νατρίου-Θείου
Ενεργειακή Πυκνότητα (Energy Density)	20-120 Wh/kg	80-150 Wh/kg	25-45 Wh/kg	37 Wh/kg	110-420 Wh/kg	150-240 Wh/kg
Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency)	60-91%	90-100%	60-95%	75%	~50%	90%
Αριθμός κύκλων επαναφόρτισης (cycles)	1.000-2.000 κύκλοι	600-1.500 κύκλοι	300-1.500 κύκλοι	500 κύκλοι	-	2.500-4.500 κύκλοι
Κόστος (Cost)	200-750 €/kWh	150-250 €/kWh (υψηλή ενέργεια, βιομηχανική εφαρμογή)	50-150 €/kWh	-	-	170 €/kWh
Ανάπτυξη	διαθέσιμες	διαθέσιμες	διαθέσιμες	αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης	αναπτυσσόμενες	διαθέσιμες
Διάδοση	περιορισμένη	αυξανόμενη για μικρής κλίμακας εφαρμογές	διαδεδομένες	περιορισμένη	περιορισμένη	περιορισμένη
Πλεονεκτήματα	υψηλές πυκνότητες ενέργειας και ισχύος, καλή απόδοση	υψηλές πυκνότητες ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	χαμηλό κόστος	υψηλή χωρητικότητα	υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, χαμηλό κόστος, περιβαλλοντική «συμβατότητα»	υψηλές πυκνότητες ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση
Μειονεκτήματα	NiCd: το κάδμιο είναι αρκετά τοξικό, οι NiMH, NiZn απαιτούν ανακύκλωση	υψηλό κόστος, απαιτείται ανακύκλωση των υλικών	ο μολύβδος απαιτεί ανακύκλωση	χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα	χαμηλή ενεργειακή απόδοση	υψηλά κόστη, το Na απαιτεί ανακύκλωση
Καταλληλότητα για εφαρμογές ενεργειακής διαχείρισης	✓✓	✓	✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Καταλληλότητα για εφαρμογές ποιότητας ισχύος	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓
Καταλληλότητα για εφαρμογές μεταφοράς	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	-	✓	✓

✓✓✓ κατάλληλο

✓✓ μερικώς κατάλληλο

✓ περιορισμένα κατάλληλο

4.6) Διαστασιολόγηση μπαταριών σε εφαρμογές ΑΠΕ.

Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις στη διαστασιολόγηση των μπαταριών σε εφαρμογές ΑΠΕ (ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”):

- Σε αυτόνομες εφαρμογές, μερικοί υπεύθυνοι ανάπτυξης συστημάτων έχουν διαστασιολογήσει τις μπαταρίες ώστε να παρέχουν υποστήριξη 3 έως 7 ημερών.
- Σε διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εφαρμογές, η στρατηγική διαστασιολόγησης εξαρτάται αφενός από τις χρήσεις του συστήματος και αφετέρου από τα τιμολόγια της τοπικής εταιρείας ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα, στις εφαρμογές ποιότητας ισχύος απαιτούνται μπαταρίες διαστασιολογημένες ώστε να παρέχουν σχεδόν στιγμιαίες εκφορτίσεις πλήρους ισχύος για μόνο 15 λεπτά υποστήριξης. Από την άλλη, μια εφαρμογή εξομάλυνσης αιχμών για ένα σύστημα ΑΠΕ μπορεί να απαιτεί από την μπαταρία της ενίσχυση της παραγωγής της γεννήτριας ώστε να ανταποκρίνεται στα φορτία αιχμής για 1-2 ώρες ημερησίως. Εάν δεν είναι σημαντική η διαφορά μεταξύ της κοστολόγησης του ηλεκτρισμού εντός και εκτός των ωρών αιχμής, τότε η μπαταρία μπορεί να διαστασιολογηθεί για μία ώρα λειτουργίας και, όταν δεν είναι διαθέσιμη η μονάδα ΑΠΕ, ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης μπορεί να αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο. Πάντως, σε περίπτωση σημαντικής διαφοράς μεταξύ των εντός και εκτός αιχμής τιμολογίων, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μιας οικονομικής ανάλυσης για να καθοριστεί το βέλτιστο μέγεθος του συστήματος μπαταριών.

Διάφοροι υπεύθυνοι βελτιστοποιούν την εγκατάσταση ΑΠΕ, αλλά όχι το σύστημα των μπαταριών, επιλέγοντας 7-10 ώρες υποστήριξης με μπαταρίες στις περιπτώσεις διακοπής της λειτουργίας. Σε πληθώρα περιπτώσεων, οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ απαιτούν μόνο ελάχιστη υποστήριξη από μπαταρίες ώστε να προστεθεί αξία στην παραγόμενη από ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια. Όταν το σύστημα μετάδοσης έχει μεγάλο φορτίο, οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν την ανανεώσιμη ενέργεια που θα χανόταν κατά τις ώρες στις οποίες περιορίζεται η υπηρεσία μετάδοσης, αποδίδοντας αργότερα την ηλεκτρική ενέργεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

5.1) Αρχή αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας – Η υδραυλική ενέργεια στην Ελλάδα.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από τη μετακίνηση του γλυκού νερού από τους ποταμούς και τις λίμνες. Το νερό αυτό διαθέτει δυνητική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή του νερού, η οποία επιδιώκεται να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια μέσω του υδροστροβίλου, είναι ανανεώσιμη καθώς προέρχεται από μία φάση του υδρολογικού κύκλου, τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις). Κινητήρια δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η δράση του ήλιου, οπότε συνεπάγεται ότι η υδραυλική ενέργεια προέρχεται και αυτή από την ηλιακή ενέργεια.

Στο σχήμα 5.1 που ακολουθεί, δίνεται η σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.



Σχήμα 5.1
Ο υδρολογικός κύκλος.
(Πηγή: <http://ga.water.usgs.gov/edu/wcpagesize/greek.html>)

Μέρος της ποσότητας του νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις και την τήξη των χιονιών σε μια υδρολογική λεκάνη αποτελεί το επιφανειακό νερό των ποταμών και υδατορευμάτων γενικότερα. Το νερό αυτό, χάρη στη βαρύτητα, ρέει συνεχώς προς χαμηλότερες στάθμες μέχρι να καταλήξει στη στάθμη της θάλασσας. Κατά την φυσική αυτή ροή στην κοίτη του υδατορεύματος, η δυνητική ενέργεια του νερού συνεχώς υποβαθμίζεται και μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω μηχανισμών υδραυλικών απωλειών, τύρβης και μεταφοράς υλικών. Εάν το νερό μιας φυσικής ροής συλλεγεί σε μια υψηλότερη στάθμη Z_E , οδηγηθεί σε μια χαμηλότερη στάθμη Z_A , αφού διέλθει μέσω ενός υδροστροβίλου γίνεται δυνατή η μετατροπή της ανά μονάδα μάζας ενέργεια:

$$g \cdot (Z_E - Z_A)$$

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

Επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια, δηλαδή κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο, δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας, κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Για το λόγο αυτό, το σύνολο των έργων και του εξοπλισμού μέσω των οποίων η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι”).

Η υδροηλεκτρική ενέργεια ξεκίνησε να εφαρμόζεται σε υδροηλεκτρικά έργα (ΥΗΕ) μεγάλης κλίμακας από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Οι πρώτες σύγχρονες υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις χτίστηκαν το 1882 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτές οι πρώτες εγκαταστάσεις χρησιμοποίησαν έναν γρήγορα ρέοντα ποταμό ως πηγή ενέργειας. Μερικά έτη αργότερα, άρχισαν να χρησιμοποιούνται τα φράγματα ως τεχνητές περιοχές αποθήκευσης ύδατος στις καταλληλότερες θέσεις. Αυτά τα φράγματα ελέγχουν επίσης το ποσοστό ροής του νερού στους στροβίλους των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Αρχικά, οι σταθμοί υδροηλεκτρικής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ήταν μικρής κλίμακας και ιδρύονταν δίπλα σε καταρράκτες κοντά στις πόλεις καθώς δεν ήταν δυνατό, εκείνη την περίοδο, να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Πλέον, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις είναι εφικτή, με αποτέλεσμα να έχει υπάρξει μεγάλη κλίμακας χρήση της υδροηλεκτρικής δύναμης καθιστώντας την οικονομικά βιώσιμη. Η μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιείται με τη βοήθεια της υψηλής τάσης σε εναέρια ηλεκτροφόρα καλώδια αποκαλούμενα γραμμές μετάδοσης. Την τελευταία δεκαετία οι τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν τη μαζική εμπορική αξιοποίηση και της αιολικής ενέργειας.

α) Μειονεκτήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας:

Στα μειονεκτήματα της υδροηλεκτρικής ενέργειας συγκαταλέγονται:

- ✓ Η σημαντική αρχική επένδυση που προϋποθέτει, λόγω των μεγάλης κλίμακας έργων.
- ✓ Οι σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη δημιουργία τεχνητής λίμνης και την κατάκλυση μεγάλων εκτάσεων, τη διακοπή της συνέχειας του ποτάμιου οικοσυστήματος και τη διακοπή της τροφοδοσίας των κατάντη εκτάσεων με φερτές ύλες.

β) Πλεονεκτήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας:

Τα πλεονεκτήματα της υδροηλεκτρικής ενέργειας υπεραντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα στο πλείστο των περιπτώσεων. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται:

- ✓ Αποτελεί καθαρή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μηδενικό κόστος καυσίμου και μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- ✓ Είναι εγχώρια πηγή ενέργειας και συνεισφέρει στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, σε εθνικό επίπεδο.

- ✓ Είναι διάσπαρτη γεωγραφικά και οδηγεί στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, αλλά δίνει και τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης τοπικών ενεργειακών πόρων.
- ✓ Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη δημιουργία λιμνών και νέων οικοσυστημάτων.
- ✓ Μπορεί να αποτελέσει πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών, καθώς και να συμβάλλει στην τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση σχετικών επενδύσεων.
- ✓ Δεν παράγει ατμοσφαιρικούς ρύπους και θόρυβο (παρά μόνο μικρής έντασης και χρονικής διάρκειας στη φάση των κατασκευών).
- ✓ Η ευελιξία των μονάδων ενεργειακής μετατροπής που επιτρέπουν την προσαρμογή της παραγωγής στις απαιτήσεις της κατανάλωσης.
- ✓ Η προστασία από πλημμύρες των κατάντη περιοχών και η ρύθμιση των εισροών που επιτρέπει την αξιοποίηση του νερού και για άλλες επιπρόσθετες χρήσεις

Κατά συνέπεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια εναρμονίζεται με την αρχή της αειφορίας. Από τα παραπάνω πλεονεκτήματα εκείνο που δίνει τη μεγαλύτερη ενεργειακή και οικονομική σημασία στην υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ευελιξία των μονάδων ενεργειακής μετατροπής. Σε λιγότερο από ένα λεπτό μια τέτοια μονάδα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και να αναλάβει πλήρες φορτίο, κάτι που τη διαφοροποιεί σημαντικά από τις άκαμπτες λιγνιτικές μονάδες, για παράδειγμα. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης και της προσδίδει έτσι περίπου διπλάσια οικονομική αξία, σε σχέση με τη συμβατική θερμική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, η αξιοπιστία του όλου ενεργειακού συστήματος της χώρας βασίζεται κατά πολύ στις υδροηλεκτρικές μονάδες. Βέβαια, απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει αξιοπιστία αυτού του τύπου είναι η διαθεσιμότητα μεγάλου όγκου ταμίευσης νερού, ώστε να μπορεί να λειτουργούν οι μονάδες παραγωγής τις ώρες ακριβώς που χρειάζονται, ενώ τις υπόλοιπες ώρες οι εισροές νερού αποθηκεύονται προσωρινά. Η προϋπόθεση αυτή ικανοποιείται πάντα στα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, όχι όμως και στα μικρά που δεν περιλαμβάνουν ταμιευτήρα (*Κουτσογιάννης Δημήτρης, 2007*).

Η υδραυλική ενέργεια στην Ελλάδα:

Λόγω του ευνοϊκού τοπογραφικού ανάγλυφου, η Ελλάδα διαθέτει σημαντικό υδροδυναμικό, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου συγκεντρώνεται στο δυτικό και βόρειο τμήμα της, όπου βρίσκονται οι μεγάλοι ποταμοί Αχελώος, Άραχθος, Αώος, Αλιάκμονας και Νέστος. Παρόλα αυτά, μικρό μέρος του δυναμικού αυτού αξιοποιείται. Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες εξάντλησαν σε μεγάλο ποσοστό την ανάπτυξη του υδροδυναμικού τους και κατά συνέπεια η ηλεκτροπαραγωγή από μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα δεν αναμένεται να συμβάλλει ουσιαστικά στην υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Η Ελλάδα αποτελεί εξαίρεση: μόνο το ένα τρίτο του οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού χρησιμοποιείται ή βρίσκεται υπό αξιοποίηση. Διαθέτει επομένως η χώρα σοβαρά ανεκμετάλλευτα αποθέματα εγχώριων, καθαρών και ανανεώσιμων υδατικών ενεργειακών πηγών, για την αξιοποίηση των οποίων υπάρχει και όλη η απαιτούμενη εγχώρια τεχνογνωσία και η κατασκευαστική υποδομή (*Ξανθόπουλος, 1996*).

Μέχρι σήμερα η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) έχει αξιοποιήσει το 40% του ετήσιου οικονομικά εκμεταλλεύσιμου υδροδυναμικού της χώρας, το οποίο ανέρχεται σε 12 TWh, καλύπτοντας το 10% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (*Κουτσογιάννης, 2007*). Είναι αρκετά χαρακτηριστικό ότι σύμφωνα με τα στοιχεία της EUROSTAT, κατά το 2004 η Ελλάδα μπήκε στη "δεκάδα" των χωρών της

Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) με το μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό δυναμικό. Αυτή η "διάκριση" επιτεύχθηκε μέσα από μια εντυπωσιακή αύξηση κατά 104% στην περίοδο 1993-2004, έναντι μιας συγκρατημένης ανόδου κατά 4,6% για το σύνολο του υδροηλεκτρικού δυναμικού των εικοσιπέντε χωρών της ΕΕ στο ίδιο διάστημα.

Σήμερα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς όλων των σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ ανέρχεται σε 12.276 MW, από τα οποία μόνο οι 3.054 MW είναι η ισχύς των εν λειτουργία υδροηλεκτρικών σταθμών. Η συνολική καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 52,9 TWh, από τα οποία μόνο 5,4 TWh εξασφαλίσθηκαν από την υδροηλεκτρική παραγωγή (Διεθνές Συνέδριο HYDRO 2006 - MAXIMIZING THE BENEFITS OF HYDROPOWER).

Τα σημαντικά υδροηλεκτρικά έργα που βρίσκονται σε λειτουργία καταγράφονται στον Πίνακα 5.1 κατά ποταμό. Άλλα έξι έργα αναμένεται να λειτουργήσουν μέχρι το 2010.

Πίνακας 5.1.
Μεγάλα Υδροηλεκτρικά Έργα σε Λειτουργία.
(Πηγή: Δημήτρης Κουτσογιάννης, <http://www.itia.ntua.gr/dk>)

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

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

** Εκτροπή Αώου προς Άραχθο.

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

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

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, στην Ελλάδα υπάρχουν σήμερα δύο αναστρέψιμοι σταθμοί:

- ✓ Ασώματα – Σφηκιά (Ποταμός Αλιάκμονας).
- ✓ Πλατανόβρυση – Θησαυρός (Ποταμός Νέστος).

Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των δύο αναστρέψιμων αυτών σταθμών (ΔΕΗ, “Ημέρα νερού”):

Ασώματα – Σφηκιά (Ποταμός Αλιάκμονας):

Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) Σφηκιάς είναι εξοπλισμένος με τρεις αναστρέψιμες μονάδες εγκατεστημένης ισχύος 105 MW η καθεμία, ενώ η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα του είναι 20,0 εκ. m³. Η λειτουργία των στροβίλων αναστρέφεται, όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο, ώστε τη νύχτα να μπορούν να αντλούν νερό από την κατάντη λίμνη Ασωμάτων, όταν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από τους λιγνιτικούς σταθμούς και να την αποδίδουν την ημέρα υπό συμφερότερους όρους.

Ο ταμιευτήρας των Ασωμάτων έχει ωφέλιμη χωρητικότητα 14 εκ. m³, εφοδιάζει, όπως αναφέρθηκε, με νερό τον αντλητικό σταθμό του ΥΗΣ Σφηκιάς και ικανοποιεί τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του ΥΗΣ Ασωμάτων ανέρχεται σε 108 MW.



(α)



(β)

Σχήμα 5.2

(α) ΥΗΣ Σφηκιάς στον Αλιάκμονα
(β) Αναστρέψιμες μονάδες.

(Πηγές: www.dei.gr/Documents/imera.nerou.pdf,
www.dei.gr/Documents/EnergyTec%202006-triantafillis.pdf)

Πλατανόβρυση – Θησαυρός (Ποταμός Νέστος):

Στον ποταμό Νέστο έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν τα δύο φράγματα του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης.

Ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός (ΥΗΣ) Θησαυρού είναι αναστρέψιμος σταθμός με λειτουργία ως αντλητικός το βράδυ, ανεβάζοντας το νερό του ταμιευτήρα Πλατανόβρυσης στον ταμιευτήρα Θησαυρού. Ο ταμιευτήρας του ΥΗΣ Θησαυρού είναι ωφέλιμης χωρητικότητας 680 εκ. m³. Είναι έργο εξοπλισμένο με τρεις αναστρέψιμες μονάδες, τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 128 MW η καθεμία και παράγει περί τις 755 GWh ετησίως.

Ο ταμιευτήρας του ΥΗΣ Πλατανόβρυσης, με ωφέλιμη χωρητικότητα 12 εκ. m³, λειτουργεί τόσο για την παραγωγή ενέργειας όσο και ως κατάντη ταμιευτήρας για το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό έργο του Θησαυρού. Ο σταθμός διαθέτει 2 μονάδες τύπου Francis κατακόρυφου άξονα, εγκατεστημένης ισχύος 58 MW η καθεμία, που παράγουν συνολικά ετήσια ενέργεια της τάξης των 240 GWh.



(α)



(β)

Σχήμα 5.3
(α) ΥΗΣ Θησαυρού στο Νέστο.
(β) Αναστρέψιμες Μονάδες.

(Πηγές: www.dei.gr/imeria.herou.pdf
www.dei.gr/EnergyTec%202006-triantafillis.pdf)

5.2) Συστήματα αντλησιοταμίευσης.

5.2.1) Εισαγωγή.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η ποσότητα της ισχύος που παράγεται από τις διατάξεις των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Η διακύμανση αυτή σημαίνει ότι η ισχύς μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ισχύος. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη της αποθήκευσης της ενέργειας για μικρά έως μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Σήμερα, η μόνη αξιόπιστη λύση αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα παρέχεται από τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και κυρίως από τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα, των οποίων οι μονάδες μετατροπής ενέργειας είναι αντιστρεπτές, δηλαδή μπορούν να λειτουργούν είτε ως στρόβιλοι (φάση παραγωγής) είτε ως αντλίες (φάση αποθήκευσης).

5.2.2) Περιγραφή συστήματος αντλιοσταμίου – Το δίλημμα της σωλήνωσης.

Ένα τυπικό σύστημα αντλιοσταμίου αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

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

Σε ένα σύστημα αντλιοσταμίου διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών. (Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμιοτήρων”)

▶ Μονή σωλήνωση:

Η περίπτωση της μονής σωλήνωσης εμφανίζει ασφαλώς το πλεονέκτημα της πιο οικονομικής λύσης, δεδομένου ότι μειώνονται τα έξοδα της εγκατάστασης. Ωστόσο, θέτει περιορισμό ως προς τη λειτουργία, δεδομένου ότι δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου με τις αντλίες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται να καθοριστεί αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας ο στρόβιλος ή οι αντλίες.

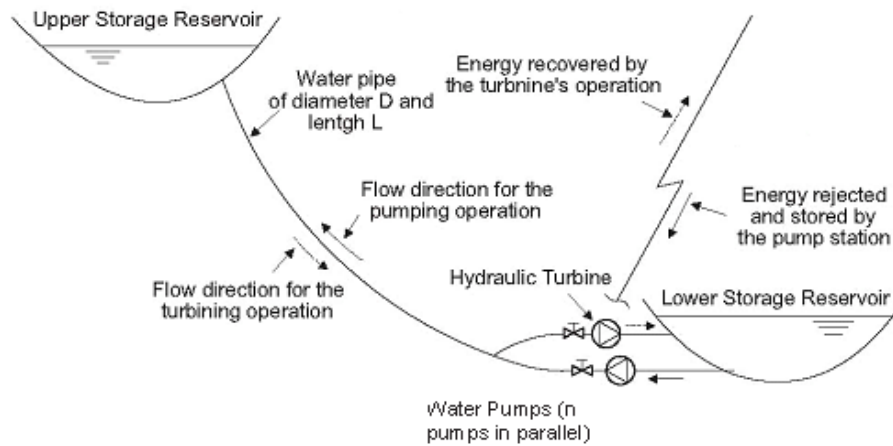
Προτεραιότητα στις αντλίες:

Στην περίπτωση που υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες (συμβατικές ή πυρηνικές) ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως (κατά τον ρου του ποταμού) είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, προτεραιότητα στη λειτουργία έχουν οι αντλίες. Σε αυτήν την περίπτωση, η παραγωγή της ενέργειας από τον στρόβιλο μπορεί να γίνει μονάχα τις ώρες που δεν γίνεται άντληση, δηλαδή τις ώρες που δεν υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα τις μεταμεσονύκτιες ώρες ή τις αργίες, που η ζήτηση είναι χαμηλή.

Προτεραιότητα στο στρόβιλο:

Στην περίπτωση που υπάρχουν διαστήματα που συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή των μονάδων βάσεως, τότε προτεραιότητα λειτουργίας έχει ο στρόβιλος έναντι των αντλιών. Αυτό συμβαίνει κυρίως τις ώρες αιχμής. Σε αυτήν την περίπτωση, ενδεχομένως να συμβεί να υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς και να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση λόγω λειτουργίας του στροβίλου.

Στο Σχήμα 5.4 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά ένα υδροηλεκτρικό σύστημα με μονή σωλήνωση.



Σχήμα 5.4

Υδροηλεκτρικό σύστημα με μονή σωλήνωση.

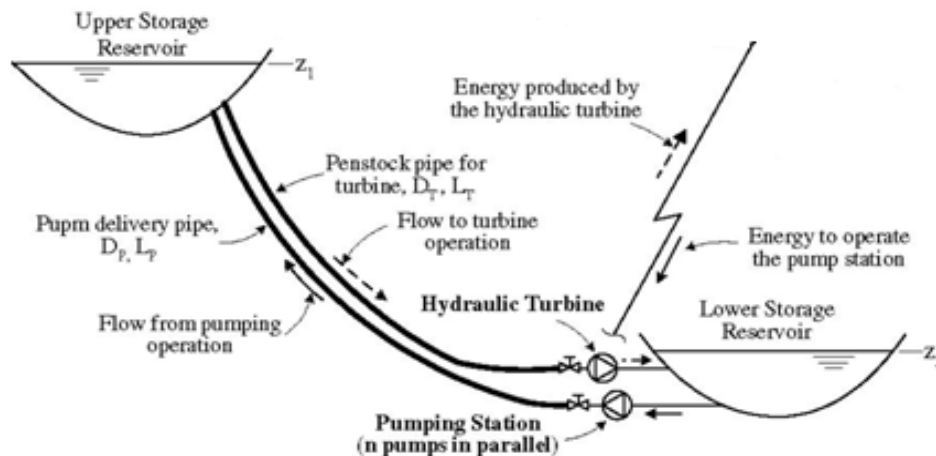
(Πηγή: Ιωάννης Δ. Σπύρου, "Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση")

► Διπλή σωλήνωση:

Θα μπορούσε να σκεφτεί κανείς ότι η διπλή σωλήνωση είναι περιττή, δεδομένου ότι εάν υπάρχει ανάγκης παραγωγής ενέργειας από το στρόβιλο και ταυτόχρονα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς από τις θερμικές μονάδες ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως, τότε θα μπορούσε να απορροφηθεί απευθείας περισσότερη ενέργεια από τις μονάδες αυτές. Ο συλλογισμός αυτός είναι εσφαλμένος, λόγω των περιορισμών του δικτύου. Η άμεση δηλαδή απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης από το δίκτυο ενέργειας.

Παράλληλα, η χρονική κατανομή της απορριπτόμενης ισχύος δείχνει ότι η περικοπή καθορίζεται πρώτα από τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και δεύτερον από τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, από τη μια υπάρχει περικοπή ισχύος και απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος, από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (π.χ. λόγω υψηλής ζήτησης). Εάν λειτουργεί η αντλία, θα απαιτηθεί χρόνος μέχρι να σταματήσει και να ξεκινήσει ο στρόβιλος, οπότε το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης απόκρισης του στροβίλου χάνεται.

Στο Σχήμα 5.5 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά ένα τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης με διπλή σωλήνωση.



Σχήμα 5.5

Τυπικό σύστημα αντλιοσταμείωσης με διπλή σωλήνωση.

(Πηγή: Ιωάννης Δ. Σπύρου, “Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλιοσταμείωση”)

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

► Μονή σωλήνωση με σύνθετη λειτουργία:

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης. Πρόκειται για μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλιοσταμείωσης, το λεγόμενο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Αυτή η προτεινόμενη λύση εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικότερη χωρίς να υστερεί λειτουργικά και θα παρουσιασθεί λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ανεξάρτητα των σχεδιαστικών εκδοχών που υιοθετούνται κάθε φορά σε ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης, οι μονάδες του συστήματος (αντλία – υδροστρόβιλος – ηλεκτρική μηχανή) τοποθετούνται σε στάθμη χαμηλότερη από αυτή της κατώτερης δεξαμενής για την αποφυγή εισροής αέρα, κάτι όμως που απαιτεί μεγάλο όγκο εκσκαφών. Επιπρόσθετα, οι μονάδες αυτές μπορούν να απομονωθούν από τις δύο δεξαμενές, μέσω βανών που τοποθετούνται στους αγωγούς κατάθλιψης και αναρρόφησης.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, θα έλεγε κανείς ότι ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης αποτελεί ένα συνδυασμό αντλητικής εγκατάστασης (αποταμίευσης ενέργειας) και υδροηλεκτρικού έργου (παραγωγή ενέργειας). Παρακάτω θα γίνει αναφορά για κάθε μέρος του τυπικού συστήματος ξεχωριστά και θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

5.2.2.1) Αντλίες.

Εισαγωγή.

Οι αντλίες αποτελούν μια κατηγορία στροβιλομηχανών και ειδικότερα ανήκουν στις εργοστροβιλομηχανές και ορίζονται ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας (η οποία προσδίδεται από έναν κινητήρα στη στρεφόμενη άτρακτο και από αυτήν στην πτερωτή) σε ενέργεια ρευστού.

Σκοπός των αντλιών είναι η διακίνηση υγρών από μια δεξαμενή σε μια άλλη που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συνήθως στάθμη. Οι αντλίες προσδίδουν ενέργεια στο υγρό η οποία αντιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του υγρού μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής και στην ενέργεια που δαπανάται λόγω υδραυλικών απωλειών στη σωλήνωση μέσω της οποίας γίνεται η διακίνηση του υγρού.

Διαμόρφωση αντλιών.

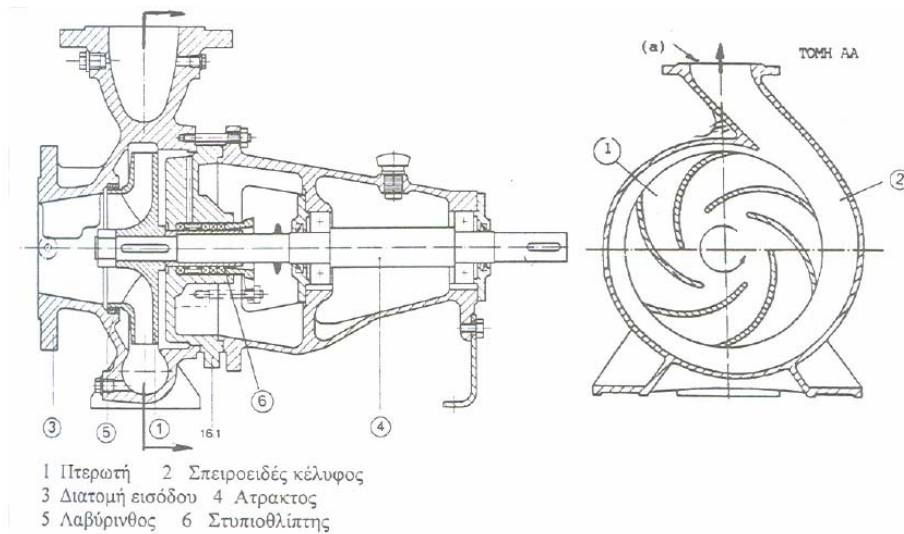
Τα κύρια μέρη μιας αντλίας είναι:

- ✓ Η πτερωτή, ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής, στο οποίο λαμβάνει χώρα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού.
- ✓ Το τμήμα εισόδου, που εξασφαλίζει την οδήγηση του ρευστού από τη διατομή εισόδου της μηχανής μέχρι τη διατομή εισόδου της πτερωτής.
- ✓ Το τμήμα εξόδου, ρόλος του οποίου είναι η συλλογή του ρευστού που εξέρχεται από την πτερωτή και η οδήγηση στην διατομή εξόδου της πτερωτής.

Για να είναι δυνατή η λειτουργία της μηχανής θα πρέπει να υπάρχουν και άλλα τμήματα, τα οποία εξασφαλίζουν τη λειτουργία και τη συνεργασία των κύριων τμημάτων, όπως το εξωτερικό κέλυφος με το οποίο συνδέονται τα υπόλοιπα τμήματα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα της μηχανής, η μεταφορά δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται σε αυτά, η στρεφόμενη άτρακτος μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της μηχανικής ροπής, τα έδρανα της άτρακτου, ο μηχανισμός στεγανότητας (στυθιοθλίπτες) κτλ..

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

Στο Σχήμα 5.6 δίνεται σχηματικά η διαμόρφωση τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την πτερωτή σε πρόβολο.



Σχήμα 5.6

Διαμόρφωση τυπικής φυγόκεντρης αντλίας με την πτερωτή σε πρόβολο.
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”)

Η ροή της ενέργειας.

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια H που παραλαμβάνει το υγρό από την αντλία, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης υγρού (mΣΥ), ονομάζεται πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας, και έτσι ορίζεται ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της μονάδας μάζας του υγρού, εκφρασμένη σε μονάδες ύψους στήλης υγρού, μεταξύ της διατομής κατάθλιψης και της διατομής αναρρόφησης, δηλαδή:

$$H = H_{oa} - H_{oe} = \frac{c_a^2}{2g} + \frac{P_a}{\rho g} + z_a - \left(\frac{c_e^2}{2g} + \frac{P_e}{\rho g} + z_e \right) \quad (5.1)$$

Όπου με e συμβολίζεται η συμβατική διατομή εισόδου (διατομή αναρρόφησης) της αντλίας και με a η συμβατική διατομή εξόδου (διατομή κατάθλιψης), ενώ με c συμβολίζεται το μέτρο της απόλυτης ταχύτητας (κινητική ενέργεια) του υγρού, με p η στατική του πίεση (ενέργεια εντατικής κατάστασης) και με z το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία στάθμη αναφοράς (δυναμική ενέργεια) στη συγκεκριμένη θέση (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”).

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

$$N_i = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (5.2)$$

Όπου $\gamma = \rho \cdot g$ είναι το ειδικό βάρος του υγρού, με τιμή στις συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας $\gamma = 1000 \text{ kp/m}^3$.

Η πραγματική ισχύς N που απορροφάται από τον κινητήρα της αντλίας για την διακίνηση της παροχής Q και την πρόσδοση ενέργειας H ανά μονάδα μάζας του υγρού θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που παραλαμβάνεται από το υγρό, δηλαδή τη

N_i , κατά τις διάφορες απώλειες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της αντλίας κατά τη λειτουργία της. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως:

$$\eta_p = \frac{N_i}{N} < 1 \quad (5.3)$$

Η μέγιστη τιμή του ολικού βαθμού απόδοσης μιας αντλίας κυμαίνεται από 50% για μικρού μεγέθους αντλίες έως 85-90% για μεγάλου μεγέθους αντλίες ($N > 50$ MW).

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

$$N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_p \quad (5.4)$$

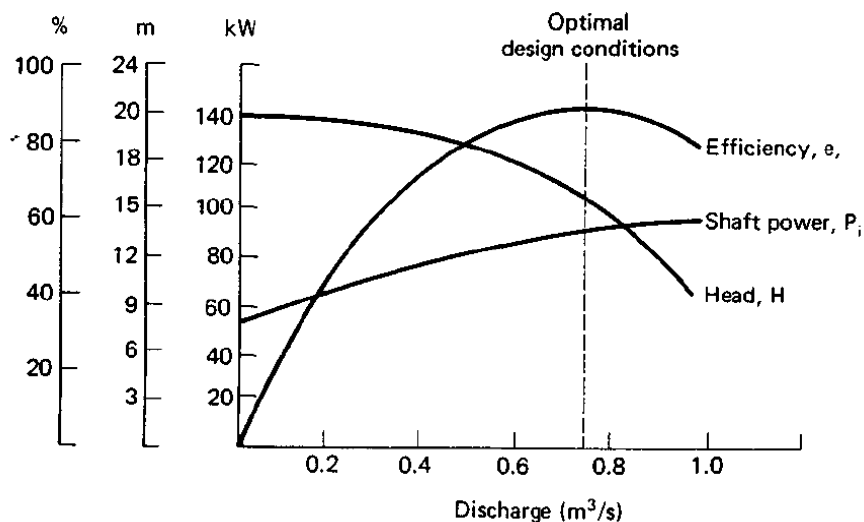
Σε μονάδες μετρικού συστήματος, όπου η ισχύς N εκφράζεται σε kW, το ειδικό βάρος γ σε kp/m^3 , η παροχή Q σε m^3/s και το πραγματικό ολικό ύψος της αντλίας σε mΣΥ, η προηγούμενη εξίσωση γράφεται ως εξής (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”):

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H / \eta_p \quad (5.5)$$

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αντλίας.

Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από τις καμπύλες λειτουργίας της, οι οποίες δίνουν στοιχεία σχετικά με τη μεταβολή της απόδοσης, του ολικού ύψους και της ισχύος της πτερωτής συναρτήσει της παροχής υγρού, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

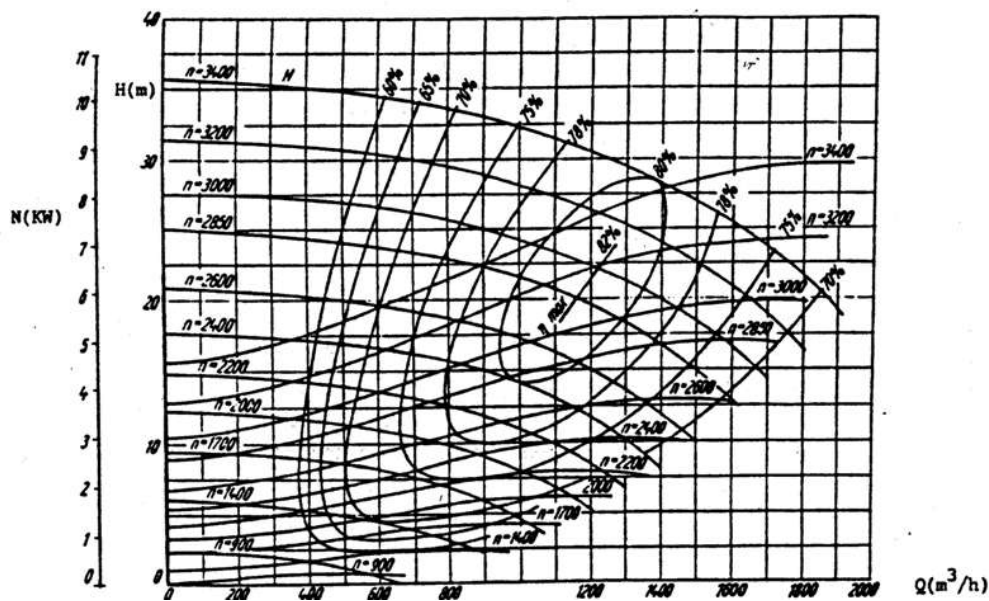
Στο Σχήμα 5.7 δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες αντλίας σταθερής ταχύτητας περιστροφής.



Σχήμα 5.7
Διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπυλών φυγόκεντρης αντλίας.
(Πηγή: http://users.auth.gr/~prinosp/downloads/Kef_Pumps.pdf)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ένα σημείο όπου σημειώνεται ο μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης της μηχανής, το οποίο ονομάζεται κανονικό σημείο λειτουργίας. Η αντλία επιδιώκεται να «δουλεύει» στα χαρακτηριστικά H,Q του σημείου αυτού. Σε αντίθετη περίπτωση, η αντλία θα έχει μειωμένη απόδοση (*Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”*).

Όμως, μια αντλία είναι σε θέση να λειτουργεί σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής, για κάθε μία από τις οποίες υπάρχει μια διαφορετική καμπύλη λειτουργίας. Στο Σχήμα 5.8 που ακολουθεί, δίνονται οι καμπύλες λειτουργίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής καθώς και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης. Παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μια μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης για μια ταχύτητα περιστροφής της αντλίας, η οποία καλείται κανονική ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 5.8
Τυπική μορφή καμπυλών λειτουργίας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και βρόγχοι ίσου βαθμού απόδοσης.
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”)

5.2.2.2) Αντλητική Εγκατάσταση.

Εισαγωγή.

Με τον όρο «αντλητική εγκατάσταση» περιγράφουμε μία εγκατάσταση η οποία περιλαμβάνει μία ή περισσότερες αντλίες, που διακινούν ένα υγρό μεταξύ δύο δεξαμενών, τις μηχανές κίνησης των αντλιών και το σύνολο των σωληνώσεων που συνδέουν τις δεξαμενές με την αντλία. Επιπλέον διαθέτει λοιπόν ηλεκτρολογικό και μηχανολογικό εξοπλισμό, ο οποίος είναι απαραίτητος για τη λειτουργία, την ασφάλεια και τη συντήρησή της.

Δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της εγκατάστασης είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού στις δύο δεξαμενές, η οποία μετράται ως προς μια κοινή στάθμη αναφοράς. Ως στάθμη αναφοράς χρησιμοποιείται συνήθως η επιφάνεια της θάλασσας. Αξίζει να αναφερθεί ότι ως δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί ένας ποταμός, ο

υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, ένα δοχείο πίεσης ή απλά μια δεξαμενή. Ανάλογα με το αν η δεξαμενή είναι ανοιχτή ή κλειστή, διαφοροποιείται και η στατική πίεση που δέχεται το υγρό στην επιφάνειά του. Στην περίπτωση απλής ανοιχτής δεξαμενής, η στατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση H_B , που ως γνωστόν εξαρτάται από το υψόμετρο από το οποίο αναφερόμαστε. Η δεξαμενή που βρίσκεται σε χαμηλότερο ύψος και από την οποία το υγρό αναρροφάται, ονομάζεται δεξαμενή αναρρόφησης και η σωλήνωση που συνδέει την αντλία με τη δεξαμενή αυτή, ονομάζεται σωλήνωση αναρρόφησης. Από την άλλη, η δεξαμενή που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος και αποτελεί τον επιθυμητό προορισμό του υγρού, καλείται δεξαμενή κατάθλιψης, ενώ η σωλήνωση που τη συνδέει με την αντλία σωλήνωση κατάθλιψης (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”).

Ως γεωδαιτικό ύψος αναρρόφησης h_e ορίζεται η διαφορά:

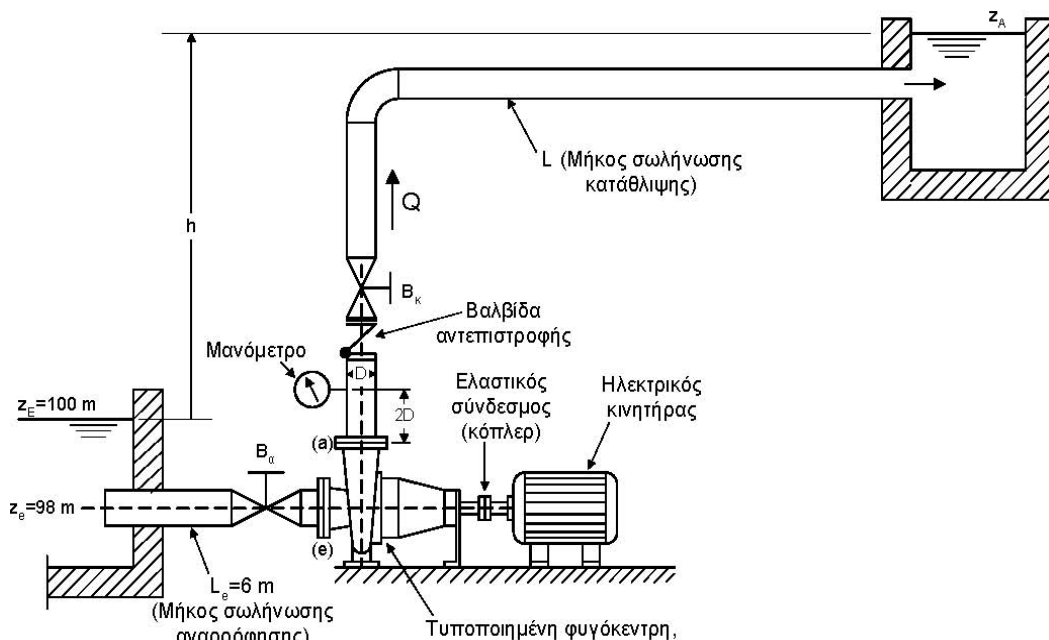
$$h_e = z_a - z_e \quad (5.6)$$

Όπου z_a είναι η στάθμη της αντλίας και z_e η στάθμη της δεξαμενής αναρρόφησης. Η στάθμη της αντλίας συμπίπτει με τη στάθμη της άτρακτου εάν αυτή είναι οριζόντια ή με τη στάθμη της διατομής εισόδου της πτερωτής αν η άτρακτος είναι κατακόρυφη.

Ως γεωδαιτικό ύψος κατάθλιψης h_a ορίζεται η διαφορά της στάθμης των δύο δεξαμενών, και είναι ανεξάρτητο από τη στάθμη τοποθέτησης της αντλίας:

$$h_a = z_A - z_a \quad (5.7)$$

Η διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.9 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.9

Λεπτομερής σχηματική διάταξη απλής αντλητικής εγκατάστασης.
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”)

Καθορισμός του σημείου λειτουργίας της αντλητικής εγκατάστασης.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli, στις διατομές εισόδου (e) και εξόδου της αντλίας η ολική πίεση αντίστοιχα ισούται με:

$$H_{oe} = H_e + \frac{c_e^2}{2g} + z_e = H_B + z_E - \delta h_{fEe} \quad (5.8)$$

$$H_{oa} = H_a + \frac{c_a^2}{2g} + z_a = H_B + z_A + \delta h_{faA} \quad (5.9)$$

Όπου H_e και H_a είναι η στατική πίεση στις διατομές εισόδου και εξόδου, ενώ δh_{fEe} και δh_{faA} είναι οι υδραυλικές απώλειες στις σωληνώσεις αναρρόφησης και κατάθλιψης αντίστοιχα. Έχει θεωρηθεί ότι πρόκειται για μεγάλες δεξαμενές, στις οποίες η κινητική ενέργεια του υγρού είναι αμελητέα.

Από τις εξισώσεις (5.8) και (5.9) προκύπτει το ολικό ύψος της αντλίας H:

$$H = H_{oa} - H_{oe} = (z_A - z_E) + (\delta h_{faA} + \delta h_{fEe}) = h + \delta h_{fEA} \quad (5.10)$$

Όπου με δh_{fEA} συμβολίζονται οι ολικές απώλειες στις σωληνώσεις της εγκατάστασης. Δηλαδή η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η αντλία στο υγρό είναι ίση με το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την ανύψωσή του και της ενέργειας που δαπανάται για τη ροή του εντός της σωλήνωσης.

Η τελευταία οφείλεται στις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες διακρίνονται στις γραμμικές και τις εντοπισμένες απώλειες. Οι γραμμικές απώλειες οφείλονται στη συνεκτικότητα του ρευστού, είναι ανάλογες του μήκους του αγωγού και εκφράζονται από τη σχέση των Darcy – Weisbach (σε mΣΥ):

$$\delta h_{fPAM} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (5.11)$$

Όπου L είναι το μήκος του αγωγού, d είναι η εσωτερική του διάμετρος, c είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού και λ ο συντελεστής των γραμμικών απωλειών. Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας του εσωτερικού του αγωγού και του αριθμού Reynolds της ροής, ο οποίος ως γνωστόν δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (5.12)$$

Όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Ως σχετική τραχύτητα ε_s ορίζεται ο λόγος της μέσης τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού ε και της εσωτερικής διαμέτρου του d:

$$\varepsilon_s = \varepsilon / d \quad (5.13)$$

Η τραχύτητα των σωλήνων εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο κατασκευής τους και τον χρόνο χρήσης τους.

Όταν η ροή εντός αγωγού είναι στρωτή, δηλαδή ισχύει $Re < 2300$, ο συντελεστής γραμμικών απωλειών δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 64 / \text{Re} \quad (5.14)$$

Σε περίπτωση όμως πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής, δηλαδή όταν $\text{Re} > 4000$, χρησιμοποιείται η σχέση των Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71} \right) \quad (5.15)$$

Εύκολα συμπεραίνουμε ότι η επίλυση της παραπάνω σχέσης γίνεται με εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας. Από μια σειρά πειραμάτων, έχει καταρτιστεί το διάγραμμα Moody, το οποίο μας δίνει μια αρκετά καλή προσέγγιση της τιμής του συντελεστή.

Οι εντοπισμένες απώλειες εμφανίζονται κυρίως σε σημεία μεταβολής της διατομής του αγωγού και της κατεύθυνσης της ροής. Επιπλέον, εντοπισμένες απώλειες παρουσιάζονται και σε διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα που τοποθετούνται στις σωληνώσεις, όπως οι βάνες. Οι εντοπισμένες απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$\delta h_{\text{ΕΝΤΟΠ.}} = \zeta \cdot \frac{c^2}{2g} \quad (5.16)$$

Όπου ζ είναι ο συντελεστής των εντοπισμένων απωλειών.

Τέλος, στις υδραυλικές απώλειες εντάσσεται και η κινητική ενέργεια $\frac{c_A^2}{2g}$ που έχει το υγρό όταν εισέρχεται στη μεγάλων διαστάσεων δεξαμενή κατάθλιψης, καθώς αυτή δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και ουσιαστικά χάνεται σε φαινόμενα τριβής και στροβιλισμών.

Λόγω της αρχής της συνέχειας της μάζας ασυμπίεστου ρευστού, η παροχή όγκου Q στα διάφορα τμήματα της σωλήνωσης είναι σταθερή και ίση με:

$$Q = c_i \cdot A_i \quad (5.17)$$

Όπου A_i είναι η διατομή του τμήματος i της σωλήνωσης.

Επομένως, με τα βάση τα παραπάνω, το άθροισμα όλων των απωλειών μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\delta h_{\text{fEA}} = \sum \lambda_i \frac{L_i \cdot c_i^2}{d_i \cdot 2g} + \sum \zeta_k \cdot \frac{c_k^2}{2g} + \frac{c_A^2}{2g} = \zeta_{\text{EA}} \cdot Q^2 \quad (5.18)$$

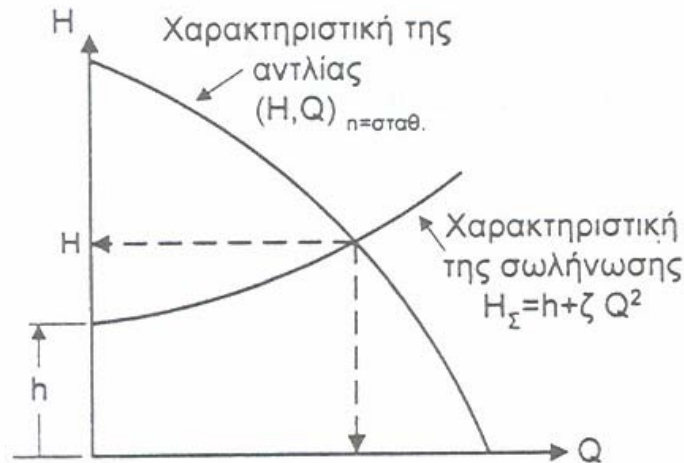
οπότε η εξίσωση (5.10) μετασχηματίζεται στην εξίσωση (5.19):

$$H_{\Sigma} = h + \zeta_{\text{EA}} \cdot Q^2 \quad (5.19)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση της χαρακτηριστικής της σωλήνωσης της εγκατάστασης και εκφράζει την ανά μονάδα μάζας ενέργεια που πρέπει να διατίθεται στο ρευστό, ώστε αυτό να μπορεί απρόσκοπτα να διακινείται μέσω της συγκεκριμένης σωλήνωσης. Λόγω της μορφής της χαράσσεται εύκολα σε κοινό διάγραμμα (H, Q) με τη χαρακτηριστική της αντλίας. Από το σημείο της τομής του προκύπτει το σημείο της αντλητικής εγκατάστασης για τη δεδομένη ταχύτητα

περιστροφής της αντλίας, δηλαδή το σημείο στο οποίο η ανά μονάδα μάζας ενέργεια που προσδίδει η συγκεκριμένη αντλία στο υγρό είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για τη ροή του εντός σωλήνωσης και την ανύψωσή του (Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης).

Στο Σχήμα 5.10 που ακολουθεί, απεικονίζεται το σημείο λειτουργίας αντλιοστασίου.



Σχήμα 5.10
Σημείο λειτουργίας αντλιοστασίου
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”)

Το σημείο τομής των δύο χαρακτηριστικών καθορίζει τόσο τον βαθμό απόδοσης της αντλίας κατά τη λειτουργία της, όσο και την ισχύ που αυτή απορροφά. Όπως αναφέρθηκε, η σχέση που συνδέει το βαθμό απόδοσης με την ισχύ που απορροφάται από την αντλία δίνεται από την εξίσωση (5.4):

$$N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_p$$

Ακόμα, υπολογίζουμε την ηλεκτρική ισχύ σε kW, που απαιτείται για να απορροφήσει το υγρό παροχής Q ανά μονάδα μάζας H, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες απώλειες κατά τη μετατροπή ενέργειας η_{mr} :

$$N_p = \frac{N}{\eta_{mr}} = \frac{9,81 \cdot H \cdot Q}{\eta_{mr} \cdot \eta_p} \Rightarrow N_p = \frac{9,81 \cdot H \cdot Q}{\eta} \quad (5.20)$$

Με τυπική τιμή του βαθμού απόδοσης του συστήματος αντλίας-κινητήρα: $\eta=0,85$.

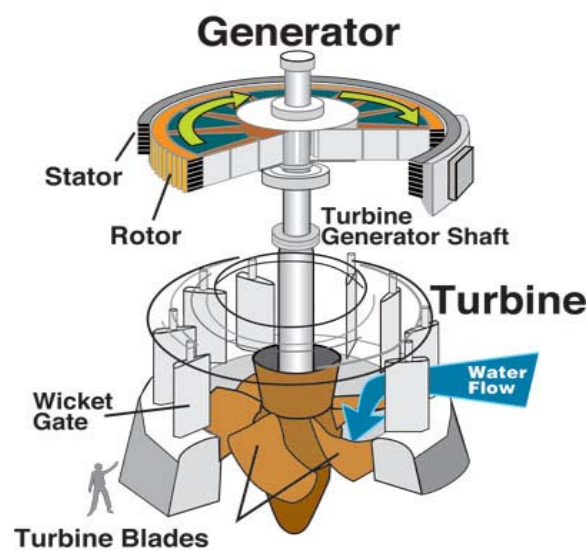
Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της πιεζομετρικής γραμμής σε μια σωλήνωση. Αυτή αποτυπώνει τη μεταβολή της πίεσης απαλλαγμένης από τη συμβολή της κινητικής ενέργειας και δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} + z \quad (5.21)$$

5.2.2.3) Υδροστρόβιλος.

Εισαγωγή.

Ως υδροστρόβιλος ορίζεται η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια ενός υγρού (νερού) σε μηχανική ενέργεια μέσω συνεχούς ροής του υγρού και σταθερής περιστροφικής κίνησης. Η μετατροπή της ενέργειας του διερχόμενου υγρού υπό σταθερή παροχή σε μηχανική ενέργεια γίνεται στο στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το οποίο καλείται δρομέας, μέσω ανάπτυξης κινητήριας ροπής. Η κινητήρια ροπή μεταφέρεται στην άτρακτο του δρομέα, η οποία είναι συζευγμένη με την άτρακτο της ηλεκτρικής γεννήτριας, που με τη σειρά της μετατρέπει τη μηχανική ισχύ N σε ηλεκτρική ισχύ N_e . Στο Σχήμα 5.11 δίνεται η σχηματική απεικόνιση του υδροστρόβιλου σε τομή.



Σχήμα 5.11
Υδροστρόβιλος σε τομή
(Πηγή: ga.water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html)

Τύποι - Διαμόρφωση υδροστρόβιλων.

Οι σύγχρονοι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε 2 κατηγορίες (Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης):

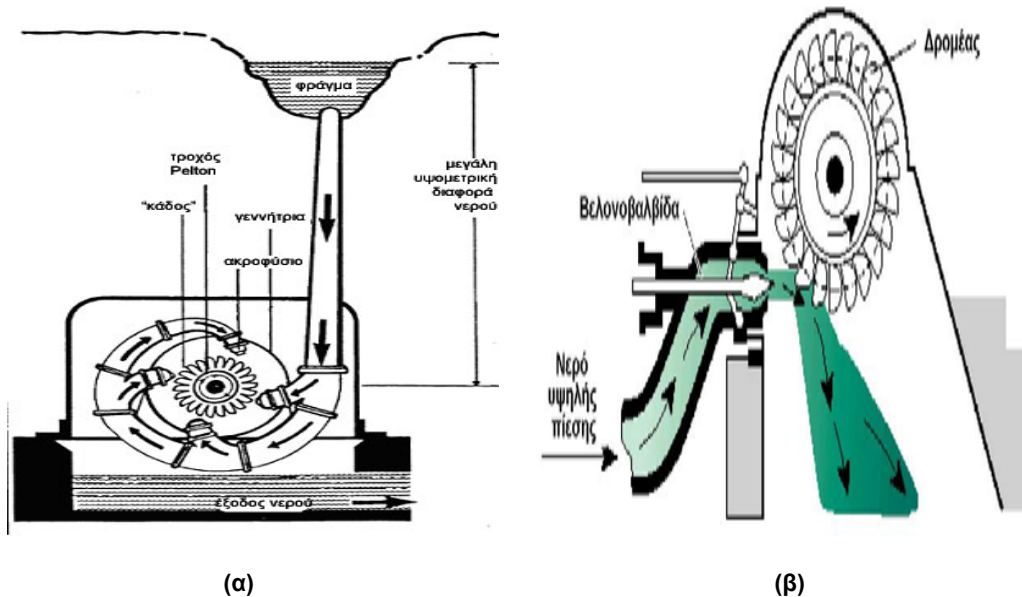
- ✓ Δράσεως ή μερικής προσβολής.
- ✓ Αντιδράσεως ή μερικής προσβολής.

Η διάκρισή τους βασίζεται στο ότι στους υδροστρόβιλους μερικής προσβολής, μόνο ένα τμήμα του δρομέα συμβάλλει στη μετατροπή της ενέργειας, ενώ στους ολικής προσβολής το αντίθετο. Ακόμα, στους μερικής προσβολής ο δρομέας λειτουργεί σε χώρο ομοιόμορφης στατικής πίεσης (μηδενικός βαθμός αντίδρασης), ενώ στους ολικής προσβολής η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού.

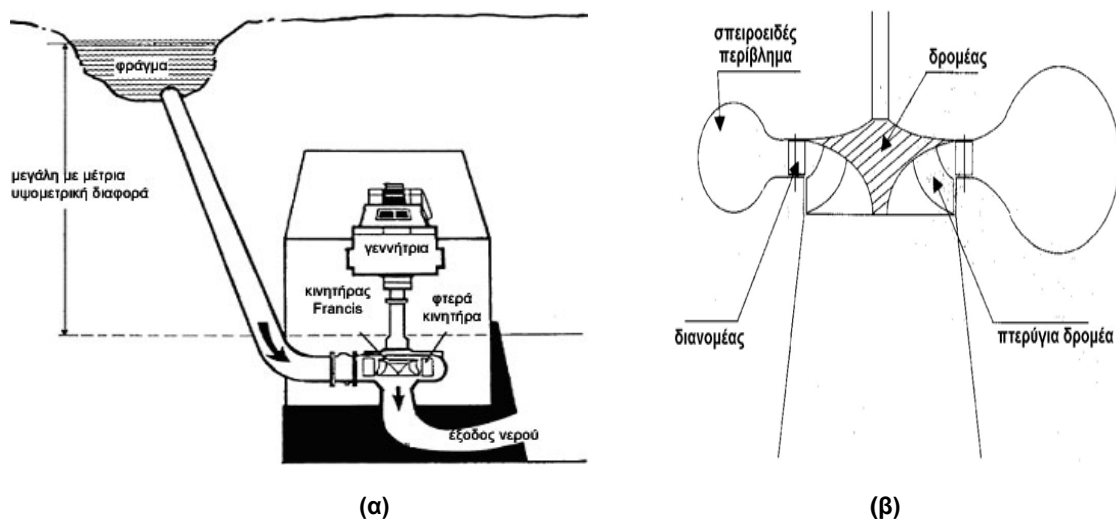
Χαρακτηριστικοί τύποι υδροστρόβιλων δράσεως είναι οι τύπου Pelton, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μεσαία και μεγάλα ύψη πτώσης ($H > 50$ m), ενώ στους υδροστρόβιλους αντιδράσεως ανήκουν οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan (αξονικής

ροής) και Francis (ακτινικής και μικτής ροής), οι οποίοι χρησιμοποιούνται μικρά και μεσαία ύψη πτώσης αντίστοιχα. Στη συνέχεια, θα αναλυθεί σύντομα η διαμόρφωση των ίσως πιο διαδεδομένων τύπων υδροστροβίλων, Pelton και Francis.

Στα Σχήματα 5.12 και 5.13 που ακολουθούν, απεικονίζονται αντίστοιχα οι υδροστροβίλοι Pelton και Francis.



Σχήμα 5.12
 (α) Ρόδα Pelton
 (β) Κατακόρυφος στρόβιλος Pelton
 (Πηγές: http://www.energypoint.gr/ananewsimes_piges_energeia/ydroelektriki_energeia,
 Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ)



Σχήμα 5.13 (α), (β)
 Υδροστροβίλος Francis
 (Πηγές: http://www.energypoint.gr/ananewsimes_piges_energeia/ydroelektriki_energeia,
 Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ)

Όπως και οι αντλίες, ένας υδροστρόβιλος έχει τρία κύρια μέρη: το τμήμα εισόδου, τον δρομέα και το τμήμα εξόδου.

Το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή ενέργειας εντατικής κατάστασης του υγρού σε κινητική, διαμορφώνοντας δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στον δρομέα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ώθησης σε αυτόν κατά την περιφερειακή διεύθυνση και η οποία δημιουργεί κινητήρια ροπή. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο 2-3 σκαφίδια του δρομέα δέχονται τη δέσμη του νερού και τα οποία εναλλάσσονται διαδοχικά. Ο δρομέας είναι τοποθετημένος πάνω από την ελεύθερη στάθμη της διώρυγας απαγωγής για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Σε αντίθεση με τον Pelton, ο δρομέας Francis, αποτελείται από πτερύγια με δυνατότητα περιστροφής ως προς τον δρομέα, τα οποία «απορροφούν» την ενέργεια του νερού και στρέφουν την άτρακτο του δρομέα. Το νερό που πέφτει από τον δρομέα λόγω βαρύτητας οδηγείται από το τμήμα εξόδου στη διώρυγα απαγωγής και στη συνέχεια στην κοίτη του υδατορεύματος ή σε δεξαμενή ανάλογα με την εφαρμογή.

Η ροή της ενέργειας.

Παρακάτω θα δοθούν οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τον υδροστρόβιλο, όπως έγινε με τις αντλίες.

Η ανά μονάδα μάζας ενέργεια του υγρού H_i που διατίθεται στον υδροστρόβιλο για να τη μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια, εκφρασμένη σε μέτρα στήλης υγρού (mΣΥ), ονομάζεται ωφέλιμο ολικό ύψος του υδροστροβίλου, και έτσι ορίζεται ως η διαφορά της ολικής ενέργειας της μονάδας μάζας του υγρού, εκφρασμένη σε μονάδες ύψους στήλης υγρού (mΣΥ), μεταξύ της συμβατικής διατομής εισόδου e και της συμβατικής διατομής εξόδου a της διερχόμενης παροχής μάζας του υγρού, δηλαδή:

$$H_i = H_{oe} - H_{oa} = \frac{c_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\rho g} + z_e - \left(\frac{c_a^2}{2g} + \frac{p_a}{\rho g} + z_a \right) \quad (5.22)$$

Όπου με c συμβολίζεται το μέτρο της απόλυτης ταχύτητας (κινητική ενέργεια) του υγρού, με p η στατική του πίεση (ενέργεια εντατικής κατάστασης) και με z το γεωδαιτικό ύψος ως προς μία στάθμη αναφοράς (δυναμική ενέργεια) στη συγκεκριμένη θέση (Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Δημήτριος Παπαντώνης).

Εισάγοντας την παροχή Q , η θεωρητική ισχύς του υδροστροβίλου N_i , δηλαδή η υδραυλική ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, εκφράζεται ως εξής:

$$N_i = \gamma \cdot Q \cdot H_i \quad (5.23)$$

Όπου $\gamma = \rho \cdot g$ είναι το ειδικό βάρος του υγρού, με τιμή στις συνθήκες συνθήκες θερμοκρασίας $\gamma = 1000 \text{ kp/m}^3$.

Αν συμβολίσουμε με ω τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και με M την κινητήρια ροπή που αναπτύσσεται σε αυτόν, η πραγματική ισχύς N που αναπτύσσεται στην άτρακτο του υδροστροβίλου ίση με:

$$N = M \cdot \omega \quad (5.24)$$

Η πραγματική ισχύς N θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη θεωρητική ισχύ N_i της εξίσωσης (5.23) κατά τις ενεργειακές απώλειες της ίδιας της μηχανής. Οι ενεργειακές αυτές απώλειες οφείλονται κυρίως στις απώλειες λόγω τριβών της ροής δια μέσου της μηχανής και στις απώλειες τριβής των εδράνων της ατράκτου. Για το λόγο αυτό ο ολικός βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου ορίζεται ως:

$$\eta_T = \frac{N_i}{N} < 1 \quad (5.25)$$

και εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου απώλεια ενέργειας σε τριβές, στροβιλισμούς κ.λ.π που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μηχανής. Η ενέργεια αυτή των απωλειών μετατρέπεται τελικά σε θερμότητα και προσδίδεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο διακινούμενο υγρό.

Τελικά, η πραγματική ισχύς του υδροστροβίλου δίνεται από τη σχέση:

$$N = \gamma \cdot H_i \cdot Q / \eta_T \quad (5.26)$$

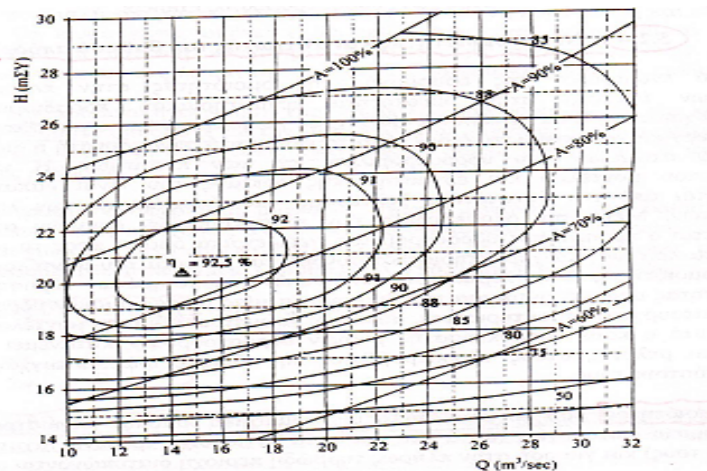
Σε μονάδες μετρικού συστήματος, όπου η ισχύς N εκφράζεται σε kW, το ειδικό βάρος γ σε kp/m^3 , η παροχή Q σε m^3/s και το πραγματικό ολικό ύψος του υδροστροβίλου σε mΣΥ, η προηγούμενη εξίσωση γράφεται ως εξής (Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Δημήτριος Παπαντώνης):

$$N = 9,81 \cdot Q \cdot H / \eta_T \quad (5.27)$$

Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου.

Ως χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλου εννοούνται οι καμπύλες μεταβολής της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H συναρτήσει της παροχής Q με παράμετρο το άνοιγμα A των ρυθμιστικών πτερυγίων (υδροστροβίλοι αντιδράσεως) και για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.

Στο Σχήμα 5.14 δίνεται ένα παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 5.14
Παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας υδροστροβίλου,
για σταθερή ταχύτητα περιστροφής.
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, "Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα")

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες υδροστροβίλου έχουν τη μορφή πλέγματος καμπυλών με θετική κλίση και προκύπτουν από πρόσθεση στην θεωρητική καμπύλη (H_u, Q), των υδραυλικών απωλειών και την κινητική ενέργεια στη διατομή εξόδου. Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα χαράσσονται καμπύλες ίσου βαθμού απόδοσης, οι οποίες είναι κλειστές και ισουψείς. Στην κορυφή τους αντιστοιχεί το κανονικό σημείο λειτουργίας όπου εμφανίζεται ο μέγιστος ολικός βαθμός απόδοσης. Το κανονικό σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τιμή του ανοίγματος των ρυθμιστικών πτερυγίων και σε μια τιμή της παροχής και της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H για τα οποία ικανοποιούνται δύο συνθήκες: η ροή στην είσοδο του δρομέα γίνεται χωρίς κρούση, και η συστροφή του υγρού στην έξοδο του δρομέα είναι σχεδόν μηδενική (*Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Δημήτριος Παπαντώνης*).

5.2.2.4) Υδροηλεκτρικό Έργο.

Εισαγωγή.

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

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.1, το νερό που είναι αποθηκευμένο στην άνω δεξαμενή (δεξαμενή κατάθλιψης), διαθέτει δυναμική ενέργεια, η οποία εκφράζεται από τη στάθμη του ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή επιδιώκεται να εκμεταλλευτεί. Το νερό από την άνω δεξαμενή διέρχεται από τον υδροστρόβιλο μέσω σωλήνωσης, όπου μετατρέπεται η ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα. Στη συνέχεια, επειδή η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό μηχανική ενέργεια δεν είναι δυνατόν να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσης, μετατρέπεται επί τόπου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας, κατευθείαν συζευγμένης στην άτρακτο του υδροστροβίλου. Τέλος, το νερό που εξέρχεται από τον υδροστρόβιλο είναι απαλλαγμένο συστροφής και οδηγείται στη κάτω δεξαμενή (δεξαμενή αναρρόφησης) μέσω σωλήνωσης (*Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης*).

Η ροή της ενέργειας.

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

$$h = z_E - z_A \quad (5.28)$$

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

$$H = h - \delta h_{fEe} \quad (5.29)$$

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

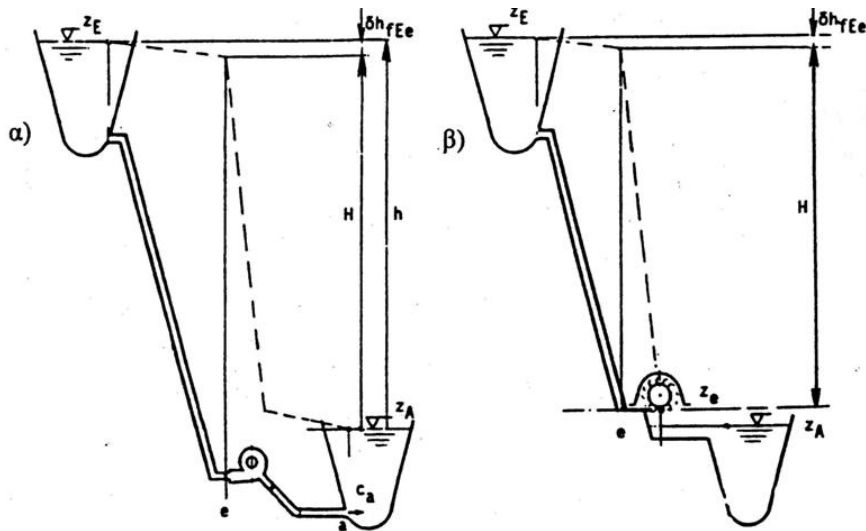
$$\delta h_{fEe} = k_e \cdot Q^2 \quad (5.30)$$

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

Στην περίπτωση υδροηλεκτρικής εγκατάστασης με υδροστρόβιλο δράσεως, όπως ο υδροστρόβιλος Pelton του σχήματος 5.15β, όπου η στάθμη του ακροφυσίου τροφοδοσίας είναι υψηλότερη από τη στάθμη απαγωγής, δηλαδή $z_e > z_A$, ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του δρομέα, η διαθέσιμη στον υδροστρόβιλο υδραυλική πτώση είναι ίση προς:

$$H = h - \delta h_{fEe} - (z_e - z_A) = z_E - z_e - \delta h_{fEe} \quad (5.31)$$

Δεδομένου ότι η ενέργεια που αντιστοιχεί στην υψομετρική διαφορά ($z_e - z_A$) δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί. Στο σχήμα 5.15 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά η αξιοποίηση της υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου αντιδράσεως και δράσεως.



Σχήμα 5.15

Αξιοποίηση υδραυλικής πτώσης σε εγκατάσταση υδροστρόβιλου αντιδράσεως και δράσεως.
(Πηγή: Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης)

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

$$N_i = \gamma \cdot H \cdot Q \quad (5.32)$$

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

$$N = N_i / \eta_T \Rightarrow N = \gamma \cdot H \cdot Q / \eta_T \quad (5.33)$$

Όπου η_T είναι ο βαθμός απόδοσης του υδροστρόβιλου.

Τέλος, έχουμε μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια N_T που θα παράγεται θα είναι μειωμένη κατά τις απώλειες της ηλεκτρικής γεννήτριας και του μετασχηματιστή (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”). Έτσι, προκύπτει:

$$N_T = \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot N \quad (5.34)$$

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

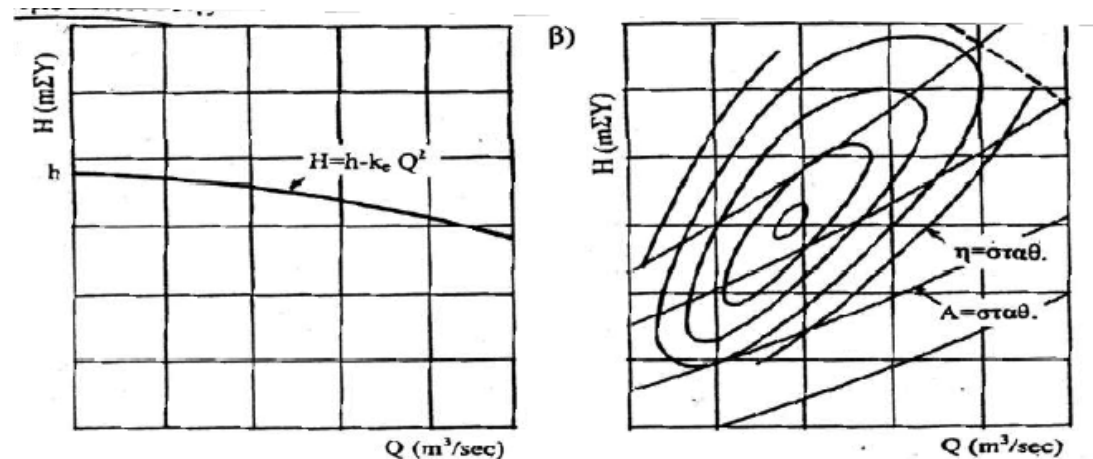
Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις και με μονάδες μετρικού συστήματος, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τον υδροστροβίλο είναι ίση με:

$$N_T = 9,81 \cdot \eta_G \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_T \cdot H \cdot Q \Rightarrow N = 9,81 \cdot \eta \cdot H \cdot Q \quad (5.35)$$

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

Καθορισμός σημείου λειτουργίας.

Όπως δείξαμε προηγουμένως, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H σε μια συγκεκριμένη εγκατάσταση εκφράζεται συναρτήσει της διακινούμενης παροχής Q , και έχει τη μορφή παραβολής (Σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16

Χαρακτηριστική σωλήνωσης και χαρακτηριστική υδροστροβίλου.
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, "Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι")

Εάν ένας υδροστροβίλος, με χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας όπως στο Σχήμα 5.16β, εγκατασταθεί σε υδραυλική εγκατάσταση με χαρακτηριστική όπως στο Σχήμα 5.16α, το μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας είναι αυτά της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H της εγκατάστασης. Χαράσσοντας τη χαρακτηριστική της εγκατάστασης, στο διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του υδροστροβίλου, αντιλαμβανόμαστε ότι η λειτουργία του υδροστροβίλου στην εγκατάσταση έχει ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας. Αυτό το εύρος είναι ακόμα πιο περιορισμένο προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία της μηχανής και συγχρόνως υψηλός βαθμός απόδοσης.

5.2.3) Λειτουργία συστήματος αντλησιοταμίευσης

Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο (νερό) ανυψώνεται διά των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, διερχόμενο δε μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια.

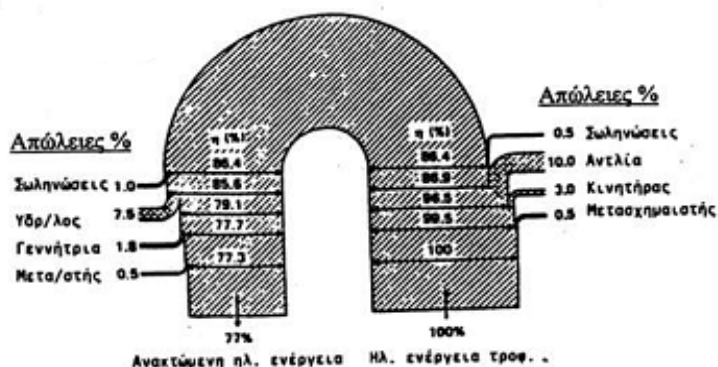
Οι διαστασιολογήσεις των δύο δεξαμενών είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον όγκο του αποθηκευμένου νερού θα χρησιμοποιείται και θα είναι ικανό για τις μετατροπές της διατιθέμενης ενέργειας σε δυναμική και αντίστροφα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο κάποια από τις δύο δεξαμενές να αδειάσει εντελώς.

Είναι πλέον πλήρως κατανοητό, ότι τα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν διπλό όφελος:

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

Η εναλλαγή της λειτουργίας τους μεταξύ άντλησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συμβαίνει μια ή περισσότερες φορές την ημέρα, μια φορά την εβδομάδα ή μια φορά τον χρόνο. Βέβαια, οι δύο τελευταίες περιπτώσεις εναλλαγής της λειτουργίας απαιτούν την ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης (άνω ταμιευτήρα) πολύ μεγάλης χωρητικότητας.

Είναι προφανές η διαδικασία αυτή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική (άντληση) και στη συνέχεια η εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική (λειτουργία υδροστροβίλων) συνοδεύεται από απώλειες ενέργειας. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε έναν κύκλο άντλησης – παραγωγής ενέργειας φθάνει στο 23% περίπου (σε ένα υδροηλεκτρικό έργο μεσαίου μεγέθους), όπως σχηματικά δίνεται στο Σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17
Απώλειες ενέργειας.

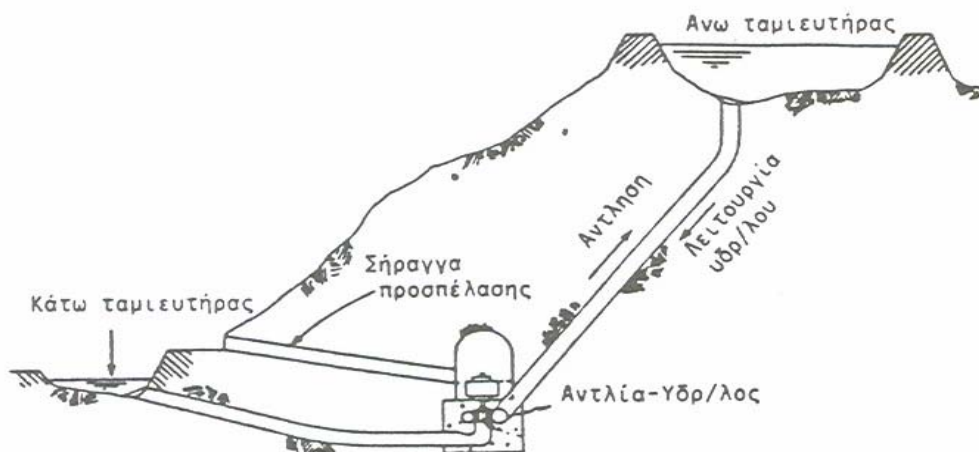
(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, "Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι")

Όπως είναι αναμενόμενο, οι συνολικές απώλειες ενέργειας είναι αναλογικά μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών είναι μικρότερο (Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”).

5.2.3.1) Περίπτωση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος:

Εισαγωγή.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα αποτελεί μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλησιοταμίευσης. Η εγκατάσταση αυτή είναι εξοπλισμένη με αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή, την ονομαζόμενη στροβιλοαντλία, η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως αντλία (φάση αποθήκευσης) είτε ως στρόβιλος (φάση παραγωγής) με αντιστροφή της φορά περιστροφής της πτερωτής (του δρομέα) και της φοράς της ροής. Στο Σχήμα 5.18 που ακολουθεί, δίνεται σχηματικά η διάταξη του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος.



Σχήμα 5.18

Διάταξη αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος.

(Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης, “Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι”)

Όσον αφορά στη λειτουργία του αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού συστήματος, σε αυτό ενσωματώνεται ένα πρωτότυπο σύστημα διανομής. Σύμφωνα με αυτό, όταν η παροχή νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή λόγω άντλησης, είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη παροχή για τη λειτουργία του στροβίλου, μέρος του αντλούμενου νερού πηγαίνει απευθείας στον στρόβιλο, και το υπόλοιπο στην άνω δεξαμενή. Δηλαδή η σωλήνωση μεταφέρει νερό προς τα πάνω. Όταν η παροχή της αντλητικής εγκατάστασης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του στροβίλου, όλο το νερό από την άντληση κατευθύνεται στο στρόβιλο και συμπληρωματικά χρησιμοποιείται νερό από την άνω δεξαμενή για να συμπληρωθεί η απαιτούμενη παροχή στροβίλου. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση, η σωλήνωση μεταφέρει νερό από την άνω στην κάτω δεξαμενή (Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινήτρων και αντλιοσταμειωτήρων”).

Σύγκριση με τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης:

Το βασικό πλεονέκτημα του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης (είτε με μονή είτε με διπλή σωλήνωση) είναι ότι κάθε μηχανή (υδροστρόβιλος και αντλία) επιλέγεται να λειτουργεί σε αντίστοιχο κανονικό σημείο λειτουργίας της. Αντίθετα, όπως θα γίνει φανερό και στη συνέχεια, στο αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα είναι ανάγκη να γίνεται συμβιβασμός στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της στροβιλοαντλίας. Βέβαια, το πρόβλημα αυτό έχει αρχίζει να ξεπερνιέται τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη αναστρέψιμων υδροδυναμικών μηχανών με δύο πτερωτές που μοιράζονται την ίδια άτρακτο και η μία λειτουργεί ως πτερωτή αντλίας και η άλλη ως δρομέας στροβίλου, επιτυγχάνοντας βέλτιστη λειτουργία και στις δύο περιπτώσεις.

Οστόσο, το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης χαρακτηρίζεται από σημαντικό κόστος ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, δεδομένου ότι είναι εξοπλισμένο από δύο υδροδυναμικές μηχανές και έναν συμπλέκτη, σε αντίθεση με το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα που περιλαμβάνει μόνο μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή. Επιπλέον, κάθε μονάδα καταλαμβάνει χώρο σημαντικά μεγαλύτερο σε σύγκριση με τη λύση της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής.

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφέρουμε ότι σε περιπτώσεις όπου η προβλεπόμενη συχνότητα εναλλαγής της λειτουργίας στροβίλου – αντλίας είναι υψηλή, το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα μειονεκτεί έναντι του τυπικού συστήματος αντλησιοταμίευσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι αναστρέψιμες μονάδες θα πρέπει πρώτα να σταματήσουν και στη συνέχεια να αρχίσουν να περιστρέφονται αντίστροφα, με αποτέλεσμα να πρόκειται για μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία.

Τέλος, σε περιπτώσεις που η διαθέσιμη υδραυλική πτώση είναι σημαντική και αντιστοιχεί σε υδροστρόβιλο τύπου Pelton, του οποίου η λειτουργία δεν μπορεί να αντιστραφεί και να λειτουργήσει ως αντλία, είναι απαραίτητη η λειτουργία ανεξάρτητης αντλίας που θα εξασφαλίζει την λειτουργία της αποταμίευσης.

Συμπέρασμα:

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα εμφανίζει περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με το τυπικό σύστημα αντλησιοταμίευσης, με αποτέλεσμα να βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος όσον αφορά στην αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό υδραυλική μορφή. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία ακολουθεί ξεχωριστή ανάλυση των συστημάτων αυτών.

Λειτουργία αναστρέψιμης αντλίας – στροβίλου.

Οι αναστρέψιμες υδροδυναμικές μηχανές εμφανίζουν συνήθως το ίδιο κατ' απόλυτη τιμή θεωρητικό ύψος πτερωτής τόσο για τη λειτουργία στροβίλου όσο για τη λειτουργία αντλίας ($H_u = H_{u,T} = -H_{u,P}$), καθώς και την ίδια παροχή πτερωτής ($Q_u = Q_{u,T} = -Q_{u,P}$).

Όμως, κατά τη λειτουργία της αντλίας, το πραγματικό ολικό ύψος H_p είναι μικρότερο από το αντίστοιχο θεωρητικό $H_{u,P}$ κατά τις υδραυλικές απώλειες της ροής δh_p (από τη διατομή εισόδου μέχρι τη διατομή εξόδου της μηχανής), δηλαδή:

$$H_p = H_{u,P} - \delta h_p = H_u - \delta h_p \quad (5.36)$$

Αντίθετα, για τη λειτουργία της ίδιας μηχανής ως στροβίλου, η διαθέσιμη υδραυλική πτώση H_T είναι ίση προς το άθροισμα του θεωρητικού ύψους $H_{u,T}$ και των αντίστοιχων υδραυλικών απωλειών:

$$H_T = H_{u,T} + \delta h_T = H_u + \delta h_T \quad (5.37)$$

Ανάλογα, κατά τη λειτουργία της αντλίας η παροχή Q_P δια μέσου της μηχανής είναι μικρότερη από την παροχή Q_u δια μέσου της πτερωτής και τις ογκομετρικές απώλειες δQ_P , δηλαδή:

$$Q_P = Q_{u,P} - \delta Q_P \quad (5.38)$$

Ομοίως, η πραγματική παροχή Q_T δια μέσου της μηχανής είναι μεγαλύτερη από την παροχή Q_u δια μέσου του δρομέα κατά τις ογκομετρικές απώλειες δQ_T :

$$Q_T = Q_{u,T} + \delta Q_T \quad (5.39)$$

Από τις σχέσεις (5.36) έως (5.39) παρατηρούμε ότι τα δύο σημεία λειτουργίας της πτερωτής δε συμπίπτουν. Η διαφορά αυτή στα σημεία λειτουργίας της ίδιας μηχανής για λειτουργία ως αντλίας και ως στροβίλου επιτείνεται από τη χαρακτηριστική της σωλήνωσης και για τις δύο περιπτώσεις. Πράγματι,

α) Για τη λειτουργία ως αντλίας, η χαρακτηριστική της σωλήνωσης (σε απόλυτες τιμές) περιγράφεται από τη σχέση:

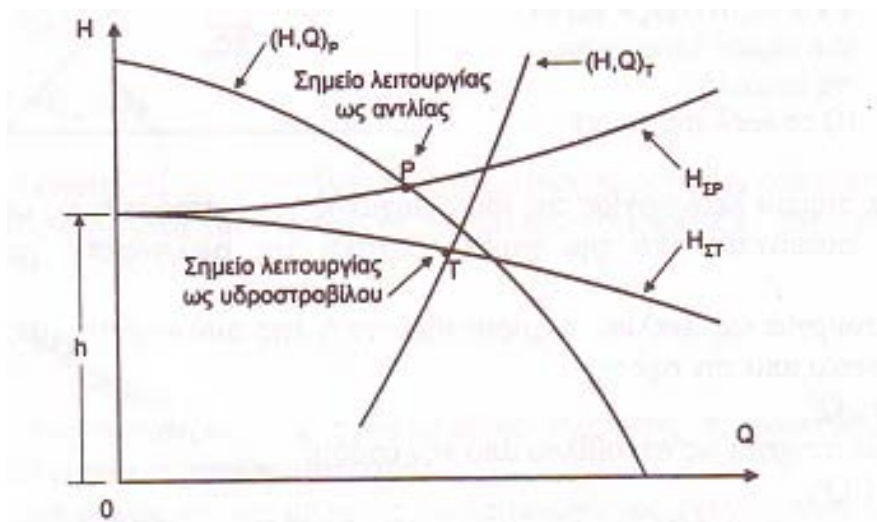
$$H_{\Sigma P} = h + \zeta \cdot Q^2 \quad (5.40)$$

β) Ενώ για τη λειτουργία ως στροβίλου από τη σχέση:

$$H_{\Sigma T} = h - \zeta \cdot Q^2 \quad (5.41)$$

Στις σχέσεις (5.40) και (5.41) με h συμβολίσθηκε η διαφορά μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρα και με $\zeta \cdot Q^2$ οι υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης.

Από τις ίδιες σχέσεις παρατηρούμε ότι το καθαρό ύψος της αντλίας είναι πάντα μεγαλύτερο από το καθαρό ύψος του στροβίλου (Δημήτριος Παπαντώνης, "Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι"). Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη όσα αναφέρθηκαν, αν ληφθεί μέριμνα ώστε η μηχανή να λειτουργεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας της ως αντλίας, τότε το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας ως στροβίλου θα διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο κανονικό (Σχήμα 5.19). Αντίστοιχα συμβαίνουν εάν η μηχανή επιλεγεί ώστε να λειτουργεί ως στρόβιλος στο κανονικό σημείο λειτουργίας της: στην περίπτωση αυτή η λειτουργία ως αντλίας θα γίνεται σε σημείο απομακρυσμένο από το αντίστοιχο κανονικό και μάλιστα με παροχή μικρότερη της αντίστοιχης κανονικής της. Γίνεται επομένως φανερό ότι η μελέτη της αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής προϋποθέτει ότι πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός στην επιλογή των κριτηρίων σχεδίασής της. Η επιλογή αυτή γίνεται ακόμα πιο δύσκολη αν ληφθεί υπόψη η διακύμανση της υψομετρικής διαφοράς h της εγκατάστασης.



Σχήμα 5.19

Διαφορά στο σημείο λειτουργίας για λειτουργία αντλίας και στροβίλου.

Πηγή: Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστρόβιλοι, Δημήτριος Παπαντώνης)

Δεδομένου ότι η λειτουργία αντλίας με μερική παροχή είναι συνήθως ασταθής και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη ότι η ροή δια μέσου της μηχανής για λειτουργία αντλίας είναι επιβραδυνόμενη, ενώ για την αντίστροφη λειτουργία ως στροβίλου επιταχυνόμενη¹, η εκλογή του σημείου λειτουργίας της αναστρέψιμης μηχανής επιλέγεται πλησιέστερα στο σημείο λειτουργίας της αντλίας. Το μέγιστο και το ελάχιστο ύψος στα οποία λειτουργούν οι μηχανές καθορίζονται από διάφορους παράγοντες. Για παράδειγμα μείωση του ύψους άντλησης, έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της παροχής, αλλά και αύξηση της απαιτούμενης ισχύος. Έτσι, το ελάχιστο ύψος άντλησης περιορίζεται από τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ο κινητήρας. Για το μέγιστο ύψος άντλησης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιοχές ασταθούς λειτουργίας της μηχανής.

Το ελάχιστο ύψος στροβίλου περιορίζεται από την ικανότητα της μηχανής να επιταχύνει στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, ενώ ταυτόχρονα η γωνία της βάνας δεν πρέπει να ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή ασφαλείας, καθώς και από την ανάγκη ευσταθούς λειτουργίας της μηχανής κατά την διαδικασία αυτή. Είναι προφανές ότι το εύρος του ύψους λειτουργίας καθορίζεται από το μέγιστο ύψος άντλησης και το ελάχιστο ύψος στροβίλου. Ακόμα, η μηχανή εμφανίζει άλλες δύο περιοχές εργασίας. Όταν η φορά περιστροφής είναι όμοια με του στροβίλου, αλλά η παροχή είναι από την κάτω προς την άνω δεξαμενή ($\eta > 0$, $Q < 0$) έχουμε λειτουργία αντιστρόφου στροβίλου, ενώ όταν το νερό ρέει από την άνω προς την κάτω δεξαμενή και η φορά περιστροφής είναι ίδια με της αντλίας ($\eta < 0$, $Q > 0$), η μηχανή εργάζεται ως ρυθμιζόμενη αντίδραση.

¹ Ο παράγοντας αυτός είναι ευνοϊκός για τη λειτουργία ως στροβίλου, επειδή η επιτάχυνση της ροής αποτρέπει την εμφάνιση αποκόλλησης της ροής και την πτώση του βαθμού απόδοσης που αυτή συνεπάγεται.

Εκκίνηση της αντλίας στα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα.

Λόγω του μεγάλου μεγέθους των μηχανών των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων, ένα πρόβλημα που τίθεται σε αυτά είναι το πρόβλημα εκκίνησης των αντλιών αποταμίευσης. Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το πρόβλημα αναφέρονται στη συνέχεια τα ακόλουθα στοιχεία (*Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι, Δημήτριος Παπαντώνης*):

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

Διακρίνονται οι ακόλουθοι μέθοδοι εκκίνησης της αντλίας (*Υδροδυναμικές Μηχανές – Αντλίες – Υδροστροβίλοι, Δημήτριος Παπαντώνης*):

▶ Εκκίνηση με την πτερωτή γεμάτη νερό:

Στην περίπτωση αυτή η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων παραμένει κλειστή, δηλαδή η παροχή είναι μηδενική. Με τον τρόπο αυτό η ισχύς που απορροφά η αντλία στην κανονική ταχύτητα περιστροφής, είναι ίση με το 35% της ονομαστικής. Ένας βοηθητικός υδροστροβίλος χρησιμοποιείται για την παροχή της ισχύος αυτής και τον συγχρονισμό της αντλίας, δηλαδή την επιτάχυνσή της στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής. Μετά το συγχρονισμό, τα ρυθμιστικά πτερύγια ανοίγουν μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Η λειτουργία με κλειστά πτερύγια συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας στο εσωτερικό της μηχανής για την απαγωγή της οποίας πρέπει να ληφθεί μέριμνα.

▶ Εκκίνηση με την πτερωτή κενή (σε περιβάλλον αέρα):

Στην περίπτωση αυτή τα ρυθμιστικά πτερύγια είναι κλειστά, ενώ η βάνα κατάθλιψης είναι ανοιχτή. Η πτερωτή εκκενώνεται από το νερό με την έγχυση αέρα υπό πίεση στο σπειροειδές κέλυφος. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η στάθμη στην αναρρόφηση να πέσει κάτω από το κατώτερο σημείο της πτερωτής. Η αντλία επιταχύνεται εν κενό και συγχρονίζεται είτε μέσω ενός βοηθητικού υδροστροβίλου είτε μέσω σύζευξης στο δίκτυο, καταναλώνοντας πολύ μικρή ισχύ ίση με 1-3% της ονομαστικής. Στη συνέχεια η πτερωτή πληρώνεται με νερό. Επειδή η πλήρωση από την κάτω δεξαμενή προκαλεί κρουστικά φαινόμενα, αυτό μπορεί να γίνει από την άνω δεξαμενή ή και με άλλους τρόπους.

Ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων -Τεχνικές εκκίνησης.

Οι ηλεκτρικές μηχανές των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων είναι κατά κύριο λόγο σύγχρονες, λόγω της ικανότητάς τους να εναλλάσσουν εύκολα τη λειτουργία τους.

Οι διάφορες τεχνικές εκκίνησης των κινητήρων είναι οι ακόλουθες (Νεσιάδης Αθανάσιος, “Προσομοίωση διαδοχικής εκκίνησης αντλιών”):

- Ύπαρξη βοηθητικού εξωτερικού κινητήρα.
- Ύπαρξη βοηθητικού υδροστροβίλου.
- Ασύγχρονη εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο.
- Ασύγχρονη εκκίνηση με χαμηλή τάση τροφοδοσίας.
- Σύγχρονη εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας.

Στις πρώτες τέσσερις μεθόδους, κάθε μονάδα διαθέτει το δικό της εξοπλισμό εκκίνησης, ενώ στην εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας είναι δυνατή η εκκίνηση περισσότερων από μία μονάδων με κοινό εξοπλισμό. Αυτή αποτελεί και την πλέον διαδεδομένη μέθοδο και για το λόγο αυτό θα αναφερθεί πολύ συνοπτικά, καθώς οι υπόλοιπες παρουσιάζουν μια σειρά σοβαρών μειονεκτημάτων, η παρουσίαση των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά λοιπόν στη μέθοδο της σύγχρονης εκκίνησης με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας, αυτή παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία και είναι κατάλληλη για την αρχική πλήρωση της άνω δεξαμενής. Ακόμα, η δυνατότητα εκκίνησης περισσότερων των μία μονάδων από έναν εκκινητή, οδηγεί σε μείωση του κόστους εξοπλισμού και λειτουργίας, καθώς και σε περιορισμένο συμπληρωματικό όγκο εκσκαφών. Η διαμόρφωση και το πλήθος των εκκινητών εξαρτάται από το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θέλουμε να ολοκληρωθεί το ξεκίνημα μιας μονάδας και όλης της εγκατάστασης. Μια συνήθης διαμόρφωση είναι η ύπαρξη δύο οδηγήσεων, έτσι ώστε όταν απαιτείται η συντήρηση μιας να μην είναι αναγκαία η εκκίνηση με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο.

5.2.4) Υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών είτε συμβατικών είτε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ονομάζεται υβριδικό σύστημα. Τέτοια συστήματα μελετώνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με σκοπό τη μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα ηλεκτρικά δίκτυα, ιδιαίτερα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, αλλά και συγχρόνως την παραγωγή ενέργειας σε συμφωνία με τις Ευρωπαϊκές και Εθνικές πολιτικές για την ενέργεια και το περιβάλλον (Ζερβός Αρθούρος, “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”).

Σύμφωνα με το Νόμο 3468/2006, σε ένα υβριδικό σύστημα:

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

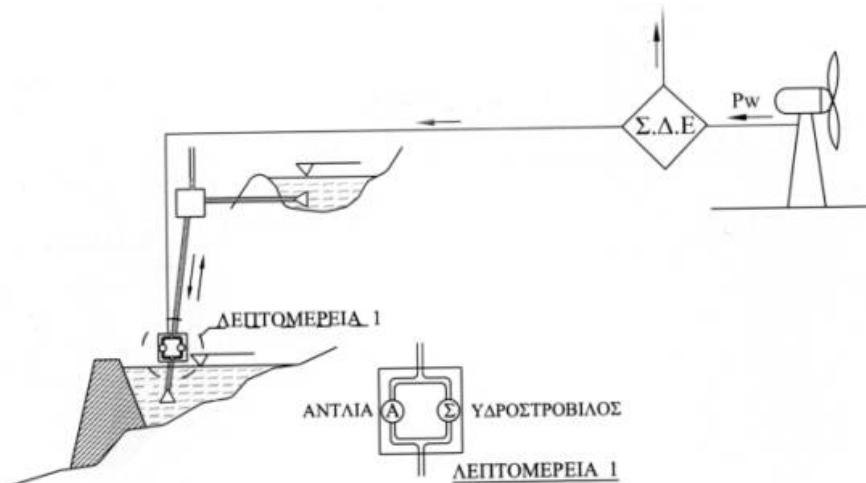
Στις υποενότητες που ακολουθούν, θα εξεταστούν τα υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα και ειδικότερα τα συστήματα αντλησιοταμίευσης που συνδυάζονται με αιολικά πάρκα ή με θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα την περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας ή της ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί.

5.2.4.1) Σύστημα αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση (ΑΕΑ).

Εισαγωγή.

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

Ένα τέτοιο υβριδικό υδροηλεκτρικό σύστημα απεικονίζεται στο σχήμα 5.20, που ακολουθεί:



Σχήμα 5.20
Σχηματική απεικόνιση διάταξης συστήματος αντλησιοταμίευσης
συνδυαζόμενο με αιολικό πάρκο.
(Πηγή: Κατσαπρακάκης, 2006)

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

Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση είναι ο εξής: το αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στο βαθμό που δεν μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο αξιοποιείται για την άντληση του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια του νερού και αποθηκεύεται στην άνω δεξαμενή. Όταν και όποτε παραστεί ανάγκη να μετατραπεί η ενέργεια αυτή σε ηλεκτρική για να καλύψει ανάγκες ηλεκτροδότησης (για παράδειγμα κατά τις ώρες αιχμής της ζήτησης,

ή όταν δεν φυσάει άνεμος, και υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας), τότε ακολουθείται η αντίστροφη διαδρομή. Το νερό θα μεταφέρεται από τον πάνω στον κάτω ταμιευτήρια, όπου ένας υδροστρόβιλος θα μετατρέψει την κίνηση του νερού σε ηλεκτρική και θα τη διοχετεύει πάλι πίσω στο δίκτυο

Στην παράγραφο 5.1 αναφέραμε ότι η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) διαθέτει ήδη δύο φράγματα που λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο (Σφυκιά, Θησαυρός), με τη διαφορά ότι η ενέργεια που μετατρέπουν σε δυναμική για να "αποθηκευτεί" στη συνέχεια, δεν προέρχεται από αιολικά πάρκα, αλλά από λιγνιτικούς σταθμούς. Ίσως τα δύο αυτά φράγματα συνδεθούν μελλοντικά με αιολικούς σταθμούς. Αξίζει βέβαια να αναφέρουμε ότι ιδιώτες έχουν ήδη καταθέσει στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) αιτήσεις για δύο τέτοια συστήματα στην Κρήτη, ενώ ακούγεται ότι ετοιμάζονται και άλλα (Λέσβο, Κάρπαθο, Ικαρία κ.τ.λ.).

Σύμφωνα με τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η εφαρμογή αιολικών μηχανών παράλληλα με σύστημα αντλησιοταμίευσης παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα ακόλουθα:

- Μια τέτοια εφαρμογή συμβάλλει στην αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και τη μείωση της λειτουργίας των συμβατικών πετρελαϊκών μονάδων. Οι έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζονται με την ύπαρξη του αποθηκευτικού συστήματος και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση και διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Παράλληλα, η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος αυξάνεται με την ένταξη του υδροστρόβιλου, που αποτελεί μία ελεγχόμενη μονάδα παραγωγής ενέργειας με δυνατότητα άμεσης απόκρισης.
- Δεδομένου ότι η τιμή των καυσίμων αυξάνεται συνεχώς, η λειτουργία τέτοιων συστημάτων καθίσταται ανταγωνιστική.
- Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τα αιολικά πάρκα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών του CO₂. Αυτό σημαίνει μείωση του κόστους για τη ΔΕΗ και τους ιδιώτες παραγωγούς, το οποίο προφανώς καταλήγει στον καταναλωτή.
- Αυξάνεται πάρα πολύ η εγχώρια παραγωγή και μειώνεται η εξάρτηση από εισαγωγές καυσίμων (όπως είναι το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, ο λιθάνθρακας κτλ).
- Υπάρχουν σημαντικά κοινωνικά οφέλη, αφού το έργο συμβάλει στην περιφερειακή ανάπτυξη και στη δημιουργία απασχόλησης.
- Το υβριδικό αυτό υδροηλεκτρικό σύστημα μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιούν μέρος της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Έτσι εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα του νερού, όχι μόνο για ενεργειακή χρήση, αλλά και για ύδρευση-άρδευση.

Μοναδικό μειονέκτημα ενός τέτοιου υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος είναι το κόστος κατασκευής του. Το κόστος ανά MW ενός υδροηλεκτρικού κυμαίνεται στα 2-3 εκατομμύρια ευρώ έναντι 1,3 εκατομμυρίων ευρώ για μια μονάδα λιθάνθρακα και 700.000 ευρώ για μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου (φυσικό αέριο). Αν και ακριβό στην κατασκευή του, είναι ωστόσο πολύ πιο φθηνό στη λειτουργία του συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες, δεδομένης της συνεχούς αύξησης των τιμών των καυσίμων (Πάρης Προδρομίδης, "Εξυπνα υδροηλεκτρικά έργα για να φτάσουμε στα 10.000 MW αιολικών").

Τέλος, δεδομένου ότι η απόδοση και η οικονομικότητα ενός συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις λειτουργικές και τις σχεδιαστικές επιλογές, αναλύουμε στη συνέχεια τις διαφορετικές επιλογές που αφορούν στη διασύνδεση του συστήματος αυτού, τον προγραμματισμό της λειτουργίας του στροβίλου, τους περιορισμούς στην άμεση απορρόφηση ηλεκτρικής ισχύος από το δίκτυο, τη χρήση συμβατικής ισχύος για άντληση, την εγκατάσταση μονής ή διπλής σωλήνωσης.

Διασύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση.

Γενικότερα, όσον αφορά στη διασύνδεση του συστήματος αιολικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση διακρίνουμε δύο εναλλακτικές περιπτώσεις (*Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμιευτήρων”*):

- ✓ Την «άμεση σύνδεση», όπου το σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδέεται με τα αιολικά πάρκα που θα συνεισφέρουν στην άντληση με ανεξάρτητη του δικτύου γραμμή μεταφοράς. Η σύνδεση αυτή συναντάται σε νησιά μικρού ή πολύ μεσαίου μεγέθους.
- ✓ Την «έμμεση σύνδεση», όπου το σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδέεται με τα αιολικά πάρκα μέσω του κεντρικού δικτύου.

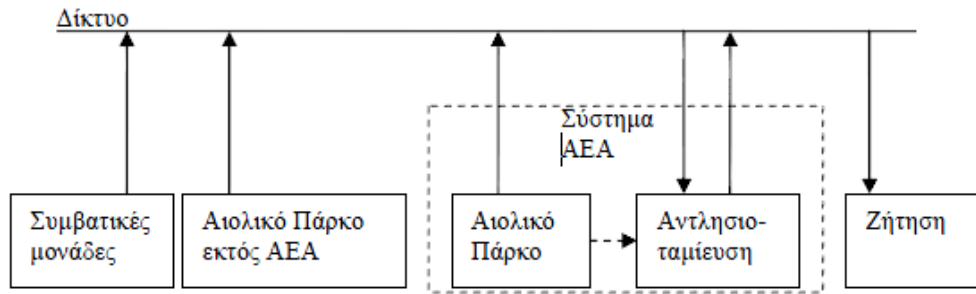
Σύνδεση μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα εντός ΑΕΑ.

Άμεση σύνδεση της μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα:

Η ύπαρξη άμεσης ανεξάρτητης σύνδεσης δίνει τη δυνατότητα στα αιολικά πάρκα να παρέχουν την απορριπτόμενη ισχύ στο σύστημα αντλησιοταμίευσης. Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- Αν $P_w > P_\phi$, τότε το αιολικό πάρκο καλύπτει εξ' ολοκλήρου τη στιγμιαία ζήτηση φορτίου και η περίσσεια της παρεχόμενης από αυτό ενέργειας τροφοδοτεί την αντλία του υδροηλεκτρικού συστήματος προκειμένου να αποταμιευτεί μέσω της ανύψωσης του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Αν υποθέσουμε ότι η πάνω δεξαμενή είναι γεμάτη, τότε είτε απορρίπτουμε την περίσσεια της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, είτε την αξιοποιούμε με κάποιο άλλο τρόπο (π.χ. αφαλάτωση), είτε μειώνουμε την παραγόμενη ισχύ από το αιολικό πάρκο.
- Αν $P_w < P_\phi$, τότε όλη η ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο διοχετεύεται στην κατανάλωση, ενώ παράλληλα παράγεται ένα επιπλέον ποσό ενέργειας από τον υδροστροβίλο για την κάλυψη της ζητούμενης ισχύος.

Αν μάλιστα κατά το σχεδιασμό του συστήματος προβλέπεται συμπληρωματικά η χρήση ισχύος από το δίκτυο και συνεπώς υπάρχει διασύνδεση μεταξύ μονάδας αντλησιοταμίευσης και κεντρικού δικτύου, τότε σε περίπτωση απώλειας των αιολικών οι αντλίες θα συνεχίσουν να λειτουργούν τραβώντας ισχύ από το κυρίως δίκτυο. Για να μη συμβεί αυτό απαιτείται πρόσθετο κατάλληλο σύστημα, το οποίο θα παρακολουθεί και θα προσαρμόζει κάθε στιγμή την κατανάλωση ισχύος των αντλιών στη διαθέσιμη αιολική ισχύ (Σχήμα 5.21).

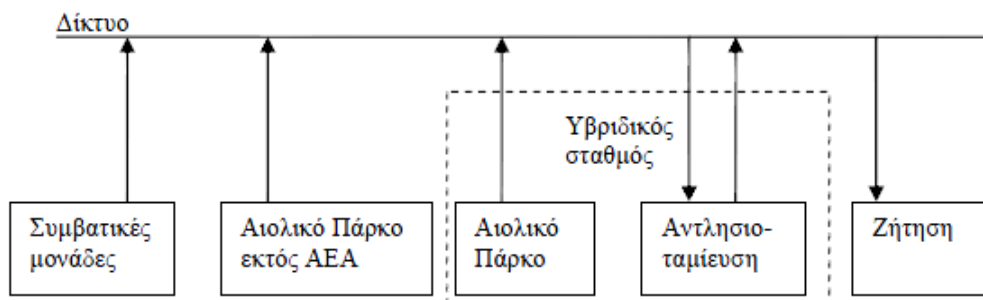


Σχήμα 5.21
Άμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ.

(Πηγή: Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμειυτήρων”)

Έμμεση σύνδεση της μονάδας αντλησιοταμίευσης με τα αιολικά πάρκα:

Στην περίπτωση αυτή, που θεωρείται και η πιο διαδεδομένη, το όλο σύστημα αποτελείται από τα αιολικά πάρκα εκτός του υβριδικού και το σύστημα ΑΕΑ (υβριδικός σταθμός) αποτελείται από τη μονάδα αποθήκευσης (αντλίες, στρόβιλος, δεξαμενές) και τα αιολικά πάρκα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.22, τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού, μέσω του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου, μπορούν να δώσουν ενέργεια στις αντλίες ή να καλύψουν μέρος της ζήτησης.



Σχήμα 5.22
Έμμεση σύνδεση συστήματος ΑΕΑ (μέσω του κεντρικού δικτύου)

(Πηγή: Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμειυτήρων”)

Στη συνέχεια εξετάζεται η χρήση του κεντρικού δικτύου για παροχή αιολικής ισχύος για άντληση. Για την απορρόφηση από το δίκτυο αιολικής ισχύος $P_{w \rightarrow A}$ πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\frac{P_{w \rightarrow A}}{P_{\phi}} \leq \delta \quad (5.42)$$

Όπου δ είναι η επιτρεπόμενη στιγμιαία συμμετοχή των αιολικών τη δεδομένη στιγμή (σε ποσοστό %).

Στην οριακή περίπτωση που ισχύει η ισότητα, εάν η απορριπτόμενη αιολική ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άντληση είναι $P_{w \rightarrow Re\ j \rightarrow Pump}$ και αυτή διοχετευτεί μέσω του δικτύου, τότε θα έχει σαν αποτέλεσμα η ζήτηση που θα βλέπει το δίκτυο να

αυξηθεί από P_ϕ σε $P_\phi + P_{w \rightarrow \text{Re } j \rightarrow \text{Pump}}$, η αιολική ισχύς που θα απορροφηθεί από το δίκτυο θα είναι $P_{w \rightarrow A} + P_{w \rightarrow \text{Re } j \rightarrow \text{Pump}}$ και ο λόγος θα γίνει:

$$\frac{P_{w \rightarrow A} + P_{w \rightarrow \text{Re } j \rightarrow \text{Pump}}}{P_\phi + P_{w \rightarrow \text{Re } j \rightarrow \text{Pump}}} > \frac{P_{w \rightarrow A}}{P_\phi} = \delta \quad (5.43)$$

Στην πράξη δηλαδή, θα εμφανιστεί στο δίκτυο αυξημένη ζήτηση λόγω της λειτουργίας των αντλιών, και η επιπλέον ζήτηση θα καλυφθεί από τα αιολικά.

Εάν στον περιορισμό της αιολικής ισχύος που πάει στην κατανάλωση, τεθεί περιορισμός στην ισχύ των αιολικών που πάει για άντληση, τότε τα συστήματα ΑΕΑ δεν θα μπορέσουν να συμβάλουν στην αύξηση της διείσδυσης των αιολικών και στην αξιοποίηση της περίσσειας αιολικής ισχύος. Για να μην υπάρχει περιορισμός, απαιτείται ένα σύστημα ελέγχου ή επικοινωνίας μεταξύ των διαχειριστών του ΑΕΑ και του ηλεκτρικού συστήματος που θα διασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ κατανάλωσης αντλιών και παραγωγής αιολικών κάθε στιγμή.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση αύξησης της στιγμιαίας συμμετοχής πέραν του επιτρεπόμενου ορίου διείσδυσης, είναι απαραίτητο ο διαχειριστής να έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζει τις αντλίες ως φορτία που μπορούν να περικοπούν εάν χρειαστεί. Δηλαδή, σε περίπτωση απώλειας των αιολικών ή πτώσης της συχνότητας στο δίκτυο, απαιτείται αυτόματη αποσύνδεση των αντλιών.

Σύνδεση αιολικού πάρκου εκτός ΑΕΑ με σύστημα ΑΕΑ.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται συμπληρωματικά για άντληση ενέργεια από το δίκτυο (για παράδειγμα τις ώρες χαμηλής ζήτησης), τα αιολικά πάρκα εκτός υβριδικού συμμετέχουν έμμεσα και αυξάνουν τη διείσδυσή τους (*Γεώργιος Κάραλης, "Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμιευτήρων"*). Πράγματι, εάν μια δεδομένη χρονική στιγμή η ζήτηση είναι P_ϕ , η δυνάμενη παραγόμενη αιολική ισχύς είναι P_w και η δυνάμενη να απορροφηθεί από το δίκτυο αιολική ισχύς είναι $P_{w \rightarrow A}$, σύμφωνα με την εξίσωση (3.42). Εάν ο υβριδικός σταθμός χρησιμοποιήσει ενέργεια για άντληση από το δίκτυο, έστω $P_{\text{Grid} \rightarrow \text{Pumping}}$, τότε η ζήτηση θα διαμορφωθεί σε $P_\phi + P_{\text{Grid} \rightarrow \text{Pumping}}$ και η δυνάμενη να απορροφηθεί αιολική ισχύς θα αυξηθεί και θα γίνει $(P_\phi + P_{\text{Grid} \rightarrow \text{Pumping}}) \cdot \delta$. Επομένως, ο υβριδικός σταθμός μπορεί έμμεσα να αυξήσει τη διείσδυση των εγκατεστημένων αιολικών εκτός υβριδικού, εφόσον οι αντλίες λειτουργούν με ενέργεια από το δίκτυο (μείγμα συμβατικής παραγωγής και αιολικών).

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση άπνοιας, τα αιολικά πάρκα δεν θα παράγουν ισχύ, οπότε η άντληση από το δίκτυο θα αντιστοιχεί σε συμβατική ισχύ. Αντίθετα, αν φυσάει, θα υπάρχει διαθέσιμη αιολική ισχύς για άντληση από τα αιολικά πάρκα του υβριδικού σταθμού, οπότε εκείνες τις ώρες δεν θα απαιτείται άντληση από το δίκτυο.

Συνεπώς, είναι φανερό ότι η έμμεση αυτή αύξηση της διείσδυσης των αιολικών εκτός υβριδικού είναι πολύ περιορισμένη και γενικά, ο υβριδικός σταθμός θα βοηθήσει στην αξιοποίηση της αιολικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα εντός ΑΕΑ.

Σύνδεση αιολικού πάρκου εντός συστήματος ΑΕΑ με το δίκτυο.

Η σύνδεση των αιολικών πάρκων με το δίκτυο είναι απαραίτητη, προκειμένου να παρέχουν άμεσα ενέργεια, όταν το επιτρέπουν οι συνθήκες και οι περιορισμοί του δικτύου.

Γενικά, η ενέργεια που προσφέρεται από τα αιολικά πάρκα εντός συστήματος ΑΕΑ άμεσα στο δίκτυο αναμένεται να είναι σχετικά μικρή. Αυτό εξαρτάται από την εγκατεστημένη αιολική ισχύ εντός του υβριδικού σταθμού, αλλά και τη στιγμιαία επιτρεπόμενη διείσδυση των αιολικών, η οποία ενδεχομένως να αυξηθεί με την εγκατάσταση του στρόβιλου ως στρεφόμενη εφεδρεία².

Σε επίπεδο λειτουργίας, για να μπορέσει να απορροφήσει το δίκτυο αιολική ισχύ από τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού σταθμού, απαιτείται ένα εξελιγμένο σύστημα επικοινωνίας. Ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να ενημερώνεται κάθε στιγμή για τη δυνάμενη να παραχθεί αιολική ισχύ, ώστε να μπορεί να ζητήσει άμεση απορρόφηση της αιολικής ισχύος από τα αιολικά πάρκα εντός του υβριδικού σταθμού μέχρι να καλυφθεί η ικανότητα απορρόφησης του συστήματος.

Σύνδεση του συστήματος αντλησιοταμίευσης με το δίκτυο.

Είναι σημαντικό να συνδέεται το σύστημα αντλησιοταμίευσης με το δίκτυο, έτσι ώστε ο στρόβιλος να παράγει και οι αντλίες να καταναλώνουν. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να απαιτηθεί η ταυτόχρονη λειτουργία του στρόβιλου και των αντλιών.

Στόχος της λειτουργίας του ΑΕΑ.

Στόχος της λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι η παροχή εγγυημένης ισχύος. Διακρίνονται τρεις βασικές επιλογές, καθεμία με διαφορετική φιλοσοφία και λογική (Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμιευτήρων”):

- 1) Κάλυψη των αιχμών - όταν η ζήτηση υπερβεί μια τιμή – από τον στρόβιλο:

Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές μηνιαίες και εποχιακές διακυμάνσεις, ενώ παράλληλα είναι επιθυμητό ο στρόβιλος να έχει ένα κύκλο λειτουργίας ικανό να του εξασφαλίσει βιωσιμότητα, προτείνεται ο στρόβιλος να λειτουργεί καθημερινά και να καλύπτει τη ζήτηση όταν αυτή υπερβεί μια τιμή. Η τιμή αυτή ορίζεται σαν ένα ποσοστό της αιχμής της προηγούμενης μέρας, επιτρέποντας την κάλυψη των σχετικών αιχμών της ζήτησης. Δηλαδή, όταν η ζήτηση ξεπεράσει αυτήν την τιμή, τότε το επιπλέον φορτίο είναι επιθυμητό να το αναλάβει ο στρόβιλος. Η επιθυμητή παραγωγή του στρόβιλου ορίζεται ως:

$$SP_T = P_\phi - L_A \quad (5.44)$$

² Η στρεφόμενη εφεδρεία περιγράφεται ως το περιθώριο μεταξύ της δυνατότητας παραγωγής της κάθε μονάδας παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και της πραγματικής παραγωγής της σε κάθε στιγμή. Διατίθεται υποχρεωτικά από τον κάθε παραγωγό, κατόπιν εντολών του Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς, ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής και αδιάλειπτη παροχή στους καταναλωτές σε περίπτωση απώλειας μιας από τις μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία.

Όπου:

$$L_A = (1 - a) \cdot peak \quad (5.45)$$

P_ϕ είναι η μέση ωριαία ζήτηση ισχύος, peak είναι η αιχμή των τελευταίων 24 ωρών και a είναι το άνω ποσοστό της ζήτησης που στοχεύει να καλύψει ο στρόβιλος.

Έτσι, εξασφαλίζεται αφενός η κάλυψη των ημερήσιων αιχμών της ζήτησης και αφετέρου η καθημερινή λειτουργία του στροβίλου - χρήσιμη για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

2) Σταθερή κάλυψη ενός ποσοστού της ζήτησης:

Στην περίπτωση αυτή προσδιορίζεται η επιθυμητή παραγωγή του στροβίλου ως σταθερό ποσοστό a της ζήτησης. Ο στρόβιλος λειτουργεί συνεχώς όλο το εικοσιτετράωρο, με αποτέλεσμα να παρέχεται η δυνατότητα μεγαλύτερης εκμετάλλευσης του στροβίλου ως στρεφόμενη εφεδρεία με σκοπό την άμεση αύξηση της διείσδυσης των αιολικών. Η επιθυμητή παραγωγή του στροβίλου ορίζεται ως:

$$SP_T = a \cdot P_\phi \quad (5.46)$$

Αυτή η επιλογή επιτρέπει την ένταξη του στροβίλου σε 24ωρη βάση, με στόχο την κάλυψη ενός συγκεκριμένου ποσοστού της ζήτησης, επομένως η παραγωγή του στροβίλου αυξομειώνεται ανάλογα με τη διακύμανση της ζήτησης. Επομένως, ο στρόβιλος εξυπηρετεί αφενός την κάλυψη των αιχμών της ζήτησης και αφετέρου την άμεση αύξηση της στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών.

3) Σταθερή λειτουργία του στροβίλου στα τεχνικά του ελάχιστα.

Η τρίτη επιλογή εξετάζει τη σταθερή ένταξη του στροβίλου στα τεχνικά του ελάχιστα (π.χ. στο 30% του ονομαστικού του φορτίου) σε 24ωρη βάση, έτσι ώστε να βρίσκεται πάντα σε στρεφόμενη εφεδρεία και να επιτρέπει την αύξηση της στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών:

$$SP_T = 30\% \cdot P_T \quad (5.47)$$

Σύγκριση:

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, είναι προφανές ότι η πρώτη επιλογή προέρχεται από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών από τον στρόβιλο, η δεύτερη συνδυάζει την ικανοποιητική κάλυψη των αιχμών και την 24ωρη λειτουργία – εφεδρεία του στροβίλου με σκοπό την αύξηση της διείσδυσης των αιολικών και η τρίτη γεννήθηκε από την ανάγκη του στροβίλου να λειτουργήσει ως στρεφόμενη εφεδρεία και να αυξήσει την άμεση διείσδυση των αιολικών.

Τα παραπάνω μπορούν να διατυπωθούν και σε σχέση με την αθροιστική συνεισφορά του στροβίλου με τα αιολικά. Δηλαδή:

- 1) Κάλυψη των αιχμών από τον στρόβιλο και τα αιολικά μαζί.
- 2) Σταθερή κάλυψη ενός ποσοστού της ζήτησης από τον στρόβιλο και τα αιολικά μαζί.
- 3) Σταθερή παραγόμενη ενέργεια αθροιστικά από τον στρόβιλο και τα αιολικά.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ιδέα είναι ότι η αιολική ενέργεια - όταν είναι διαθέσιμη - λειτουργεί συμπληρωματικά για να καλύψει τις υποχρεώσεις του στρόβιλου, ενώ ο στρόβιλος αναλαμβάνει να αυξομειώνει την παραγωγή του και να καλύπτει τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, ο στρόβιλος αναλαμβάνει να εξισορροπήσει τόσο τις διακυμάνσεις της ζήτησης, όσο και της διακυμάνσεις των αιολικών (Papathanassiou S.A., Tziantzi M., Papadopoulos M.P., Tentzerakis S.T., Vionis P.S., 2003).

Αντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παραγόμενη ισχύς από το αιολικό πάρκο παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ανέμου, είναι προφανές ότι αντίστοιχες διακυμάνσεις θα παρουσιάζει και η απορριπτόμενη κάθε φορά αιολική ισχύς, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη υδραυλική ενέργεια να είναι μικρή και να ακολουθεί στοχαστική κατανομή ανά ημέρα του έτους. Συνεπώς, σε περίπτωση που δεν επιτρέπεται συμπληρωματικά η άντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας περιορίζεται η εγγυημένη ισχύς που μπορεί να παρέχει ο στρόβιλος. Για την καλύτερη λοιπόν αξιοποίηση της απορριπτόμενης αιολικής ισχύος, καθώς και του στρόβιλου απαιτείται η συμπληρωματική άντληση με χρήση συμβατικής ενέργειας.

Αν θα χρησιμοποιηθεί ή όχι για άντληση η διαθέσιμη συμβατική ισχύς εξαρτάται από δύο παράγοντες (Γεώργιος Κάραλης, “Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλιοσταμειωτήρων”):

- ✓ Την διαθέσιμη αιολική ισχύ για άντληση τη συγκεκριμένη στιγμή. Η αιολική ισχύς έχει προφανώς προτεραιότητα στην άντληση.
- ✓ Την ανάγκη για μετακίνηση νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Σε περίπτωση που η άνω δεξαμενή είναι γεμάτη, αποφεύγεται η αγορά ενέργειας από το δίκτυο. Παράλληλα, δίνεται το περιθώριο εάν τις επόμενες ώρες προκύψει διαθέσιμη αιολική ισχύς για άντληση, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Εισάγεται δηλαδή ένας έλεγχος που σχετίζεται με τη στάθμη του νερού στην άνω δεξαμενή, και ορίζει κάτω από ποια στάθμη ασφαλείας χρησιμοποιείται η διαθέσιμη από το δίκτυο ισχύς για άντληση.

Το δίλημμα της σωλήνωσης.

Στην παράγραφο 5.2.2 παρουσιάσαμε αναλυτικά τις βασικές σχεδιαστικές εκδοχές σε ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης. Οι ίδιες σχεδιαστικές εκδοχές ακολουθούνται και στην περίπτωση που το σύστημα αντλιοσταμείωσης εφαρμόζεται παράλληλα με αιολικές μηχανές:

- Μονή σωλήνωση:

Αν και πρόκειται για οικονομική λύση, δεν επιτρέπει τη ταυτόχρονη λειτουργία του στρόβιλου και των αντλιών, οπότε καθορίζεται αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας ο στρόβιλος ή οι αντλίες. Οι αντλίες έχουν προτεραιότητα στη λειτουργία όταν ο υβριδικός σταθμός στοχεύει στην εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερης από την απορριπτόμενη αιολική ισχύ (δηλαδή κυρίως τις ώρες που ο άνεμος είναι χαμηλός και δευτερευόντως τις ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή). Αντίθετα, ο στρόβιλος έχει προτεραιότητα λειτουργίας όταν ο υβριδικός σταθμός στοχεύει πρωταρχικά να

υπηρετήσει τις ανάγκες του ηλεκτρικού συστήματος δίνοντας ισχύ στο δίκτυο όταν απαιτείται (π.χ. στις αιχμές της ζήτησης).

- Διπλή σωλήνωση.

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών. Ο λόγος για τον οποίον μπορεί να απαιτείται η ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών δίνεται από τους περιορισμούς του δικτύου. Δεδομένου λοιπόν ότι η άμεση απορρόφηση της αιολικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης στιγμιαίας διείσδυσης των αιολικών, το υβριδικό σύστημα είναι μονόδρομος για να φθάσουμε σε μεγαλύτερη διείσδυση. Ακόμα, η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο αυτών μηχανών είναι αναγκαία σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα διαθέσιμο άνεμο, όπου από τη μία απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας αιολικής ισχύος και από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (είτε λόγω υψηλής ζήτησης είτε λόγω απώλειας των αιολικών).

- Μονή σωλήνωση με σύνθετη λειτουργία.

Επιτρέπει τη διπλή ταυτόχρονη λειτουργία του στροβίλου και των αντλιών με τη χρήση μονής σωλήνωσης. Το σύστημα αντλησιοταμίευσης περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Πρόκειται για την πιο οικονομική λύση, χωρίς να υστερεί λειτουργικά.

5.2.4.2) Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα.

Ιδιαίτερα ελκυστικά μεγέθη εξάγονται επίσης από το συνδυασμό συστημάτων αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα για εξοικονόμηση σε περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος σε ισχείς μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες, λόγω τεχνικών ελαχίστων. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου και γρήγορη απόσβεση των αρχικών κεφαλαίων επένδυσης με τη χρήση συστήματος αντλησιοταμίευσης (Κατσαπρακάκης, 2006).

Κατανομή Θερμικών Μονάδων.

Το Σύστημα παραγωγής της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), πλην των νησιών, αποτελείται από τις Μονάδες του Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2
Σύστημα Παραγωγής της ΔΕΗ (πλην νήσων).
(Πηγή: ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΝΕΔΡΙΟ «EnergyTec 2006» &
1^η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ: ΜΟΡΦΕΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (2006))

Είδος	Πλήθος	Ισχύς (MW)
Λιγνιτικές	22	4.808
Πετρελαϊκές	4	718
Φυσικού Αερίου	6	1.539
Υδροηλεκτρικές	55	3.060

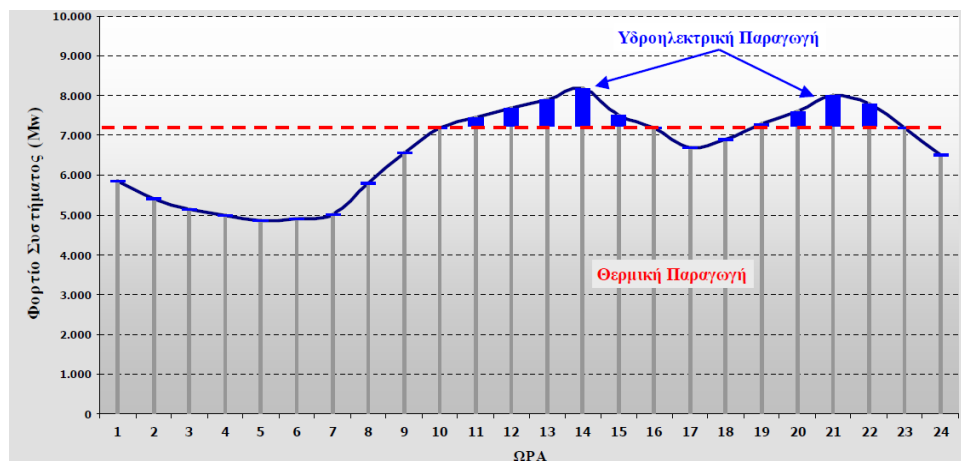
Επιπρόσθετα, η σύνθεση της προσφερόμενης ενέργειας από τη ΔΕΗ στο Σύστημα για το έτος 2006, είναι η ακόλουθη (ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΝΕΔΡΙΟ «EnergyTec 2006» & 1^η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ: ΜΟΡΦΕΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (2006)):

- ✓ Από Λιγνιτικές Μονάδες: 30.400 GWh.
- ✓ Από Πετρελαϊκές Μονάδες: 3.200 GWh.
- ✓ Από Μονάδες Φυσικού Αερίου: 8.500 GWh.
- ✓ Από Υδροηλεκτρικές Μονάδες: 6.200 GWh.
- ✓ Από Εισαγωγές: 2.900 GWh

Σκοπός είναι η κάθε ποσότητα ζητούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που πρόκειται να παραχθεί από τις Θερμικές Μονάδες, να παραχθεί με το μικρότερο δυνατό κόστος. Επομένως, για κάθε επιπλέον ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) που απαιτείται να παραχθεί από το πλήθος των διαθέσιμων Μονάδων Παραγωγής, επιλέγεται εκείνη η Μονάδα Παραγωγής που θα απαιτήσει τη μικρότερη επιπλέον δαπάνη σε μεταβλητό κόστος, δηλαδή, βασικά, κατανάλωση καυσίμου. Η οικονομικότερη φόρτιση των Μονάδων Παραγωγής επιτυγχάνεται όταν η σειρά φόρτισης είναι αντιστρόφως ανάλογη του Οριακού Κόστους των Μονάδων Παραγωγής κάθε χρονική στιγμή. Ειδικά για την περίπτωση των Μονάδων με το ίδιο καύσιμο, ο ανωτέρω τρόπος οδηγεί στη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση καυσίμων .

Υδροθερμική Συνεργασία.

Για τη λειτουργία των Υδροηλεκτρικών Μονάδων χρησιμοποιείται το κριτήριο της Υποκατάστασης Παραγωγής (ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΝΕΔΡΙΟ «EnergyTec 2006» & 1^η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ: ΜΟΡΦΕΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (2006)). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, όταν παράγει μια υδροηλεκτρική μονάδα τότε δεν φορτίζεται (καταναλώνει καύσιμο) αντίστοιχα μια Θερμική. Η υδροθερμική συνεργασία αποσκοπεί στη μέγιστη αποφυγή κόστους (ισοδύναμα κατανάλωσης καυσίμων) από τις Θερμικές Μονάδες με τη χρήση μίας συγκεκριμένης συνολικά διαθέσιμης ποσότητας υδροηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος. Το έτος είναι και η περίοδος διακύμανσης των εισροών στους ταμιευτήρες (Σχήμα 5.23).



Σχήμα 5.23

Βέλτιστη χρήση υδροηλεκτρικών μονάδων.

(Πηγή: ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΝΕΔΡΙΟ «EnergyTec 2006» &

1^η ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΚΘΕΣΗ: ΜΟΡΦΕΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (2006))

Τόσο οι Υδροηλεκτρικές Μονάδες όσο και οι Θερμικές Μονάδες Παραγωγής υπόκεινται στον περιορισμό της ονομαστικής ισχύος τους για τη μέγιστη δυνατή παραγωγή τους. Ενδεικτικά αναφέρουμε και άλλους περιορισμούς στους οποίους υπόκεινται οι Υδροηλεκτρικές Μονάδες:

- Περιορισμοί διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας μακροπρόθεσμα. Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, οι Υδροηλεκτρικές Μονάδες δεν μπορούν να παράγουν περισσότερη ενέργεια από όση είναι αποταμιευμένη στους ταμιευτήρες τους συν την ενέργεια εισροών, που όμως δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο και μπορεί μόνο να προβλεφθεί.
- Περιορισμοί αλληλεξάρτησης Μονάδων του ίδιου ποταμού. Εάν λειτουργήσει μια Μονάδα στο άνω μέρος του ποταμού πρέπει διαδοχικά να λειτουργήσουν και οι μονάδες στη συνέχεια του ποταμού.
- Περιορισμοί συμβατικής υποχρεωτικής παραγωγής, για παράδειγμα για λόγους αρδεύσεων, ύδρευσης κ.α.
- Περιορισμοί υποχρεωτικής παραγωγής για λόγους ασφαλείας φραγμάτων (π.χ. σε περιπτώσεις έντονων εισροών στους ταμιευτήρες και αντίστοιχης ανόδου της στάθμης των φραγμάτων).
- Περιορισμοί ειδικής κατανάλωσης λόγω της στάθμης του φράγματος. Η ίδια ποσότητα ύδατος δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, να μετατραπεί δηλαδή σε ηλεκτρική ενέργεια, το ίδιο σε υψηλές και χαμηλές στάθμες φράγματος.

Το όλο πρόβλημα είναι αρκετά πολύπλοκο και λόγω του πλήθους των παραμέτρων αλλά και της φύσης τους (πιθανολογικές). Ωστόσο, η πρακτική αυτή αδιαμφισβήτητη οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, διότι υποκαθιστά μεταξύ Θερμικών Μονάδων ομοίου καυσίμου, αυτήν με την υψηλότερη ειδική κατανάλωση.

Λειτουργία Υδροηλεκτρικών Μονάδων.

Η βέλτιστη λειτουργία των Υδροηλεκτρικών Μονάδων αποσκοπεί στο να παράγεται κάθε ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τις Υδροηλεκτρικές Μονάδες με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ύδατος. Έχει γίνει κατανοητό από τις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης των Υδροηλεκτρικών Μονάδων εξαρτάται, εκτός από τα ηλεκτρομηχανολογικά τους χαρακτηριστικά (π.χ. βαθμοί απόδοσης γεννήτριας και στροβίλου), και από το ύψος στάθμης του ταμιευτήρα τους (ύψος πτώσης). Για το λόγο αυτό λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε, όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, όχι μόνο να λειτουργούν σε φορτίο ώστε να εξασφαλίζεται ο καλύτερος ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης, αλλά και το ύψος στάθμης του ταμιευτήρα τους να είναι το μέγιστο δυνατόν.

Συμπέρασμα:

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα αυτή, είναι πλέον κατανοητό ότι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας με την κατάλληλη σειρά φόρτισης των Θερμικών Μονάδων όπως και τη χρήση των Υδροηλεκτρικών Μονάδων. Περαιτέρω ανάλυση των υδροηλεκτρικών συστημάτων σε συνδυασμό με θερμικές μονάδες ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

6.1) Ενέργεια υδρογόνου.

Γενικά για το υδρογόνο.

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Σε καθαρή αέρια μορφή συναντάται σπάνια, παρόλο που πολλά ορυκτά και όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί περιέχουν ενώσεις του σε πολύ μεγάλο βαθμό. Έτσι, το υδρογόνο βρίσκεται στην κερατίνη, στα ένζυμα που συντελούν στην πέψη, στα μόρια του DNA, καθώς και στις τροφές υπό τη μορφή λιπών, πρωτεϊνών και υδατανθράκων. Εξαιτίας της ελαφρότητάς του, το υδρογόνο δεν αποτελεί περισσότερο από το 1% της συνολικής μάζας της Γης (*Wikipedia*, “Υδρογόνο”).

Σε θερμοκρασία δωματίου, το υδρογόνο βρίσκεται σε αέρια κατάσταση, στην οποία σαν υλικό είναι άοσμο, άχρωμο και εύφλεκτο. Όταν καίγεται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα (ή και με το “καθαρό” οξυγόνο), το υδρογόνο σχηματίζει νερό και παράγει θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η ονομασία του οφείλεται στον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από τη σύμπτυξη δύο αρχαιοελληνικών λέξεων: “ύδωρ” και “γίγνομαι”. Ως ξεχωριστό χημικό στοιχείο αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά από τον Άγγλο χημικό Henry Cavendish το 1766.

Το υδρογόνο κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των χημικών στοιχείων και το άτομό του συμβολίζεται με το λατινικό γράμμα H. Κάθε άτομό του αποτελείται από ένα πρωτόνιο και από ένα ηλεκτρόνιο, ενώ κατά την ένωση δύο διαφορετικών ατόμων του παράγεται ένα μόριο υδρογόνου με μοριακό τύπο: H₂ (H – H). Το υδρογόνο μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν οποιοδήποτε άλλο χημικό στοιχείο και έτσι δίνει τις περισσότερες χημικές ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Στις σημαντικότερες από τις ενώσεις του συγκαταλέγονται το νερό, οι ενώσεις του με τον άνθρακα (οργανικές ενώσεις) και οι διάφοροι φυσικοί υδρογονάνθρακες, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Όσον αφορά στις φυσικές του ιδιότητες, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή πίεση 1 atm (101,325 kPa) και θερμοκρασία 0 °C (273,15 K), το υδρογόνο έχει πυκνότητα 0,0899 kg/m³, δηλαδή περίπου δέκα φορές μικρότερη από αυτήν του αέρα. Με εξαίρεση το ήλιο, το υδρογόνο έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού (20,268 K) και πήξεως (14,025 K). Όταν η θερμοκρασία του αερίου υδρογόνου μειωθεί κάτω από τους 20,268K σε κανονικές συνθήκες πίεσης (P = 1atm), αυτό αρχίζει να υγροποιείται, περνώντας σταδιακά από την αέρια στην υγρή του φάση. Το υγρό υδρογόνο σε μικρές ποσότητες είναι άχρωμο, αλλά όταν μελετάται σε λεπτά δείγματα παίρνει ένα ανοιχτό μπλε. Με συνεχή μείωση της θερμοκρασίας του σε κανονικές συνθήκες πίεσης (P = 1atm), το υγρό υδρογόνο τελικά στερεοποιείται στους 14,025K. Το στερεό υδρογόνο σαν υλικό είναι και αυτό άχρωμο όπως και το υγρό υδρογόνο (*Wikipedia*).

Γιατί προτείνεται το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας.

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται σαν βιομηχανικό καύσιμο εδώ και αρκετές δεκαετίες. Από την συνολική ποσότητα του υδρογόνου που παράγεται κάθε χρόνο σε παγκόσμια κλίμακα, η βιομηχανία της αμμωνίας καταναλώνει περίπου το 50% αυτής, ενώ τα διυλιστήρια του πετρελαίου το 37%. Το υπόλοιπο 13% καταναλώνεται σε διάφορους άλλους βιομηχανικούς τομείς, μεταξύ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό σε κατανάλωση κατέχει η βιομηχανία των τροφίμων (*ΕΚΠΑΑ, Νοέμβριος 2003, “Ενέργεια, περιβάλλον και επιχειρηματικότητα - Προτάσεις για τον ενεργειακό τομέα στον ελληνικό χώρο”*).

Το υδρογόνο, όμως, εκτός από βιομηχανικό καύσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή ενέργειας, δεδομένου ότι απαντά σε τέσσερα μείζονα προβλήματα της χρήσης των συμβατικών καυσίμων (*Μαρία Χωραφά, “Υδρογόνο, Το καύσιμο του μέλλοντος”*):

- 1) Εκμηδενισμός ή ελαχιστοποίηση της ρύπανσης του περιβάλλοντος από εκπομπές.
- 2) Επάρκεια αποθεμάτων.
- 3) Ασφάλεια εφοδιασμού.
- 4) Ενεργειακή ανεξαρτησία.

Εκμηδενισμός – Ελαχιστοποίηση της Ρύπανσης:

Όπως αναφέρθηκε, η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο με αντίδρασή του με το οξυγόνο παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα και μοναδικό υποπροϊόν υδρατμούς και καθαρό νερό. Έτσι, η τεχνολογία του υδρογόνου μπορεί να συμβάλει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, φαινόμενα που έχουν προκληθεί από τη χρήση των συμβατικών μορφών καυσίμων.

Βέβαια, το υδρογόνο δεν απαντάται μόνο του στη φύση, με συνέπεια να απαιτείται η παραγωγή του για τη χρήση του ως ενεργειακό καύσιμο. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνολογίες παρασκευής του, οι περισσότερες όμως από τις οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή ρυπογόνων αερίων. Σήμερα, η πλέον διαδεδομένη και οικονομικά βιώσιμη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η αναμόρφωση υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου) με ατμό, η οποία θα παρουσιασθεί αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Αυτή η μέθοδος παραγωγής έχει, όμως, ανεπιθύμητα για το περιβάλλον προϊόντα (παραγωγή CO₂, CO).

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αναβιώσει η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμων με χρήση υδρογόνου. Οι κυψελίδες καυσίμου βασίζονται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση: παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο ως καύσιμο, το οποίο οξειδώνεται ηλεκτροχημικά με οξυγόνο με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και μοναδική εκπομπή το νερό. Η τεχνολογία των κυψελίδων καυσίμου καθιστά το υδρογόνο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας τελικής χρήσης χωρίς επιβλαβείς εκπομπές και με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Από την άλλη πλευρά, δύναται η παραγωγή υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), κυρίως αιολική ενέργεια και φωτοβολταϊκά, όπου δεν υπάρχει καμία περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, γεγονός που το καθιστά το πλέον φιλικό καύσιμο για το περιβάλλον. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν είναι ακόμη οικονομικά ανταγωνιστική, απαιτεί μεγάλες εκτάσεις για την εγκατάσταση των συστημάτων ΑΠΕ, ενώ μπορεί να χαρακτηριστούν ρυπογόνες οι διαδικασίες κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών

μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) ή ηλιακής (φωτοβολταϊκά) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου.

Επάρκεια Αποθεμάτων:

Όσον αφορά στον προβληματισμό για την αιφορία των αποθεμάτων ενέργειας, φαίνεται ότι το υδρογόνο κυριαρχεί ως λύση. Το γεγονός ότι το υδρογόνο αποτελεί το 90% της συνολικής μάζας του σύμπαντος το καθιστά καύσιμο ευρείας διάθεσης, του οποίου ο ανεφοδιασμός δεν τελειώνει ποτέ. Πράγματι, το νερό και οι υδρατμοί που εκλύονται από την καύση του υδρογόνου υφίστανται ανακύκλωση μέσω της βροχής, των ποταμών, των λιμνών και των ωκεανών για να «επανορθώσουν» για το νερό που αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι το υδρογόνο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, η οποία ανέρχεται σε 33,30 kWh/kg (Πίνακας 6.1). Η ενέργεια αυτή είναι τρεις φορές μεγαλύτερη περίπου από την ενέργεια 1 kg συμβατικής βενζίνης, γεγονός που καθιερώνει το υδρογόνο καύσιμο υψηλής δραστηριότητας, οπότε και ενδείκνυται σε πλήθος εφαρμογών. Από την άλλη μεριά βέβαια, το υδρογόνο παρουσιάζει και την μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, η οποία ανέρχεται σε 0,53 kWh/lt (Πίνακας 6.1). Αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά μικρή του αέρια πυκνότητα υπό συνθήκες περιβάλλοντος και, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί σήμερα το κυριότερο εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του, κυρίως στον τομέα της ασφαλούς και αποτελεσματικής αποθήκευσής του.

Πίνακας 6.1
Συγκριτικά στοιχεία ενεργειακής πυκνότητας μεταξύ του υδρογόνου και των κυριότερων από τα σημερινά ενεργειακά καύσιμα.
(Πηγή: Εγκυκλοπαίδεια Πάπυρος – Larus Britannica, Αθήνα 1992)

Καύσιμο	Υδρογόνο	Φυσικό Αέριο	LPG (Προπάνιο)	Πετρέλαιο (Αργό)	Μεθανόλη	Βενζίνη	Μπαταρίες Μολύβδου
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (kWh/kg)*	33,30	13,90	12,90	12,10	5,60	12,70	0,03
Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου (kWh/lt)	0,53	2,60	7,50	10,80	4,40	8,70	0,09

* Το βάρος κάθε καυσίμου αποτελεί το καθαρό βάρος αυτού, χωρίς τον συμψηφισμό κάποιου άλλου βάρους που προστίθεται στο συνολικό του βάρος (π.χ. βάρος εξοπλισμού για την αποθήκευσή του κ.τ.λ.).

Ασφάλεια Εφοδιασμού:

Τα περισσότερα καύσιμα έχουν υψηλή ενεργειακή περιεκτικότητα και απαιτείται ασφαλής χειρισμός τους. Το υδρογόνο δεν θεωρείται ούτε λιγότερο ούτε περισσότερο επικίνδυνο συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα. Άλλωστε, ο σωστός και ασφαλής χειρισμός ενός καυσίμου εξαρτάται από την καλή γνώση των φυσικών, χημικών και

θερμικών του ιδιοτήτων, οπότε διαθέτοντας τις γνώσεις αυτές και ο χειρισμός του υδρογόνου ως καύσιμο μπορεί να επιτευχθεί με ασφάλεια. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί, χαρακτηρίζοντας με έναν συντελεστή ασφαλείας τα καύσιμα ανά ιδιότητά τους, το υδρογόνο κατατάσσεται ως το πιο ασφαλές καύσιμο. Τονίζεται ότι τα επίπεδα ασφαλείας ενός καυσίμου καθορίζονται από την τοξικότητά τους, αλλά και τους κινδύνους πυρκαγιάς (επίπεδα ανάφλεξης).

Γενικότερα, τα καύσιμα από μόνα τους είναι τοξικά. Η τοξικότητά τους αυξάνεται, καθώς ο λόγος άνθρακα / υδρογόνου αυξάνεται. Το υδρογόνο, καθώς και τα κύρια προϊόντα της καύσης του, όπως το νερό ή οι υδρατμοί, δεν είναι τοξικά. Ωστόσο, οξειδία του αζώτου μπορεί να παραχθούν από την καύση του με τον αέρα (λόγω της παρουσίας του αζώτου στον ατμοσφαιρικά αέρα), τα οποία παρουσιάζουν τοξικότητα, όπως συμβαίνει και με τα συμβατικά καύσιμα. Η διαφορά όμως με τα συμβατικά καύσιμα έγκειται στο ότι οι ποσότητες των οξειδίων του αζώτου είναι πολύ μικρές, ακόμα και για μαζική κατανάλωση του υδρογόνου, οπότε δεν θα επηρεάσουν σημαντικά το γήινο περιβάλλον.

Το υδρογόνο είναι το ίδιο ακίνδυνο από πλευράς αυθόρμητης ανάφλεξης, σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (π.χ. βενζίνη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ.). Μάλιστα, κατά την απουσία ατμοσφαιρικού αέρα και υπό συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $P=1\text{atm}$), το υδρογόνο είναι λιγότερο εύφλεκτο από αυτά, έχοντας για θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης του τους $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ (αντίστοιχη θερμοκρασία αυθόρμητης ανάφλεξης της βενζίνης, απουσία ατμοσφαιρικού αέρα: $230\text{ }^{\circ}\text{C} \div 480\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Μιχάλης Ι. Βαλάκας: “Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας”).

Τέλος, όσον αφορά θέματα ασφαλείας, το υδρογόνο είναι άμεσα συγκρίσιμο με το φυσικό αέριο, το δίκτυο μεταφοράς του οποίου είναι 1000 φορές λιγότερο επικίνδυνο από τα τάνκερ μεταφοράς αργού πετρελαίου, ανά μονάδα ενέργειας

Ενεργειακή ανεξαρτησία:

Το υδρογόνο μπορεί να βοηθήσει πολλά κράτη που είναι “φτωχά” σε διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων να αναπτύξουν τα δικά τους αυτόνομα και ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα. Μέσω της τεχνολογίας του υδρογόνου τα κράτη αυτά, που ως γνωστόν είναι και τα πολυπληθέστερα πάνω στον πλανήτη, θα μπορέσουν να αναπτύξουν τις δικές τους αυτόνομες ενεργειακές οικονομίες, ξεφεύγοντας από τον φαύλο κύκλο της ενεργειακής τους εξάρτησης από άλλα κράτη – προμηθευτές τους σε ορυκτά καύσιμα.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της ενεργειακής ανεξαρτησίας που προσφέρει το υδρογόνο ως καύσιμο, ανήκει και η υψηλή αυτονομία και αυτοδιαχείριση που προσφέρει όταν καταναλώνεται στα πλαίσια ενός ενεργειακού συστήματος. Η υψηλή αυτή αυτονομία και αυτοδιαχείριση συντελεί στο να προφυλάσσεται ικανοποιητικά το σύστημα αυτό, όταν στο δίκτυό του συμβούν διάφορες καταστροφές λόγω δυσμενών γεγονότων (π.χ. πυρκαγιές, πλημμύρες, σεισμοί κ.α.). Έτσι, η διακοπή της λειτουργίας μερικών τμημάτων του δεν έχει οπωσδήποτε σαν αποτέλεσμα την καθολική του κατάρρευση, μιας και τα διάφορα τμήματα που το αποτελούν είναι λίγο ή περισσότερο ανεξάρτητα το ένα με το άλλο.

Προβληματισμοί για τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο.

Γενικότερος προβληματισμός για τη χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο στο μέλλον αποτελεί η αποθήκευση και η διανομή του προς τους καταναλωτές (*Μαρία Χωραφά, “Υδρογόνο, Το καύσιμο του μέλλοντος”*).

Πρόβλημα Αποθήκευσης:

Το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα πτητικό, γεγονός που δυσχεραίνει την αποθήκευσή του μιας και διαρρέει πολύ εύκολα. Ακόμα, δεδομένου ότι είναι ένα στοιχείο που σε αέρια κατάσταση είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητάς του σε πολύ μικρού μεγέθους δεξαμενές είναι ακόμα αρκετά δύσκολη, εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται γι’ αυτό (ή αντίστοιχα εξαιτίας των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών που χρειάζονται για την αποθήκευσή του σαν υγρό). Εκτός από αυτό, οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται για την αέρια ή την υγρή του αποθήκευση συνεπάγονται και την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την επίτευξή τους, με αποτέλεσμα η αέρια ή η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου να είναι αρκετά δαπανηρή σαν μέθοδος αποθήκευσής του.

Η έρευνα που γίνεται αναφορικά με την αποθήκευση του υδρογόνου έχει στραφεί προς νέες τεχνικές μεθόδους, οι οποίες έχουν σαν πεδίο αναφοράς τους την αποθήκευσή του σε νανοδομημένα υλικά (αύξηση της ποσότητας αποθήκευσής του) και την δέσμευσή του από στερεά υλικά τα οποία το αποθηκεύουν στη μάζα τους με τη μορφή “στερεού” (προσοροφημένο ή απορροφημένο μεταξύ των στερεών τους μορίων). Η “στερεή” αποθήκευση του υδρογόνου στα συγκεκριμένα υλικά έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνονται δραματικά οι ακραίες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που απαιτούνται κατά την αποθήκευσή του σαν υγρό ή σαν αέριο.

Πρόβλημα Διανομής:

Όσον αφορά στη διανομή του υδρογόνου, θα πρέπει να υπάρχει εύκολος, ασφαλής και οικονομικός τρόπος πρόσβασης των καταναλωτών στο καύσιμο. Η μετάβαση από ένα επί σειράς ετών σύστημα ενέργειας που βασίζεται κυρίως στο πετρέλαιο και τα παράγωγά του, σε ένα που θα γίνεται χρήση υδρογόνου απαιτεί χρόνο και δαπανηρά βήματα από κυβερνήσεις, παραγωγούς και καταναλωτές ενέργειας. Προς το παρόν, το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του υδρογόνου δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και από όλες τις χώρες του κόσμου. Μελλοντικά, στον τομέα των μεταφορών θα πρέπει να υπάρχει στους δρόμους μεγάλος αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού, ενώ οι καταναλωτές θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με τις καινούριες απαιτήσεις ως προς την ασφάλεια χρήσης.

Επιπρόσθετα, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ΑΠΕ δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το γεγονός όμως αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον, όσο η κατανάλωσή του σαν καύσιμο θα αρχίσει να αυξάνεται και όσο η παραγωγή του από ΑΠΕ θα γίνεται όλο και περισσότερο φθηνότερη.

Αυξημένο Κόστος Ενεργειακών Διατάξεων:

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο μαζικής παραγωγής ενέργειας, είναι το αυξημένο κόστος των διαφόρων ενεργειακών

διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή του σαν καύσιμο (των κυψελών καυσίμου και των ΜΕΚ υδρογόνου). Η τεχνολογία των διατάξεων αυτών, προς το παρόν, δε μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη, μιας και κατά την εφαρμογή τους παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικής και οικονομικής φύσης προβλήματα που δεν καθιστούν ικανή τη μαζική χρησιμοποίησή τους.

Οικονομία του υδρογόνου – Εφαρμογές τεχνολογίας του υδρογόνου στην Ελλάδα.

Οι μέχρι σήμερα υπάρχουσες τεχνικές δυσχέρειας, αλλά και το σχετικό κόστος σε όλα τα επίπεδα της παραγωγής, διανομής, αποθήκευσης, υποδομής και ασφάλειας θέτουν την εποχή μετάβασης του υδρογόνου σε μακρινό ορίζοντα. Πρέπει να βελτιωθούν τα υλικά, τα κατασκευαστικά στοιχεία, οι επιδόσεις των τεχνολογιών υδρογόνου και ο σχεδιασμός των συστημάτων, ενώ δεν πρέπει να παραμεληθούν οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν από την αντίστοιχη τεχνολογία.

Η υιοθέτηση δηλαδή του υδρογόνου ως βασικού ενεργειακού μέσου στο μέλλον προϋποθέτει την ριζική μεταστροφή της παγκόσμιας ενεργειακής οικονομίας σε έναν καινούργιο και διαφορετικό τρόπο λειτουργίας της, ο οποίος θα βασίζεται κατά κύριο λόγο σ' αυτό και στις διάφορες τεχνολογίες του. Η νέα αυτή μορφή, χαρακτηρίζεται σήμερα από τους επιστήμονες που ασχολούνται με την τεχνολογία του σαν παγκόσμια “Οικονομία του Υδρογόνου”.

Παρόλο, όμως, τους προβληματισμούς και τις δυσκολίες που παρουσιάζει η παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, η διορατικότητα κρατών και οργανισμών για τη μελλοντική καθιέρωσή του το έχουν ήδη κατατάξει σε ανταγωνιστικό καθεστώς. Σήμερα, κονδύλια και έρευνες διατίθενται και διεξάγονται από διάφορα κράτη και οργανισμούς για τη μελλοντική καθιέρωση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα στους διάφορους τομείς της βιομηχανίας, των μεταφορών και της οικιακής χρήσης (*Μαρία Χωραφά, “Υδρογόνο, Το καύσιμο του μέλλοντος”*).

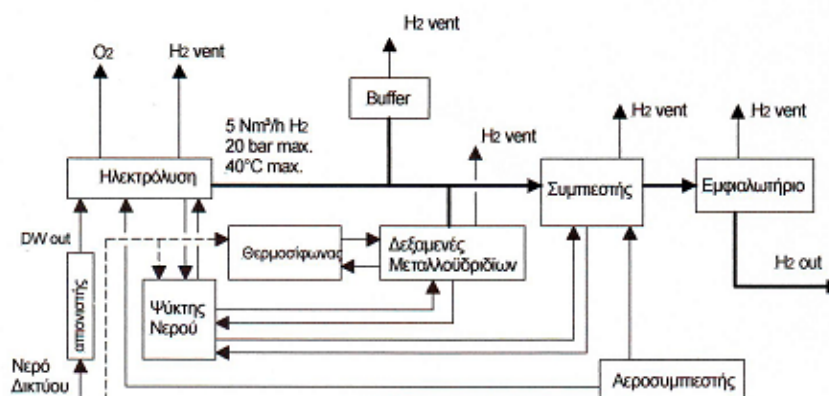
Στην Ελλάδα, αυτή τη στιγμή αρκετά ερευνητικά εργαστήρια ασχολούνται με την τεχνολογία της παραγωγής και χρήσης του υδρογόνου ως ενεργειακό καύσιμο, ενώ γίνεται μια Εθνική προσπάθεια με συνεργασία πανεπιστημίων, ινστιτούτων και φορέων για την δημιουργία του Ελληνικού Νησιού, ΑΠΕ-Υδρογόνου “H2ellenic Island”, το οποίο θα καλύπτει πολλές από τις ενεργειακές του ανάγκες με H₂ παραγόμενο από ΑΠΕ (Η Μήλος αποτελεί το υποψήφιο Ελληνικό Νησί H₂, μετά από ενημέρωση και αποδοχή του εγχειρήματος από τις τοπικές αρχές και την τοπική κοινωνία) (*Δρ. Μ. Ζούλιας, ΚΑΠΕ*).

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια του πενταετούς Ευρωπαϊκού προγράμματος RES2H2 που ξεκίνησε το 2001, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς, σχεδίασε και υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ κοντά στο Λαύριο, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 3 MW. Η εγκατάσταση ολοκληρώθηκε και τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ένα - ένα στο διάστημα Μάιος-Ιούλιος 2005. Στην πορεία προέκυψαν διάφορες μικρο-εργασίες, οπότε η λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ξεκίνησε στο τέλος Σεπτεμβρίου 2005 (*ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”*).

Ένα απλό διάγραμμα της χημικής εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- 1) Την ηλεκτρόλυση του νερού.
- 2) Τις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων.
- 3) Μια συμβατική δεξαμενή υδρογόνου.
- 4) Τον συμπιεστή υδρογόνου.
- 5) Τον σταθμό πλήρωσης φιαλών.
- 6) Το κλειστό σύστημα ψύξης νερού.
- 7) Το σύστημα πεπιεσμένου αέρα.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού των 25 kW είναι συνδεδεμένη στην έξοδο 400 V μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας Enercon E-40 των 500 kW. Η ηλεκτρόλυση παράγει 5 Nm³/h υδρογόνου στα 19 bar, που περνάει από επιπλέον καθαρισμό και είτε αποθηκεύεται σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων ικανότητας 40 Nm³ H₂ είτε συμπιέζεται σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης, στα 220 bar.



Σχήμα 6.1

Απλό διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”)



(α)



(β)

Σχήμα 6.2

(α) Πανοραμική άποψη του σταθμού παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ.

(β) Αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική



(α)



(β)

Σχήμα 6.3

α) Ο συμπιεστής υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.

β) Δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων.

(Πηγή: ΚΑΠΕ, “Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”)

Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας είναι πολύ ενθαρρυντικά και αποδεικνύουν ότι η μονάδα έχει πολύ υψηλή απόδοση (της τάξης του 60%), όπως είχε σχεδιαστεί. Αξίζει να αναφερθεί ότι πολύ πρόσφατα προστέθηκε στο όλο σύστημα και κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έχει τρεις συνδέκτες, που συνδέονται με το δίκτυο σε περίπτωση άπνοιας.

6.2) Παραγωγή του υδρογόνου.

6.2.1) Εισαγωγή.

Το υδρογόνο είναι ένας δευτερογενής φορέας ενέργειας, καθώς για την παραγωγή του απαιτείται ενέργεια. Μπορεί να παραχθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους από διαφορετικές πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ορυκτής, της ανανεώσιμης και της πυρηνικής. Κάποιες τεχνολογίες είναι καθιερωμένες, ενώ άλλες (π.χ. παραγωγή υδρογόνου από την πυρηνική ενέργεια) απαιτούν σημαντική έρευνα και ανάπτυξη. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να παραχθεί το υδρογόνο είναι πάντα μεγαλύτερο από την ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την χρησιμοποίησή του. Σήμερα, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί η παραγωγή του μέσω διαφόρων ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο και γαιάνθρακα).

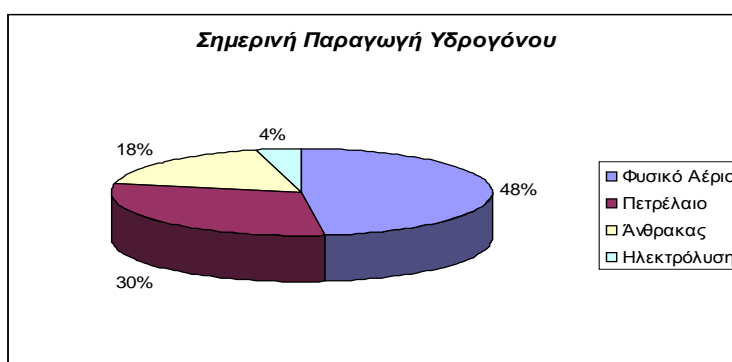
Κάθε χρόνο παράγονται παγκοσμίως τεράστιες ποσότητες υδρογόνου και μάλιστα με αυξανόμενη τάση (10%) από χρόνο σε χρόνο. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι διάφορες ποσότητες υδρογόνου που παράγονται σήμερα κατά μέσο όρο παγκοσμίως από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα, καθώς και μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού.

Πίνακας 6.2

Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου ανά μέσο παραγωγής (Έτος αναφοράς: 2003).
(Πηγή: “Η οικονομία του υδρογόνου, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα www.ccs-net.gr/PDM/marnellos1.pdf)

Μέσο	Δισεκατομμύρια m ³ /έτος	Ποσοστό
Φυσικό Αέριο	240	48%
Πετρέλαιο	150	30%
Άνθρακας	90	18%
Ηλεκτρόλυση	20	4%
Συνολική Ποσότητα	500	100%

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου:



Σχήμα 6.4

Παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου σήμερα.

(Πηγή: “Η οικονομία του υδρογόνου”, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: www.ccs-net.gr/PDM/marnellos1.pdf)

Οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Τις θερμοχημικές.
- Τις ηλεκτρολυτικές.
- Τις φωτολυτικές.

Κάθε μία από τις βασικές αυτές κατηγορίες των εμπορικών μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου θα παρουσιασθεί συνοπτικώς στις επόμενες παραγράφους.

6.2.2) Θερμοχημικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

6.2.2.1) Παραγωγή του υδρογόνου από τα ορυκτά καύσιμα.

Οι βασικότεροι τρόποι με τους οποίους το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα ορυκτά καύσιμα είναι οι ακόλουθοι:

Παραγωγή από το Φυσικό Αέριο:

- ▶ Αναμόρφωση του Μεθανίου με Ατμό (Steam Methane Reforming - SMR):

Η αναμόρφωση του μεθανίου (φυσικού αερίου) μέσω της επίδρασης υδρατμών γίνεται σύμφωνα με τρεις αμφίδρομες αντιδράσεις, εκ των οποίων οι δύο είναι ενδόθερμες και η άλλη εξώθερμη (απαιτείται επίσης η ταυτόχρονη παρουσία

διαφόρων καταλυτών, όπως π.χ. το νικέλιο (Ni), το οποίο βρίσκεται τυλιγμένο σε φoρέα Al):



Λόγω των ενδόθερμων αντιδράσεων, η αναμόρφωση μεθανίου ευνοείται από υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, επειδή η αντίδραση συνοδεύεται από αύξηση του όγκου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χαμηλή πίεση. Η αύξηση της παραγωγής του υδρογόνου απαιτεί αύξηση της ποσότητας του ατμού, συνεπώς θα είναι αναγκαία περισσότερη ενέργεια. Στην πράξη, η αναλογία ατμού - μεθανίου είναι $P(H_2O)/P(CH_4)=3$ (Βαζάκας Νικόλαος: “Μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών αλυσίδων υδρογόνου”).

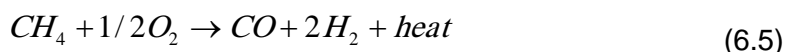
1^ο στάδιο: Στους 800-1000 °C και πίεση 30-40 bar, λαμβάνει χώρα η αναμόρφωση με τις αντιδράσεις (6.2) και (6.4).

2^ο στάδιο: Σε χαμηλότερη θερμοκρασία (συνήθως 200-400 °C), για την αύξηση της μετατροπής του υδρογόνου λαμβάνει χώρα η αντίδραση (6.3).

Παρατηρούμε ότι κατά την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο αυτή εκλύεται CO₂. Ωστόσο, οι ποσότητες που παράγονται είναι αρκετά μικρές, οπότε δεν προκαλούν σημαντικές επιβαρύνσεις στην ατμοσφαιρική σύνθεση.

► Μερική Οξειδωση του Φυσικού Αερίου (Partial Oxidation - POX):

Η μερική οξειδωση του φυσικού αερίου είναι η διαδικασία με την οποία το υδρογόνο παράγεται από τη μερική καύση του μεθανίου με το οξυγόνο:



Σε αυτήν την διαδικασία η θερμότητα παράγεται με μια εξώθερμη αντίδραση, οπότε δεν υπάρχει καμία ανάγκη για οποιαδήποτε εξωτερική θέρμανση του αντιδραστήρα. Το παραχθέν CO μετατρέπεται περαιτέρω σε H₂, όπως περιγράφεται από την αντίδραση καταλυτικής αναμόρφωσης (αντίδραση 6.3).

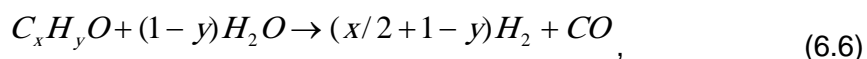
► Θερμική Διάσπαση Υδρογονανθράκων (Thermal Cracking– TC):

Η μόνη μέθοδος που μπορεί να παράγει υδρογόνο από φυσικά καύσιμα χωρίς την εκπομπή CO₂ είναι απευθείας από θερμικό και καταλυτικό σπάσιμο των υδρογονανθράκων. Κατά τη θερμική διάσπαση των υδρογονανθράκων που περιέχονται στα ορυκτά καύσιμα, παράγονται σαν προϊόντα το υδρογόνο και ο “καθαρός” άνθρακας με τη μορφή λεπτής σκόνης. Τα ορυκτά καύσιμα που προσφέρονται περισσότερο για την παραγωγή του υδρογόνου με τη μέθοδο αυτή, είναι κατά κύριο λόγο το φυσικό αέριο και τα διάφορα ελαφρά κλάσματα του πετρελαίου. Πρόκειται όμως για μία τεχνολογία που είναι οικονομικά ασύμφορη, καθώς βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια.

Παραγωγή με Αεριοποίηση Άνθρακα (Coal Gasification):

Κατά την αεριοποίηση, οι στερεοί υδρογονάνθρακες μετατρέπονται σε αέρια φάση με πρόσδοση θερμότητας και εφαρμογή πίεσης παρουσία ατμού. Η διαδικασία περιλαμβάνει «μερική οξειδωση» του αρχικού καυσίμου, η οποία παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις, ώστε η μεγαλύτερη ποσότητα του άνθρακα να μετατραπεί σε συνθετικό αέριο (syngas). Το συνθετικό αέριο είναι κυρίως υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η αναλογία υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα στο παραγόμενο αέριο εξαρτάται από το είδος του υδρογονάνθρακα με το οποίο τροφοδοτείται το σύστημα και από τις συνθήκες που επικρατούν στον αεριοποιητή.

Η διαδικασία της αεριοποίησης περιλαμβάνει την ανάμειξη του κονιοποιημένου λιθάνθρακα ή λιγνίτη με το οξειδωτικό μέσο (αέρα ή οξυγόνο και ατμό). Το μίγμα εισέρχεται στον αεριοποιητή και θερμαίνεται στους 1000 - 1500 °C. Οι υδρογονάνθρακες αντιδρούν σύμφωνα με την αντίδραση:



όπου παράγεται συνθετικό αέριο.

Για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου, το αέριο επεξεργάζεται σε αντιδραστήρες αναμόρφωσης (Water Gas Shift Reactors). Κατά την καταλυτική αντίδραση, CO και ατμός αντιδρούν προς παραγωγή H_2 και CO_2 σύμφωνα με την αντίδραση 6.3 (Βαζάκας Νικόλαος: “Μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών αλυσίδων υδρογόνου”).

6.2.2.2) Παραγωγή του υδρογόνου από τη βιομάζα.

Οι τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου από τη βιομάζα είναι η αεριοποίηση και η πυρόλυση (www.sciencenews.gr, “Παραγωγή Υδρογόνου”).

Η αεριοποίηση βασίζεται στη θέρμανση της βιομάζας παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξυγόνου, κατά την οποία προκύπτουν άμεσα CO και H_2 , καθώς και κάποια άλλα αέρια προϊόντα. Το μίγμα, συνολικά, των αερίων που προκύπτει κατά την αεριοποίηση της βιομάζας αναφέρεται συνήθως ως αέριο συνθέσεως (synthesis gas).

Η πυρόλυση βασίζεται στη θέρμανση της βιομάζας απουσία οξυγόνου και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Κατά την πυρόλυση της βιομάζας ανάλογα και με τις ακριβείς συνθήκες διεξαγωγής της (πίεση και θερμοκρασία), προκύπτει ένα πλήθος από προϊόντα αέριας, υγρής ή και στερεάς μορφής. Τα υγρής μορφής προϊόντα στην ουσία είναι ένα είδος λαδιού, το οποίο όπως και το πετρέλαιο, περιέχει ένα ευρύ φάσμα από συστατικά, τα οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας τους μπορούν να διαχωριστούν σε χρήσιμες χημικές ουσίες και καύσιμα συμπεριλαμβανομένου και του υδρογόνου.

6.2.2.3) Ηλεκτρολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

Ηλεκτρόλυση του H_2O .

Η πιο «καθαρή» και φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο παραγωγής υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή και η αιολική. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την

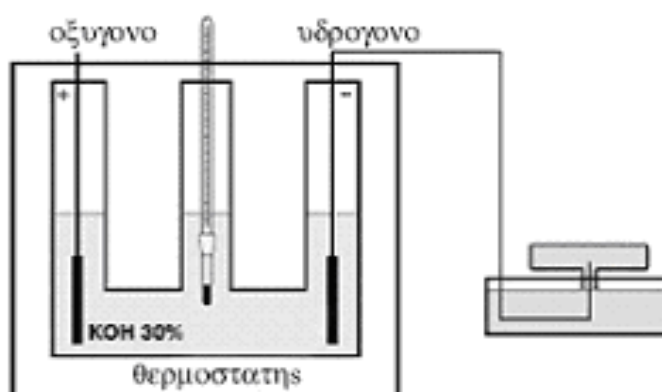
αποθήκευση της ενέργειας από ΑΠΕ σε μορφή υδρογόνου σε κατάλληλες δεξαμενές, το οποίο μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό, ιδανικά μέσω κυψελών καυσίμου, σε άλλες περιόδους. Η ηλεκτρόλυση του νερού έχει απόδοση ίσως και πάνω από 70%, λόγω όμως της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας στην όλη διαδικασία το συνολικό κόστος παραγωγής του H₂ αυξάνει. Άρα, όχι μόνο για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά και για οικονομικούς είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παρέχεται είτε από φωτοβολταϊκά στοιχεία είτε από ανεμογεννήτριες είτε ακόμα από υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι οικονομικά ασύμφορη, καθώς αυτή η τεχνολογία να μεν είναι καλώς ανεπτυγμένη, αλλά το κόστος της είναι ακόμα υψηλό. Βέβαια, θα μπορούσε στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου.

Η αιολική ενέργεια φαίνεται να είναι ο τομέας από τον οποίο μπορεί να παραχθεί H₂ με χαμηλό κόστος, σε περιοχές κυρίως που είναι προικισμένες με μεγάλο αιολικό δυναμικό. Τέτοιες περιοχές μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για μεγάλης κλίμακας παραγωγή (S.A. Sherif, F. Barbir, T.N. Veziroglu. *Wind energy and the hydrogen economy – review of the technology. Solar Energy 78 (2005), 647-660*).

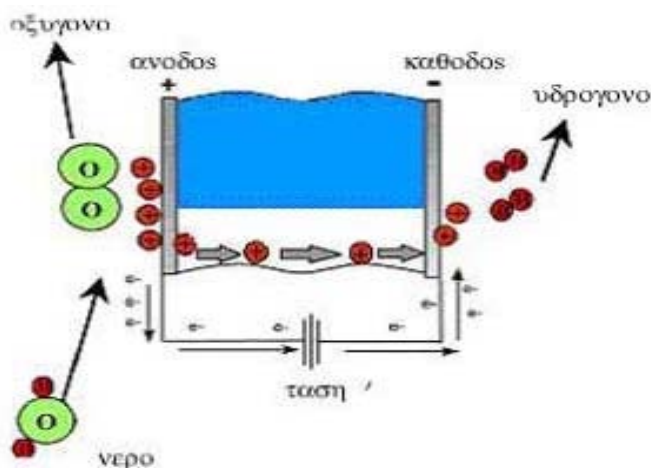
Συσκευή Ηλεκτρόλυσης:

Μία συσκευή ηλεκτρόλυσης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5. Αποτελείται από δύο χώρους μέσα στους οποίους βρίσκονται τα ηλεκτρόδια και οι οποίοι είτε επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους είτε μπορεί να παρεμβάλλεται μια διαχωριστική μεμβράνη (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων - PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης). Σε κάθε συσκευή μπορεί να διαφέρει το υλικό των ηλεκτροδίων που διαθέτουν και το οποίο δεν είναι απαραίτητο να είναι το ίδιο και στα δύο, καθώς και η σύσταση του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν.



Σχήμα 6.5
Συσκευή ηλεκτρόλυσης με θερμοστάτη για ρύθμιση εάν είναι επιθυμητό και της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη.
(Πηγή: Βιολέττα Γιαννέτα, “Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”)

Η αρχή της ηλεκτρόλυσης είναι η ίδια για όλες τις συσκευές. Εάν η συσκευή χρησιμοποιείται για ηλεκτρόλυση H₂O, τότε στις εξόδους της παράγεται αέριο H₂ και O₂. Μια παραστατική απεικόνιση μιας τέτοιας διαδικασίας δίνεται στο Σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6

Διαδικασία ηλεκτρόλυσης σε συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού.

(Πηγή: Βιολέττα Γιαννέτα, “Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”)

Θεωρία Ηλεκτρόλυσης:

Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, μέσα σε μία ηλεκτρολυτική διάταξη, προς παραγωγή υδρογόνου, αυτό οξειδώνεται αρχικά στην άνοδο της διάταξης σε μοριακό οξυγόνο και σε θετικά ιόντα υδρογόνου (ή πρωτόνια υδρογόνου, H^+). Στη συνέχεια, τα πρωτόνια υδρογόνου που έχουν προκύψει, διέρχονται διαμέσου του νερού, που βρίσκεται μέσα στην ηλεκτρολυτική διάταξη, προς την κάθοδο αυτής και εκεί ανάγονται σε μοριακό υδρογόνο. Οι συγκεκριμένες διεργασίες παριστάνονται με αντιδράσεις ως εξής:

- Στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη πραγματοποιείται η αντίδραση:



- Στην Άνοδο:



- Στην Κάθοδο:



Η (6.8) είναι μια αντίδραση οξειδωσης, ενώ η (6.9) μια αντίδραση αναγωγής. Μια αντίδραση οξειδοαναγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα δύο ημιαντιδράσεων, μιας οξειδωσης και μιας αναγωγής, που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Η συνολική αντίδραση σε αυτή την περίπτωση είναι:



Στην άνοδο, όταν εφαρμοστεί μια εξωτερική τάση σχηματίζονται αέριο οξυγόνο και ηλεκτρόνια. Τα ιόντα υδρογόνου περνούν στην πλευρά της καθόδου, όπου αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια προς σχηματισμό αερίου H_2 , το οποίο και συλλέγεται στο εξωτερικό κύκλωμα της συσκευής (Ειδική ερευνητική εργασία, Βιολέττα Γιαννέτα: “Υβριδικό

σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”).

Η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, ορίζεται από τον λόγο της τάσης που απαιτείται θεωρητικά για την παραγωγή του προς την ηλεκτρική τάση την οποία εφαρμόζουμε κάθε φορά στη πράξη. Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, απαιτεί ηλεκτρική τάση η οποία ισούται με 1,23 V (*www.hy2.gr*, “*Ηλεκτρόλυση νερού*”). Στην πράξη όμως, η ηλεκτρική τάση που συνήθως εφαρμόζεται γι’ αυτόν το σκοπό είναι μεγαλύτερη (μεταξύ 1,55 V και 1,65V). Η αυξημένη αυτή τιμή της, οφείλεται κυρίως στις διάφορες απώλειες που υφίσταται το ηλεκτρικό ρεύμα (απώλειες θερμότητας και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) όταν διοχετεύεται μέσα στις ηλεκτρολυτικές διατάξεις. Η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού ορίζεται από τον λόγο της τάσης των 1,23 V, η οποία απαιτείται θεωρητικά για την παραγωγή του, προς την ηλεκτρική τάση την οποία εφαρμόζουμε κάθε φορά στη πράξη γι’ αυτό. Για παράδειγμα, με πρακτικά εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση ίση με 1,60 V, θα έχουμε απόδοση παραγωγής υδρογόνου $(1,23/1,60)=0,77=77\%$. Επομένως, από ενεργειακής τουλάχιστον σκοπιάς, η παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της παραγωγής του από τα διάφορα ορυκτά καύσιμα (των οποίων η απόδοση παραγωγής δεν υπερβαίνει συνήθως το 60%).

6.2.2.4) Φωτολυτικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

Οι φωτολυτικές διαδικασίες χρησιμοποιούν την ήπιας μορφής ενέργεια για να διασπάσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτήν την περίοδο οι διαδικασίες αυτές βρίσκονται στα πολύ αρχικά στάδια της έρευνας, αλλά προσφέρουν μακροπρόθεσμη δυνατότητα για τη βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση (*www.sciencenews.gr*, “*Παραγωγή υδρογόνου*”).

▶ Φωτοβιολογική Παραγωγή:

Σε αυτή την διαδικασία, το υδρογόνο παράγεται από το νερό χρησιμοποιώντας το φως του ήλιου και ειδικούς μικροοργανισμούς, όπως τα κυανοβακτήρια. Ακριβώς όπως τα φυτά παράγουν οξυγόνο κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης, αυτοί οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν το νερό και παράγουν υδρογόνο ως υποπροϊόν των φυσικών μεταβολικών διαδικασιών τους. Μέσω κατάλληλης εκμετάλλευσης της ποσότητας του υδρογόνου που παράγεται από τη μεθοδολογία αυτή, μπορούμε να παράγουμε υδρογόνο με αποδοτικότητα παραγωγής που προσεγγίζει το 25%.

▶ Φωτοηλεκτρόλυση:

Η παραγωγή του υδρογόνου επιτυγχάνεται και μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης του νερού (ο όρος υδρόλυση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού από ολοκληρωμένα ηλιακά συστήματα). Η συγκεκριμένη διαδικασία ονομάζεται και φωτοηλεκτρόλυση του νερού. Κατά τη διαδικασία αυτή, ολοκληρωμένα συστήματα πολυάριθμων ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά, εκμεταλλεύονται τις ακτίνες του ηλίου και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, την οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούν για να υδρολύσουν το νερό και να παράγουν υδρογόνο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται γι’ αυτό το σκοπό, παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, η οποία θεωρητικά προσεγγίζει και το 40%. Στην πράξη όμως, η απόδοση αυτή δεν υπερβαίνει συνήθως το 20% .

6.3) Διανομή του υδρογόνου.

6.3.1) Τρόποι διανομής του υδρογόνου.

Η διανομή του υδρογόνου αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη και την εδραίωση της “Οικονομίας του Υδρογόνου”. Ως γνωστόν, τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καταναλώνονται στις μέρες μας από τον άνθρωπο (με εξαίρεση το φυσικό αέριο), μεταφέρονται αποκλειστικά σε υγρή ή στερεά μορφή. Το γεγονός αυτό καθιστά τις υπάρχουσες υποδομές μεταφοράς τους ακατάλληλες για την μεταφορά του υδρογόνου, το οποίο σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι αέριο. Ακόμα και αν το υδρογόνο μετατρέπεται σε υγρό, μέσω συμπίεσης και μεταφερόταν από το σημερινό υπάρχον σύστημα μαζικής διανομής των υγρών ορυκτών καυσίμων, η μεταφορά του αυτή θα σήμαινε αφενός την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την μετατροπή του σε υγρό (με αποτέλεσμα υπερβολικά μεγάλο κόστος μεταφοράς του) και αφετέρου θα παρουσίαζε αυξημένα προβλήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας εξαιτίας των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν κατά τη μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή (υψηλές πιέσεις). Από την άλλη μεριά, η υποδομή του παγκόσμιου δικτύου διανομής που χρησιμοποιείται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σαν αέριο, είναι εξίσου ανεπαρκής για τη μεταφορά του αερίου υδρογόνου, αφού οι συνθήκες πιέσεων που απαιτούνται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου σε συνθήκες θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της μεταφοράς του υδρογόνου.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για τη μελλοντική διανομή του υδρογόνου με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο, απαιτείται νέα υποδομή. Σε θεωρητικό επίπεδο υπάρχουν σήμερα διάφορες προσεγγίσεις συγκρότησης του μελλοντικού δικτύου διανομής του υδρογόνου (*Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”*):

- 1^η Προσέγγιση:

Πολλές μονάδες μεγάλης παραγωγής του υδρογόνου συνδεδεμένες μεταξύ τους με αγωγούς μεταφοράς του, οι οποίοι θα το μεταφέρουν σε αέρια μορφή. Η παραγωγή, κατά τη συγκεκριμένη προσέγγιση, λαμβάνει χώρα μακριά από τις τοπικές πηγές κατανάλωσης του υδρογόνου και για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος τρόπος διανομής του χαρακτηρίζεται σαν “κεντροποιημένος”.

- 2^η Προσέγγιση:

Τοπική παραγωγή σε ποσότητες αρκετές για την τοπική ζήτηση. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται σαν “μη κεντροποιημένη” διανομή του υδρογόνου. Οι μελλοντικές ποσότητες του υδρογόνου που θα παράγονται στα διάφορα τοπικά σημεία της ζήτησής του θα μπορούν εκτός από το να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες του κάθε τοπικού πληθυσμού, να διοχετευτούν και στο ευρύτερο δίκτυο διανομής, είτε για εσωτερική κατανάλωση (για ένα κράτος) είτε για εξαγωγή.

- 3^η Προσέγγιση:

Οικιακή παραγωγή. Ο καθένας παραγωγός της δικής του ενέργειας (π.χ. στο χώρο του σπιτιού μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού από οικιακά ηλιακά ή αιολικά ηλεκτροπαραγωγικά συστήματα με σκοπό την κάλυψη των διαφόρων οικιακών αναγκών ή στο χώρο της εργασίας για μικρές ή μεσαίες επιχειρήσεις). Το περίσσειμα το διαθέτει στους άλλους.

6.3.2) Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των συστημάτων διανομής του υδρογόνου.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στην παράγραφο 6.3.1, γίνεται φανερό ότι η “μη κεντροποιημένη” διανομή του υδρογόνου υπερτερεί της “κεντροποιημένης” διανομής όσον αφορά στην ενεργειακή ανεξαρτησία. Αυτό γιατί, η ενδεχόμενη δυσλειτουργία κάποιου σημείου του δικτύου της πρώτης δε θα είχε οπωσδήποτε σαν συνέπεια την παρεμπόδιση ή διακοπή της λειτουργίας και κάποιων άλλων σημείων του δικτύου της, δεδομένου ότι τα διάφορα σημεία του ευρύτερου δικτύου της λειτουργούν σχεδόν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αντίθετα, στην περίπτωση της “κεντροποιημένης” διανομής η ελαττωματική λειτουργία οποιουδήποτε τυχαίου σημείου του δικτύου της θα επηρεάσει πιθανότατα ένα ή περισσότερα γειτονικά του σημεία. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε αντίθεση με τη “κεντροποιημένη διανομή” του υδρογόνου, η μη κεντροποιημένη” διανομή μπορεί να λειτουργήσει ομαλά και σε πιθανές περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης που καταστρέφουν ή θέτουν προσωρινά εκτός λειτουργίας κάποια σημεία του δικτύου της (π.χ. περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, δηλαδή εκτεταμένων πυρκαγιών, σεισμών κ.α.).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του “μη κεντροποιημένου” συστήματος διανομής του υδρογόνου είναι η σημαντική συνεισφορά του στην κάλυψη των ευρύτερων ενεργειακών αναγκών οποιουδήποτε κράτους, το οποίο συνεπάγεται γι’ αυτό την οικονομική και ενεργειακή του ανεξαρτησία από άλλα κράτη.

Για να λειτουργήσουν, όμως, τα μελλοντικά δίκτυα διανομής του υδρογόνου με ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο, είναι απαραίτητη η επίλυση σημαντικών ζητημάτων. Συγκεκριμένα:

- ✓ Οι αγωγοί μεταφοράς του αέριου υδρογόνου και οι διάφοροι σταθμοί ανεφοδιασμού του θα πρέπει να εξοπλιστούν με κατάλληλες τεχνολογίες διαχείρισής του, υψηλότερων απαιτήσεων από τις μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενες για το φυσικό αέριο (εξαιτίας των αρκετά υψηλότερων πιέσεων που απαιτούνται για τη διανομή του υδρογόνου).
- ✓ Είναι απαραίτητη η λήψη όλων των τεχνικών προφυλάξεως ανίχνευσης πιθανούς διαρροής του υδρογόνου, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος έκρηξης.
- ✓ Δεδομένου ότι η διανομή και ο ανεφοδιασμός του υδρογόνου γίνονται κάτω από υψηλές πιέσεις, τα υλικά κατασκευής των μελλοντικών αγωγών μεταφοράς του υδρογόνου θα πρέπει να παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη μεταφορά του φυσικού αερίου.
- ✓ Οι αγωγοί διακίνησης του υδρογόνου είναι αναγκαίο να εφοδιαστούν και με κατάλληλες διατάξεις συμπίεστών του σε διάφορα σημεία τους, αφού εκτός από υψηλές πιέσεις κατά τη μεταφορά του, το υδρογόνο σαν αέριο απαιτεί οι υψηλές αυτές πιέσεις να παραμένουν και συνεχώς σταθερές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγάλη πτώση πίεσης που παρατηρείται στο δίκτυο διανομής του υδρογόνου όταν αυτό απάγεται απ’ αυτό και χρησιμοποιείται για λόγους ανεφοδιασμού.

Σήμερα, παρά τις διάφορες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν για την ευρύτερη εφαρμογή της διανομής του υδρογόνου, αρκετά τεχνολογικά προηγμένα κράτη (μεταξύ αυτών και αρκετά κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης) έχουν ήδη αρχίσει να αναπτύσσουν τις πρώτες, μικρής κλίμακας, υποδομές διανομής και ανεφοδιασμού του υδρογόνου, κυρίως δε για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο αστικών μεταφορικών οχημάτων του (π.χ. λεωφορεία).

6.4) Αποθήκευση του υδρογόνου.

6.4.1) Εισαγωγή.

Το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας πρέπει να αποθηκεύεται ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχει διαθέσιμη πρωτογενής ενέργεια, ενώ υπάρχει στην αποθήκη υδρογόνο.

Όπως έχουμε αναφέρει, σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος ($T=298,15\text{ K}$, $P=0,987\text{ atm}$), το υδρογόνο είναι αέριο σαν υλικό. Σαν αέριο, το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλους όγκους για περιορισμένες ποσότητες μάζας του, εξαιτίας τους χαμηλής του πυκνότητας ($0,0899\text{ kg/m}^3$). Συγκεκριμένα, 1 kg αερίου υδρογόνου τους συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, καταλαμβάνει όγκο ίσο με 11 m^3 , δηλαδή πολύ μεγάλη ποσότητα όγκου για να αξιοποιηθεί πρακτικά από τον άνθρωπο. Επομένως, για την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, είναι απαραίτητη η μείωση του πολύ μεγάλου όγκου του, η οποία συνεπάγεται ταυτόχρονη αύξηση τους πιέσεώς του ή ταυτόχρονη μείωση τους θερμοκρασίας του (ή και τα δύο). Η μείωση του όγκου του, δηλαδή η αύξηση τους πυκνότητάς του (αφού $\rho=m/V$, όπου ρ η πυκνότητα, m η μάζα και V ο όγκος), επιτυγχάνεται μέσω των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσής του σε κατάλληλες διατάξεις ή υλικά. Όποια πάντως τεχνική αποθήκευσης και να ακολουθηθεί, το σημαντικό ζητούμενο κατά την αύξηση τους πυκνότητάς του αποτελεί το κατά πόσο το αποθηκευμένο υδρογόνο δύναται να ανακτηθεί στη συνέχεια, κατά την φάση τους κατανάλωσής του.

Για την αποτελεσματική αποθήκευση του υδρογόνου οι κυριότερες μέθοδοι που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα είναι οι ακόλουθες υδρογόνου (*Καρύδας Χρήστος, "Τεχνολογία Υδρογόνου"*):

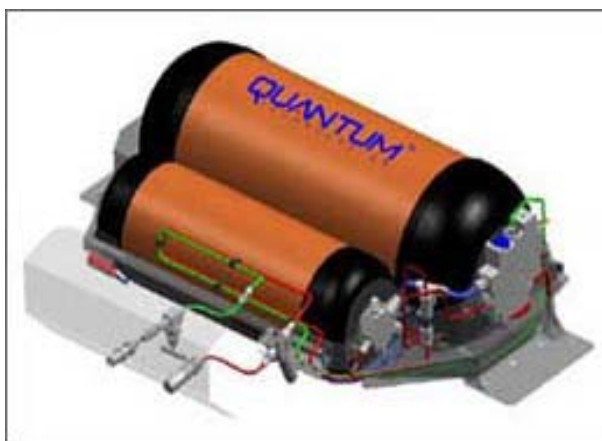
- ✓ Σε υψηλής πίεσης φιάλες αερίου.
- ✓ Ως υγρό σε κρυογονικές δεξαμενές.
- ✓ Σε μέταλλα και κράματα μετάλλων.
- ✓ Σε «καθαρά» νανοκρυσταλλικά μέταλλα και σε νανοκρυσταλλικά μεταλλικά κράματα
- ✓ Σε νανοδομημένες ενώσεις άνθρακα.

Στους παραγράφους που ακολουθούν θα εξετάσουμε λεπτομερώς τους κυριότερες σημερινές συμβατικές μεθόδους αποθήκευσης του υδρογόνου, αναφέροντας παράλληλα και τα θετικά και τα αρνητικά τους σημεία κατά την χρησιμοποίησή τους. Ακόμα, πέρα από τους συμβατικούς τρόπους αποθήκευσης, θα περιγραφεί η ιδέα των «αιολικών πύργων» (wind turbine towers) για την αποθήκευση του υδρογόνου που προέρχεται από ανεμογεννήτριες, η οποία βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

6.4.2) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν αέριο.

Σήμερα, το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα για την αποθήκευση του υδρογόνου είναι οι φιάλες αερίου, οι οποίες το αποθηκεύουν σε αρκετά υψηλές πιέσεις. Οι φιάλες αυτές ανάλογα με την κατασκευή τους, μπορούν να φθάσουν έως και 700 bar πίεση. Η πιο διαδεδομένη πίεση στην οποία το υδρογόνο αποθηκεύεται στις συγκεκριμένες φιάλες είναι αυτή των 340 bar , κάτω από την οποία το αποθηκευμένο υδρογόνο αποκτά ογκομετρική πυκνότητα ίση με 36 kg/m^3 (*Καρύδας Χρήστος, "Τεχνολογία Υδρογόνου"*).

Οι συνηθισμένες φιάλες αερίου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία και την τεχνολογία παραγωγής ενέργειας υδρογόνου για την αποθήκευση αυτού, κατασκευάζονται από πολλαπλά ομοκυλινδρικά μεταλλικά τοιχώματα, εξαιτίας των πολύ υψηλών πιέσεων που επικρατούν στο εσωτερικό τους. Ακόμα, για την επιπλέον ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους έχουν χρησιμοποιηθεί και εξωτερικά τοιχώματα κατασκευασμένα από νανοσωλήνες άνθρακα με αρκετή επιτυχία (αύξηση των πιέσεων συμπίεσης στα 700 bar). Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής διάταξης φιαλών αποθήκευσης του αερίου υδρογόνου.



Σχήμα 6.7

Τυπική διάταξη φιαλών αποθήκευσης του αερίου υδρογόνου (P=350 bar).

(Πηγή: Μαρία Φούντη –Γιώργος Βουρλιωτάκης, “Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου”)

Για την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου μέσα σε μια φιάλη πίεσης υψηλής πίεσης (340 bar), απαιτείται έργο συμπίεσης 2,5 kWh/kg.

Ωστόσο, η αποθήκευση του υδρογόνου σε φιάλες αερίου υψηλών πιέσεων παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα (Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”). Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- Χαμηλή Πυκνότητα:

Το υδρογόνο μετά την αποθήκευσή του στο εσωτερικό των φιαλών αερίου υψηλών πιέσεων εξακολουθεί να έχει σχετικά χαμηλή πυκνότητα.

- Υψηλές Πιέσεις:

Οι υψηλές πιέσεις που απαιτούνται για την αέρια αποθήκευση του υδρογόνου στις φιάλες αερίου, ανεβάζουν το κόστος της αέριας αποθήκευσής του λόγω των απαιτούμενων ειδικών υλικών για την κατασκευή των φιαλών.

Εκτός από αυτό, για λόγους ανθεκτικότητας στις υψηλές πιέσεις, οι φιάλες αερίου κατασκευάζονται από μεταλλικά κράματα (για παράδειγμα κράματα χαλκού ή αλουμινίου). Τα κράματα αυτά είναι όμως ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική οξείδωση και επομένως, κάτω από ορισμένες συνθήκες, διατρέχουν τον κίνδυνο της διάβρωσης και της βίαιης απελευθέρωσης του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα (κίνδυνος έκρηξης). Φιάλες αερίου που έχουν κατασκευαστεί από λιγότερο οξειδωτικά μεταλλικά υλικά

(όπως το τιτάνιο ή ο σίδηρος), δεν εμφανίζουν ανθεκτικότητα στις υψηλές πιέσεις, οπότε και δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίησή τους.

- «Προκαλούμενη από Υδρογόνο Ευθραυστότητα» (Hydrogen Induced Phenomenon of Embrittlement):

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι φιάλες αερίου κατασκευάζονται από μεταλλικά κράματα (κράματα χαλκού ή αλουμινίου), που είναι ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική οξειδωση.

Καθώς το υδρογόνο αποθηκεύεται στο εσωτερικό των φιαλών αερίου και ενόσω εξακολουθεί να βρίσκεται υπό χαμηλές πιέσεις, διαχέεται διαμέσου των πολύ μικρών πόρων των μεταλλικών κραμάτων στην εσωτερική επιφάνεια των φιαλών και συγκεντρώνεται στα σημεία εκείνα των τοιχωμάτων τους όπου τα μεταλλικά κράματα παρουσιάζουν κάποιες ατέλειες στη κρυσταλλική τους δομή. Τα μεταλλικά υλικά αντιδρούν με τον ατμοσφαιρικό αέρα και σχηματίζουν οξείδια. Το υδρογόνο αντιδρά με τα οξείδια αυτά και από την αντίδραση αυτή παράγονται μεταλλικά υδρίδια.

Τα παραχθέντα μεταλλικά υδρίδια παραμένουν στο χώρο που έχουν σχηματιστεί και αυξανόμενα συνεχώς σε συγκέντρωση, ασκούν ολοένα και μεγαλύτερες πιέσεις στην συνολική μάζα των μεταλλικών κραμάτων, αναγκάζοντάς τα να διογκώνονται (διόγκωση φιάλης). Οι ολοένα και αυξανόμενες πιέσεις μέσα στην μεταλλική επιφάνεια των φιαλών αποθήκευσης του υδρογόνου, προκαλούν από ένα όριο και πάνω την ολική θραύση τους μέσω έκρηξης.

Μέχρι το σημείο της θραύσης, το φαινόμενο της διόγκωσής τους μπορεί να γίνει αντιστρεπτό, απομακρύνοντας το υδρογόνο που έχει αποθηκευτεί στο εσωτερικό των φιαλών. Επειδή όμως η ανίχνευση μεγάλων ποσοτήτων από μεταλλικά υδρίδια στο εσωτερικό των μεταλλικών επιφανειών γίνεται μόνο μέσω εξωτερικής οπτικής παρατήρησης (έλεγχος διόγκωσης), συχνά είναι δυνατό η ανίχνευση αυτή να μην γίνει σωστά και να εξαχθούν εσφαλμένα συμπεράσματα. Γίνεται δηλαδή κατανοητό ότι η αποθήκευση του υδρογόνου μέσα σε φιάλες υψηλών πιέσεων θα πρέπει πάντα να ακολουθείται από αυστηρούς κανόνες ελέγχου και συντήρησης (π.χ. επικάλυψη εξωτερικών τοιχωμάτων φιάλης με αντιοξειδωτική μπογιά), προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς κίνδυνο και με αποτελεσματικότητα.

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως «Προκαλούμενη από Υδρογόνο Ευθραυστότητα» (Hydrogen Induced Phenomenon of Embrittlement).

6.4.3) Αποθήκευση του υδρογόνου σαν υγρό.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και στην υγρή του μορφή, αφού πρώτα υγροποιηθεί. Οι ειδικές διατάξεις μέσα στις οποίες το υδρογόνο αποθηκεύεται σαν υγρό ονομάζονται κρυογονικές δεξαμενές.

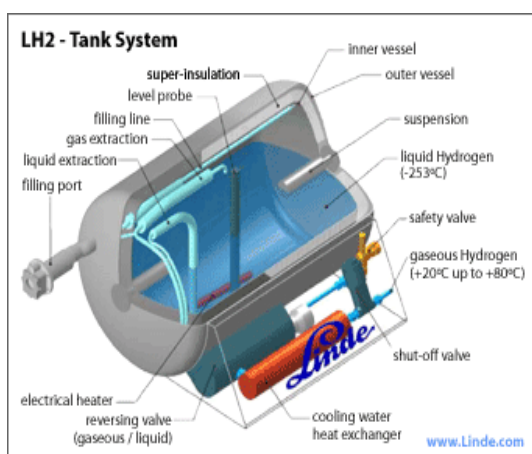
Γενικά, οι κρυογονικές δεξαμενές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών υλικών, που κανονικά σε συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι αέρια, αποθηκεύοντάς τα σαν υγρά κάτω από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και πολύ υψηλές πιέσεις. Οι εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό των κρυογονικών δεξαμενών, επιτυγχάνονται με τη βοήθεια διαφόρων αερίων, όπως είναι το οξυγόνο, το άζωτο, το αργό, το αιθυλένιο κ.α.), τα οποία, λόγω του πολύ χαμηλού σημείου της υγροποίησής τους, έχουν την δυνατότητα να αφαιρούν θερμότητα από άλλα υλικά με υψηλότερο σημείο υγροποίησης. Από την άλλη μεριά,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ – ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

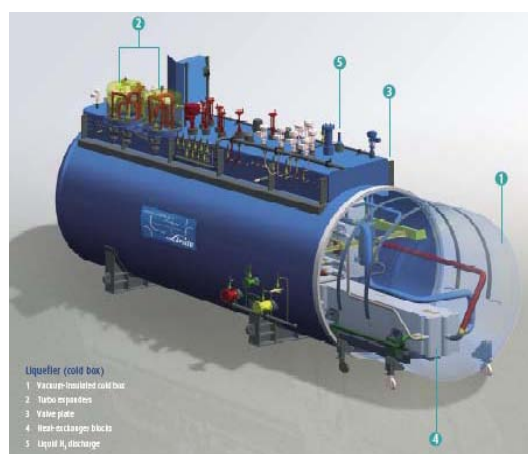
οι εξαιρετικά υψηλές και σταθερές πιέσεις που επικρατούν στο εσωτερικό των κρυογονικών δεξαμενών, επιτυγχάνονται με τη βοήθεια διαφόρων διατάξεων απαγωγής κενού, καθώς επίσης και μέσω της σωστής στεγανοποίησης των κρυογονικών δεξαμενών.

Όσον αφοράν στο υδρογόνο, κατά την αποθήκευσή του σαν αέριο μέσα σε μία κρυογονική δεξαμενή, η πυκνότητα που αποκτά σαν υγρό ανέρχεται συνήθως σε $70,8 \text{ kg/m}^3$ περίπου (λίγο μεγαλύτερη από αυτή που χαρακτηρίζει τη στερεή του κατάσταση στο σημείο της τήξης του, η οποία ανέρχεται σε $70,6 \text{ kg/m}^3$). Η πυκνότητά του αυτή παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την περιοχή των πιέσεων και των θερμοκρασιών που χαρακτηρίζουν την υγρή του κατάσταση μέσα στην κρυογονική δεξαμενή.

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της υγρής αποθήκευσης του υδρογόνου (Σχήμα 6.8).



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.8 (α, β, γ)
Αποθήκευση υγρού υδρογόνου

(Πηγή εικόνων: (α), (β) Μαρία Φούντη –Γιώργος Βουρλιωτάκης, "Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου",
πηγή εικόνας (γ:) (<http://www.llnl.gov/str/June03/Aceves.htm>)

Η αποθήκευση του υδρογόνου μέσω υγροποίησης σε κρυογονικές δεξαμενές, αποτελεί μια εξώθερμη διαδικασία και η θερμότητα που εκλύεται κατά την αποθήκευσή του σε αυτές εκλύεται με συνεχή τρόπο. Το εκλυόμενο ποσό θερμότητας εξαρτάται από το τελικό σημείο στο οποίο σταματάει η υγροποίηση του αερίου υδρογόνου και ο ρυθμός της έκλυσής του από το εκάστοτε σημείο της υγροποίησης

στο οποίο βρίσκεται το υδρογόνο. Συγκεκριμένα, μέχρι τους 77 K ο ρυθμός αυτός αυξάνεται με σταθερό και σχεδόν εκθετικό ρυθμό, ενώ μετά τους 77K και μέχρι το τελικό σημείο βρασμού του υδρογόνου (20,268 βαθμοί K), ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας από τη μάζα του γίνεται σταθερός.

Λόγω της εξώθερμης φύσης της υγρής αποθήκευσης του υδρογόνου σε κρυογονικές δεξαμενές, η θερμότητα που εκλύεται μπορεί να προκαλέσει την εξάτμιση του υγρού υδρογόνου. Μια ακόμα συνέπεια της εξώθερμης αυτής διαδικασίας αποθήκευσης είναι τα μεγάλα ποσά ενέργειας που απαιτούνται για την υγροποίηση του υδρογόνου. Για τους λόγους αυτούς εφοδιάζουμε τις κρυογονικές δεξαμενές με πολλαπλές καταλυτικές επιφάνειες στο εσωτερικό τους. Οι καταλυτικές αυτές επιφάνειες είναι κατασκευασμένες από κατάλληλα υλικά που επιταχύνουν την υγρή αποθήκευση του υδρογόνου, όπως είναι το βολφράμιο, το νικέλιο, το οξειδίο του χρωμίου κ.α. Ο κρυογονικές δεξαμενές μπορούν επίσης να εφοδιαστούν και από αλληπάλληλα εξωτερικά στρώματα από θερμική μόνωση, τα οποία τις βοηθάνε να εμποδίζουν την απαγωγή της θερμότητας από το αποθηκευμένο πλέον σ' αυτές υγρό υδρογόνο.

Η υγρή αποθήκευση του υδρογόνου παρουσιάζει όμως και δύο σημαντικά μειονεκτήματα (*Καρύδας Χρήστος, "Τεχνολογία Υδρογόνου"*):

- Τα μεγάλα ποσά ενέργειας που απαιτούνται για την υγροποίηση του υδρογόνου (πέρα τις προφυλάξεις που αναφέρθηκαν), τα οποία είναι ίσα με το ένα τρίτο της ενέργειας που περικλείεται στο υγροποιημένο υδρογόνο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ποσά της θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθούν από το αέριο υδρογόνο, προκειμένου αυτό να μετατραπεί σε υγρό, είναι πολύ μεγάλα. Το ποσά αυτά απάγονται από τη μάζα του, προφανώς μέσω της ταυτόχρονης κατανάλωσης ενέργειας από εμάς. Για το λόγο αυτό η υγροποίηση του υδρογόνου και το υγρό υδρογόνο χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις που είναι αναγκαία υψηλής πυκνότητας αποθήκευση, όπως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές (χρησιμοποίηση του υγρού υδρογόνου σαν προωθητικό αέριο σε διαστημικούς πυραύλους).
- Επικινδυνότητα σε περίπτωση επαφής του ανθρώπου με τις κρυογονικές επιφάνειες.

6.4.4) Αποθήκευση του υδρογόνου σε μέταλλα και κράματα μετάλλων.

Εισαγωγή.

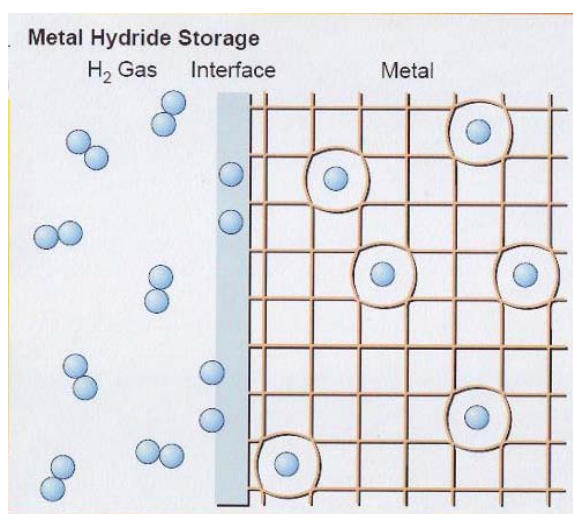
Πρόκειται για μια σχετικά πρόσφατη μέθοδο αποθήκευσης του υδρογόνου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το υδρογόνο αποθηκεύεται στη μάζα διαφόρων «καθαρών» μετάλλων ή κραμάτων σχηματίζοντας σύνθετα μεταλλικά σώματα, τα λεγόμενα υδρίδια μετάλλων. Τα υδρίδια μετάλλων δρουν σαν σε ένα σφουγγάρι που απορροφά νερό. Δίνονται οι αντιδράσεις σχηματισμού των υδριδίων μετάλλων από «καθαρά» μέταλλα (αντίδραση 6.11) και μεταλλικά κράματα (αντίδραση 6.12) (*Καρύδας Χρήστος, "Τεχνολογία Υδρογόνου"*):



Όπου:

- ✓ A είναι το μέταλλο που απορροφά το υδρογόνο: RE, Ti, Zr, Mg, Ca.
- ✓ B: Fe, Ni, Co, Mn.

Κατά το σχηματισμό των υδριδίων των μετάλλων, τα μόρια του υδρογόνου διαχωρίζονται και τα άτομα του υδρογόνου προσαρτώνται μέσα στα κενά ανάμεσα στο πλέγμα των κατάλληλων μετάλλων ή των κράματων (Σχήμα 4.9). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια αποτελεσματική αποθήκευση συγκρίσιμη σε χωρητικότητα με αυτή του υγρού υδρογόνου. Ωστόσο, όταν η μάζα του μετάλλου ή του κράματος λαμβάνεται υπόψη, ο ποσοτικός προσδιορισμός των υδριδίων των μετάλλων είναι ανάλογος της πυκνότητας (χωρητικότητας) του υδρογόνου υπό πίεση. Η χωρητικότητα που συνήθως επιτυγχάνεται είναι γύρω στα 0,01–0,02 kg H₂ ανά kg μετάλλου. Για μεγάλης θερμοκρασίας υδρίδια (υδρίδια τελευταίας γενιάς), έχουν επιτευχθεί και μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας, οι οποίες κυμαίνονται γύρω στα 0,07-0,1 kg H₂ ανά kg μετάλλου (π.χ. για το MgH₂). Αν και το ποσοστό του αερίου υδρογόνου που απορροφάται στον βαθμό του μετάλλου είναι ακόμη σχετικά χαμηλό, τα υδρίδια προσφέρουν μια αξιόπιστη λύση για την αποθήκευση του υδρογόνου. (www.tropical.gr, “Αποθήκευση Υδρογόνου”).



Σχήμα 6.9

Σχηματισμός υδριδίων μετάλλων.

(Πηγή: www.uowm.gr/enman/dep/makridis/Metal_hydrides_1.pdf)

Για να ανακτηθεί το υδρογόνο από το μεταλλικό πλέγμα που έχει αποθηκευτεί, είναι απαραίτητη η προσφορά θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης. Η ταχύτητα της διαδικασίας αποθήκευσης του υδρογόνου σε «καθαρά» μέταλλα και κράματα μετάλλων εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως τη δομή του μετάλλου, την καθαρότητα, την παρουσία καταλυτών, την αργή απομάκρυνση της εκλυόμενης θερμότητας.

Τα υδρίδια μετάλλων προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της ασφαλούς μεταφοράς υδρογόνου κάτω από συνεχή πίεση. Ένα σοβαρό, για παράδειγμα, ατύχημα σε δεξαμενή υδριδίων (π.χ. πρόσκρουση) δε θα προκαλέσει κίνδυνο πυρκαγιάς εφόσον το υδρογόνο παραμείνει στη μεταλλική δομή. Ακόμα, η διάρκεια ζωής του δοχείου αποθήκευσης μεταλλικών υδριδίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την καθαρότητα του υδρογόνου όταν αποθηκεύεται. Τα κράματα δρουν σαν σφουγγάρι, τα οποία απορροφούν υδρογόνο, αλλά επίσης απορροφούν κάθε ρύπο που εισάγεται στο δοχείο μέσω του υδρογόνου. Το αποτέλεσμα είναι το υδρογόνο που απελευθερώνεται από το δοχείο να είναι εξαιρετικά καθαρό, αλλά η διάρκεια ζωής του δοχείου και η ικανότητα να αποθηκεύει υδρογόνο να μειώνεται, καθώς οι ρύποι μένουν και γεμίζουν τα κενά στο μέταλλο, τα οποία κατείχε το υδρογόνο.

Ο Πίνακας 6.3 δείχνει τα διάφορα υδρίδια που χρησιμοποιούνται σήμερα σαν αποθηκευτικά μέσα.

Πίνακας 6.3
Υδρίδια ως αποθηκευτικά μέσα H₂.
(Πηγή: “Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”).

Μέσο	Περιεκτικότητα σε H ₂ (kg/kg)	Πυκνότητα ενέργειας (kJ/kg)
MgH ₂	0,070	9.933
Mg ₂ NiH ₄	0,032	4.484
VH ₂	0,021	3.831
FeTiH _{1,95}	0,018	2.483
TiFe _{0,7} Mg _{0,2} H _{1,9}	0,018	2.440
LaNi ₅ H _{7,0}	0,014	1.944
R.E.Ni ₅ H _{6,5}	0,014	1.915

Σχηματισμός μεταλλικών υδριδίων κατά την προσρόφηση του υδρογόνου μέσα σε «καθαρά» μέταλλα.

Κατά την έναρξη της απορρόφησης του υδρογόνου μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του συστήματος μετάλλου-υδρογόνου (M-H), δημιουργείται στο εσωτερικό αυτού ένα στερεό διάλυμα, το οποίο ονομάζεται διάλυμα παρεμβολής (interstitial solid solution). Στο διάλυμα αυτό, το υδρογόνο καταλαμβάνει τυχαίες ενδοπλεγματικές θέσεις μέσα στο «καθαρό» μέταλλο. Η θερμοδυναμική φάση από την οποία τότε διέρχεται το σχηματιζόμενο σύστημα M-H ονομάζεται α-φάση. Η αντίδραση σχηματισμού δίνεται από τη σχέση:



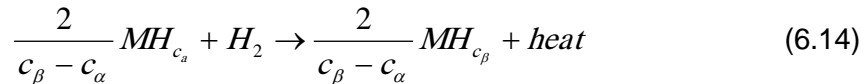
Όπου με c συμβολίζεται ο λόγος της συγκέντρωσης των ατόμων υδρογόνου της α-φάσης του σχηματιζόμενου συστήματος M-H, προς την συγκέντρωση των ατόμων του «καθαρού» μετάλλου στο σύστημα αυτό.

Για όλες τις τιμές των θερμοκρασιών που είναι μικρότερες από μία μέγιστη τιμή ($T < T_c$) και για όλες τις τιμές των λόγων $[H]/[M]$ (συγκέντρωση υδρογόνου/συγκέντρωση «καθαρού» μετάλλου) που είναι μεγαλύτεροι από μία συγκεκριμένη τιμή του λόγου $[H]/[M]$ (η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία T_c), στο εσωτερικό του συστήματος M-H αρχίζει σταδιακά να δημιουργείται μια νέα θερμοδυναμική φάση. Η νέα αυτή θερμοδυναμική φάση σχηματίζεται βαθμιαία από την αρχική α-φάση και περιγράφεται σαν α'-φάση. Ο σταδιακός σχηματισμός της α'-φάσης οφείλεται στην αυξανόμενη αστάθεια που παρουσιάζει η α-φάση, όσο ο λόγος των συγκεντρώσεων $[H]/[M]$ γίνεται μεγαλύτερος στο εσωτερικό του συστήματος M-H. Η α'-φάση συνεχίζει να συνυπάρχει με την αρχική α-φάση, έως ότου η αρχική φάση μετασχηματιστεί πλήρως σε αυτή. Η α'-φάση αποτελεί και το «πραγματικό» μεταλλικό υδρίδιο. Η μέγιστη θερμοκρασία T_c , μετά από την οποία ξεκινάει σταδιακά ο σχηματισμός της α'-φάσης του συστήματος M-H, ονομάζεται και κρίσιμη θερμοκρασία (critical temperature) του συστήματος αυτού. Η θερμοκρασία αυτή διαφέρει ανάλογα με το μέταλλο του κάθε συστήματος.

Οι σχηματιζόμενες φάσεις α και α' δεν κρυσταλλώνονται υποχρεωτικά και οι δύο στην ίδια κρυσταλλική δομή. Για παράδειγμα, ενώ στο υδρίδιο του παλλαδίου (Pd-H), οι φάσεις α και α' κρυσταλλώνονται οπωσδήποτε στην (f.c.c.) κρυσταλλική δομή, στο υδρίδιο του τιτανίου (Ti-H) η τελική φάση κρυσταλλώνεται στην (f.c.c.) κρυσταλλική

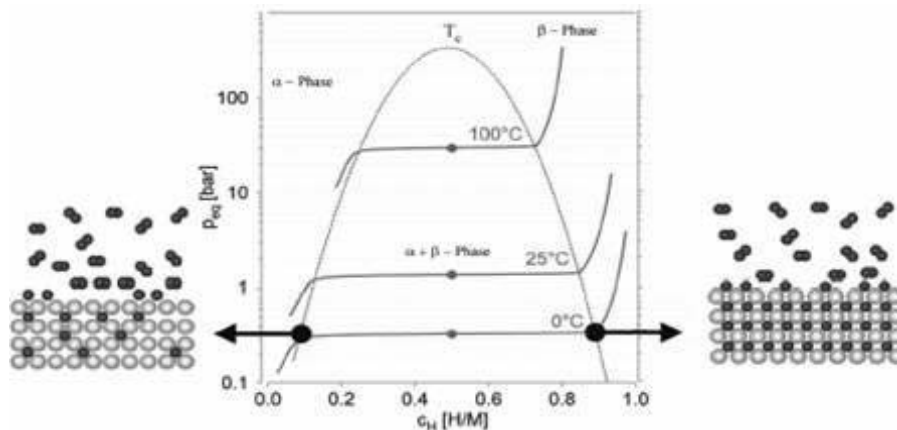
δομή, ενώ η αρχική φάση-α κρυσταλλώνεται στην (b.c.c.) κρυσταλλική δομή. Για το λόγο αυτό, η δεύτερη κατά σειρά θερμοδυναμική φάση που σχηματίζεται στο εσωτερικό των συστημάτων M-H αναφέρεται και με την ονομασία της β-φάσης.

Η γενική αντίδραση σχηματισμού της β-φάσης ενός συστήματος «καθαρού» μετάλλου-υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:



Όπου με c_{α} παριστάνεται η συγκέντρωση της αρχικής α-φάσης του αντίστοιχου μεταλλικού υδριδίου που σχηματίζεται και με c_{β} η συγκέντρωση της τελικής β-φάσης.

Στο Σχήμα 6.10 που ακολουθεί, απεικονίζεται το διάγραμμα ισόθερμης μεταβολής της πίεσης p_{eq} στο χώρο της μάζας ενός τυχαίου υδριδίου «καθαρού» μετάλλου κατά την απορρόφηση του υδρογόνου στο εσωτερικό του. Η απεικόνιση αυτή, γίνεται σε συνάρτηση με τη μεταβολή του λόγου των συγκεντρώσεων $[H/M]$, καθώς διέρχεται από τις θερμοδυναμικές φάσεις α και β. Η πίεση p_{eq} του διαγράμματος ισούται θεωρητικά με την εξωτερική πίεση που πρέπει να ασκείται συνεχώς στο υδρογόνο, καθώς αυτό αποθηκεύεται στη μάζα του αντίστοιχου τυχαίου μεταλλικού υδριδίου:



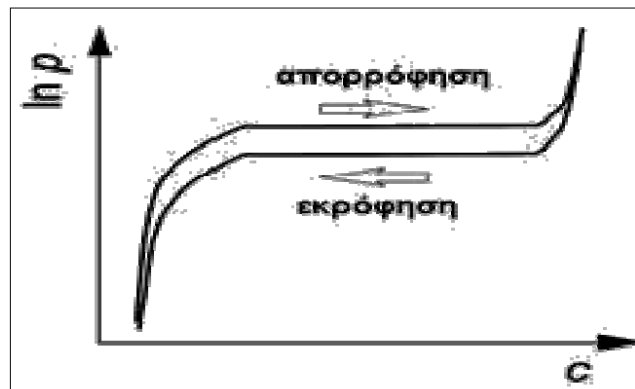
Σχήμα 6.10

Διάγραμμα πίεσης-συγκέντρωσης του υδρογόνου κατά την αποθήκευσή του σε μεταλλικό υδρίδιο.
(Πηγή: Καρύδας Χρήστος, "Τεχνολογία Υδρογόνου")

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στην περιοχή της α-θερμοδυναμικής φάσης, η μεταβολή της πίεσης p_{eq} στο εσωτερικό του αντίστοιχου μεταλλικού υδριδίου μεταβάλλεται εκθετικά με το λόγο $[H/M]$. Ομοίως και στην περιοχή της β-θερμοδυναμικής φάσης. Στην περιοχή, όμως, συνύπαρξης και των δύο θερμοδυναμικών φάσεων α και β, η μεταβολή της πίεσης p_{eq} είναι μηδενική, δηλαδή στην περιοχή αυτή η πίεση p_{eq} παραμένει σταθερή.

Η πίεση p_{eq} είναι διαφορετική από την πίεση που απαιτείται κατά την αποσύνθεση του κάθε μεταλλικού υδριδίου, δηλαδή κατά την ανάκτηση της ποσότητας του υδρογόνου που έχει αποθηκευτεί σ' αυτό. Η δεύτερη αυτή πίεση είναι πάντα μικρότερη της πρώτης. Αυτό συμβαίνει, γιατί η πυκνότητα του αντίστοιχου μεταλλικού υδριδίου που σχηματίζεται είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή του αντίστοιχου «καθαρού» μετάλλου του, αφού στο εσωτερικό του έχει αποθηκευτεί ορισμένη ποσότητα υδρογόνου. Έτσι, η τελική του β-φάση ασκεί (αρκετά μεγάλες) πιέσεις στο

κρυσταλλικό πλέγμα του «καθαρού» μετάλλου, με αποτέλεσμα από το «καθαρό» μέταλλο να ασκούνται ίσες και αντίθετες πιέσεις προς αυτήν. Οι αντίθετες αυτές πιέσεις έχουν σαν συνέπεια το υδρογόνο να απωθείται από τη μάζα του μεταλλικού υδριδίου, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η απομάκρυνση του υδρογόνου από το εσωτερικό αυτού (δηλαδή να απαιτούνται μικρότερες πιέσεις για την απομάκρυνση του υδρογόνου σε σχέση με αυτές που απαιτούνται κατά την αποθήκευσή του). Το φαινόμενο των μειωμένων πιέσεων κατά την απομάκρυνση του υδρογόνου από την μάζα ενός μεταλλικού υδριδίου, ονομάζεται φαινόμενο υστέρησης (hysteresis phenomenon) (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11.
Το φαινόμενο της υστέρησης κατά την απορρόφηση και την εκρόφηση του υδρογόνου από τα υδρίδια.
(Πηγή: www.hy2.gr, “Σχηματισμός Υδριδίων”)

Σύμπλοκα υδρίδια μετάλλων (ή υδρίδια των μεταλλικών κραμάτων).

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και σε κράματα μετάλλων. Στην περίπτωση αυτή, τα σχηματιζόμενα μεταλλικά υδρίδια ονομάζονται σύμπλοκα υδρίδια μετάλλων ή υδρίδια μεταλλικών κραμάτων (complex metal hydrides). Τα σύμπλοκα μεταλλικά υδρίδια ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (B.-H. Liu, *Hydrogen-Metal Systems: Hydride Forming Alloys. Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*).

- Στα σύμπλοκα μεταλλικά υδρίδια που συγκροτούνται από το υδρογόνο και από διάφορα μέταλλα μεταπτώσεως (transition complex hydrides).
- Στα σύμπλοκα μεταλλικά υδρίδια που συγκροτούνται από το υδρογόνο και από διάφορα μέταλλα μη μεταπτώσεως (non transition complex metal hydrides).

Στα «μέταλλα μεταπτώσεως» περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα μεταλλικά στοιχεία που βρίσκονται μεταξύ των II και III ομάδων του περιοδικού πίνακα. Παραδείγματα τέτοιων μετάλλων αποτελούν ο Fe, το Mg, το Ni, το Mn και ο Cu. Κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε μεταλλικά κράματα μεταπτώσεως, τα σχηματιζόμενα σύμπλοκα μεταλλικά του υδρίδια περιγράφονται από τον τύπο:



Όπου με x, y παριστάνονται οι ατομικοί αριθμοί των μετάλλων μεταπτώσεως M, M' αντίστοιχα, ενώ με z παριστάνεται ο ατομικός αριθμός με τον οποίο συμμετέχει το

υδρογόνο στο σύστημα μεταλλικού κράματος-υδρογόνου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συμπλόκων μεταλλικών υδριδίων σχηματιζόμενα από μέταλλα μεταπτώσεως αποτελούν τα Mg_2FeH_6 (σύμπλοκο υδρίδιο σιδήρου-μαγνησίου) και το $MgNiH_4$ (σύμπλοκο υδρίδιο νικελίου-μαγνησίου).

Από την άλλη, κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε κράματα μετάλλων μη μεταπτώσεως, τα σύμπλοκα μεταλλικά υδρίδια που προκύπτουν περιγράφονται από τον τύπο:



Όπου με n παριστάνεται ο ατομικός αριθμός του μετάλλου μη μεταπτώσεως M που συμμετέχει. Το δεύτερο μέταλλο μη μεταπτώσεως και το υδρογόνο συμμετέχουν με ατομικό αριθμό ίσο πάντα με 1. Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα για αυτήν την κατηγορία μεταλλικών υδριδίων είναι το $NaAlH_4$ (σύμπλοκο υδρίδιο αργιλίου-νατρίου) και το $LiAlH_4$ (σύμπλοκο υδρίδιο αργιλίου-λιθίου).

Και οι δύο κατηγορίες συμπλόκων μεταλλικών υδριδίων παρουσιάζουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: μπορούν (τουλάχιστον θεωρητικά) να αποθηκεύσουν αρκετά μεγάλες ποσότητες υδρογόνου στη μάζα τους. Για παράδειγμα, το σύμπλοκο μεταλλικό υδρίδιο $NaAlH_4$ μπορεί, σύμφωνα με τον θεωρητικό χημικό του τύπο, να αποθηκεύσει στη μάζα του υδρογόνου το οποίο ανέρχεται μέχρι και στο 7,5% κ.β. της συνολικής του σύστασης.

Σταθερότητα των μεταλλικών υδριδίων (συμπλόκων και μη).

Ένα στοιχείο που είναι σημαντικό για τον χαρακτηρισμό των υδριδίων είναι και η σταθερότητά τους, δεδομένου ότι διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ευκολία με την οποία αυτά απορροφούν το υδρογόνο στη μάζα τους ή το αποβάλλουν από αυτή κατά την αντίστροφη διαδικασία της αποδέσμευσης. Στα σταθερά μεταλλικά υδρίδια η απορρόφηση του υδρογόνου πραγματοποιείται σχετικά εύκολα, σε αντίθεση με την αποδέσμευσή του που απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη μεριά, στα ασταθή μεταλλικά υδρίδια η αποδέσμευση του υδρογόνου πραγματοποιείται σχετικά εύκολα, ενώ η απορρόφησή του στη μάζα τους απαιτεί σχετικά υψηλές πιέσεις. Στην κατηγορία των σημαντικότερων σταθερών μεταλλικών υδριδίων ανήκουν τα μεταλλικά υδρίδια LiH , TiH_2 , CaH_2 , ZrH_2 , ενώ στην κατηγορία των σημαντικότερων μη σταθερών μεταλλικών υδριδίων ανήκουν τα μεταλλικά υδρίδια AlH_3 και $LiAlH_4$.

Οι πιέσεις απορρόφησης του υδρογόνου σε μη σταθερά μεταλλικά υδρίδια είναι συχνά τόσο υψηλές, ώστε η υδρογόνωση αυτών να επιτυγχάνεται μόνο μέσω διαφόρων ενδιάμεσων αντιδράσεων της. Αντίθετα, οι πιέσεις απορρόφησης του υδρογόνου σε σταθερά μεταλλικά υδρίδια συνήθως είναι μικρότερες από της πρώτες και ο σχηματισμός των σταθερών μεταλλικών υδριδίων επιτυγχάνεται με απευθείας δέσμευση αυτού στο εσωτερικό του κρυσταλλικού της πλέγματος.

Η ικανότητα των διαφόρων μεταλλικών υδριδίων να αποβάλλουν το απορροφημένο υδρογόνο από τη μάζα της αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση γι' αυτά, προκειμένου να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν και στην πράξη για την αποθήκευσή του στη μάζα της. Για τον λόγο αυτό και οι διάφορες ερευνητικές προσπάθειες, που γίνονται σήμερα παγκοσμίως πάνω στην αποθήκευση του υδρογόνου, επικεντρώνονται ακριβώς σε αυτό το στοιχείο. Η αύξηση της αναστρεψιμότητας της αποθήκευσης του υδρογόνου στη μάζα των διαφόρων μεταλλικών υδριδίων επιτυγχάνεται:

- ✓ Μέσω της μείωσης της απαιτούμενης θερμοκρασίας αποδέσμευσης του υδρογόνου από τα μεταλλικά υδρίδια (περίπτωση σταθερών μεταλλικών υδριδίων).
- ✓ Μέσω της μείωσης της απαιτούμενης πίεσης απορρόφησης του υδρογόνου στα μεταλλικά υδρίδια (περίπτωση μη σταθερών υδριδίων).

6.4.5) Αποθήκευση του υδρογόνου σε «καθαρά» νανοκρυσταλλικά μέταλλα και σε νανοκρυσταλλικά μεταλλικά κράματα.

Εισαγωγή.

Πολλά μεταλλικά υδρίδια δεν αποτελούν ικανό μέσο αποθήκευσης (ή αποδέσμευσης) του υδρογόνου για τους ακόλουθους λόγους:

- ✓ Δεν διαθέτουν υψηλή χωρητικότητα σε υδρογόνο.
- ✓ Χαρακτηρίζονται από χαμηλούς κινηματικούς μηχανισμούς απορρόφησης ή αποδέσμευσης του υδρογόνου.
- ✓ Αντιδρούν σχετικά εύκολα με τον ατμοσφαιρικό αέρα σχηματίζοντας αλληπάλληλα στρώματα από μεταλλικά οξειδία στο εξωτερικό τους. Τα στρώματα αυτά εμποδίζουν γενικά το υδρογόνο να εισέλθει στη μάζα τους ή να εξέλθει από αυτή, με αποτέλεσμα να πρέπει αρχικά να «ενεργοποιηθούν» πριν την αποθήκευση ή την αποδέσμευσή του.
- ✓ Παρουσιάζουν αλλοιώσεις στη σύσταση της μάζας τους κατά τους συνεχείς κύκλους υδρογόνωσης και αφυδρογόνωσής τους.

Ωστόσο, παρά τις δυσκολίες που παρουσιάζουν τα μεταλλικά υδρίδια ως μέσο αποθήκευσης ή αποδέσμευσης του υδρογόνου, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτρωθεί το ενδιαφέρον για αυτά. Αυτό οφείλεται στην κοινή πλέον διαπίστωση ότι η βελτίωση της ταχύτητας απορρόφησης και αποδέσμευσης, της διάχυσης υδρογόνου στο μέταλλο, της σταθερότητας των υδριδίων και γενικότερα της δυνατότητας αποθήκευσης του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση νανοδομημένων μεταλλικών υδριδίων και νανοκαταλυτών (Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”).

Δομή των νανομεταλλικών υδριδίων.

Με τη νανοδόμηση των μεταλλικών υδριδίων μειώνονται οι διαστάσεις των δομικών λίθων (ή κόκκων) τους σε διαστάσεις νανομέτρου (nm). Η μείωση αυτή βελτιώνει την κινητική των αντιδράσεών τους κατά την απορρόφηση ή την αποδέσμευση του υδρογόνου από τη μάζα. Δηλαδή, τα νανοδομημένα μεταλλικά υδρίδια αφενός παρουσιάζουν πολύ μικρότερους χρόνους υδρογόνωσης από τα «απλά» μεταλλικά υδρίδια και αφετέρου αποθηκεύουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες υδρογόνου σε σχέση με αυτά, για τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το μεταλλικό υδρίδιο MgH, όταν νανοδομηθούν οι κόκκοι του «καθαρού» Mg.

Τα νανοδομημένα μεταλλικά υδρίδια ονομάζονται και νανοκρυσταλλικά ή νανομεταλλικά υδρίδια. Τα τελικά χαρακτηριστικά τους καθορίζονται από τις ακριβείς συνθήκες υπό τις οποίες έγινε η παρασκευή των διαφόρων νανομετάλλων τους. Η πιο διαδεδομένη τεχνική παρασκευής των διαφόρων νανομετάλλων τους αποτελεί η κατεργασία των κόνεων (ball milling technique). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, αδρανοποιούνται βαρέα μέταλλα, προερχόμενα από δεξαμενές πετρελαίου. Τα βαρέα

αυτά μέταλλα σχηματίζονται σε αυτές σαν φυσικές ιζηματογενείς αποθέσεις τους (www.hy2.gr, “Δομή νανοκρυσταλλικών υδριδίων”).

Σε όλες τις τεχνικές παρασκευής νανομετάλλων, οι αυξημένοι χρόνοι κατεργασίας οδηγούν σε όλο και μικρότερα μεγέθη κόκκων των σχηματιζόμενων νανομετάλλων. Ωστόσο, οι χρόνοι κατεργασίας δεν μπορούν να αυξάνονται απεριόριστα, γιατί μετά από κάποιο όριο εμφανίζεται «άμορφη» μάζα στο εσωτερικό του παραγόμενου νανομετάλλου, δηλαδή μάζα που δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη κρυσταλλική δομή. Η παρουσία, όμως, μεγάλων ποσοτήτων της στο εσωτερικό του νανομετάλλου εμποδίζει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου στο εσωτερικό της και για αυτό είναι ανεπιθύμητη. Από την άλλη μεριά, αν στο εσωτερικό ενός «έμμορφου» νανομετάλλου, δηλαδή νανομετάλλου με καθορισμένη κρυσταλλική δομή, εμφανίζονται μικρές ποσότητες από «άμορφη» μάζα, βελτιώνονται οι αποθηκευτικές του ικανότητες σε υδρογόνο. Πράγματι, κατά την υδρογόνωση του νανομετάλλου το υδρογόνο καταλαμβάνει πρώτα τις θέσεις που προσφέρονται εντός της «άμορφης» περιοχής της μάζας του νανομετάλλου και στη συνέχεια αυτές που προσφέρονται εντός της «έμμορφης» περιοχής αυτής. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μία ανισοκατανομή στην αύξηση του όγκου της «έμμορφης» και της «άμορφης» περιοχής του νανομετάλλου, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα η «άμορφη» περιοχή του να ασκεί θλιπτικές πιέσεις στην «έμμορφη», με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερη εξωτερική πίεση για την συνέχιση της απορρόφησης του υδρογόνου στο εσωτερικό του (και εντός της «έμμορφης» περιοχής του).

Κατά την υδρογόνωση ενός οποιουδήποτε νανομεταλλικού υδριδίου, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Το αρχικό μέγεθος των κόκκων του νανομεταλλικού υδριδίου αυξάνεται, αλλά παραμένει συγκρίσιμο με το αρχικό του μέγεθος. Δηλαδή ο μέσος λόγος ογκομεταβολής των όγκων ($V_{\text{κόκκου,τελ.}}/V_{\text{κόκκου,αρχ.}}$) είναι μικρότερος ή ίσος του 1,5 (Περίπτωση νανο - Mg_2NiH_4).
- Ο τελικός όγκος των κόκκων του νανομεταλλικού υδριδίου αυξάνεται σημαντικά, παύοντας να είναι συγκρίσιμος με τον αρχικό όγκο (Περίπτωση νανο – Mg).

Βέβαια, κατά την αφυδρογόνωση των μεταλλικών υδριδίων, οι κόκκοι αυτοί επιστρέφουν πάλι στο αρχικό τους μέγεθος χωρίς να υφίστανται κάποιες μόνιμες παραμορφώσεις στη μάζα τους.

Κατά το σχηματισμό των διαφόρων νανομεταλλικών υδριδίων, τυχούσες προσμίξεις ή κρυσταλλικές ατέλειες στο εσωτερικό τους βοηθούν στην αποτελεσματικότερη απορρόφηση του υδρογόνου μέσα στη μάζα τους, ενώ παράλληλα συντελούν στη μείωση των χρόνων που απαιτούνται για την απορρόφηση του, αφού, λόγω μεγέθους, καθίστανται «φυσικές» δίοδοι για την εισροή του στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, η ύπαρξη τέτοιου είδους «ανωμαλιών» μπορούν να επιφέρουν τα αντίθετα αποτελέσματα όταν το νανο-υδρίδιο υφίσταται συνεχείς και πολλούς κύκλους υδρογόνωσης και αφυδρογόνωσης (δημιουργία «άμορφης» μάζας, που σε μεγάλες ποσότητες εμποδίζει την εισροή του υδρογόνου στο εσωτερικό του).

Οι κρυσταλλικές ατέλειες των διαφόρων «καθαρών» νανομεταλλικών υδριδίων ανήκουν στην κατηγορία των σημειακών ατελειών. Οι τελευταίες διακρίνονται σε ενδοπλεγματικές ατέλειες και σε ατέλειες κενού. Τέλος, όταν στα διάφορα «καθαρά» νανομεταλλικά υδρίδια υπάρχουν και ορισμένες προσμίξεις από άλλα υλικά μέσα στη μάζα τους, τότε δημιουργούνται οι λεγόμενες ατέλειες αντικαταστάσεως των μεταλλικών τους ατόμων.

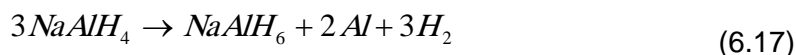
Χρήση νανοκαταλυτών.

Η παρουσία των καταλυτών συνήθως επιδρά δυναμικά στην κινητική των μηχανισμών των αντιδράσεων, χωρίς να επηρεάζει παράλληλα και την κατ' αναλογία σύσταση των διαφόρων προϊόντων τους. Ωστόσο, σε ένα μεταλλικό υλικό που προορίζεται για την αποθήκευση του υδρογόνου, απαιτείται προσοχή στις ποσότητες των καταλυτών που θα χρησιμοποιηθούν, δεδομένου ότι μεγάλες ποσότητές τους επηρεάζουν αρνητικά την μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε υδρογόνο.

Η μέγιστη δραστηριότητα ενός καταλύτη επιτυγχάνεται όταν αυτός ενεργεί σε υλικά συστήματα υγρών διαλυμάτων. Η αποθήκευση, όμως, του υδρογόνου στα μεταλλικά υλικά γίνεται υπό στερεή μορφή (απορροφημένο σαν αέριο μέσα στο στερεό κρυσταλλικό τους πλέγμα). Αυτό συνεπάγεται ότι και ο καταλύτης που θα χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση της αντίδρασης, πρέπει να βρίσκεται σε στερεή μορφή. Λόγω, όμως, της στερεής μορφής του, μειώνεται η ικανότητά του να δράσει αποτελεσματικά. Ωστόσο, η δράση του στα μεταλλικά υλικά βελτιώνεται σημαντικά όταν νανοδομηθεί και ενεργήσει πλέον σαν νανοδομημένο υλικό. Στην περίπτωση αυτή, ο καταλύτης αναφέρεται ως νανοκαταλύτης (www.hy2.gr, “*Επίδραση κατάλυσης στη απορρόφηση*”).

Το ρόλο του νανοκαταλύτη στις διάφορες αντιδράσεις δέσμευσης του υδρογόνου από μεταλλικά υλικά συστήματα αναλαμβάνουν συνήθως αποτελεσματικά τα στοιχεία παλλάδιο (Pd), νικέλιο (Ni), βανάδιο (V) και τιτάνιο (Ti). Τα συγκεκριμένα στοιχεία έχουν την δυνατότητα να εξαλείφουν την ανάγκη της αρχικής «ενεργοποίησης» του κάθε μεταλλικού συστήματος, η οποία, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οφείλεται στο σχηματισμό των μεταλλικών οξειδίων πάνω σε αυτό κατά την επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η εξάλειψη αυτή επιτυγχάνεται μέσω του ομοιογενούς διασκορπισμού των νανοκαταλυτών πάνω στην επιφάνεια του κάθε μεταλλικού υλικού. Έτσι, μπορούν να αυξάνουν, δια απορρόφησης, την ποσότητα του αντιδρώντος υδρογόνου που συγκεντρώνεται εκεί, ώστε να μπορεί να διαπεράσει την εξωτερική επιφάνεια του μεταλλικού υλικού και να εισέλθει στο εσωτερικό του.

Επιπρόσθετα, η χρήση του νανοκαταλύτη δρα αποτελεσματικά και στην κινητική της δέσμευσης του υδρογόνου από το σύστημα υδρογόνου – μεταλλικού υλικού. Για παράδειγμα, η δέσμευση του υδρογόνου από το μεταλλικό υδρίδιο NaAlH₄ παρουσία κάποιου νανοκαταλύτη, μπορεί να επιταχυνθεί έως και δέκα φορές περισσότερο απ’ότι απουσία νανοκαταλύτη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αυξημένη απορρόφηση που παρουσιάζει το «υδρογονωμένο» προϊόν του NaAlH₄, δηλαδή το NaAlH₆:



Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η θετική επίδραση του νανοκαταλύτη κατά την αποθήκευση του υδρογόνου σε κάποιο μεταλλικό υλικό σύστημα, είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτή και οπτικά διαμέσου ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscope), το οποίο απεικονίζει τη νανοδομή του κάθε παραγόμενου μεταλλικού υδριδίου.

Αποθήκευση του υδρογόνου σε μίγματα νανομεταλλικών υδριδίων.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και σε μίγμα δύο διαφορετικών νανομεταλλικών υδριδίων, το οποίο συχνά εξασφαλίζει την αύξηση της συνολικής ποσότητας του υδρογόνου που αποθηκεύεται σε αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αποθήκευση του υδρογόνου στο μίγμα των νανο-υδριδίων MgH₂ και FeTiH₂. Ως γνωστόν, το Mg απαιτεί αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες για την

απορρόφηση του υδρογόνου στη μάζα του συγκριτικά με το FeTi. Οι διαφορετικές, όμως, απαιτήσεις τους σε θερμοκρασίες λειτουργούν ευεργετικά η μία προς την άλλη κατά τη διαδικασία της αποδέσμευσης του υδρογόνου. Αναλυτικότερα, το υδρογόνο αποβάλλεται σχετικά εύκολα από το νανομεταλλικό FeTiH₂, σε συνηθισμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Αν τώρα χρησιμοποιηθεί μέρος της αποβαλλόμενης ποσότητάς του για την παραγωγή θερμότητας μέσω καύσης, η θερμότητα αυτή που θα παραχθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ξεκινήσει η αποδέσμευση υδρογόνου και από το MgH₂. Η συνολική απόδοση της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι μεγαλύτερη από τη συνολική απόδοση της απόσπασης του υδρογόνου από τα δύο νανομεταλλικά υδρίδια του μίγματος κατά μεμονωμένο τρόπο (αυτό εξηγείται από το γεγονός, ότι η ποσότητα του υδρογόνου που χρειάζεται για να παραχθεί η θερμότητα είναι πολύ μικρή).

Ακόμα, κατά την χρησιμοποίηση μιγμάτων από νανομεταλλικά υλικά για την αποθήκευση ή την αποδέσμευση του υδρογόνου, πολλές φορές τα νανομεταλλικά υλικά επιδρούν καταλυτικά μεταξύ τους αυξάνοντας έτσι την τελική ποσότητα του υδρογόνου που αποθηκεύεται στο μίγμα τους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της ταυτόχρονης χρησιμοποίησης των νανομεταλλικών υδριδίων MgH₂ και Mg₂NiH₄ σαν αποθηκευτικά μέσα υδρογόνου, παρατηρείται αύξηση της ποσότητας του υδρογόνου έως και 5% κ.β. περίπου σε σχέση με την ξεχωριστή τους χρησιμοποίηση. Ένα άλλο όφελος της καταλυτικής επίδρασης μεταξύ των νανομεταλλικών υλικών είναι η πραγματοποίησης γρηγορότερης αποδέσμευσης του υδρογόνου συγκριτικά με την μεμονωμένη αποδέσμευση, με ταυτόχρονη ελάττωση της θερμοκρασίας του κρυσταλλικού πλέγματος που απαιτείται για αυτήν.

Τέλος, δεδομένης της ενδόθερμης φύσης της αποδέσμευσης του υδρογόνου από τα νανομεταλλικά υλικά, με τη χρησιμοποίηση μίγματος δύο διαφορετικών νανομεταλλικών υλικών (το ένα να βρίσκεται με τη μορφή «καθαρού» νανομετάλλου και το άλλο με τη μορφή του νανομεταλλικού υδριδίου) επιταχύνεται ο ρυθμός με τον οποίον η θερμότητα διοχετεύεται από το περιβάλλον τους στο εσωτερικό τους. Το «καθαρό» νανομέταλλο διαδραματίζει τον ρόλο του αγωγού της θερμότητας για το νανομεταλλικό υδρίδιο, διευκολύνοντας το τελευταίο να παραλάβει αποτελεσματικότερα τη θερμότητα μέσα στο εσωτερικό του και να αποβάλλει το υδρογόνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρησιμοποίηση του νανομεταλλικού μίγματος Mg – Al για την αποβολή υδρογόνου, στο οποίο το Mg βρίσκεται υπό τη μορφή υδριδίου του (MgH₂), ενώ το Al δρα σαν «καθαρό» νανομέταλλο, άγοντας την θερμότητα προς το εσωτερικό του MgH₂. Συγκεκριμένα, το Al του μίγματος διαδραματίζει δύο διαφορετικού ρόλους: αφενός λειτουργεί σαν αγωγός της θερμότητας για το MgH₂ και αφετέρου συμμετέχει στην απόσπαση του υδρογόνου από το εσωτερικό αυτού. Η απόσπαση του υδρογόνου ξεκινάει όταν, μετά από κάποιο σημείο της όλης διαδικασίας, η μεγαλύτερη ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου έχει πλέον αφαιρεθεί από το MgH₂, οπότε η μετακίνηση της θερμότητας προς το εσωτερικό του δεν είναι πλέον πρωτεύουσας σημασίας και έτσι το Al μπορεί να αντιδράσει μ' αυτό και να συντελέσει στην απόσπαση της υπολειπόμενης ποσότητας υδρογόνου που έχει στο εσωτερικό του (*www.hy2.gr, "Μίγματα Υδριδίων"*).

6.4.6) Αποθήκευση του υδρογόνου σε νανοδομημένες ενώσεις του με άνθρακα.

Εισαγωγή.

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί και σε διάφορες ανθρακικές του ενώσεις, οι οποίες νανοδομούνται για τη αποτελεσματικότερη δέσμευσή του στο εσωτερικό τους.

Δύο από τις σημαντικότερες και πολυπληθέστερες κρυσταλλικές μορφές του άνθρακα, που απαντώνται ελεύθερες στη φύση, αποτελούν το διαμάντι και ο γραφίτης (ή αλλιώς το κάρβουνο). Ο άνθρακας, όμως, μπορεί να υπάρξει και σε άλλες κρυσταλλικές μορφές, οι οποίες κατά πλείστον είναι τεχνητές, αφού δεν υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες στη φύση. Στην κατηγορία των κρυσταλλικών αυτών δομών του άνθρακα εντάσσονται:

- ✓ Οι νανοϊνες.
- ✓ Τα φουλερένια.
- ✓ Οι νανοσωλήνες.

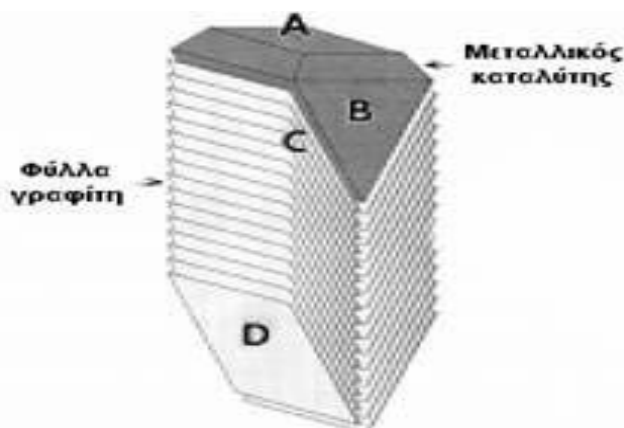
Και οι τρεις αυτές κρυσταλλικές δομές παρουσιάζουν δύο κοινά χαρακτηριστικά:

- Χαρακτηρίζονται από νανοδομή στη μάζα τους.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την αποθήκευση του υδρογόνου μέσα στη μάζα τους.

Μέχρι στιγμής, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την τεχνολογία του υδρογόνου παρουσιάζουν οι νανοσωλήνες του άνθρακα. Για το λόγο αυτό, μέχρι και το τέλος του παρόντος κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με αυτούς, ενώ θα γίνει μόνο μια απλή αναφορά στις νανοϊνες και τα φουλερένια του άνθρακα. Αξίζει, όμως, να αναφερθεί ότι τόσο οι νανοσωλήνες όσο τα φουλερένια και οι νανοϊνες του άνθρακα, εξασφαλίζουν κατά την αποθήκευση του υδρογόνου πολύ μεγαλύτερη ασφάλεια σε σχέση με την υγρή και την αέρια αποθήκευση του υδρογόνου, γιατί το αποθηκεύουν στη μάζα τους σαν «στερεό» (προσοροφημένο μεταξύ των ατόμων του άνθρακά τους) υπό αρκετά χαμηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (www.hy2.gr, “Παρουσίαση μορφών άνθρακα”).

Οι νανοϊνες και τα φουλερένια του άνθρακα.

Οι νανοϊνες του άνθρακα (carbon nanofibers) αποτελούνται από στρώματα γραφίτη με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Πρόκειται για μεγάλης έκτασης επιφάνειες που αποτελούν θέσεις για την προσρόφηση του αερίου υδρογόνου (Σχήμα 6.11) (Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”).



Σχήμα 6.11
Νανοϊνες του άνθρακα.
(Πηγή: Καρύδας Χρήστος, “Τεχνολογία Υδρογόνου”).

Τα φουλερένια (buckyballs) είναι ανθρακικές δομές με σφαιρικό σχήμα και ονομάστηκαν έτσι επειδή η δομή τους μοιάζει με κατασκευές του αρχιτέκτονα Buckminster Fuller. Η διάμετρός τους κυμαίνεται μεταξύ 0,7 και 1,5 nm. Γενικά, είναι σταθερά μόρια και απαιτούν θερμοκρασίες τάξεως 1000 °C και άνω προκειμένου να διασπαστούν οι δεσμοί μεταξύ των ανθράκων που τα αποτελούν. Η επιφάνεια των φουλερενίων αποτελείται από πενταμελείς και εξαμελείς δακτυλίους άνθρακα. Όπως και στην περίπτωση των νανοϊνών, το υδρογόνο αποθηκεύεται ως «στερεό» στη μάζα τους, δεδομένου ότι προσροφάται μεταξύ των ατόμων του άνθρακά τους. Το πιο γνωστό φουλερένιο είναι αυτό που αποτελείται από 60 άτομα άνθρακα (Σχήμα 6.12) (*Βικιπαίδεια, “Φουλερένιο”*).



Σχήμα 6.12

Δομή του C_{60} . Κάθε μόριο έχει τη μορφή κανονικού εικοσαέδρου και θυμίζει μπάλα ποδοσφαίρου.

(Πηγή: www.physics4u.gr, “Φουλερένια και νανοσωλήνες”)

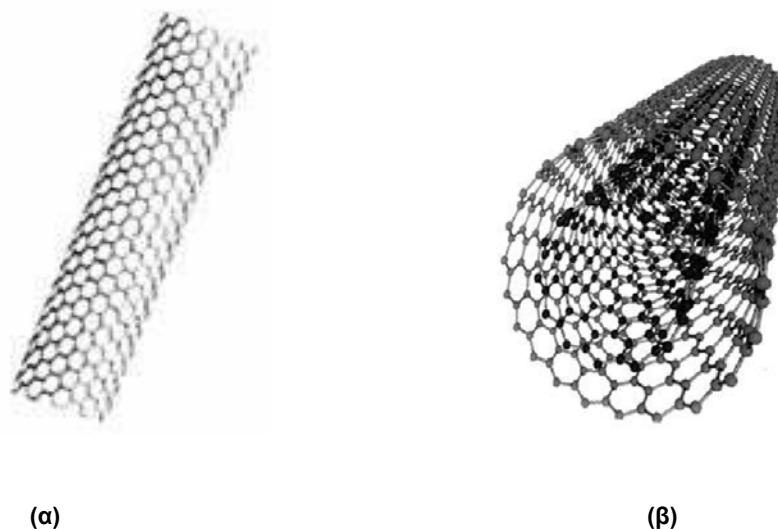
Οι νανοσωλήνες του άνθρακα.

Οι νανοσωλήνες του άνθρακα (carbon-nanotubes ή απλά nanotubes) είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, κλειστοί σε κάθε άκρο με πενταμελείς δακτυλίους. Ανακαλύφθηκαν το 1991 από τον Ιάπωνα φυσικό Sumio Iijima. Οι νανοσωλήνες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

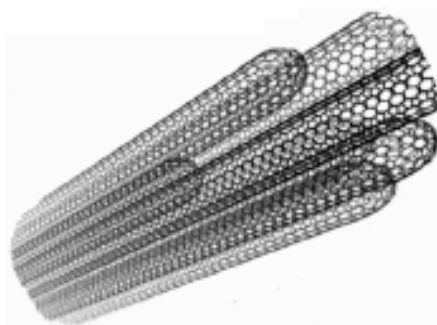
- ✓ Πολυφλοιϊκοί νανοσωλήνες του άνθρακα (Multi-Wall Nanotubes, MWNT).
- ✓ Μονοφλοιϊκοί νανοσωλήνες του άνθρακα (Single-Wall Nanotubes, SWNT).

Οι πολυφλοιϊκοί νανοσωλήνες του άνθρακα αποτελούνται από έναν κεντρικό σωλήνα, ο οποίος περιβάλλεται εξωτερικά από ένα ή περισσότερα ομόκεντρα, σε σχέση με αυτόν, κυλινδρικά στρώματα από άτομα άνθρακα, ενώ στους μονοφλοιϊκούς νανοσωλήνες υπάρχει μόνο ένας κυλινδρικός σωλήνας, ο οποίος συγκροτείται από πολυάριθμα άτομα άνθρακα. Όταν οι νανοσωλήνες του άνθρακα ομαδοποιηθούν, προκύπτουν οι λεγόμενες συστοιχίες τους (nanotubes bundles) (*Βικιπαίδεια, “Νανοσωλήνες Άνθρακα”*).

Στα σχήμα 6.13 που ακολουθεί, απεικονίζεται αντίστοιχα ένας μονοφλοιϊκός και ένας πολυφλοιϊκός νανοσωλήνας άνθρακα. Το σχήμα 4.14 απεικονίζει μία συστοιχία νανοσωλήνων άνθρακα.



Σχήμα 6.13
Δομή νανοσωλήνων άνθρακα.
(α) Μονοφλοιϊκός νανοσωλήνας άνθρακα.
(β) Πολυφλοιϊκός νανοσωλήνας άνθρακα.
(Πηγή: www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf)



Σχήμα 6.14
Συστοιχία νανοσωλήνων άνθρακα.
(Πηγή: www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf)

Τεχνικές σύνθεσης των νανοσωλήνων του άνθρακα.

Οι σημαντικότερες τεχνικές σύνθεσης που έχουν εφευρεθεί μέχρι σήμερα για την παραγωγή των νανοσωλήνων άνθρακα είναι οι ακόλουθες (Βικιπαίδεια, “Νανοσωλήνες Άνθρακα”):

- Εξάχνωση των ηλεκτροδίων του άνθρακα με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου εκκένωσης (electric-arc discharge technique).
- Φωτοδιάσπαση γραφίτη με χρήση ακτινών laser (laser ablation). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ο γραφίτης εξατμίζεται με ακτινοβολία από laser σε υψηλή θερμοκρασία και αδρανή ατμόσφαιρα και μετατρέπεται σε νανοσωλήνες του άνθρακα. Οι παραγόμενοι σωλήνες έχουν μικρή διασπορά ως προς τη διάμετρό τους.

- Καταλυτική χημική απόθεση από ατμό (catalytical chemical vapor deposition, CCVD). Κατά τη συγκεκριμένη τεχνική, αέριες ενώσεις του άνθρακα (συνήθως υδρογονανθράκων ή μονοξειδίου του άνθρακα) διασπώνται θερμικά με τη χρήση μεταλλικών καταλυτών (Fe, Co, Ni), υποστηριγμένων σε υποστρώματα οξειδίων των μετάλλων ή αιωρούμενων στην αέρια φάση.

Τα προϊόντα που θα προκύψουν από τις παραπάνω τεχνικές μπορεί να είναι πολυφλοιϊκοί ή μονοφλοιϊκοί νανοσωλήνες άνθρακα, ανάλογα με τις παραμέτρους της μεθόδου. Γενικά, ενώ οι πολυφλοιϊκοί νανοσωλήνες μπορούν να συντεθούν και χωρίς τη χρήση καταλύτη, οι μονοφλοιϊκοί απαιτούν την παρουσία του. Τόσο όμως για τους μονοφλοιϊκούς, όσο και για τους πολυφλοιϊκούς νανοσωλήνες άνθρακα (όταν αυτοί συντίθενται παρουσία καταλύτη), το μέγεθος μάλιστα των καταλυτικών σωματιδίων καθορίζει και τη διάμετρο του νανοσωλήνα.

Σήμερα, η τεχνική της καταλυτικής χημικής απόθεσης από ατμό για την Παρασκευή των νανοσωλήνων του άνθρακα, είναι περισσότερο εύχρηστη συγκριτικά με τις υπόλοιπες, δεδομένου ότι παρουσιάζει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα:

- ✓ Απαιτεί αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες (700-1400 βαθμούς Κ) από αυτές που απαιτούνται κατά τις δύο άλλες τεχνικές (3000 βαθμοί Κ).
- ✓ Παρουσιάζει καλύτερη ικανότητα ελέγχου της δομής των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα, με αποτέλεσμα να παρέχει τη δυνατότητα παρασκευής τους για πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Αντίθετα, οι άλλες δύο τεχνικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για συγκεκριμένες μόνο εφαρμογές, αφού δεν μπορούν να ελέγξουν την τελική δομή των παραγόμενων νανοσωλήνων άνθρακα.

Μηχανισμοί αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν αέριο μέσα στους νανοσωλήνες του άνθρακα. Ενώ όμως στα μεταλλικά υδρίδια το υδρογόνο απορροφάται μέσα στη μάζα τους, στους νανοσωλήνες του άνθρακα αυτό προσροφάται πάνω στην εξωτερική τους επιφάνεια. Η διαφορά μεταξύ της προσρόφησης και της απορρόφησης του υδρογόνου από τα στερεά υλικά έγκειται στην έκταση του βάρους εισχώρησης του υδρογόνου μέσα στη μάζα του εκάστοτε υλικού. Έτσι, ενώ κατά την αποθήκευση του αερίου υδρογόνου στα μεταλλικά υδρίδια αυτό κατανέμεται στο εσωτερικό τους, κατά την προσρόφησης του στους νανοσωλήνες αυτό κατανέμεται ομοιόμορφα μέσω δέσμμευσης πάνω στην εξωτερική τους επιφάνεια, χωρίς να υπεισέρχεται στο εσωτερικό τους.

Η προσρόφηση του υδρογόνου στους νανοσωλήνες του άνθρακα πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

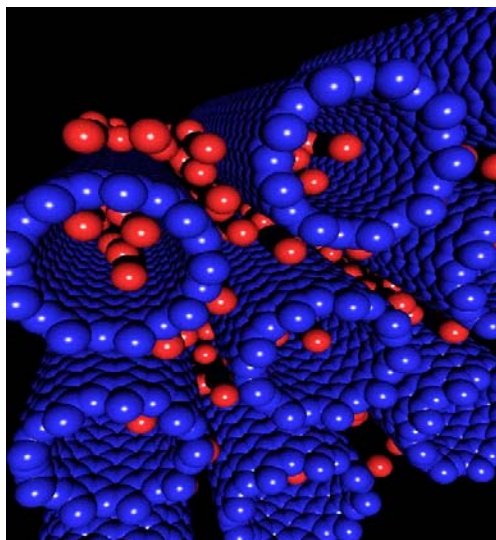
- ▶ Με φυσική προσρόφηση, κατά την οποία το υδρογόνο διατηρεί την μοριακή του δομή και συγκρατείται στην εξωτερική επιφάνεια των νανοσωλήνων με δυνάμεις τύπου Van der Waals.
- ▶ Με χημική προσρόφηση, κατή την οποία το υδρογόνο υφίσταται διάσπαση σε άτομα και δημιουργεί χημικούς δεσμούς με τα άτομα του άνθρακα των νανοσωλήνων.

Ωστόσο, οι ακριβείς μηχανισμοί με τους οποίους το υδρογόνο προσροφάται (φυσικά ή μηχανικά) στους νανοσωλήνες του άνθρακα, δεν έχουν μέχρι σήμερα

εξακριβωθεί πλήρως. Αυτό οφείλεται αφενός στην ύπαρξη ασυμφωνίας μεταξύ των διαφόρων θεωρητικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της αποθήκευσης του υδρογόνου στους νανοσωλήνες του άνθρακα και αφετέρου στην παρουσιαζόμενη απόκλιση στις μετρήσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τη διερεύνηση της αποθήκευσής του σε αυτούς. Πάντως μέχρι σήμερα έχει γίνει δυνατό να διαπιστωθεί ότι το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί στους νανοσωλήνες του άνθρακα ως εξής (www.hy2.gr, “Μηχανισμοί αποθήκευσης υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα”):

- Στο εσωτερικό των νανοσωλήνων του άνθρακα, αλλά όχι σε μεγάλο βάθος. Αν οι αποθηκευμένες ποσότητες του υδρογόνου είναι μικρές, αυτό μπορεί να σχηματίσει ένα μονό κυλινδρικό στρώμα στο εσωτερικό των νανοσωλήνων. Σε περίπτωση, όμως, που οι αποθηκευμένες ποσότητές του είναι μεγαλύτερες, το υδρογόνο σχηματίζει αλληπάλληλα κυλινδρικά στρώματα στο εσωτερικό τους. Τα αλληπάλληλα αυτά κυλινδρικά στρώματα είναι συνήθως ομοκεντρικά μεταξύ τους, ενώ γίνονται μη ομοκεντρικά σε περίπτωση που οι ποσότητες του υδρογόνου γίνουν πολύ μεγάλες. Οι νανοσωλήνες αποθήκευσης που χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες διαμέτρους ευνοούν τον σχηματισμό των αλληπάλληλων μη ομοκεντρικών κυλινδρικών στρωμάτων αποθηκευμένου υδρογόνου.
- Στο εσωτερικό της επιφάνειας των νανοσωλήνων για την περίπτωση των μονοφλοιϊκών νανοσωλήνων του άνθρακα, ενώ στο εξωτερικό της επιφάνειάς τους για την περίπτωση των πολυφλοιϊκών νανοσωλήνων του άνθρακα.
- Μεταξύ των εσωτερικών επιφανειών των πολυφλοιϊκών νανοσωλήνων του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή, η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου είναι ανεξάρτητη του μεγέθους της διαμέτρου των νανοσωλήνων.
- Μεταξύ των νανοσωλήνων του άνθρακα που βρίσκονται σε σχηματισμό συστοιχίας. Η προσρόφηση αυτή του υδρογόνου μέσα σε συστοιχίες νανοσωλήνων άνθρακα προσδίδει στους νανοσωλήνες υπεροχή ως αποθηκευτικά μέσα υδρογόνου, συγκριτικά με τα μονοστρώματα γραφίτη (που μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση του υδρογόνου). Ωστόσο, η προσρόφηση αυτή απαιτεί, κατά κανόνα, την καταβολή μεγάλων εξωτερικών πιέσεων, που διαχωρίζουν τους νανοσωλήνες που συγκροτούν τις συστοιχίες. Μετά τον διαχωρισμό των νανοσωλήνων των συστοιχιών, το υδρογόνο υπεισέρχεται στον ελεύθερο χώρο που δημιουργήθηκε μεταξύ τους και κατακρατείται από τις εκτεθειμένες τους επιφάνειες.

Μια προσομοίωση της δομής του προσροφημένου υδρογόνου σε μια βελτιστοποιημένη συστοιχία νανοσωλήνων (σε θερμοκρασία 298 K και πίεση υδρογόνου 200 bar) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.15 (*Johnson 2002*).



Σχήμα 6.15
Προσομοίωση της δομής του προσροφημένου υδρογόνου σε συστοιχία νανοσωλήνων σε θερμοκρασία 298 K και πίεση 200 bar.
(Πηγή: Johnson 2002)

Αποθήκευση του υδρογόνου σε νανοσωλήνες άνθρακα που περιέχουν και προσμίξεις αλκαλίων.

Θεωρητικά, οι νανοσωλήνες του άνθρακα παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για μαζική χρησιμοποίηση σαν αποθηκευτικά μέσα υδρογόνου. Έχουν την ικανότητα να προσροφούν γρήγορα και αποτελεσματικά το υδρογόνο, γεγονός που τους καθιστά ιδανικά μέσα για την αποθήκευσή του και τη χρησιμοποίησή τους στις διάφορες εφαρμογές. Στην πράξη, όμως, τα διάφορα ποσά του αποθηκευμένου υδρογόνου που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, δεν καλύπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις απαιτήσεις των τεχνολογικών εφαρμογών του υδρογόνου, καθιστώντας επομένως τη μελλοντική μαζική εφαρμογή τους αβέβαιη. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με διάφορα πειράματα που έχουν διεξαχθεί έχει διαπιστωθεί ότι όταν οι νανοσωλήνες άνθρακα περιέχουν διάφορα αλκάλια (π.χ. Li, K, κ.α.) αυξάνεται η ικανότητά τους να αποθηκεύουν αποτελεσματικά και σε μεγάλες ποσότητες το υδρογόνο, ακόμα και σε συνηθισμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της θετικής πόλωσης που παρατηρείται στα άτομα των αλκαλικών τους προσμίξεων, εξαιτίας της μεταφοράς αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου από αυτά προς τα άτομα του άνθρακα. Κατά τη μεταφορά αυτή, τα αλκαλικά άτομα φορτίζονται θετικά, πολώνοντας στη συνέχεια τα μόρια του υδρογόνου που αποθηκεύεται στη μάζα τους και δημιουργώντας έτσι έναν ασθενή δεσμό μαζί τους, ο οποίος διευκολύνει την περαιτέρω συνέχιση της αποθήκευσης (www.hy2.gr, “Αποθήκευση σε νανοσωλήνες άνθρακα προσμίξεων αλκαλίων”). Η πλήρης διερεύνηση και εφαρμογή του όλου φαινομένου βρίσκεται ακόμα υπό εξέλιξη.

6.4.7) Σύγκριση κυριότερων συμβατικών μεθόδων αποθήκευσης του υδρογόνου.

Σε όλες τις περιπτώσεις αποθήκευσης του υδρογόνου, είναι σημαντικό να μειωθεί ο απαιτούμενος όγκος για την αποθήκευση, χωρίς όμως να μειωθεί η ενεργειακή του απόδοση πάρα πολύ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν πολλές μέθοδοι αποθήκευσης και ανάλογα της μορφής που έχει το υδρογόνο σε καθεμία, έχει και

διαφορετική ενεργειακή πυκνότητα. Σήμερα, η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης του υδρογόνου είναι το συμπιεσμένο υδρογόνο.

Ο πίνακας 6.4 δίνει τις ενεργειακές πυκνότητες των κυριότερων σημερινών συμβατικών μεθόδων αποθήκευσης του υδρογόνου:

Πίνακας 6.4
Ενεργειακές πυκνότητες των κυριότερων σημερινών
συμβατικών μεθόδων αποθήκευσης του υδρογόνου (Έτος αναφοράς 2007).
(Πηγή: Μαρία Φούντη – Γιώργος Βουρλιωτάκης, "Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου")

<i>Μέθοδος Αποθήκευσης του Υδρογόνου</i>	<i>Ενεργειακή Πυκνότητα ανά Μάζα (MJ/kg)</i>	<i>Ενεργειακή Πυκνότητα ανά Όγκο (MJ/L)</i>	<i>Πλεονεκτήματα</i>	<i>Μειονεκτήματα</i>
Συμπιεσμένο υδρογόνο (200 bar)	2,00	2,60	Μικρή μάζα και χαμηλός όγκος	Δυσκολίες συμπίεσης, θέματα ασφάλειας
Συμπιεσμένο υδρογόνο (350 bar)	6,00	4,50		
Μεταλλικό υδρίδιο (LaNi ₅ , steel vessel)	0,86	2,00	Αρκετά χαμηλός όγκος (ειδικά σε μικρά μεγέθη), χαμηλές πιέσεις	Μεγάλο βάρος, διαχείριση θερμότητας αντίδρασης
Υγρό υδρογόνο	5,60	3,80	Ικανοποιητικός όγκος και βάρος	Υψηλό κόστος, απώλειες ατμοποίησης, απώλειες υγροποίησης

Σύμφωνα λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού και με βάση τον πίνακα 6.4, σαν γενική αρχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξής ταξινόμηση: Τα υδρίδια μετάλλων είναι πιο κατάλληλα όταν πρόκειται για αποθήκευση μικρών ποσοτήτων (της τάξης του 1 kg) και όταν απαιτείται υψηλός παράγοντας ασφαλείας. Για μεγάλες ποσότητες όμως, τα σημερινά υδρίδια μετάλλων είναι αρκετά βαριά και αρκετά ακριβά.

Σε αυτές τις περιπτώσεις η υγροποίηση ή η συμπίεση του αερίου υδρογόνου φαίνεται να είναι οι πιο κατάλληλες διαδικασίες. Το υγροποιημένο υδρογόνο φαίνεται να είναι πλεονεκτικότερο όσον αφορά στο χώρο αποθήκευσης και τα θέματα ασφαλείας, ενώ η συμπίεση της αέριας μορφής του είναι σίγουρα πολύπλοκη διαδικασία. Η υγροποίησή του συμβαίνει στους 20 K, απαιτεί συγκεκριμένο ποσό ενέργειας εισόδου της τάξης των 12,5 με 15 kWh/ kg H₂, ειδικό χώρο εγκατάστασης των περίπου 15 L/kg H₂ και συνεπάγεται ένα κόστος της τάξης των 250-700 € / kg H₂, ανάλογα το μέγεθος της εγκατάστασης. Ωστόσο, αν και το υγρό υδρογόνο προσφέρει πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, παρέχει πολύ μικρή συνολική απόδοση στο όλο σύστημα κυρίως λόγω των ενεργειακών απωλειών κατά τη διάρκεια της υγροποίησής του.

Από την άλλη μεριά, το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορες πιέσεις προκειμένου να εξοικονομηθεί χώρος. Ένας περιοριστικός παράγοντας σε αυτή την επιλογή είναι η διαπερατότητα και η οριακή τάση διάρρηξης του υλικού το οποίο έχει επιλεγεί για την αποθήκευση. Τα σύνθετα υλικά φαίνεται να δίνουν τεχνολογικά την καλύτερη λύση και να αντέχουν σε πιέσεις μεγαλύτερες των 700 bar σε ένα μικρό μέρος του βάρους των συμβατικών κυψελών από χάλυβα. Μια σχετική έρευνα από το US Department ενέργειας προτείνει πιέσεις της τάξης των 480 bar για αποθήκευση του υδρογόνου σε κυψέλες από πολυμερή υλικά. Η ενέργεια που χρειάζεται για να γίνει η συμπίεση κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι γύρω στα 2,6 με

3,6 kWh/kg H₂ και ο ειδικός χώρος εγκατάστασης περίπου 40 L/kg H₂. Το προβλεπόμενο κόστος για τέτοιες κυψέλες είναι γύρω στα 330 €/kg H₂, εάν συζητάμε για μαζική παραγωγή (στο εμπόριο σήμερα, οι τιμές για κυψέλες από χάλυβα κυμαίνονται γύρω στα 560 €/kg H₂) (*Βιολέττα Γιαννέτα: “Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”*).

6.4.8) Αποθήκευση του υδρογόνου που προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες.

Πέρα από τους συμβατικούς τρόπους αποθήκευσης που προαναφέρθηκαν, μια ιδέα αποθήκευσης του υδρογόνου, η οποία βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο, είναι αυτή των «αιολικών πύργων» (wind turbine towers). Πρόκειται για ανεμογεννήτριες, το εσωτερικό των οποίων είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να μπορεί να αποθηκεύεται το παραγόμενο υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου γίνεται μέσω ηλεκτρόλυσης και στη συνέχεια αποθηκεύεται στους «πύργους». Με αυτό τον τρόπο μπορεί κανείς να δημιουργήσει ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου από 100% ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, το οποίο είναι αρκετά οικονομικό.

Τα προβλήματα:

Η αποθήκευση του υδρογόνου προσθέτει ένα πλήθος από δυσκολίες στο σχεδιασμό του «πύργου», καθώς μια σειρά από προβλήματα πρέπει να επιλυθούν. Αυτά είναι τα ακόλουθα (*Ειδική ερευνητική εργασία, Βιολέττα Γιαννέτα: “Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια”*):

▶ Η διάβρωση:

Τόσο η οξειδωση από τον ατμοσφαιρικό αέρα, όσο και η φθορά από το υδρογόνο, επηρεάζουν το εσωτερικό ενός «πύργου» υδρογόνου. Για το λόγο αυτό οι συμβατικοί «πύργοι» προστατεύονται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά από τη διάβρωση από τον ατμοσφαιρικό αέρα, με βαφή και με προσθήκη κατάλληλων υλικών.

▶ Καταστροφή εξαιτίας του υδρογόνου (Hydrogen attack):

Η καταστροφή από το υδρογόνο είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο διεισδύει μέσα στο πλέγμα του ατσαλιού, συγχωνεύεται στα κενά και στα εγκλείσματα όπου αντιδρά με τον άνθρακα που υπάρχει στο ατσάλι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απανθράκωση, καθώς και το σχηματισμό αερίου μεθανίου. Το μεθάνιο ασκεί μια εσωτερική πίεση, προκαλώντας έτσι ρωγμές και εσωτερικά σπασίματα. Η καταστροφή από υδρογόνο δε συμβαίνει κάτω από τους 200 °C. Για το λόγο αυτό, η αποθήκευση του υδρογόνου σε «πύργους» προβλέπεται κάθε φορά να γίνεται κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C), που είναι αρκετά χαμηλότερη από τους 200 °C.

▶ Ευθρυπτότητα από υδρογόνο (Hydrogen Embrittlement, HE):

Ο όρος ευθρυπτότητα (HE), χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη θραύση που συμβαίνει εξαιτίας του υδρογόνου στο εσωτερικό ενός «πύργου». Γενικά, η

ευθρυπτότητα προκαλείται από την έκθεση ενός μετάλλου σε περιβάλλον πλούσιο σε υδρογόνο. Κατά τη διάρκεια της εσωτερικής ευθρυπτότητας, το υδρογόνο παράγεται μέσα στο μεταλλικό πλέγμα, ως προϊόν κάποιων διεργασιών, υδρογόνο το οποίο είναι απίθανο να σχετίζεται με το υδρογόνο που υπάρχει αποθηκευμένο στον πύργο.

Σε αντίθεση με την καταστροφή από το υδρογόνο, η ευθρυπτότητα που προκαλείται από το υδρογόνο του περιβάλλοντος, είναι πιο σοβαρή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ωστόσο, όπως και η καταστροφή από το υδρογόνο, έτσι και η ευθρυπτότητα γίνεται σημαντική με την αύξηση της πίεσης. Τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι ο βαθμός θραύσης είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας της πίεσης του αερίου υδρογόνου. Επομένως, ο σχεδιασμός «πύργων» για την αποθήκευση του υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις, μάλλον βοηθά στην αποφυγή του συγκεκριμένου φαινομένου.

Η καθαρότητα του υδρογόνου είναι επίσης ένας πολύ βασικός παράγοντας που ρυθμίζει την ευθρυπτότητα. Πειραματικά στοιχεία έχουν δείξει ότι η εξάπλωση των ρωγμών σε ένα τετρωμένο δείγμα, μπορεί να ελεγχθεί με την εισαγωγή οξυγόνου στο περιβάλλον του υδρογόνου. Οι έρευνες έδειξαν ότι η εξάπλωση των ρωγμών σε περιβάλλον καθαρού υδρογόνου μπορούν να σταματήσουν με την εισαγωγή κάτι λιγότερου από 200 ppm οξυγόνου σε ατμοσφαιρική πίεση.

Δεδομένου ότι το υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση, το οξυγόνο θα υπάρχει ήδη για την παραπάνω διαδικασία. Ωστόσο, η προσθήκη οξυγόνου σε περιβάλλον υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία εκρηκτικού μείγματος. Η προσθήκη, όμως, των απαραίτητων ποσοτήτων οξυγόνου, προκειμένου να σταματήσει η δημιουργία ρωγμών, δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την ασφάλεια του συστήματος. Εξάλλου, οι ποσότητες είναι της τάξεως των 200 ppm, δηλαδή απέχουν πολύ από το όριο ανάφλεξης του υδρογόνου σε οξυγόνο (αυτό είναι 94% κατά όγκο). Διακόσια ppm οξυγόνου σε υδρογόνο αντιπροσωπεύουν μόνο το 0,02 % (κατά όγκο) του οξυγόνου που απαιτείται για να δημιουργηθεί ανάφλεξη.

Ο χάλυβας που αποτελείται από μεγαλύτερους κόκκους (grains) και με ιζήματα να είναι συγκεντρωμένα στα όρια αυτών των κόκκων, μπορεί επίσης να επισπεύσει την ευθρυπτότητα, επειδή αυτοί διευκολύνουν την διάχυση του υδρογόνου μέσα στο μεταλλικό πλέγμα. Η κατάλληλη επιλογή μεγέθους τέτοιου κόκκων ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο γίνεται κατά τη διαμόρφωση του χάλυβα καθώς και κατά την επεξεργασία του. Ευτυχώς, η επιλογή κατάλληλης πλακέτας χάλυβα, με ικανοποιητικό μέγεθος κόκκων, είναι κάτι εύκολο.

Επιπρόσθετα, η επιρροή σε ευθρυπτότητα αυξάνεται με αύξηση της αντοχής του υλικού. Τυπικά, η αντοχή αυξάνεται με την πρόκληση εναπομένουσας τάσης εφελκυσμού στην επιφάνεια του υλικού, μέσω διαδικασιών, όπως είναι η σφυρηλάτηση ή η συγκόλληση. Θεωρητικά όταν το υδρογόνο απορροφάται στην επιφάνεια ενός υλικού, μειώνει την ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό ρωγμών. Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραγόντων διευκολύνει το σχηματισμό επιφανειακών ρωγμών.

Τέλος, οι συγκολλήσεις των διαφόρων επιφανειών του πύργου αποτελούν ένα λεπτό ζήτημα, δεδομένου ότι λόγω της απότομης ψύξης των σημείων αυτών, μπορεί να προκληθούν περιοχές πάνω εκεί, όπου ο άνθρακας και άλλες προσμείξεις συνενώνονται διευκολύνοντας την ευθρυπτότητα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί αν χρησιμοποιηθεί χαμηλός σε κράμα χάλυβας, ο οποίος να έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 0,28% και σε ισοζύγιο άνθρακα (C+1/4 Mn) γύρω στο 0,55%.

▶ Ανάλυση της δομής:

Προκειμένου να διατηρηθεί σε σταθερή πίεση το εσωτερικό ενός τέτοιου «πύργου», δημιουργούνται πρόσθετες απαιτήσεις στο σχεδιασμό του. Αυτός δεν πρέπει μόνο να αντέχει στα φορτία ανέμου, που δέχεται κατά την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας, αλλά πρέπει και να πληρεί τις απαιτήσεις ενός δοχείου πίεσης. Οι απαιτήσεις αυτές καθορίζονται από την ASME (American Society of Mechanical Engineers) Boiler and Pressure Vessel Code.

6.5) Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου – Ηλεκτροχημική παραγωγή ηλεκτρισμού από υδρογόνο.

6.5.1) Εισαγωγή - Αρχή λειτουργίας.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου ή απλά κυψέλες καυσίμου (fuel cells) είναι από τα πιο ελκυστικά και πολλά υποσχόμενα συστήματα στην τεχνολογία του υδρογόνου. Με τη χρήση αυτών, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια του υδρογόνου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό και σε θερμότητα, μέσω της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Από τον ηλεκτρισμό και την θερμότητα που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου, μπορεί στη συνέχεια να προκύψει οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στις καθημερινές ενεργειακές του ανάγκες.

Η θεωρία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου είναι ανάλογη με αυτήν των μπαταριών. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν βάσει του τύπου του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος τους είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEMFC). Η δομή και η αρχή λειτουργίας του αντιπροσωπευτικού αυτού τύπου κυψέλης καυσίμου είναι η ακόλουθη:

Δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από μία μεμβράνη, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Η μεμβράνη έχει κατασκευαστεί από πολυμερές υλικό. Μεταξύ αυτής της πολυμερούς μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Συνοπτικά, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού περιγράφεται από τα παρακάτω επιμέρους στάδια (*Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας, “Κυψέλες Καυσίμου”*):

▶ 1^ο στάδιο:

Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης (δηλαδή το αρνητικό της ηλεκτρόδιο) και αφού έρθει σε επαφή με τον καταλύτη της διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου (H^+) και ηλεκτρόνια (e^-). Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής, ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομοιογενή τρόπο. Η ομοιογενής αυτή διάχυση συντελεί στην ομαλότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και επομένως στην αποδοτικότερη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώθηκαν από το υδρογόνο στην άνοδο της κυψέλης, μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο αυτής (δηλαδή προς το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιό της) δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι συνεχές και έχει ικανοποιητική ισχύ, εξαιτίας του γεγονότος ότι η πολυμερής μεμβράνη εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να εισέλθουν στο εσωτερικό της μάζας της, επιτρέποντας παράλληλα μόνο στα θετικά ιόντα να εισέλθουν μέσα σε αυτό. Επιπρόσθετα, η άνοδος και ο καταλύτης της κυψέλης κατασκευάζονται πάντα από αγώγιμο υλικό, προκειμένου να διευκολύνουν την κίνηση των θετικών ιόντων υδρογόνου στην περιοχή του.

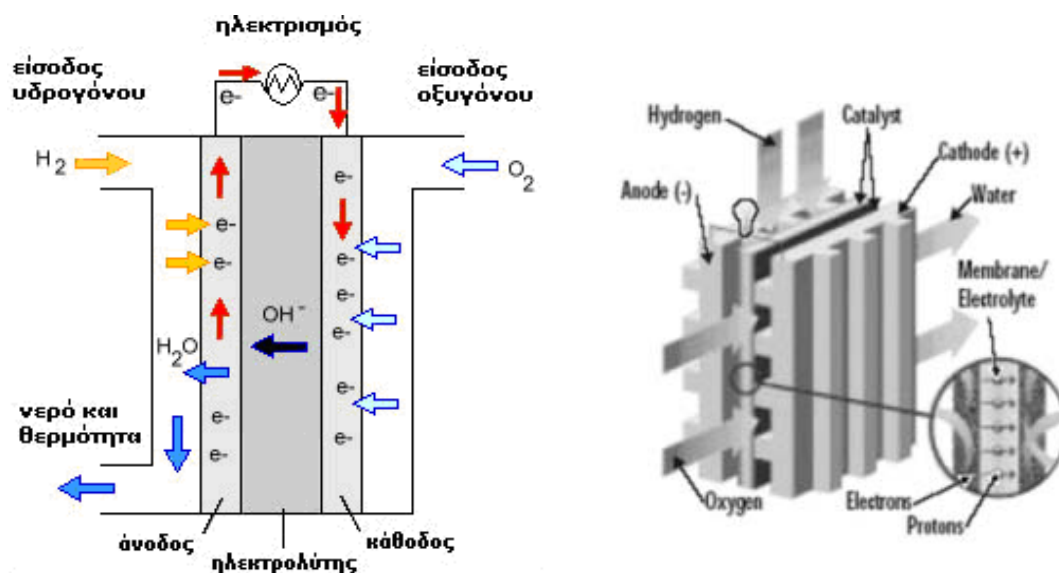
▶ 2° στάδιο:

Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου (πρωτόνια) διαπερνούν την εξωτερική επιφάνεια της πολυμερούς μεμβράνης και εισέρχονται στο εσωτερικό της μάζας της. Εξερχόμενα από αυτήν, στη συνέχεια φθάνουν στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου, όπου ενώνονται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, το οποίο την τροφοδοτεί. Από την ένωσή τους αυτή παράγεται νερό. Στον χώρο της καθόδου της κυψέλης καυσίμου, υπάρχει ένα δεύτερο στρώμα από μεταλλικό καταλύτη, όμοιο με το πρώτο μεταλλικό στρώμα της ανόδου της, το οποίο αναλαμβάνει την επιτάχυνση του σχηματισμού του νερού. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.

▶ 3° στάδιο:

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, τα δύο στρώματα μεταλλικού καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου - οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Το κάθε ένα από τα δύο παράλληλα στρώματα του μεταλλικού καταλύτη αποτελείται συνήθως από μία πολύ λεπτή επιφάνεια από λευκόχρυσο (Pt) πάνω σε μία παχύτερη επιφάνεια από άνθρακα (C). Η λεπτή επιφάνεια του Pt είναι το μέρος εκείνο του μεταλλικού καταλύτη το οποίο σε επαφή με την μεμβράνη της κυψέλης. Ο καταλύτης είναι τραχύς και πορώδης, ώστε να μεγιστοποιεί την εκτεθειμένη επιφάνειά του στα υλικά με τα οποία έρχεται σε επαφή (πρωτόνια υδρογόνου, ηλεκτρόνια και μοριακό οξυγόνο).

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου κυψέλης καυσίμου PEMFC στον οποίο αναφερθήκαμε (Σχήμα 6.16).



Σχήμα 6.16

Απεικόνιση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

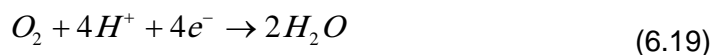
(Πηγές: www.energypoint.gr/alles_tehnologies/ydrogono.html, www.allaboutenergy.gr/Paraqogi3327.html)

Οι χημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν τα παραπάνω στάδια συνοψίζονται παρακάτω:

Άνοδος:



Κάθοδος:



Ολική Αντίδραση:



Η τάση που παράγεται συνήθως στη πράξη, κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του υδρογόνου με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, μέσα σε μία κυψέλη καυσίμου PEMFC, είναι της τάξης των 0,7 Volt. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες τάσεις, οι οποίες θα είναι και πρακτικά αξιοποιήσιμες, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά. Η συνδεσμολογία αυτή αναφέρεται και σαν συστοιχία κυψελών καυσίμου ή fuel cell stack (*Wikipedia*, “Κυψέλη καυσίμου”). Οι συστοιχίες κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται στην πράξη και για τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου που θα αναφερθούν στη συνέχεια, προκειμένου να παραχθεί η αναγκαία ηλεκτρική τάση για τις πρακτικές τους εφαρμογές.

Όσον αφορά στα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου σαν διατάξεις παραγωγής ενέργειας, αυτές παρουσιάζουν τρία πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα (*Wikipedia*, “Κυψέλη καυσίμου”):

- Πολυμορφία ως προς το είδος των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Οι περισσότεροι τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν εκτός από το «καθαρό» υδρογόνο, άλλα πολυάριθμα υδρογονούχα καύσιμα (π.χ. μεθανόλη, αιθανόλη, φυσικό αέριο), χωρίς να μειώσουν σημαντικά την απόδοσή τους σε ισχύ. Απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση για την χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων καυσίμων σε αυτές είναι η ύπαρξη αναμορφωτή, δηλαδή μιας διάταξης που μετατρέπει τα μη υδρογονούχα καύσιμα σε υδρογόνο, ώστε αυτά να μπορούν να διοχετευτούν στο εσωτερικό της κάθε κυψέλης καυσίμου.
- Δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσών ενέργειας από το υδρογόνο.
- Περιβαλλοντικά οφέλη (ελάχιστες εκπομπές ρύπων), αφού το κύριο προϊόν από την ηλεκτρόλυση του υδρογόνου που επιτελείται στο εσωτερικό τους, είναι το νερό.

Το σημαντικότερο, όμως, μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι το μεγάλο οικονομικό κόστος που συνεπάγεται η χρήση τους (*Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας*, “Κυψέλες Καυσίμου”).

6.5.2) Είδη κυψελών καυσίμου.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.5.1, η ταξινόμηση των κυψελών καυσίμου γίνεται κυρίως με βάση το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Ανάλογα λοιπόν με το είδος του ηλεκτρολύτη, προκύπτουν οι ακόλουθοι βασικοί τύποι:

- Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερών ή μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC):

Οι κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane fuel cells, PEM) λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν αρκετή ισχύ για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση των καθημερινών ενεργειακών αναγκών (π.χ. κίνηση μεταφορικών οχημάτων, τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών κ.α.). Σε αυτό βοηθά η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ των 50 και 250 kW. Το μοναδικό ίσως μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου PEMFC, είναι η αρνητική συμπεριφορά στη λειτουργία τους με μη «καθαρό» υδρογόνο, δηλαδή με υδρογονούχα καύσιμα που δεν περιέχουν το υδρογόνο σε μεγάλες περιεκτικότητες στη μάζα του. Σήμερα, η έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου όσον αφορά στις εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων είναι επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο (*Βικιπαίδεια, "Κυψέλες καυσίμου"*)

- Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC):

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά στο διαστημικό πρόγραμμα των οχημάτων Gemini και Apollo, τα οποία αναπτύχθηκαν από τη Nasa για την προσεδάφιση στη Σελήνη τη δεκαετία του '60. Οι κυψέλες καυσίμου AFC χρησιμοποιούν διάλυμα KOH 85% κ.β. σαν ηλεκτρολύτη, για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, και 35-50% κ.β για λειτουργία κάτω από τους 120 °C, διότι αυτός είναι ο πιο αγώγιμος από όλους τους ηλεκτρολύτες (απαιτεί όμως υψηλής καθαρότητας H₂ και O₂, ώστε να αποφεύγεται η δηλητηρίασή του). Συγκριτικά με τις υπόλοιπες κυψέλες, οι AFC μπορούν να παράγουν το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, καθώς η απόδοσή τους μπορεί να φθάσει και το 80% (*Austria Energy Agency. Fuel cell Research strategy for Europe. 1998 edition*). Ο υψηλός αυτός βαθμός της απόδοσής τους, οφείλεται κυρίως στον εξίσου υψηλό ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι διάφορες καταλυτικές χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό τους. Το μεγαλύτερό τους μειονέκτημα είναι, όμως, ότι είναι ιδιαίτερα ευπρόσβλητες, κατά τη λειτουργία τους, από την παρουσία του CO₂ στο εσωτερικό τους, ακόμα και όταν αυτό υφίσταται σε πολύ μικρές ποσότητες. Λόγω της παρουσίας του CO₂, η απόδοση των κυψελών καυσίμου μειώνεται και η λειτουργία τους παρεμποδίζεται («δηλητηριάζεται»), με συνέπεια να ελαττώνεται σημαντικά η συνολική διάρκεια ζωής τους. Για το λόγο αυτό, και το μίγμα υδρογόνου – ατμοσφαιρικού οξυγόνου που καταναλώνουν, καθαρίζεται επιμελώς από οποιεσδήποτε ποσότητες CO₂, πριν αυτό διοχετευτεί στο εσωτερικό τους. Σήμερα, οι κυψέλες καυσίμου AFC δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, γιατί το κόστος λειτουργίας τους είναι υψηλό εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι ευπρόσβλητες στο CO₂. Από την άλλη μεριά, οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διαστημικές εφαρμογές, δεδομένου ότι αυτές το κόστος είναι δευτερεύον ζήτημα, ενώ το πρωτεύον είναι η απόδοση (*Wikipedia, "Alkaline fuel cell"*).

- Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC):

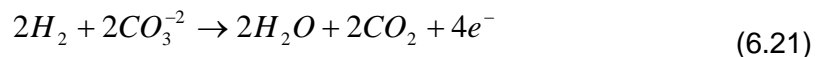
Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells ή αλλιώς PAFC) είναι από τις πιο προηγμένες κυψέλες καυσίμου τεχνολογικά και εμπορικά. Χρησιμοποιούν 100% καθαρό φωσφορικό οξύ σαν ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ των 150 °C και 200 °C και επιτρέπει στην κυψελίδα να αντέξει 1-2% CO και μερικά ppm θείου, μέσα στα αντιδρώντα αέρια, κάτι που ωφελεί στην όλη διαδικασία καθώς μειώνει την ανάγκη για καθαρό H₂ στην άνοδο. Οι κυψέλες καυσίμου PAFC μειονεκτούν ως προς το σχετικά μεγάλο μέγεθος

του όγκου τους, το επίσης αυξημένο βάρος της μάζας τους, αλλά και η χαμηλή τάση του ρεύματος που παράγουν. Η απόδοση αυτών των κυψελών είναι πολύ μικρότερη από ότι των υπολοίπων και υπολογίζεται στην περιοχή των 40-60%. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό των κυψελών καυσίμου PAFC κατά την παραγωγή ενέργειας από το υδρογόνο, είναι πανομοιότυπες με αυτές που συμβαίνουν στο εσωτερικό των κυψελών καυσίμου PEMFC (εξισώσεις 6.1.1 έως 6.1.3). Οι κυψέλες καυσίμου PAFC έχουν βγει ήδη στην παραγωγή (*Hirschenhofer, John H. Fuel Cell Status 1994. IEEE AES Systems Magazine Nov. (1994) 10 – 15*).

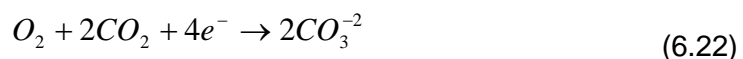
- Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC):

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (molten carbonate fuel cells, MCFC) χρησιμοποιούν για ηλεκτρολύτη ενώσεις του άνθρακα με στοιχεία, όπως είναι το λίθιο (Li), το νάτριο (Na) και κάλιο (K), σε υγρή μορφή και εμποτισμένες σε κατάλληλο υλικό. Ενώ οι κυψέλες αυτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλά επίπεδα απόδοσης (μεγαλύτερα από 60%) λόγω των θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν (περίπου 650 °C), δεν προσφέρονται για καθημερινή χρήση. Από την άλλη μεριά, αυτή η υψηλή θερμοκρασία, η οποία απαιτείται προκειμένου ο ηλεκτρολύτης να γίνει ιοντικά αγώγιμος, επιτρέπει τη χρήση φτηνών καταλυτών, αφού οι χημικοί δεσμοί καταστρέφονται και δημιουργούνται πολύ πιο εύκολα σε τέτοιες θερμοκρασίες. Η ίδια όμως υψηλή θερμοκρασία ευθύνεται για την αυξημένη διάβρωση και καταστροφή των μελών της κυψέλης. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, φυσικό αέριο, προπάνιο και άλλα. Η ισχύς, η οποία χαρακτηρίζει αυτόν τον τύπο κυψέλης κυμαίνεται ανάλογα τη χρήση από 10 kW μέχρι και 2 MW. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης είναι οι ακόλουθες (*Βικιπαίδεια, “Κυψέλες καυσίμου”*):

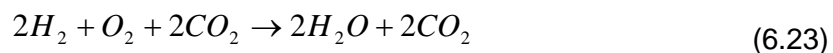
Άνοδος:



Κάθοδος:



Ολική αντίδραση:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις παρατηρούμε ότι CO₂ που παράγεται στην άνοδο, καταναλώνεται στη συνέχεια εξ' ολοκλήρου στην κάθοδο.

- Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC):

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (solid oxide fuel cells, SOFC) ενδείκνυνται για αυξημένες ενεργειακές ανάγκες, με απόδοση στο 60% και παραγόμενη ισχύ μέχρι και 100 kW. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως ως ηλεκτρολύτη ένα σκληρό κεραμικό υλικό στερεού οξειδίου ζirkονίου και μια μικρή ποσότητα νατρίου, αντί για ηλεκτρολύτη υγρής μορφής, επιτρέποντας έτσι θερμοκρασίες μέχρι και 1000 °C. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας τους, οι κυψελίδες αυτές χρειάζονται ακριβούς

καταλύτες ή εναλλακτικά, εξοπλισμό ύγρανσης και επεξεργασίας καυσίμου, αυξάνοντας έτσι το κόστος τους σημαντικά. Το αρχικό μειονέκτημα αυτού του τύπου κυψελίδων καυσίμου, είναι το κόστος της συγκράτησης, το οποίο απαιτεί εξωτικά κεραμικά με παρόμοιους ρυθμούς διαστολής. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους είναι οι ακόλουθες (*Βικιπαίδεια, “Κυψέλες καυσίμου”*):

Άνοδος:



Κάθοδος:



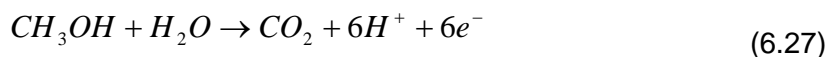
Ολική αντίδραση:



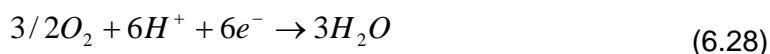
- Κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC):

Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (direct methanol fuel cells, DMFC) χρησιμοποιούν ως καύσιμο μεθανόλη, αντί για υδρογόνο, χωρίς απαιτείται η μετατροπή της σε αυτό. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι η πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM, με αρκετά όμως ακόμα προβλήματα προς επίλυση, όπως είναι η μεγάλη ποσότητα καταλύτη που απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου, όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο, ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία τους είναι οι ακόλουθες:

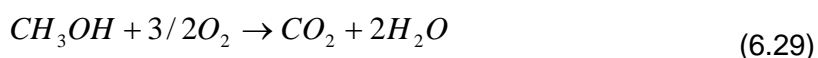
Άνοδος:



Κάθοδος:



Ολική αντίδραση:



Στον πίνακα 6.5 που ακολουθεί, απεικονίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας των παραπάνω βασικών τύπων κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 6.5
Διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου μαζί με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους.

(Πηγές: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell,
www.physics.ntua.gr/pdf_doc_files/seminario_fysikhs_2007/Karydas.ppt,
www.courseware.mech.ntua.gr/ml22058/pdfs/M12b-Hydrogen_Combustion.pdf.)

Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Ευκίνητο Ιόν	Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	Απόδοση Ηλεκτρικής Ισχύος (%)	Ισχύς (kW)	Κυριότερες Εφαρμογές
PEM- Πολυμερούς Μembrάνης	H ⁺	50-100	40-50	50-250	Οχήματα και άλλες εφαρμογές, Συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας – ηλεκτρικού ρεύματος
Μεθανόλης DMFC	H ⁺	20-90	~45	1	Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές χαμηλής ισχύος
Φωσφορικού Οξέος PAFC	H ⁺	150-200	40-60	έως 10.000 (μελλοντικά)	Ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις
Στερεού Οξειδίου SOFC	O ²⁻	800-1000	>60	έως 100.000 (μελλοντικά)	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής
Τηγμένου Άνθρακα MCFC	CO ₃ ⁻²	~650	>60	έως 100.000 (μελλοντικά)	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής
Αλκαλικού Ηλεκτρολύτη AECF	OH ⁻	500-200	70	10-100	Σε διαστημικά οχήματα (Apollo, Shuttle...)

6.6) Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου (MEK Υδρογόνου).

6.6.1) Εισαγωγή .

Εκτός από τις κυψέλες καυσίμου, μια άλλη κατηγορία ενεργειακών διατάξεων για την παραγωγή ενέργειας μέσω υδρογόνου είναι και οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK υδρογόνου). Μέχρι σήμερα, η δυνατότητα χρησιμοποίησης του υδρογόνου σαν αέριο καύσης των MEK αφορά σχεδόν αποκλειστικά τον τομέα των μεταφορικών οχημάτων και ιδιαίτερα των επιβατικών Ι.Χ. Αξίζει να αναφέρουμε ότι τα τελευταία χρόνια, αρκετές μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες σε παγκόσμια κλίμακα (π.χ. Nissan, Mazda, Hyundai, Toyota, Ford, BMW κ.λ.π.) έχουν αρχίσει να σχεδιάζουν μεταφορικά οχήματα τροφοδοτούμενα από MEK υδρογόνου και μερικές από αυτές μάλιστα έχουν ήδη «λανσάρει» στο εμπόριο ορισμένα από αυτά (*Wikipedia, "Hydrogen"*).

Στο Σχήμα 6.17 που ακολουθεί, απεικονίζονται το μοντέλο Sedan 760 Li που κυκλοφόρησε στο εμπόριο η αυτοκινητοβιομηχανία BMW τον Φεβρουάριο του 2007, ο δωδεκακύλινδρος κινητήρας καύσης του, καθώς και ο σωλήνας πλήρωσης για τον ανεφοδιασμό του συγκεκριμένου οχήματος με υγρό υδρογόνο.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 6.17

(α) Το πρώτο τελειοποιημένο μοντέλο μικτών δυνατοτήτων κίνηση με βενζίνη ή/και υδρογόνο) Sedan 760Li της BMW.

(β) Ο δωδεκακύλινδρος κινητήρας καύσης τύπου "dual-mode" του εμπορικού μοντέλου Sedan 760Li της BMW.

(γ) Σωλήνας πλήρωσης για ανεφοδιασμό με υγρό υδρογόνο του Sedan 760Li

(Πηγή: <http://woman.pathfinder.gr/driving/257546.html>)

6.6.2) Καύση του υδρογόνου σε MEK.

Ως γνωστόν, όταν το υδρογόνο αντιδρά με τον ατμοσφαιρικό αέρα παράγεται νερό (υπό μορφή ατμού) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Όσον αφορά στις MEK υδρογόνου, η θερμότητα που εκλύεται κατά την καύση του υδρογόνου με τον ατμοσφαιρικό αέρα, δύναται να αξιοποιηθεί κατάλληλα από τα εσωτερικά μηχανικά μέρη, προκειμένου να μετατραπεί σε ωφέλιμο μηχανικό έργο.

Όπως και στις κυψέλες καυσίμου, κατά τη χρησιμοποίηση του υδρογόνου στις MEK παράγονται και ορισμένες ποσότητες ρύπων από την πραγματική αντίδραση καύσης του. Στους διάφορους ρύπους συγκαταλέγονται κυρίως τα διάφορα οξειδία του αζώτου, λόγω της παρουσίας του αζώτου στο ατμοσφαιρικό αέρα με τον οποίον αντιδρά το υδρογόνο. Προκύπτουν ακόμα και ορισμένες ποσότητες από CO, CO₂, καθώς και άκαυστους υδρογονάνθρακες, οι οποίοι προέρχονται από την αντίδραση καύσης του ατμοσφαιρικού αέρα και του υδρογόνου αντίστοιχα με τις ποσότητες των λιπαντικών και των ελαίων που περιέχονται μέσα στις MEK. Όλες όμως οι ποσότητες αυτές ρύπων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες ποσότητες των κυψελών καυσίμου, αλλά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες ποσότητες των παραγόμενων ρύπων από την καύση των διαφόρων ορυκτών καυσίμων σε MEK. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του CO₂ έχει παρατηρηθεί ότι οι εκπομπές του κατά τη λειτουργία μιας και μοναδικής MEK βενζίνης ισοδυναμούν με τις εκπομπές 300 όμοιων, ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, MEK υδρογόνου, υπό τις ίδιες συνθήκες καύσης με την MEK βενζίνης.

Ωστόσο, μέχρι και σήμερα, το φαινόμενο αυτανάφλεξης (ή αλλιώς “backfire”) τροχοπεδεί την ανάπτυξη των ΜΕΚ υδρογόνου. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται κατά τη μη ομαλή εξέλιξη της καύσης του υδρογόνου μέσα σε μια ΜΕΚ, η οποία συνεπάγεται κάποιες μικροανάφλεξεις (ή αλλιώς «σκασίματα») και εφόσον οι βαλβίδες εισαγωγής προς το χώρο καύσης της ΜΕΚ είναι ανοιχτές. Οι μικροανάφλεξεις αυτές παρουσιάζονται κατά τη φάση εισαγωγής του μίγματος αέρα – υδρογόνου στο χώρο καύσης της ΜΕΚ. Το φαινόμενο αυτανάφλεξης είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο και ανεπιθύμητο αφενός γιατί μπορεί να καταστρέψει πλήρως (με έκρηξη) μια ΜΕΚ, υπό κατάλληλες συνθήκες, και αφετέρου γιατί δεν μπορεί να ελεγχθεί και να σταματήσει προτού πάρει επικίνδυνες διαστάσεις. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό στις ΜΕΚ υδρογόνου συγκριτικά με τις ΜΕΚ που καταναλώνουν συμβατικά ορυκτά καύσιμα, δεδομένης της μεγαλύτερης αναφλεξιμότητας που παρουσιάζει το υδρογόνο έναντι των συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Δύο πιθανές αιτίες που προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου “backfire” είναι οι ακόλουθες (Μιχάλης Ι. Βαλάκας: “Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας”):

- ✓ Η υψηλή θερμοκρασία των ηλεκτροδίων ανάφλεξης που υπάρχουν μέσα στον χώρο καύσης της ΜΕΚ, η οποία για διάφορους λόγους μπορεί να γίνει υψηλότερη από αυτήν του μίγματος καύσης που εισέρχεται στο χώρο αυτό.
- ✓ Η ύπαρξη ορισμένων «θερμών» σημείων στην εσωτερική επιφάνεια του χώρου καύσης της ΜΕΚ, δηλαδή σημείων με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτή του μίγματος της καύσης.

Η εμφάνιση του φαινομένου “backfire” σε μία ΜΕΚ υδρογόνου, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μιας αλυσιδωτής ανάφλεξης, μέσα στην ΜΕΚ, η οποία συνήθως ξεκινάει από τον χώρο που το μίγμα της καύσης εισάγεται στους κυλίνδρους. Το «κύμα» αυτό μπορεί να επεκταθεί στη συνέχεια από τις ανοιχτές βαλβίδες εισαγωγής της ΜΕΚ και να επηρεάσει την υπόλοιπη ποσότητα του μίγματος καύσης, το οποίο υπάρχει μέσα στους αλούς εισαγωγής και δεν έχει εισροφηθεί ακόμα από τους κυλίνδρους της. Στην καλύτερη περίπτωση, η αλυσιδωτή αυτή ανάφλεξη προκαλεί την ασταθή και θορυβώδη λειτουργία της ΜΕΚ, η οποία συνήθως συνεπάγεται και τη διακοπή της λειτουργίας της. Στην χειρότερη όμως περίπτωση, η αλυσιδωτή αυτή ανάφλεξη μπορεί να οδηγηθεί σε τόσο μεγάλη κλιμάκωση, ώστε το μίγμα της καύσης να αναφλεγεί σε όλη την έκταση της μάζας του, με αποτέλεσμα την ολική καταστροφή της ΜΕΚ μέσω έκρηξης.

Για τον περιορισμό του φαινομένου “backfire” στις ΜΕΚ υδρογόνου, βασικό ρόλο διαδραματίζουν τα ακροφύσια ψεκασμού (injectors) του μίγματος καύσης, τα οποία, όπως έχει διαπιστωθεί, θα πρέπει να έχουν διαφορετικό σχεδιασμό από αυτά που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές ΜΕΚ. Σήμερα δεν έχει ακόμα καταστεί δυνατό να αναπτυχθούν ειδικά σχεδιασμένα ακροφύσια ψεκασμού για τις διάφορες ΜΕΚ υδρογόνου που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα, σ’ αυτές εφαρμόζονται κατά πλείστον τα ακροφύσια ψεκασμού που χρησιμοποιούνται στις ΜΕΚ φυσικού αερίου. Τα ακροφύσια αυτά προσεγγίζουν αρκετά, αλλά όχι απόλυτα, τις αυξημένες απαιτήσεις των ΜΕΚ υδρογόνου για παροχή καυσίμου, μιας και το φυσικό αέριο, ως γνωστόν είναι κι αυτό αρκετά αραιό σαν αέριο, αλλά όχι τόσο αραιό όσο το υδρογόνο.

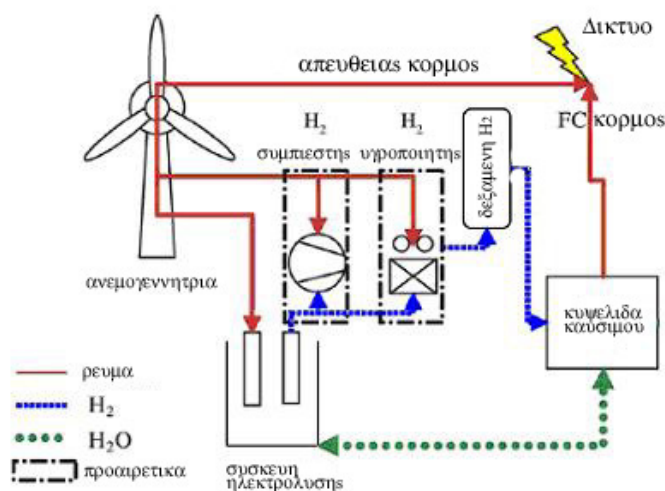
Γενικά στις ΜΕΚ (υδρογόνου ή συμβατικών καυσίμων), τα διάφορα ακροφύσια ψεκασμού που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι δύο βασικών κατηγοριών (Μιχάλης Ι. Βαλάκας: “Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας”):

- Τα ακροφύσια «έμμεσου» ψεκασμού, τα οποία ψεκάζουν το μίγμα της καύσης μέσα στους αλούς εισαγωγής των κυλίνδρων τους.

- Τα ακροφύσια «άμεσου» ψεκασμού, τα οποία ψεκάζουν το μίγμα της καύσης απευθείας μέσα στους κυλίνδρους τους. Σε αντίθεση με τον «έμμεσο» ψεκασμό, ο «άμεσος» ψεκασμός δεν εφαρμόζεται ακόμα σε πρακτικές εφαρμογές.

6.7) Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή υδρογόνου.

Στο Σχήμα 6.18 που ακολουθεί, απεικονίζεται σε απλουστευμένη μορφή ένα τυπικό υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την παραγωγή υδρογόνου:



Σχήμα 6.18

Σχηματική αναπαράσταση υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την παραγωγή υδρογόνου.

(Πηγή: Βιολέττα Γιαννέτα, "Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια")

Το υβριδικό αυτό σύστημα περιλαμβάνει την ανεμογεννήτρια για την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος, τη συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή του υδρογόνου, τον συμπιεστή ή τον υγροποιητή για τη μετατροπή του υδρογόνου σε αέρια ή υγρή μορφή αντίστοιχα, τη δεξαμενή αποθήκευσης του αερίου ή υγρού υδρογόνου και την κυψελίδα καυσίμου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από το καύσιμο του υδρογόνου.

Η φιλοσοφία λειτουργίας ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την παραγωγή υδρογόνου, είναι απλή. Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στο βαθμό που δεν μπορεί να απορροφηθεί απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο αξιοποιείται για την παραγωγή του υδρογόνου στη συσκευή ηλεκτρόλυσης. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται στη συνέχεια σε δεξαμενή, σε υγρή ή συμπιεσμένη μορφή. Η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου είναι συνδεδεμένη με συστοιχίες κυψελών καυσίμου. Όταν και όποτε παραστεί ανάγκη να μετατραπεί η ενέργεια του αποθηκευμένου υδρογόνου σε ηλεκτρική για να καλυφθούν οι ανάγκες ηλεκτροδότησης (π.χ. τις ώρες αιχμής της ζήτησης, ή όταν υπολείπεται η ανεμογεννήτρια και υπάρχει ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας), το υδρογόνο μεταφέρεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης στη συστοιχία των κυψελίδων. Σε αυτές ενώνεται με το υπάρχον οξυγόνο των κυψελών και οδηγεί

στο σχηματισμό ηλεκτρικής ενέργειας η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο, και νερού το οποίο είναι το απόβλητο αυτής της διαδικασίας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται το ηλεκτρικό δίκτυο να λαμβάνει πάντα σταθερή ηλεκτρική ισχύ.

Επιπρόσθετα, το σύστημα διαθέτει ένα εσωτερικό κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί την συσκευή ηλεκτρόλυσης με εφεδρική ηλεκτρική ενέργεια (10% της ενέργειας που απαιτείται για την κανονική λειτουργία της συσκευής) από τη συστοιχία των κυψελών καυσίμου, όταν η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας. Κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο για να αποφευχθεί η συσκευή ηλεκτρόλυσης να τίθεται εκτός λειτουργίας και να ξεκινά συνεχώς. Με ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτούνται επίσης συνεχώς, ο υψηλής πίεσης συμπιεστής (αν πρόκειται για αέριο υδρογόνο) και ο υγροποιητής (αν πρόκειται για αποθήκευση υγρού υδρογόνου), ενώ η τροφοδοσία τους γίνεται είτε από την ανεμογεννήτρια είτε από τις κυψέλες καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ

7.1) Εισαγωγή.

Τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ) βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα. Εκτός των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων που περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, καμμία άλλη μέθοδος δεν έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης τόσων μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και για μεγάλης διάρκειας χρονικές περιόδους. Η ισχύς ενός τέτοιου συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να ξεκινά από 50 MW και να ξεπερνά τα 300 MW.

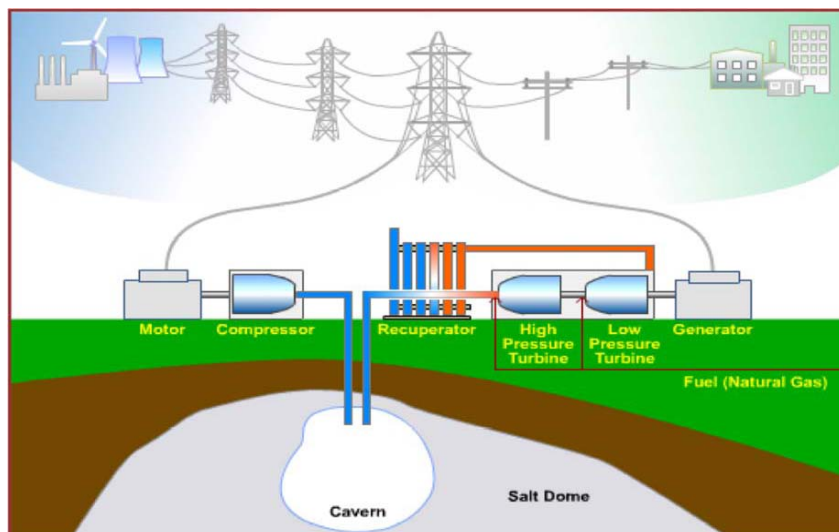
Το πρώτο σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ισχύος 290 MW, τέθηκε πρώτη φορά σε λειτουργία το 1978 στο Huntorf της Γερμανίας, αποτελώντας το πρώτο μεγάλης κλίμακας σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα παγκοσμίως. Τα αποτελέσματα της λειτουργίας του ήταν πολύ ενθαρρυντικά και έτσι το 1991 κατασκευάστηκε στην Αλαμπάμα ένα δεύτερο σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ισχύος 110 MW.

7.2) Περιγραφή συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ).

Η βασική εγκατάσταση ενός τυπικού συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ) αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα (*LOWER COLORADO RIVER AUTHORITY, "STUDY OF ELECTRIC TRANSMISSION IN CONJUNCTION WITH ENERGY STORAGE TECHNOLOGY"*):

- ✓ Το τμήμα ισχύος, το οποίο αποτελείται από τον προθερμαντήρα/μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης, το στρόβιλο αέρα, το στρόβιλο καύσης και την ηλεκτρική γεννήτρια.
- ✓ Το τμήμα συμπίεσης, που αποτελείται από τον ηλεκτρικό κινητήρα και τους αξονικούς και φυγοκεντρικούς συμπιεστές, οι οποίοι συμπληρώνονται με δοχεία ψύξης για την επίτευξη οικονομικής συμπίεσης και τη μείωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία.
- ✓ Τον υπόγειο αεροστεγή ταμιευτήρα για την αποθήκευση του αέρα που υποβάλλεται σε συμπίεση.
- ✓ Το κέντρο ελέγχου του εξοπλισμού για τη λειτουργία του στροβίλου καύσης, του συμπιεστή και των βοηθητικών, αλλά και για τον έλεγχο της μετάβασης από την παραγωγή στην αποθήκευση.
- ✓ Τον βοηθητικό εξοπλισμό για την αποθήκευση και τη διαχείριση του καυσίμου, και μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα για να υποστηρίξουν τους διάφορους εναλλάκτες θερμότητας που απαιτούνται.

Στο Σχήμα 7.1 που ακολουθεί, παρατίθεται σχηματικά ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ).



Σχήμα 7.1
Απεικόνιση συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

(Πηγή: Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

7.2.1) Τμήμα συμπίεσης.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, το τμήμα συμπίεσης αποτελείται από έναν ή περισσότερους συμπιεστές, τον ηλεκτρικό κινητήρα και τα δοχεία ψύξης.

Αεροσυμπιεστές:

Ο συμπιεστής πραγματοποιεί τη συμπίεση του εργαζόμενου μέσου, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο αέρας. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που ο συμπιεστής σε τέτοιο σύστημα καλείται και αεροσυμπιεστής. Ο ατμοσφαιρικός αέρας, πίεσης 15 bar (σε κανονικές συνθήκες), εισέρχεται στον συμπιεστή όπου συμπιέζεται σε μεγάλες πιέσεις της τάξης των 75 bar, και εν συνεχεία αποθηκεύεται σε έναν υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα.

Οι αεροσυμπιεστές μπορεί να είναι είτε αξονικής είτε ακτινικής ροής. Ο αξονικός συμπιεστής έχει επικρατήσει σε μηχανές μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, ενώ ο ακτινικός συναντάται μόνο σε μικρές μηχανές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αξονικών συμπιεστών είναι οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης από τους ακτινικούς. Παράλληλα, όσον αφορά στους αξονικούς συμπιεστές, η ευκολία συνδυασμού βαθμίδων για τη συγκρότηση πολυβάθμιων μηχανών τους δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερων λόγων πίεσης. Τέλος, οι αξονικοί συμπιεστές έχουν μεγαλύτερη αναρροφητική ικανότητα, δηλαδή αναρροφούν μεγαλύτερες παροχές εργαζόμενου μέσου από τους ακτινικούς για την ίδια μετωπική επιφάνεια (Κ. Μαθιουδάκης, “Λειτουργία αεροστροβίλων και αεριοστροβίλων”).

Οι κλασικοί αεροσυμπιεστές έχουν δύο θέσεις λειτουργίας. Στη μία (ON), ο αεροσυμπιεστής λειτουργεί στην πλήρη ισχύ, όταν οι ταμειυτήρες είναι άδειοι ή υπάρχει ζήτηση από την παραγωγή. Στη δεύτερη θέση (OFF), ο αεροσυμπιεστής βρίσκεται σε μηδενική ισχύ, όταν οι ταμειυτήρες είναι γεμάτοι ή δεν υπάρχει καθόλου ζήτηση. Από την άλλη, στους σύγχρονους αεροσυμπιεστές, με την εφαρμογή της τεχνολογίας των μεταβλητών στροφών (inverter), η ισχύς λειτουργίας και συνεπώς η απορροφούμενη ηλεκτρική ισχύς είναι κάθε φορά ανάλογη της ζήτησης, με άμεση

συνέπεια την αντίστοιχη μείωση της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, οι σύγχρονοι αεροσυμπιεστές διαθέτουν ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου τόσο για την παραγωγή πεπιεσμένου αέρα, όσο και για την επεξεργασία του αέρα. Με τα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται μείωση της πίεσης λειτουργίας, καθώς και μείωση των εσωτερικών απωλειών των συμπιεστών και η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάσει το 15% (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας).



Σχήμα 7.2

Διάταξη αεροσυμπιεστή.

(Πηγή: Παναγιώτης Κυριακού, “Εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα πεπιεσμένου αέρα”)

Η επιλογή του αεροσυμπιεστή απαιτεί προσεκτική ανάλυση, αφού επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικούς από αυτούς:

- ✓ Η μέγιστη και η ελάχιστη απαίτηση αέρα, οι εποχιακές διαφοροποιήσεις, καθώς και οι προβλεπόμενες μελλοντικές επεκτάσεις.
- ✓ Οι συνθήκες περιβάλλοντος. Παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι ακραίες θερμοκρασίες, ο μολυσμένος αέρας, τα μεγάλα υψόμετρα, κ.τ.λ.
- ✓ Η προοριζόμενη χρήση και επομένως οι απαιτήσεις για πίεση λειτουργίας.
- ✓ Η ανάγκη για συνεχή ή περιοδική παροχή αέρα.
- ✓ Η ύπαρξη ορίων στη διαθέσιμη ισχύ.
- ✓ Ο χώρος που θα εγκατασταθεί ο αεροσυμπιεστής (περιορισμοί σε κραδασμούς κ.α.)

Η απαιτούμενη παροχή αέρα είναι φυσικά πρωταρχικής σημασίας. Οι συνολικές απαιτήσεις σε αέρα προκύπτουν από τη συνολική μέση κατανάλωση. Ο καθορισμός της μέσης κατανάλωσης αέρα διευκολύνεται από τη χρήση του Συντελεστή Φορτίου. Ο Συντελεστής Φορτίου ο λόγος της πραγματικής κατανάλωσης αέρα σε σχέση με τη μέγιστη συνεχή κατανάλωση σε πλήρες φορτίο. Ορίζεται ως το γινόμενο του Συντελεστή Χρόνου και του Συντελεστή Έργου. Ο Συντελεστής Χρόνου είναι το ποσοστό του συνολικού χρόνου λειτουργίας κατά τη διάρκεια του οποίου η διάταξη είναι πραγματικά σε χρήση. Ο Συντελεστής Έργου είναι το ποσοστό του αέρα που χρειάζεται για τη μέγιστη δυνατή απόδοση του έργου/λεπτό που απαιτείται σε σχέση με αυτό που πραγματικά εκτελείται από τη διάταξη (Παναγιώτης Κυριακού, “Εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα πεπιεσμένου αέρα”).

Τέλος, όταν υπολογίζουμε τη συνολική απαιτούμενη παροχή, είναι σύνηθες να προσθέτουμε ένα 10% στην προϋπολογιζόμενη για πιθανές διαρροές (π.χ. κατά τη μεταφορά του συμπιεσμένου αέρα μέσω των σωληνώσεων).

Ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται επίσης σε ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, είναι η επιλογή μεταξύ ενός μεγάλου ή πολλών αεροσυμπιεστών. Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι το 100% των απαιτήσεων σε πεπιεσμένο αέρα πρέπει να καλυφθεί, κατά την επιλογή μεταξύ της εγκατάστασης ενός αεροσυμπιεστή για κάλυψη 100% της παροχής ή π.χ. δύο αεροσυμπιεστών με δυνατότητα παροχής 50% της συνολικής που απαιτείται από την παραγωγική διαδικασία, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τα ακόλουθα σημεία:

- Το κόστος της πιθανής διακοπής της παραγωγής.
- Τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις παροχής ισχύος.
- Τον κύκλο φόρτισης των αεροσυμπιεστών.
- Το διαθέσιμο χώρο για την εγκατάσταση των συμπιεστών.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο ένας από τους δύο αεροσυμπιεστές με δυνατότητα παροχής 50%, μπορεί να παρέχει αρκετό απόθεμα σε αέρα έτσι ώστε μέρος της παραγωγικής διαδικασίας να συνεχίσει απρόσκοπτα αν διακοπεί απρόβλεπτα η λειτουργία του ενός από τους δύο συμπιεστές. Εάν η συνέχεια της παραγωγής είναι σημαντική, τότε τρεις αεροσυμπιεστές με δυνατότητα παροχής 50% πρέπει να εγκατασταθούν, δύο για την κάλυψη της κατανάλωσης και ένας ως εφεδρικός. Ο εφεδρικός θα είναι εκτός λειτουργίας και σε αναμονή, ενώ ο άλλος θα είναι σχεδόν πάντοτε πλήρως φορτισμένος και θα λειτουργεί με υψηλή απόδοση, δεδομένου ότι η απόδοση ενός αεροσυμπιεστή αυξάνει στον ανώτατο βαθμό όταν λειτουργεί σε πλήρες φορτίο (*Παναγιώτης Κυριακού, “Εξοικονόμηση ενέργειας σε συστήματα πεπιεσμένου αέρα”*).

Η χρήση μερικών αεροσυμπιεστών (αλυσίδες συμπίεσης) με σύστημα επιλογής σειράς λειτουργίας είναι μία δυναμική λύση για το δίλημμα της χαμηλής απόδοσης ενός υπερμεγέθους αεροσυμπιεστή και της αδυναμίας κάλυψης των αιχμών καταναλώσεων με αποτέλεσμα την μειωμένη παραγωγή. Στην περίπτωση εγκατάστασης ενός μόνο μεγάλου αεροσυμπιεστή, ένας μικρότερος αεροσυμπιεστής με περίπου 10% ικανότητα σε παροχή, μπορεί πολλές φορές να εγκατασταθεί για να καλύπτει τις μικρές απαιτήσεις πεπιεσμένου αέρα σε περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης. Άλλο σημείο το οποίο μπορεί να ληφθεί υπόψη όταν εγκαθιστούμε ένα μεγάλο αεροσυμπιεστή, είναι η πιθανότητα να επηρεάσει δυσμενώς την κύρια παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με την πολλή μεγάλη εισροή ρευμάτων.

Δοχεία ψύξης:

Ο ατμοσφαιρικός αέρας που εισάγεται σε ένα συμπιεστή είναι ένα μίγμα αερίων που περιέχει πάντα υδρατμούς. Ωστόσο, η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται στον αέρα ποικίλλει και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία. Ο αέρας που εισέρχεται στο αεροσυμπιεστή για συμπίεση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ψυχρότερος, ώστε ο όγκος που θα συμπιεστεί να είναι μικρότερος και συνεπώς το απαιτούμενο έργο από τον αεροσυμπιεστή να είναι μικρότερο (μείωση δηλαδή της καταναλισκόμενης ενέργειας). Για το λόγο αυτό, οι αεροσυμπιεστές επιλέγεται να εγκαθίστανται σε χώρους με όσο το δυνατόν χαμηλή θερμοκρασία, δηλαδή σε χώρους προστατευμένους από την ηλιακή ακτινοβολία, καλά αεριζόμενους, μακριά από πηγές θερμότητας κ.τ.λ. (*Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΚΑΠΕ*).

Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, ως γνωστόν, η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται, με συνέπεια να αυξάνεται επίσης και η δυνατότητα του αέρα να συγκρατεί υγρασία.

Αυτός είναι και ο λόγος που ο αεροσυμπιεστής εξοπλίζεται με δοχεία ψύξης (τους ονομαζόμενοι μεταψύκτες). Οι μεταψύκτες μειώνουν τη δυνατότητα του αέρα να συγκρατεί υγρασία, αλλά οδηγούν σε συμπύκνωση υδρατμών. Αυτό το συμπύκνωμα αφαιρείται σε έναν φυγοκεντρικό διαχωριστή, μετά τον συμπιεστή. Διαφορετικά τα συμπυκνώματα θα συσσωρεύονταν στις σωληνώσεις διανομής αέρα, με φυσικό επακόλουθο τη βλάβη του συστήματος, τη διακοπή της λειτουργίας του και συνεπώς δαπανηρές εργασίες συντήρησης και επισκευής.

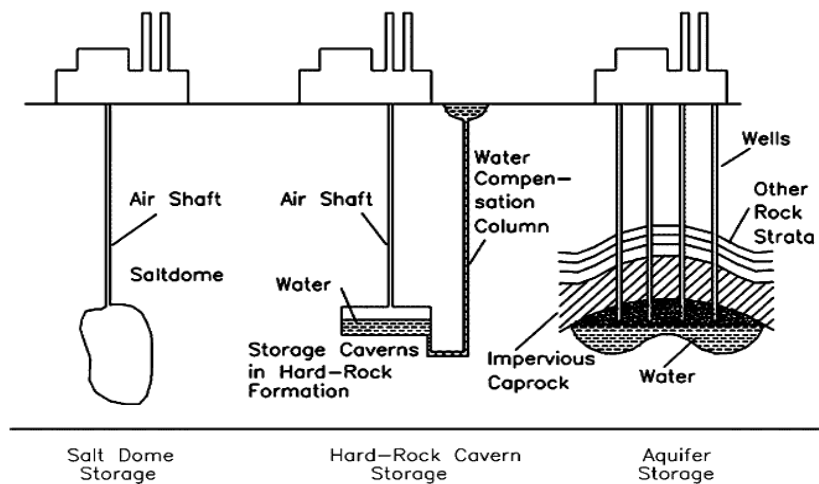
Ηλεκτρικός κινητήρας.

Ο συμπιεστής (ή η αλυσίδα συμπίεσης) συνδέονται με μια ηλεκτρική μηχανή, η οποία λειτουργεί ως κινητήρας για να τον θέτει σε κίνηση.

7.2.2) Υπόγεια αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα.

Συστήματα μεγάλης κλίμακας:

Όπως αναφέρθηκε, η αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα επιτυγχάνεται σε υψηλές πιέσεις (40 – 70 bar), και κοντά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει μικρότερος όγκο και μικρότερη δεξαμενή (ταμιευτήρας) αποθήκευσης. Υπάρχουν πολλοί γεωλογικοί σχηματισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ταμιευτήρες για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα. Αυτοί χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεγάλης κλίμακας και περιλαμβάνουν τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, τα υπόγεια σπήλαια – αλατωρυχεία και την κατασκευή υπόγειων σπηλαίων από βράχους (Σχήμα 7.3).



Σχήμα 7.3

Διαφορετικοί τύποι ταμιευτήρων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

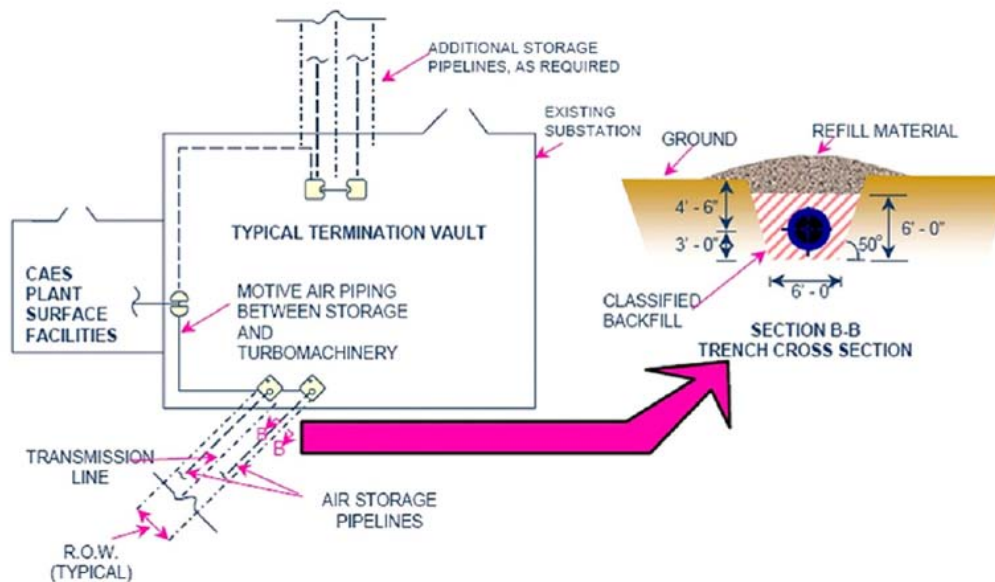
(Πηγή: H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron, "Energy storage systems – Characteristics and comparisons")

Και οι τρεις αυτοί τύποι ταμιευτήρων αποτελούν ιδανικές επιλογές για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα, δεδομένου ότι ωφελούνται από τη γεωστατική πίεση, η οποία διευκολύνει τη συγκράτηση της μάζας αέρα. Γενικότερα, για εφαρμογές συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, τα βραχώδη σπήλαια είναι κατά 60% περίπου ακριβότερα από τα σπήλαια – αλατωρυχεία. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον τρόπο σχηματισμού των δύο αυτών σπηλαίων. Συγκεκριμένα, τα υπόγεια βραχώδη σπήλαια δημιουργούνται από τους σχηματισμούς στερεών βράχων

ανασκαφής, σε αντίθεση με τα σπήλαια άλατος που δημιουργούνται από την εξόρυξη διαλυμάτων άλατος. Από την άλλη, η αποθήκευση σε υπόγεια υδροφόρα στρώματα αποτελεί τη φθηνότερη μέθοδο και επομένως προτιμάται πολύ περισσότερο από τις προηγούμενες δύο μεθόδους (Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”).

Ωστόσο, ένα μεγάλο πλήθος μελετών έδειξε ότι ο αέρας θα μπορούσε να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε υπόγειες, υψηλής πίεσεως σωληνώσεις. Αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να εξαλείψει τα γεωλογικά κριτήρια, καθιστώντας πιο εύκολη τη λειτουργία του συστήματος. Παρόλα αυτά, η σημερινή τεχνολογία δεν έχει αναπτυχθεί στον απαιτούμενο βαθμό για να κατασκευαστούν αυτοί οι υψηλής πίεσης σωλήνες χωρίς υψηλό κόστος.

Στο Σχήμα 7.4 που ακολουθεί, απεικονίζεται η αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα σε υπόγειες σωληνώσεις.



Σχήμα 7.4
Απεικόνιση αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα
σε υπόγειες σωληνώσεις.

(Πηγή: H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron, “Energy storage systems – Characteristics and comparisons”)

Συστήματα μικρής κλίμακας.

Αν και το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται στην εφαρμογή των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα, αξίζει να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση των μικρής ή μεσαίας κλίμακας συστήματα ο συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε αεροφυλάκια (H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron, “Energy storage systems – Characteristics and comparisons”). Εκτός από μέσο αποθήκευσης του συμπιεσμένου αέρα, τα αεροφυλάκια μπορούν να επίσης χρησιμοποιηθούν ως αρχικοί διαχωριστές για την αφαίρεση των συμπυκνωμάτων που μεταφέρονται με τον πεπιεσμένο αέρα. Επιπλέον, το αεροφυλάκιο διασφαλίζει την σταθερή παροχή αέρα προς τα μηχανήματα που τον χρειάζονται για τη λειτουργία τους και εξισορροπεί στιγμιαία τις διακυμάνσεις της πίεσης στο δίκτυο αέρα, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν συχνή φόρτιση/εκφόρτιση του αεροσυμπιεστή.

Καθώς το αεροφυλάκιο μπορεί να ενεργήσει σαν ένας συμπληρωματικός διαχωριστής αέρα-νερού, θα πρέπει να εγκατασταθεί όσο πιο κοντά γίνεται στους αεροσυμπιεστές και στο πιο ψυχρό χώρο (π.χ. εξωτερικά). Στο αεροφυλάκιο η ταχύτητα του αέρα θα μειωθεί και το περισσότερο από το υπόλοιπο του συμπυκνώματος θα «καθίσει» κάτω στον πυθμένα του δοχείου, ο οποίος θα πρέπει να είναι συνδεδεμένος με μία αυτόματη και χειροκίνητη βαλβίδα εκκένωσης των συμπυκνωμάτων

Στο Σχήμα 7.5 που ακολουθεί, παρατίθεται σχηματικά η διάταξη ενός τυπικού αεροφυλακίου.



Σχήμα 7.5
Τυπική διάταξη αεροφυλακίου

(Πηγή: http://cy.kaeser.com/Products_and_Solutions/Compressed-air-treatment/default.asp)

7.2.3) Τμήμα ισχύος.

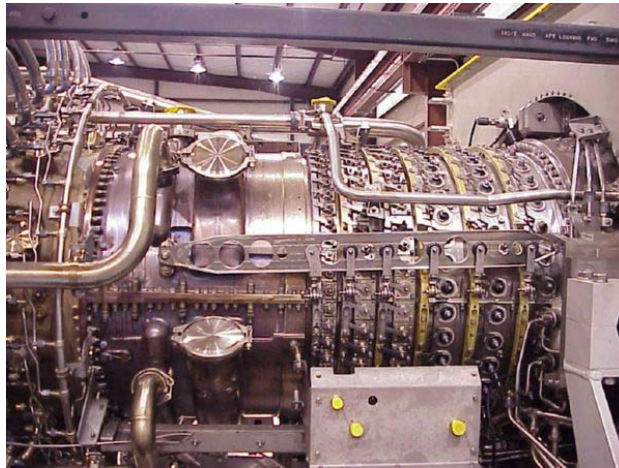
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, σε ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, το τμήμα ισχύος αποτελείται από τον προθερμαντήρα/μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης, το στρόβιλο αέρα, το στρόβιλο καύσης και την ηλεκτρική γεννήτρια.

Στρόβιλος αέρα.

Στο στρόβιλο αέρα πραγματοποιείται η αποτόνωση του αέρα που υπεβλήθη σε συμπίεση και εν συνεχεία αποθηκεύτηκε στον υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα. Πριν την είσοδο στο στρόβιλο αέρα, ο αποθηκευμένος πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται στον προθερμαντήρα, όπου θερμαίνεται. Ο στρόβιλος αέρα είναι στρόβιλος υψηλής πίεσης και επιτρέπει στο στρόβιλο καύσης (στρόβιλος χαμηλής πίεσης) να λειτουργεί στην ίδια ακριβώς πίεση, θερμοκρασία και ροή αέρα που θα λειτουργούσε αν η μονάδα περιείχε ακόμα έναν συμπιεστή αέρα (*LOWER COLORADO RIVER AUTHORITY, "STUDY OF ELECTRIC TRANSMISSION IN CONJUNCTION WITH ENERGY STORAGE TECHNOLOGY*).

Στρόβιλος καύσης.

Ως γνωστόν, ένας αεριοστρόβιλος αποτελείται από τον συμπιεστή, το θάλαμο καύσης και το στρόβιλο (Σχήμα 7.6). Ο στρόβιλος καύσης είναι ουσιαστικά ένας αεριοστρόβιλος, από τον οποίο έχει αφαιρεθεί το τμήμα του συμπιεστή. Ο αέρας από τον αποσυμπιεστή υψηλής πίεσης εισέρχεται στη συνέχεια στο θάλαμο καύσης του στρόβιλου καύσης. Στον θάλαμο καύσης ανυψώνεται η θερμοκρασία του, με πρόσδοση θερμότητας που προκύπτει από την καύση ενός καυσίμου (π.χ. φυσικό αέριο, απόσταγμα κ.α.) που αναμειγνύεται μαζί με τον συμπιεσμένο αέρα. Τέλος, ο αέρας από τον αποσυμπιεστή υψηλής πίεσης εισέρχεται στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρική γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που απορρίπτεται από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης, πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον, οδηγείται στον προθερμαντήρα. Ο προθερμαντήρας προσδίδει ικανή θερμότητα στο συμπιεσμένο αέρα, προτού ο τελευταίος αναφλεχθεί στο θάλαμο καύσης. Στον προθερμαντήρα εγκαθίσταται και η μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης, που θα δούμε στη συνέχεια (*LOWER COLORADO RIVER AUTHORITY, "STUDY OF ELECTRIC TRANSMISSION IN CONJUNCTION WITH ENERGY STORAGE TECHNOLOGY*).



Σχήμα 7.6
Τυπική μονάδα αεριοστροβίλου.
(Πηγή: *Τεχνικά νέα*)

Προθερμαντήρας.

Ο προθερμαντήρας σε ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, είναι στην ουσία ένας εναλλάκτης θερμότητας (air-to-air heat exchanger), που έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται τον υψηλό όγκο αέρα που απαιτεί ο στρόβιλος καύσης. Σκοπός του προθερμαντήρα είναι να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, «αιχμαλωτίζοντας» τη θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου στο θάλαμο καύσης και χρησιμοποιώντας την για να θερμάνει το συμπιεσμένο αέρα που εισέρχεται στο στρόβιλο υψηλής πίεσης.

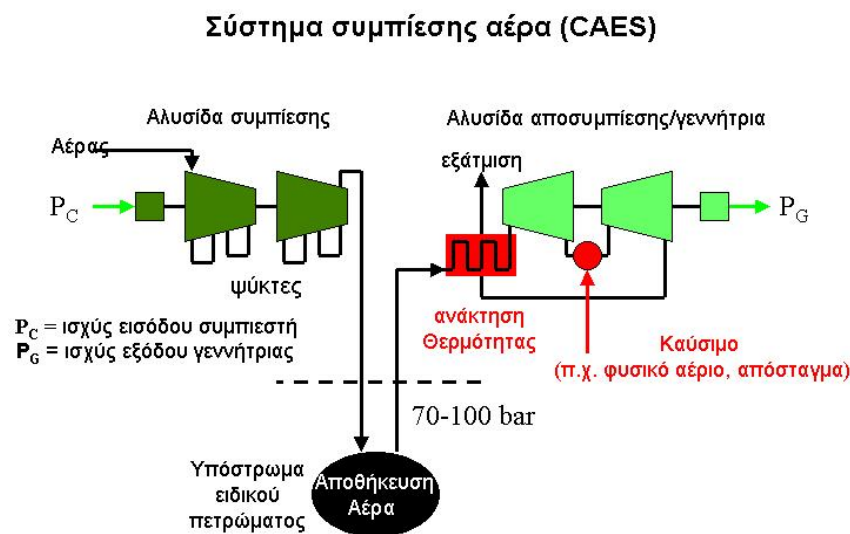
Ηλεκτρική γεννήτρια.

Όπως αναφέραμε, η ηλεκτρική γεννήτρια συνδέεται με το στρόβιλο καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει, ως γνωστόν, άζωτο και οξυγόνο. Κατά την καύση παράγονται επομένως και οξειδία του αζώτου, που είναι βλαβερά για την ατμόσφαιρα. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται οι Μονάδες Επιλεκτικής Καταλυτικής Μείωσης. Οι μονάδες αυτές είναι στρώματα καταλυτών που μετατρέπουν το NOx σε άζωτο με την εισαγωγή μικρής ποσότητας υδάτινης αμμωνίας στο ρεύμα εξάτμισης, στην έξοδο του εναλλάκτη. Οι Μονάδες Επιλεκτικής Καταλυτικής Μείωσης εγκαθίστανται εκεί που διοχετεύεται το ρεύμα εξάτμισης.

Για την πληρέστερη κατανόηση των βασικών μερών ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, δίνεται το διάγραμμα του συστήματος (Σχήμα 7.7)



Σχήμα 7.7
Διάγραμμα συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.
(Πηγή: Τάσιου Ιωάννα, Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)

7.2.4) Λειτουργία συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.

Μετά την περιγραφή των βασικών τμημάτων του συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, μπορούμε να περιγράψουμε τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος.

Η φιλοσοφία λειτουργίας των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (ΕΑΣΑ) είναι σχετικά απλή. Τα συστήματα ΕΑΣΑ χρησιμοποιούν ενέργεια εκτός αιχμής για τη συμπίεση και την αποθήκευση ποσοτήτων αέρα σε μεγάλες πιέσεις (συνήθως κοντά στα 75 bar) και σε υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα. Όταν θεωρηθεί απαραίτητο, για παράδειγμα σε ώρες αιχμής της ζήτησης, ποσότητες συμπιεσμένου αέρα αποδεσμεύονται από τον υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα και εν συνεχεία θερμαίνονται και εκτονώνονται σε ένα στρόβιλο καύσης συνδεδεμένο με μια γεννήτρια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απορριπτόμενη από το στρόβιλο ενέργεια πριν απελευθερωθεί στο περιβάλλον οδηγείται σε προθερμαντήρα για την πρόσδοση ικανής θερμότητας στο συμπιεσμένο αέρα, προτού ο τελευταίος αναφλεχθεί στο θάλαμο καύσης. Σχεδόν τα 2/3 του φυσικού αερίου σε ένα συμβατικό

σταθμό παραγωγής καταναλώνονται για τη λειτουργία του συμπιεστή μέσω του στροβίλου. Αντίθετα, για να τεθεί σε ένα σύστημα ΕΑΣΑ ο συμπιεστής σε λειτουργία χρησιμοποιείται χαμηλού κόστους συμπιεσμένος αέρας, εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου.

7.3) Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων ΕΑΣΑ - Εφαρμογές.

Τα συστήματα ΕΑΣΑ παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθιστώντας την τεχνολογία τους εξαιρετικά ανταγωνιστική για εφαρμογές σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η ισχύς ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα μπορεί να ξεκινά από 50MW και εύκολα να ξεπερνά τα 300MW. Η περίοδος αποθήκευσης μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας καθώς οι αντίστοιχες απώλειες δε θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές. Μια μονάδα ΕΑΣΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας για περισσότερο από ένα έτος.

Σημαντικό πλεονέκτημα ενός συστήματος ΕΑΣΑ αποτελεί επίσης και η γρήγορη εκκίνηση. Σε φυσιολογικές συνθήκες απαιτούνται περίπου 12 λεπτά ενώ σε περιπτώσεις ανάγκης η μονάδα έχει τη δυνατότητα εκκίνησης σε 9 λεπτά, χρόνοι εντυπωσιακοί αν αναλογιστούμε πως μια συμβατική μονάδα απαιτεί 20 με 30 λεπτά (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί φυσικός ταμιευτήρας, τα οφέλη είναι πολλαπλά, καθώς το αρχικό κόστος εγκατάστασης παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένο και η περιβαλλοντική υποβάθμιση ασήμαντη. Παράλληλα, η εκπομπή των αερίων θερμοκηπίων είναι ουσιαστικά χαμηλότερη συγκριτικά με τις κανονικές εγκαταστάσεις αερίου.

Ωστόσο, τα συστήματα ΕΑΣΑ παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Απώλειες ενέργειας παρατηρούνται τόσο κατά την αποθήκευση στον ταμιευτήρα όσο και κατά την άντληση του συμπιεσμένου αέρα από αυτόν καθώς και εξαιτίας των μηχανολογικών βαθμών αποδόσεων των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης. Εκτιμήσεις αναφέρουν βαθμούς απόδοσης εγκαταστάσεων συμπιεσμένου αέρα της τάξης του 80%.

Επιπρόσθετα, η κατασκευή ενός υπόγειου ταμιευτήρα προϋποθέτει τη διάθεση σημαντικού αρχικού κεφαλαίου που σε πολλές περιπτώσεις καθιστά την πραγματοποίηση ανάλογων σχεδίων αδύνατη. Αν σε αυτό συμπεριλάβουμε και τη δυσκολία εύρεσης υπόγειου ταμιευτήρα, γίνεται κατανοητή η δυσκολία χρησιμοποίησης αυτής της μεθόδου ενεργειακής αποθήκευσης. Εντούτοις, για τις θέσεις όπου είναι κατάλληλο, μπορεί να παρέχει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και μακράς διάρκειας περιόδους (*Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications"*).

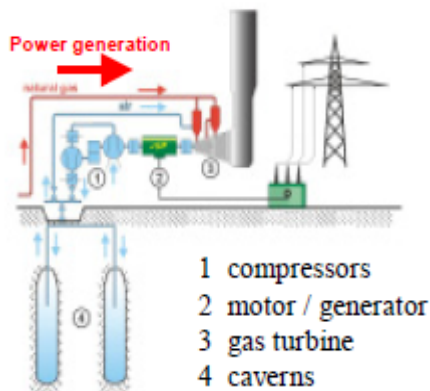
Εφαρμογές.

Παρά τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, η διάδοσή τους στην Ευρώπη είναι πολύ περιορισμένη. Μέχρι στιγμής αναφέρονται οι ακόλουθες εφαρμογές τους:

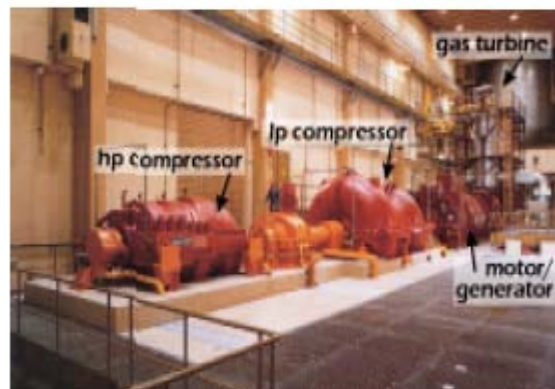
- Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου, το πρώτο μεγάλης κλίμακας σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ισχύος 290 MW, κατασκευάστηκε το 1979 στο Huntorf της Γερμανίας.



Σχήμα 7.8
Υφιστάμενη μονάδα στο Huntorf της Γερμανίας.
(Πηγή: *Τεχνικά νέα*)



Huntorf Schematic



Power Train

Σχήμα 7.9
Εξοπλισμός υφιστάμενης μονάδας στο Huntorf της Γερμανίας.
(Πηγή: *Energy Storage Council*)

- Το δεύτερο σύστημα ΕΑΣΑ βρίσκεται στην Αλαμπάμα των Η.Π.Α, ισχύος 110 MW. Η κατασκευή του διήρκησε 30 μήνες και κόστισε 65 εκατομμύρια δολάρια. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα υπόγειο σπήλαιο-αλατωρυχείο για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα. Το σπήλαιο αυτό είναι 220 πόδια σε διάμετρο και έχει βάθος 1000 μέτρα. Ο συνολικός όγκος του ανέρχεται στα 10 εκατομμύρια πόδια. Σε πλήρη φόρτιση, ο αέρας συμπιέζεται μέχρι την πίεση των 1000 psi και αποθηκεύεται στο σπήλαιο. Αυτό εκφορτίζεται στα 600 psi. Το σπήλαιο αποδίδει την αποθηκευμένη ποσότητα του συμπιεσμένου αέρα σε 26 ώρες.



Σχήμα 7.10
Υφιστάμενη μονάδα στην Αλαμπάμα, Αμερική.
(Πηγή: *Τεχνικά νέα*)

- Στην Iowa των ΗΠΑ μελετάται η εγκατάσταση μονάδος ισχύος 300MW με συνεργασία μεταξύ αιολικού πάρκου 100 MW και συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα ισχύος 200 MW. Έχει ήδη δαπανηθεί το ποσό του 1.500.000\$ για την έρευνα και μελέτη του όλου σχεδίου και όλα δείχνουν πως στα μέσα του επόμενου χρόνου οι προσπάθειες των αρμοδίων θα καρποφορήσουν. Η μελλοντική εγκατάσταση φιλοδοξεί να χρησιμοποιεί κατά 33% λιγότερο φυσικό αέριο από αντίστοιχη συμβατική, ενώ το όποιο επιπρόσθετο κόστος για την παραγωγή αιολικής ενέργειας εκτιμάται ως αμελητέο.
- Στις ΗΠΑ ερευνώνται και χρηματοδοτούνται διάφορα σημαντικά σχέδια συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Μεγάλες εγκαταστάσεις των 2700 MW έχουν προγραμματιστεί σε Norton και Ohio για περίπου 5 έτη, αλλά η κατασκευή τους δεν έχει αρχίσει ακόμα, λόγω διαφόρων καθυστερήσεων προγραμματισμού.
- Τέλος, ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα σε συνδυασμό με αιολικό πάρκο, μελετάται στο Τέξας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

8.1) Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράψαμε συνοπτικώς τις διάφορες διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών που είτε είναι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα είτε βρίσκονται ακόμα υπό εντατική έρευνα και ανάπτυξη. Στη συνέχεια, παραθέσαμε σε πίνακα τα οικονομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και εξάγαμε ορισμένα βασικά συμπεράσματα για την επιλογή του κατάλληλου τύπου μπαταριών ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή. Ένα από τα σημαντικά αυτά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε ήταν ότι οι μπαταρίες ροής (π.χ. ψευδαργύρου/βρωμιδίου) και οι μπαταρίες νατρίου – θείου (NaS), συγκριτικά με τα άλλα είδη μπαταριών, είναι οι πιο κατάλληλες για την τροφοδοσία του συστήματος με πολύ υψηλό ποσό ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα ή με μεγάλο ποσό ενέργειας για μεγαλύτερη χρονική περίοδο. Επιπρόσθετα, στα κεφάλαια 5, 6 και 7 ακολούθησε ενδελεχής περιγραφή των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, των τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου και των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Οι τρεις αυτές τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως άλλωστε και οι μπαταρίες ροής και νατρίου-θείου εντάσσονται στις τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Υπενθυμίζουμε ότι αυτές οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης έχουν την ικανότητα να αποδεσμεύουν μεγάλο ποσό ενέργειας για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους (ώρες και ημέρες).

Στην υποενότητα που ακολουθεί, θα συνοψίσουμε σε πίνακα τα σημαντικότερα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των προαναφερθέντων τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.

8.2) Χαρακτηριστικά λειτουργίας – Σύγκριση.

Ο Πίνακας 8.1 που ακολουθεί συνοψίζει τις τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Παρουσιάζει τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας αποθήκευσης, τα επίπεδα ανάπτυξης και διάδοσής της, καθώς και τις δυνατές/πραγματικές εφαρμογές της.

Πίνακας 8.1
 Διατάξεις μακροπρόθεσμης ενεργειακής
 αποθήκευσης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

(Πολλαπλές πηγές: US Department of Energy (EERE 2006), The INVESTIRE network (INVESTIRE, 2003), Energy Storage Association (ESA, 2007), UK Department of Trade and Industry (DTi, 2004 και DTi, 2006), Baxter (2006))

Χαρακτηριστικά	Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας				
	Μπαταρίες (Ροής, NaS)	Συστήματα αντλησιοταμίευσης	Συστήματα ΕΑΣΑ	Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου	ΜΕΚ υδρογόνου
Αποθηκευτική Ικανότητα (Storage Capacity)	μερικές 100 MWh (NaS)	500-8.000 MWh	500-2.500 MWh	μερικές 1000 MWh	-
Χωρητικότητα Ισχύος (Power Capacity)	μερικές 100 MW	100-1.000 MW	μερικές 100 MW	μερικές 100 MW	-
Ενέργεια/Ισχύς (Energy/Power)	εκτιμώμενη ισχύς για ώρες ή μέρες, πολύ υψηλή ισχύς για λεπτά	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	εκτιμώμενη ισχύς για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	εκτιμώμενη για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους	-
Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency)	70-90%	75-85%	80% (σύστημα Αλαμπάμας)	25-58%	-
Διάρκεια ζωής (Life-time)	15 έτη (NaS)	50 έτη	40 έτη	10 ⁴ ώρες	-
Κόστος (Cost)	750-1000 €/kWh (δεκάδες MW, 2hrs) 500-600 €/kWh (δεκάδες MW, 0,5 hr)	140 εκατομμύρια € έως > 680 εκατομμύρια € για ένα έργο 1000 MW	400 €/kWh (σύστημα Αλαμπάμας)	6.000-30.000 €/kWh	-
Ανάπτυξη	NaS: διαθέσιμες Zn-Br: αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης	διαθέσιμη	διαθέσιμη	έρευνα/υπό ανάπτυξη/εμπορικά διαθέσιμες	υπό ανάπτυξη
Διάδοση	περιορισμένη	διαδεδομένη – 90 GW παγκοσμίως	περιορισμένη, ένα στην Αμερική και ένα στη Γερμανία	περιορισμένη	περιορισμένη
Πλεονεκτήματα	ανακύκλωση υλικών	υψηλή χωρητικότητα, σχετικά χαμηλό κόστος/χωρητικότητα μονάδος	υψηλή χωρητικότητα, σχετικά χαμηλό κόστος /χωρητικότητα μονάδος	το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλες περιόδους, ποικιλία τύπων κυψελών για διαφορετικές εφαρμογές	-
Μειονεκτήματα	υψηλά κόστη, ανακύκλωση νατρίου	σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις	προβληματική στην εύρεση τοποθεσιών για χρήση	συχνά απαιτούνται ακριβείς καταλύτες ή επεξεργασία.	-
Εφαρμογές	-Στρεφόμενη εφεδρεία -Ενσωμάτωση σε ΑΓΠΕ -Ποιότητα ισχύος -Εξομάλυνση αιχμών -Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής	-Εξισορρόπηση φορτίου -Στρεφόμενη εφεδρεία -Εφαρμογή παράλληλα με αιολικά πάρκα ή/και θερμικά συστήματα	-Στρεφόμενη εφεδρεία -Εξομάλυνση αιχμών -Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής -Συνδυασμός με αιολικά πάρκα	-Ποιότητα ισχύος -Συνδυασμός με ανεμογεννήτριες	-τομέας μεταφορών -ελαφρώς κατάλληλες για εφαρμογές ισχύος και ενέργειας
Περιβαλλοντική Επίδραση (Environment impact)	μεσαία	υψηλή	μεσαία	μεσαία	-

Με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 8.1, θα προσπαθήσουμε να προβούμε σε μία σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών αυτών, ώστε να επιλέγουμε τη βέλτιστη κάθε φορά τεχνολογία ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και το πλήθος των εφαρμογών. Μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Τόσο τα συστήματα αντλησιοταμίευσης όσο και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις. Οι υψηλές χωρητικότητες ισχύος και ενέργειας που τα χαρακτηρίζουν, σε συνδυασμό με την αποθηκευτική τους ικανότητα, καθιστούν τα δύο αυτά συστήματα ως τις πλέον κατάλληλες τεχνολογίες για την αποθήκευση πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους. Πράγματι, συγκριτικά με τις διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών και τις τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου, των οποίων η αποθηκευτική ικανότητα ανέρχεται σε μερικές 100 MWh και μερικές 1000 MWh αντίστοιχα, τα αντλούμενα υδροηλεκτρικά και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα, η οποία μπορεί να φθάσει και μέχρι και 8.000 MWh για τα πρώτα και έως 2.500 MWh για τα δεύτερα.

Από την άλλη, οι διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών (κυρίως οι μπαταρίες ροής και οι μπαταρίες NaS) και τα συστήματα κυψελών καυσίμων υδρογόνου υπόκεινται σε πολύ λιγότερους περιορισμούς λειτουργίας, σε αντίθεση και συγκριτικά πάντα με τα αντλούμενα υδροηλεκτρικά και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Στο τέλος του 5^{ου} κεφαλαίου είχαμε μάλιστα αναφέρει ενδεικτικά ορισμένους βασικούς περιορισμούς που παρουσιάζουν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που τόσο οι μπαταρίες όσο και τα συστήματα κυψελών καυσίμων υδρογόνου αποτελούν ιδανικές διατάξεις για καταναμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Τέλος, οι μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου είναι οι μοναδικές διατάξεις που εφαρμόζονται κατάλληλα στον τομέα των μεταφορών.

Η υψηλή ενεργειακή απόδοση είναι ένα από τα πιο σημαντικά απαιτούμενα τεχνικά χαρακτηριστικά για ενεργειακές εφαρμογές. Ωστόσο, τα συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου παρουσιάζουν τη μικρότερη ενεργειακή απόδοση (25 – 58%) έναντι των άλλων τεχνολογιών. Η πολύ χαμηλή αυτή απόδοση των συστημάτων αυτών είναι απόρροια της απόδοσης των στοιχείων τους, από την παραγωγή του υδρογόνου μέχρι τη χρήση του στην κυψελίδα καυσίμου. Εντούτοις, τα συστήματα αυτά βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη, οπότε μελλοντικά αναμένονται βελτιώσεις στην απόδοσή τους. Τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση εμφανίζουν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, η οποία φθάνει και το 85%, ενώ ακολουθούν τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με απόδοση της τάξης του 80%.

Με κριτήριο το εκτιμώμενο κόστος ανά χωρητικότητα μονάδος, τόσο τα συστήματα αντλησιοταμίευσης όσο και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα εμφανίζουν σχετικά χαμηλό κόστος ανά χωρητικότητα μονάδος. Αντίθετα, οι μπαταρίες νατρίου – θείου εμφανίζουν σχετικά υψηλό κόστος, της τάξης των 750-1000 €/kWh για δεκάδες MW και 2hrs ή της τάξης των 500-600 €/kWh για δεκάδες MW και 0,5 hr, ενώ πολύ δαπανηρά εμφανίζονται τα συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, των οποίων το κόστος εκτιμάται από 6.000 – 30.000 €/kWh. Με κριτήριο τα έτη λειτουργίας, τα αντλούμενα υδροηλεκτρικά εμφανίζουν τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (50 έτη), ακολουθούν τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με 40 έτη λειτουργίας, οι μπαταρίες νατρίου-θείου με 15 έτη λειτουργίας, ενώ, τέλος, τα συστήματα των κυψελών καυσίμου υδρογόνου εμφανίζουν μόλις 10⁴ ώρες λειτουργίας.

Όσον αφορά στη διάδοση των τεχνολογιών μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, τη μεγαλύτερη διάδοση εμφανίζουν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης (90 GW παγκοσμίως). Εμπορικά διαθέσιμες είναι και οι μπαταρίες νατρίου – θείου, οι οποίες αυτή την περίοδο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος ή σε εφαρμογές εξομάλυνσης αιχμών, ενώ οι μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμιδίου (μπαταρίες ροής) βρίσκονται στο αρχικό στάδιο εμπορευματοποίησης. Η διάδοση των υπολοίπων τεχνολογιών είναι περιορισμένη. Μόνο δύο συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα λειτουργούν σήμερα παγκοσμίως, ένα στο Huntorf της Γερμανίας και ένα στην Αλαμπάμα των ΗΠΑ. Η περιορισμένη διάδοση των εγκαταστάσεων συμπιεσμένου αέρα οφείλεται, όπως αναφέρθηκε στο 7^ο κεφάλαιο, στη δυσκολία εύρεσης υπόγειου ταμιευτήρα. Τέλος, η περιορισμένη διάδοση των συστημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου, καθώς και των μηχανών εσωτερικής καύσης υδρογόνου οφείλεται στο ότι πρόκειται για τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμα υπό εντατική έρευνα και ανάπτυξη.

Τέλος, θα ήταν σημαντική παράλειψη να αμελήσουμε τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Άλλωστε, η περιβαλλοντική «συμβατότητα» ενός συστήματος αποτελεί ισχυρή διαφήμιση για την προώθησή του. Όσον αφορά λοιπόν στην περιβαλλοντική «συμβατότητα», τα συστήματα αντλησιοταμίευσης εμφανίζουν τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συγκεκριμένα, κατά την εκπόνηση ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης εντοπίζονται εδαφικές (π.χ. τραυματισμός του εδαφικού προφίλ από την κατασκευή, αισθητή ένταξη του έργου), υδρολογικές (π.χ. δίαιτα του ποταμού, εμπλουτισμός υπόγειων νερών, χρήση του νερού), οικολογικές (μεταβολή στη χλωρίδα και πανίδα), κοινωνικές (π.χ. μετακίνηση οικισμών λόγω κατάκλισης, αλλαγή συνθηκών) ή οικονομικές διαφοροποιήσεις (π.χ. χρήση γης). Βέβαια, οι επιπτώσεις αυτές είναι αντιμετωπίσιμες, αρκεί να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη περιορισμοί τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη λειτουργία τους. Αντίθετα, στις εγκαταστάσεις συμπιεσμένου αέρα η περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι ασήμαντη σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί φυσικός ταμιευτήρας, ενώ παράλληλα, η εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου είναι ουσιαστικά χαμηλότερη συγκριτικά με κανονικές εγκαταστάσεις αερίου. Περιορισμένες είναι και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες από τη χρήση των συστημάτων κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, καθώς και των μπαταριών ροής και των μπαταριών νατρίου – θείου. Και στα δύο είδη μπαταριών χρησιμοποιούνται περιβαλλοντικά αδρανή υλικά για την κατασκευή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

9.1) Σύνοψη εργασίας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως θέμα την ανάλυση των σημαντικότερων διατάξεων ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, που είτε είναι εμπορικά διαθέσιμες σήμερα είτε βρίσκονται ακόμα υπό εντατική έρευνα και ανάπτυξη.

Τα δύο πρώτα κεφάλαια ουσιαστικά αποτέλεσαν την εισαγωγή στο θέμα της εργασίας. Συγκεκριμένα, στο 1^ο κεφάλαιο δόθηκαν κάποια γενικά στοιχεία για το παγκόσμιο μελλοντικό ενεργειακό τοπίο και έγινε κατανοητή η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση κυρίως λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης διαιρέθηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης και τις διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, ενώ παράλληλα παρουσιάστηκαν οι όροι που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά λειτουργία τους. Στη συνέχεια, κρίθηκε αναγκαίο το 2^ο κεφάλαιο να αφιερωθεί στις ΑΠΕ και ειδικότερα στην αιολική ενέργεια, που αποτελεί την πιο ελπιδοφόρα πηγή ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή.

Το 3^ο κεφάλαιο αφιερώθηκε στην παρουσίαση των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Αφού παρουσιάστηκαν συνοπτικώς οι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές και τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, συνοψίστηκαν σε πίνακα τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους, με βάση τα οποία πραγματοποιήθηκε εν συνεχεία η μεταξύ τους σύγκριση.

Τα κεφάλαια 4, 5, 6, και 7 αποτέλεσαν το κύριο μέρος της εργασίας. Στα κεφάλαια αυτά, το ενδιαφέρον μας επικεντρώθηκε στις τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες εφαρμόζονται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα. Συγκεκριμένα, στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αρχικά οι σημαντικότερες διατάξεις αποθήκευσης μπαταριών και εν συνεχεία ακολούθησε η μεταξύ τους σύγκριση με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Έπειτα, το 5^ο κεφάλαιο αφιερώθηκε στην ενδελεχή περιγραφή των συστημάτων αντλησιοταμίευσης και κυρίως των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών συστημάτων, των οποίων οι μονάδες μετατροπής ενέργειας είναι αντιστρεπτές. Ιδιαίτερη αναφορά έγινε στα υβριδικά υδροηλεκτρικά συστήματα και ειδικότερα στα συστήματα αντλησιοταμίευσης που συνδυάζονται με αιολικά πάρκα ή θερμικά συστήματα. Στο 6^ο κεφάλαιο εστίασαμε στη χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας και αναπτύξαμε λεπτομερώς τις κυριότερες μεθόδους για την αποτελεσματικότερη αποθήκευσή του. Επιπρόσθετα, παρουσιάσαμε δύο κατηγορίες ενεργειακών διατάξεων για την παραγωγή ενέργειας μέσω υδρογόνου: τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και τις μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Στο τέλος του κεφαλαίου, ακολούθησε η περιγραφή ενός τυπικού υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την παραγωγή υδρογόνου. Το 7^ο κεφάλαιο αφιερώθηκε στην αναλυτική περιγραφή των συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα. Περιγράφηκε η λειτουργία των συστημάτων αυτών, ενώ παράλληλα αναφέρθηκαν οι σημαντικότερες εφαρμογές τους.

Τέλος, στο 8^ο κεφάλαιο συνοψίσαμε σε πίνακα τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά λειτουργίας τους πραγματοποιήσαμε στη συνέχεια μια σύγκριση μεταξύ των διατάξεων αυτών και εξάγαμε βασικά συμπεράσματα για την επιλογή της βέλτιστης κάθε φορά τεχνολογίας ανάλογα με την εφαρμογή.

9.2) Συμπεράσματα εργασίας – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τα συμπεράσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η ενεργειακή αποθήκευση είναι σημαντική για τα ηλεκτρικά συστήματα, δεδομένου ότι επιτρέπει την αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος και βελτιώνει γενικότερα την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του δικτύου. Παράλληλα, διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, όπου η ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (π.χ. αιολική ενέργεια), η ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης είναι απαραίτητη. Η ανάγκη αυτή δεν είναι προφανής στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, εντούτοις η ενεργειακή αποθήκευση θα είναι αναπόφευκτη στο μέλλον. Πράγματι, με το «άνοιγμα» της ενεργειακής αγοράς, πολλές διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές θα συνδεθούν σε ηλεκτρικά δίκτυα, με αποτέλεσμα την ασταθή λειτουργία των τελευταίων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, η αποθήκευση της ενέργειας σε συνδυασμό με την ορθολογική διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών αποτελούν τη βέλτιστη λύση.
- Από τις τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις, με ικανότητα να αποθηκεύουν πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας και για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους. Από την άλλη, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τόσο των διατάξεων αποθήκευσης μπαταριών όσο και των συστημάτων κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές ιδανικές για καταναμεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής.
- Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι σφόνδυλοι, οι υπερ-πυκνωτές και τα υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται επίσης σε καταναμεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Για παράδειγμα, οι υπερ-πυκνωτές χρησιμοποιούνται κατάλληλα για την ενίσχυση των ηλεκτρικών συστημάτων μετά από μια μικρής διάρκειας διαταραχής του συστήματος. Από την άλλη, οι σφόνδυλοι, λόγω της 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. Τέλος, τα υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης είναι οι πλέον κατάλληλες διατάξεις για εφαρμογές μεταφοράς και διανομής.
- Η ανάπτυξη των τεχνικών αποθήκευσης απαιτεί συνεχείς βελτιώσεις, καθώς και βελτιστοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή που να μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και αντίστροφα.

Στο σημείο αυτό, θα παρουσιάσουμε κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και να επεκτείνουν την παρούσα μελέτη:

- ✓ Η μελέτη των πλήρη συστημάτων αποθήκευσης (ενεργειακή αποθήκευση, μετασχηματισμός της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφή, συστήματα ελέγχου κ.α.) θα οδηγήσει στη βελτιστοποίηση των τεχνικών αποθήκευσης

υπό το πρίσμα του κόστους, της ενεργειακής απόδοσης, της αξιοπιστίας, της συντήρησης, των κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιδράσεων κ.τ.λ.

- ✓ Περαιτέρω έρευνα και επενδύσεις στην ενσωμάτωση των διατάξεων αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, θα οδηγήσουν στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης των συστημάτων, τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, και το σπουδαιότερο, στην αντικατάσταση των ρυπογόνων τρόπων παραγωγής ενέργειας με φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα.
- ✓ Επέκταση της ανάλυσης αναφορικά με τα συστήματα αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα (Λεπτομερέστερη περιγραφή της λειτουργίας των μηχανών, π.χ. χαρακτηριστικές καμπύλες, τεχνικοί περιορισμοί, κόστη θερμικών μονάδων, υδροστροβίλων, αντλιών κ.α.).
- ✓ Αύξηση του διεθνή ενδιαφέροντος για τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, των οποίων η διάδοση μέχρι σήμερα είναι περιορισμένη.
- ✓ Περισσότερες έρευνες για την αύξηση του ποσοστού διείσδυσης και της χρήσης των συστημάτων κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, καθώς και περαιτέρω ανάπτυξη των ΜΕΚ υδρογόνου.
- ✓ Μελέτη των υψηλών θερμοκρασιών θερμικών συστημάτων αποθήκευσης, τα οποία εμφανίζουν σημαντικό πλεονέκτημα ως προς την απόδοση ισχύος. Η έρευνα των συστημάτων αυτών θα οδηγήσει στην ασφαλή εγκατάστασή τους κοντά στις περιοχές κατανάλωσης ισχύος.
- ✓ Εξέταση της περίπτωσης διαστασιολόγησης και ανάπτυξης ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης που θα συνδυάζει τεχνολογίες βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- 1) Ζερβός Α., «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Ε.Μ.Π., 2007
- 2) Μαθιουδάκης Κ., «Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων», Ε.Μ.Π., 2007
- 3) Μπεργελές Γ., «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμεών, 2005
- 4) Παπαντώνης Δ., «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Εκδόσεις Συμεών, 2007
- 5) Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες – Υδροστρόβιλοι», Εκδόσεις Συμεών, 2004
- 6) Κ.Α.Π.Ε., «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ», 2001
- 7) Mr. Edberg Oliver, Dr. McCubbin Ian, Dr. Naish Chris, Dr., “Outlook of Energy Storage Technologies”, 2006

Εγκυκλοπαίδειες

- 1) Πάπυρος – Larus Britannica, Αθήνα 1992

Διδακτορικές Διατριβές

- 1) Κάραλης Γ., «Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμιευτήρων», 2007

Μεταπτυχιακές Εργασίες

- 1) Γιαννέτα Β., «Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια», 2005

Διπλωματικές Εργασίες

- 1) Βαζάκας Ν., «Μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών αλυσίδων υδρογόνου», 2007
- 2) Βαλάκας Μ., «Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας», 2007
- 3) Νεσιάδης Α., «Προσομοίωση διαδοχικής εκκίνησης αντλιών», 2007
- 4) Σπύρου Ι., «Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλιοσταμείωση», 2009
- 5) Τάσσιου Ι., «Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»

Συνέδρια

- 1) Διεθνές Συνέδριο «EnergyTec 2006» & 1^η Διεθνής Έκθεση: «Μορφές και Διαχείριση Ενέργειας», 2006
- 2) Διεθνές Συνέδριο HYDRO, «Maximizing The Benefits of Hydropower», 2006

Παρουσιάσεις

- 1) Βουρλιωτάκης Γ. – Φούντη Μ., «Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου», 2007
- 2) Κ.Α.Π.Ε, «Παραγωγή και Αποθήκευση Υδρογόνου από Αιολική Ενέργεια – Πρώτα Αποτελέσματα», 2005
- 3) Καρύδας Χ., «Τεχνολογία Υδρογόνου», 2007
- 4) Κυριακού Π., «Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα – Επιλογή και Εγκατάσταση»
- 5) Τριανταφυλλίδης Γ., «Η Ανάπτυξη του Ελληνικού Υδροδυναμικού και η Τροφοδοσία της ΔΕΗ Α.Ε», 2006
- 6) Energy Storage Council, “The Commercial World of Energy storage: A Review of Operating Facilities”, 2003
- 7) Energy Storage Association, “Energy Storage: A Solution in Network Operation? ”, 2000

Δημοσιεύσεις

- 1) ΕΚΠΑΑ, «Ενέργεια, περιβάλλον και επιχειρηματικότητα - Προτάσεις για τον ενεργειακό τομέα στον ελληνικό χώρο», 2003
- 2) ΚΑΠΕ, «Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια», 2005
- 3) ΚΑΠΕ, ΥΠΑΝ «Επιπτώσεις των Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων», 2006
- 4) Προδομίδης Π., «Εξυπνα Υδροηλεκτρικά Έργα για να φθάσουμε τα 10.000 MW», 2008
- 5) ΥΠΑΝ, «4^η Εθνική Έκθεση για το Επίπεδο Διείδυσης», 2005
- 6) Χωραφά Μ., “Υδρογόνο, Το καύσιμο του μέλλοντος, 2006
- 7) Anagnostopoulos I., Papantonis D., «Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant», 2007
- 8) Balzer G., Hellmich B., Münch W. and Spahic E., “Wind energy storages – Possibilities”, 2006
- 9) Barbir F., Sherif S.A., Veziroglu T.N, “Wind Energy and the Hydrogen Economy – Review of the Technology”, 2005
- 10) Castro R., Faias S., Santos P., Sousa J., “An Overview on Short and Long - Term Response Energy Storage Devices for Power Systems Applications”, 2007
- 11) Chiruvolu M., Nakhamkin M., “Available Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Concepts”
- 12) Denholm P., Sioshansi R., “The value of compressed air energy storage with wind in transmission- constrained electric power systems”
- 13) Efthimiou V., Hadjipaschalis I., Poulidakas A., “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications”, 2008
- 14) Hirschenhofer, John H. Fuel Cell Status 1994. IEEE AES Systems Magazine Nov. (1994) 10 – 15
- 15) Ibrahima H., Ilinca A., Perron J., “Energy storage systems – characteristics and comparisons”, 2007
- 16) Lower Colorado River Authority, “Study of Electric Transmission in Conjunction with Energy Storage Technology”, 2003
- 17) Pockley S., “Compressed Air Energy Storage”, 2009
- 18) U.S. Department of Energy, Office of Science, “Basic Research Challenges for Hydrogen Storage: Report of the Basic Energy Sciences Working Group on Hydrogen Production, Storage and Use”, 2003

Ιστοσελίδες

- 1) www.allaboutenergy.gr
- 2) www.bioenergynews.blogspot.com
- 3) www.cres.gr
- 4) www.dei.gr
- 5) www.energypoint.com
- 6) www.energystoragecouncil.org
- 7) <http://en.wikipedia.org/>
- 8) www.hy2.gr
- 9) <http://www.itia.ntua.gr/dk>
- 10) www.rae.gr/K2/hybrid-principles.pdf
- 11) www.sciencenews.gr
- 12) www.technicalreview.gr
- 13) www.technologywatch.gr
- 14) www.tropical.gr
- 15) <http://www.ypai.gr/>